

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Resíduo de areia de fundição estabilizado com ligante álcali-
ativado de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de
ovo: Desempenho mecânico, microestrutura, lixiviação e
sustentabilidade**

Suéllen Tonatto Ferrazzo

Porto Alegre
2023

SUÉLLEN TONATTO FERRAZZO

**RESÍDUO DE AREIA ESTABILIZADO COM LIGANTE
ÁLCALI-AATIVADO DE CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR E CAL DE CASCA DE OVO: DESEMPENHO
MECÂNICO, MICROESTRUTURA, LIXIVIAÇÃO E
SUSTENTABILIDADE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia

Porto Alegre
2023

CIP - Catalogação na Publicação

Ferrazzo, Suéllen Tonatto

Resíduo de areia de fundição estabilizado com ligante álcali-ativado de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo: Desempenho mecânico, microestrutura, lixiviação e sustentabilidade / Suéllen Tonatto Ferrazzo. -- 2023. 360 f.

Orientador: Nilo Cesar Consoli.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Resíduos industriais e agroindustriais. 2. Ativação alcalina. 3. Propriedades mecânicas e microestruturais. 4. Encapsulamento de metais. 5. Avaliações de ciclo de vida. I. Consoli, Nilo Cesar, orient. II. Título.

SUÉLLEN TONATTO FERRAZZO

**RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO ESTABILIZADO COM
LIGANTE ÁLCALI-AATIVADO DE CINZA DE BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR E CAL DE CASCA DE OVO:
DESEMPENHO MECÂNICO, MICROESTRUTURA,
LIXIVIAÇÃO E SUSTENTABILIDADE**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para a obtenção do título de
Doutora em Engenharia.

Porto Alegre, 03 de março de 2023.

Prof. Nilo Cesar Consoli
PhD. pela Concordia University
Orientador

Prof. Lucas Festugato
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Guilherme Jorge Brigolini Silva
(UFOP)
Dr. pela Universidade Federal de Minas
Gerais

Prof. Pedro Domingos Marques Prietto
(UPF)
Dr. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Rodrigo Beck Saldanha (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Profa. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

À Deus por colocar pessoas maravilhosas no meu caminho.

Ao meu orientador, Professor Nilo Cesar Consoli por ser um exemplo de pesquisador brilhante, pela orientação sempre presente e por todo incentivo.

À CAPES e ao CNPq pelo fomento à esta pesquisa.

À minha família, principalmente aos meus pais, Silvia e Dirceu, e meu irmão William, por todo apoio e incentivo. Aos meus avós, Olga e Jandir (*in memoriam*), por sempre demonstrarem orgulho em me ver “estudando muito”, mesmo que hoje não possam entender o significado de concluir o doutorado.

À Mariana Tonini de Araújo, minha companheira de laboratório e pesquisas durante o doutorado, agradeço pela amizade sincera, compartilhamento de conhecimentos técnicos e culturais e por todo apoio e incentivo.

Ao Giovani J. Bruschi, meu amigo e parceiro de pesquisa, agradeço pelo carinho, paciência, troca de conhecimento e constante incentivo. Ao Gustavo D. Macedo pela amizade sincera e humor cômico. À Luana R. Schulz pela energia alto astral contagiante e incentivo. À Carolina P. dos Santos e à Camila Martinatto pelo auxílio em laboratório e por serem meus exemplos de mulheres fortes e sensíveis. Ao Helder M. Chaves pela ajuda com ensaios de laboratório. Ao Flávio A. Ferreira pelo auxílio no laboratório e pelas palavras de incentivo. Aos demais colegas e amigos do laboratório: Bruna Hoch, Gledsa Vieira e Hugo C. Scheuermann Filho.

Ao Professor Eduardo Pavan Korf e William M. K. Levandoski por serem amigos e parceiros de pesquisa leais, bem como por toda ajuda prestada nos ensaios de lixiviação. Ao Rafael F. dos Santos e Jonas D. Mota pelo suporte e atenção dedicados às análises realizadas na Central analítica da UFFS.

Ao Professor Pedro Domingos Marques Prietto e ao técnico Leunir Freitas pode terem possibilitado o uso do Laboratório de Geotecnia Ambiental da UPF.

À Suzana Bazoti, a “química de plantão” pelo suporte técnico com reagentes/equipamentos de laboratório, e minha amiga de todas as horas, obrigada por sempre acreditar em mim. À Luciane R. Agazzi pela amizade leal e apoio incondicional. À Lucimara Bragagnolo pela escuta acolhedora e disponibilidade em ajudar a qualquer momento. À Bruna C. Folador pelo acolhimento em Porto Alegre e pelos bons momentos compartilhados.

RESUMO

FERRAZZO, S. T. **Resíduo de areia de fundição estabilizado com ligante álcali-ativado de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo: Desempenho mecânico, microestrutura, lixiviação e sustentabilidade**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A valorização de resíduos e o desenvolvimento de ligantes alternativos ao cimento Portland são importantes para práticas de engenharia sustentável. Assim, este estudo avaliou a estabilização de resíduo de areia de fundição (RAF) com um novo ligante álcali-ativado (LAA) oriundo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, cal de casca de ovo hidratada e hidróxido de sódio (NaOH). A produção do LAA avaliou a RCS e a microestrutura (DRX, MEV e FTIR) de pastas álcali-ativadas, considerando diferentes relações cinza/cal e água/ligante, e molaridade. Misturas RAF-LAA foram produzidas considerando diferentes fatores (teor de umidade, peso específico aparente seco, teor de ligante, temperatura e tempo de cura) e avaliadas quanto a: RCS, RCD, G_0 , durabilidade (PMA), mineralogia (DRX), composição química (FTIR), microestrutura (SEM), lixiviação e solubilização de metais. Misturas RAF-cimento Portland (CPV) foram avaliadas como um grupo controle. Os resultados de comportamento mecânico foram submetidos a análise estatística e correlacionados ao índice porosidade/teor volumétrico de ligante (η/B_{iv}). Avaliações ambiental, econômica e social do ciclo de vida da estabilização de RAF com LAA foram realizadas para avaliar a sustentabilidade, comparativamente a RAF-CPV. O LAA é composto por 80/20 cinza/cal, 0,8 água/ligante e 2,61 Na₂O. O comportamento mecânico de RAF-LAA é influenciado significativamente (de maior a menor magnitude) pelo teor de ligante, peso específico, temperatura de cura, tempo de cura e teor de umidade respectivamente. RAF-LAA apresentou resultados mecânicos similares ou superiores a RAF-CPV. RAF-LAA atingiu uma resistência média de 9,8 MPa após 28 dias de cura a 40°C. Corpos de prova com altas resistências (RCS e RCD) apresentaram elevados valores de rigidez inicial. Misturas com altos teor de LAA e peso específico tiveram PMA em torno de 7%. O índice $\eta/B_{iv}^{0,28}$ mostrou-se um parâmetro adequado para avaliar a estabilização de RAF com distintos ligantes. Gel N-A-S-H foi identificado nas misturas RAF-LAA. Maiores temperatura e tempo de cura resultaram em matrizes cimentadas mais homogêneas e compactas. O método de lixiviação da NBR 10005 forneceu resultados mais favoráveis do que D4874 perante limites de qualidade de águas. RAF-LAA encapsulou Cd, Cr, Mn, Pb e Zn presentes nos resíduos e não representa risco ambiental em termos de toxicidade por metais. A dosagem alta densidade-baixo ligante (ADBL) resultou em menores impactos ambientais e econômicos do que a baixa densidade-alto ligante. Em RAF-LAA, os impactos ambientais estão associados principalmente aos processos de produção de matérias-primas (NaOH e cal) e de transporte de materiais, enquanto que, a produção de cimento Portland foi o fator mais influente em RAF-CPV. A dosagem LAA-ADBL apresentou maiores custos diretos e menores custos indiretos (custo social do CO₂) do que CPV-ADBL. RAF-LAA gerou maior impacto social positivo em relação a RAF-CPV. A estabilização de RAF com LAA-ADBL possui um índice de sustentabilidade superior (0,59) a RAF com CPV-ADBL (0,49).

Palavras-chave: Resíduos industriais e agroindustriais; ativação alcalina; propriedades mecânicas e microestruturais; encapsulamento de metais; avaliações de ciclo de vida.

ABSTRACT

FERRAZZO, S. T. *Waste foundry sand stabilized with alkali-activated binder from sugar cane bagasse ash and eggshell lime: Mechanical performance, microstructure, leaching and sustainability*. 2023. Thesis (Doctor in Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

Waste valorization and the development of alternative binders to Portland cement are important to sustainable engineering practices. Thus, this study evaluated the stabilization of waste foundry sand (WFS) with a new alkali-activated binder (AAB) from sugar cane bagasse ash, hydrated eggshell lime, and sodium hydroxide (NaOH). The production of AAB evaluated the unconfined compressive strength (q_u) and microstructure (XRD, SEM, and FTIR) of alkali-activated pastes, considering different ash/lime and water/binder ratios, and molarity. WFS-AAB mixtures were produced considering distinct factors (moisture content, dry unit weight, binder content, temperature, and curing time) and evaluated according to q_u , q_b , G_0 , durability (ALM), mineralogy (XRD), chemical composition (FTIR), microstructure (SEM), leaching and solubilization of metals. WFS-Portland cement (PC) mixtures were evaluated as a control group. The mechanical behavior results were submitted to statistical analysis and correlated to the porosity/volumetric binder content index (η/B_{iv}). Environmental, economic, and social life cycle assessments of WFS stabilization with AAB were carried out to assess sustainability compared to WFS-PC. The AAB was composed of 80/20 ash/lime, 0.8 water/binder, and 2.61 Na₂O. The mechanical behavior of WFS-AAB is significantly influenced (from higher to lower magnitude) by binder content, dry unit weight, curing temperature, curing time, and moisture content, respectively. WFS-AAB showed mechanical results similar or superior to WFS-PC. WFS-AAB achieved an average strength of 9.8 MPa after 28 days of curing at 40°C. Specimens with higher strengths (q_u e q_t) showed higher values of initial stiffness. Mixtures with higher AAB content and dry unit weight showed an ALM of around 7%. The $\eta/B_{iv}^{0.28}$ index was shown to be an appropriate parameter for evaluating the stabilization of WFS with different types of cement. N-A-S-H gels were identified in WFS-AAB mixtures. Higher temperatures and curing times led to more homogeneous and compact cemented matrices. The leaching method of NBR 10005 provided more favorable results than D4874 before the water quality limits. WFS-AAB encapsulated Cd, Cr, Mn, Pb, and Zn from wastes and poses no environmental risk in terms of metal toxicity. The high density-low binder (HDLB) dosage resulted in lower environmental and economic impacts than a low density-high binder. In WFS-AAB, the environmental impacts are mainly associated with raw materials production (NaOH and lime) and materials transportation processes, while Portland cement production was the most influential factor in WFS-PC. The AAB-HDLB dosage showed higher direct costs and lower indirect costs (social cost of CO₂) than PC-HDLB. WFS-AAB generated a higher positive social impact compared to WFS-PC. The stabilization of WFS with AAB-HDLB presents a higher sustainability index (0.59) than WFS with PC-HDLB (0.49).

Keywords: Industrial and agro-industrial wastes; alkaline activation; mechanical and microstructural properties; metal encapsulation; life cycle assessments.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fabricação de peças fundidas.....	35
Figura 2 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura de RAF.....	36
Figura 3 – Classificação química de materiais álcali-ativados.....	47
Figura 4 – Modelo teórico do mecanismo de reação para ativação alcalina de escória.....	49
Figura 5 – Modelo estrutural para gel C-S-H contendo Al: (a) cadeias lineares de gel C-A-S-H e (b) cadeias lineares com estruturas ocasionalmente reticuladas, formando planos de gel C-A-S-H.....	50
Figura 6 – Solubilização de alumínio e sílica amorfa em água.....	54
Figura 7 – Modelo conceitual para geopolimerização.....	54
Figura 8 – Projeção plana da estrutura tridimensional de um gel N-A-S-H.....	55
Figura 9 – Taxa máxima de ganho de resistência mecânica versus tempo de cura e temperatura.....	56
Figura 10 – Modelo proposto para definir a estabilidade de gel N-A-S-H em função de pH e conteúdo de cálcio.....	57
Figura 11 – Coprecipitação de géis C-A-S-H e (N,C)-A-S-H em 70% CV + 30% CPO álcali-ativadas.....	58
Figura 12 – Análises EDX de géis MW (misturas cinza-cimento hidratadas com água) e MA (misturas cinza-cimento álcali-ativadas), projetadas no plano CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ e micrografias por MT de ambos géis.....	58
Figura 13 – Modelo de ativação alcalina para misturas de cimentos com alto teor de Si e Al e baixo teor de Ca.....	60
Figura 14 – Fases e aplicações de uma ACV.....	82
Figura 15 – Categorias de impactos para <i>mindpoint</i> e <i>endpoint</i>	84
Figura 16 – Comparação dos três tipos de ACCV.....	85
Figura 17 – Processo produtivo de peças fundidas de ferro e geração de RAF.....	93
Figura 18 – Processo produtivo da produção de CCOH em laboratório.....	94
Figura 19 – Esquematização das etapas da pesquisa.....	95
Figura 20 - Agitador rotatório de frasco do ensaio de lixiviação da NBR 10005.....	99
Figura 21 – Exemplo da filtração a vácuo para extrato lixiviado de CBCA.....	100
Figura 22 – Ensaio de solubilização em etapa de repouso para RAF (a) e CBCA (b).....	100
Figura 23 – Amostra de RAF (areia verde) desta pesquisa.....	102
Figura 24 – Morfologia das partículas de RAF (a) e areia de Osório (b).....	102

Figura 25 – Curva de distribuição granulométrica do RAF.	103
Figura 26 – Difratoograma do RAF.	104
Figura 27 – Morfologia das partículas de CBCA com magnificação de 500x.....	105
Figura 28 – Curva de distribuição granulométrica da CBCA.	106
Figura 29 – Difratoograma da CBCA.....	107
Figura 30 – Curva de distribuição granulométrica da CCOH.	109
Figura 31 – Difratoograma da CCOH.	109
Figura 32 – Difratoograma do CPV-ARI.	111
Figura 33 – Curvas de compactação das misturas e pontos de moldagem.....	113
Figura 34 – Caixa com água para cura térmica dos corpos de prova.	117
Figura 35 – Corpos de prova de RAF-LAA (a) e RAF-CPV (b) após passagem na peneira 9,5mm.	123
Figura 36 – Ensaio de lixiviação em equipamento de coluna.	124
Figura 37 – Limites do sistema de estabilização do RAF com LAA.	128
Figura 38 – Limites do sistema de estabilização do RAF com CPV.....	128
Figura 39 – RCS das pastas álcali-ativadas.	146
Figura 40 – Efeitos principais na RCS das pastas álcali-ativadas.	148
Figura 41 – Difratoogramas da pasta álcali-ativada versus CBCA e CCOH.	150
Figura 42 – Imagens de MEV da pasta álcali-ativada: (a) 1,5kx de magnificação, (b) imagem de EDS, (c) distribuição de elementos e (d) mapa químico.	151
Figura 43 – Imagens de MEV de (a) pasta álcali-ativada e (b) pasta não álcali-ativada.....	153
Figura 44 – Espectro FTIR para a pasta álcali-ativada.....	153
Figura 45 – Resultados médios de RCS para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.	154
Figura 46 – Gráficos de Pareto para RCS de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.....	155
Figura 47 – Efeitos principais sob a RCS de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.....	156
Figura 48 – Interação dos fatores teor de umidade e teor de cimento de RAF-CPV.	157
Figura 49 – Resultados médios de RCD para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.....	159
Figura 50 – Gráficos de Pareto para RCD de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.....	160
Figura 51 – Efeitos principais sob a RCD de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.	161
Figura 52 – Relação RCS versus RCD de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.	161
Figura 53 – Resultados médios de G_0 para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.....	162
Figura 54 – Gráficos de Pareto para G_0 de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.....	163
Figura 55 – Efeitos principais sob G_0 de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.....	164
Figura 56 – Relação RCS versus G_0 de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.....	164

Figura 57 – Perda de massa individual (PMI) das misturas (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.	165
Figura 58 – Perda de massa acumulada (PMA) das misturas (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.	166
Figura 59 – Corpos de prova dos ciclos 0 e 12 para os resultados extremos de RAF-LAA e RAF-CPV.	168
Figura 60 – Relação entre a RCS e η/Biv e η/Civ para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.	169
Figura 61 – RCS normalizada para ambos tempos e temperaturas de cura de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.	171
Figura 62 – Relação entre a RCD e η/Biv e η/Civ para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.	172
Figura 63 – RCD normalizada para ambos tempos e temperaturas de cura de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.	174
Figura 64 – Relação entre a G_0 e η/Biv e η/Civ para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.	175
Figura 65 – G_0 normalizado para ambos tempos e temperaturas de cura de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.	177
Figura 66 – Relação entre PMA ao longo dos ciclos e η/Biv e η/Civ para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.	178
Figura 67 – Difractogramas de RAF-25% LAA para 7 e 28 dias, a 23 e 40°C.	180
Figura 68 – Espectros de FTIR de RAF-25% LAA para 7 e 28 dias, a 23 e 40°C.	182
Figura 69 – Imagens de MEV de RAF-25% LAA para 7 e 28 dias, a 23 e 40°C.	183
Figura 70 – Concentração de Ba nos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV.	185
Figura 71 – Concentração de Cr total nos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV.	186
Figura 72 – Concentração de Mn nos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV.	187
Figura 73 – Concentração de Zn nos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV.	188
Figura 74 – Concentração de Al nos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV.	196
Figura 75 – Concentração de Ba nos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV.	197
Figura 76 – Concentrações de Al e Ba nos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV em 7 e 28 dias.	201
Figura 77 – Impactos ambientais das estratégias de estabilização de RAF com distintos ligantes e dosagens.	202
Figura 78 – Impacto das distâncias de transporte da CBCA nas categorias acidificação e eutrofização.	205
Figura 79 – Contribuições dos processos do ciclo de vida da estabilização de RAF nas categorias de impactos ambientais.	206
Figura 80 – Custos da estabilização de RAF com distintos ligantes e dosagens.	207

Figura 81 – Diagrama <i>Sunburst</i> para estabilização com ligante álcali-ativado.....	212
Figura 82 – Diagrama <i>Sunburst</i> para estabilização com cimento Portland.....	213
Figura 83 – Índice de sustentabilidade da estabilização de RAF com distintas estratégias. ...	215

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedade físicas e químicas de amostras de RAF (areia verde).....	36
Tabela 2 – Síntese de estudos envolvendo uso de RAF e ativação alcalina.....	41
Tabela 3 – Síntese dos produtos precipitados em distintos tipos de ligantes.	51
Tabela 4 – Pesquisas relacionadas a ligantes álcali-ativados para estabilização de solos.....	74
Tabela 5 – Comparação entre distintas abordagens para monetarização de GEE em CO ₂ eq. ..	86
Tabela 6 – Comparação de distintas variáveis da ACCV.....	86
Tabela 7 – Categorias de partes interessadas (<i>stakeholders</i>) e subcategorias de impacto.	89
Tabela 8 – Pesquisas referente a ACV aplicada em melhoramento de solos.....	90
Tabela 9 – Materiais e respectivas denominações e funções.....	92
Tabela 10 – Síntese do programa de caracterização dos materiais.....	95
Tabela 11 – Propriedades físicas do RAF.	103
Tabela 12 – Composição química do RAF.....	104
Tabela 13 – Composição química dos extratos lixiviado e solubilizado do RAF.....	104
Tabela 14 – Propriedades físicas da CBCA.....	106
Tabela 15 – Composição química da CBCA.....	107
Tabela 16 – Composição química dos extratos lixiviado e solubilizado da CBCA.....	108
Tabela 17 – Composição química da CCOH.....	108
Tabela 18 – Propriedades físicas da CCOH.	109
Tabela 19 – Fatores e níveis do planejamento experimental das pastas.....	110
Tabela 20 – Composição química do CPV-ARI.	111
Tabela 21 – Composição química dos extratos lixiviado e solubilizado do CPV-ARI.....	112
Tabela 22 – Ensaio de compactação das misturas RAF-LAA.....	113
Tabela 23 – Fatores e níveis do planejamento experimental para RCS de RAF-LAA.	114
Tabela 24 – Matriz do planejamento experimental para RCS de RAF-LAA.....	115
Tabela 25 – Fatores e níveis do planejamento experimental para RCS de RAF-CPV.....	116
Tabela 26 – Matriz do planejamento experimental para RCS de RAF-CPV.....	116
Tabela 27 – Programa experimental do ensaio de durabilidade para RAF com distintos ligantes.	120
Tabela 28 – Níveis dos fatores correspondentes as amostras de RAF-LAA avaliadas por DRX, FTIR e MEV.....	122
Tabela 29 – Programa experimental dos ensaios de lixiviação e solubilização de metais.	124
Tabela 30 – Programa experimental do ensaio de lixiviação em coluna conforme D4874. ..	125

Tabela 31 – Gradiente hidráulico máximo em função da condutividade hidráulica de cada corpo de prova.	125
Tabela 32 – Síntese das dosagens para a AACV dos sistemas RAF-LAA e RAF-CPV.....	127
Tabela 33 – Quantitativo de materiais para 1 m ³ de RAF estabilizado com distintos ligantes.	127
Tabela 34 – Consumo de diesel para o transporte dos materiais.....	132
Tabela 35 – Consumo de diesel pelos maquinários e equipamentos na mistura, homogeneização e compactação de RAF-ligante.....	132
Tabela 36 – Dados da análise de inventário.	133
Tabela 37 – Dados da composição de custos diretos para 1 m ³ de RAF estabilizado.....	135
Tabela 38 – Processos relacionados aos sistemas RAF-LAA e RAF-CPV.	136
Tabela 39 – <i>Stakeholders</i> e indicadores sociais.	137
Tabela 40 – Escalas de avaliação dos indicadores sociais e da sua importância.....	140
Tabela 41. Profissionais participantes em cada setor.	142
Tabela 42 – Requerimentos, critérios e indicadores usados no método MIVES para esta pesquisa.	143
Tabela 43 – Indicador e respectivas forma da V_i e valores de P , K e C	144
Tabela 44 – Porcentagem de álcalis nas pastas álcali-ativadas.	145
Tabela 45 – ANOVA da RCS das pastas álcali-ativadas.	148
Tabela 46 – Comparação múltipla de médias pelo método de <i>Tukey</i> para CBCA/CCOH*A/L.	149
Tabela 47 – Comparação múltipla de médias pelo método de <i>Tukey</i> para CBCA/CCOH *Molaridade.....	149
Tabela 48 – Composição química da pasta álcali-ativada.....	150
Tabela 49 – Composição elementar da pasta álcali-ativada por EDS com base nos pontos indicados na Figura 41.....	152
Tabela 50 – Perda de massa individual média das misturas RAF-ligante.....	166
Tabela 51 – Perda de massa acumulada das misturas RAF-ligante.	167
Tabela 52 – Composição química dos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV com 7 dias (mg.L ⁻¹).....	190
Tabela 53 – Valores de pH dos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV com 7 dias. .	190
Tabela 54 – Composição química e pH dos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV a 28 dias (mg.L ⁻¹).	191

Tabela 55 – Composição química dos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV provenientes de ensaio em equipamento de coluna (mg.L ⁻¹).	193
Tabela 56 – Valores de pH dos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV provenientes de ensaio em equipamento de coluna.	193
Tabela 57 – Comparativo da composição química dos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV proveniente de distintos métodos de ensaio de lixiviação (mg.L ⁻¹).	194
Tabela 58 – Composição química dos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV a 7 dias (mg.L ⁻¹).	199
Tabela 59 – Valores de pH dos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV com 7 dias.	199
Tabela 60 – Composição química e pH dos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV a 28 dias (mg.L ⁻¹).	200
Tabela 61 – Valores do coeficiente alfa de <i>Cronbach</i> (α) para cada setor.	210
Tabela 62 – Pontuação de <i>stakeholders</i> , indicadores e score social total de RAF-LAA e RAF-CPV.	211

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RAF	Resíduo de areia de fundição
RCS	Resistência à compressão simples
<i>WFS</i>	<i>Waste foundry sand</i>
<i>AAB</i>	<i>Alkali activated binder</i>
<i>UCS</i>	<i>Unconfined compressive strength</i>
CBCA	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar
USA	Estados Unidos da América
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
SC	Estado de Santa Catarina
US EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
MAA	Materiais álcali-ativados
CPO	Cimento Portland Ordinário
EDX	Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X
MET	Microscopia eletrônica de transmissão
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento do Brasil
<i>FAOSTAT</i>	<i>Food and Agriculture Organization Statistical Database</i>
<i>AFS</i>	<i>American Foundry Society</i>
<i>WCED</i>	<i>World Commission on Environment and Development</i>
PET	Polietileno tereftalato
CBOP	Cinza de bagaço de óleo de palma
DRX	Difração de raios-X
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva
FTIR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
RMN	Ressonância magnética nuclear
PIM	Porosimetria por intrusão de mercúrio
<i>CBR</i>	<i>California Bearing Ratio</i>
ACV	Avaliação de ciclo de vida

ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AA	Álcali-ativado
RS	Estado do Rio Grande do Sul
LEGG	Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
BET	Método Brunauer-Emmett-Teller
UNESC	Universidade do Extremo Sul Catarinense
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios-X
USP	Universidade de São Paulo
UFFS	Universidade Federal da Fronteira Sul
UPF	Universidade de Passo Fundo
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
LAPOL	Laboratório de Materiais Poliméricos
ICP-OES	<i>Inductively coupled plasma optical emission spectrometry</i>
APHA	<i>American Public Health Association</i>
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Policloreto de polivinila
S	Saturação
RCD	Resistência à tração por compressão diametral
VROM	<i>Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer</i>
TCLP	<i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
AACV	Avaliação ambiental do ciclo de vida
AICV	Avaliação de impacto do ciclo de vida
ACCV	Avaliação do custo do ciclo de vida
ASCV	Avaliação social do ciclo de vida
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
<i>TCLP</i>	<i>Toxicity characteristic leaching procedure</i>
<i>PCA</i>	<i>Portland Cement Association</i>
<i>USACE</i>	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
COMPESQ	Comissão de Pesquisa
CAAE	Certificado de Apresentação de Apreciação Ética
CEP	Comissão de Ética em Pesquisa
MIVES	<i>Spanish Integrated Value Model for the Sustainability Assessment</i>
ADBL	Alta densidade - baixo teor de ligante
BDAL	Baixa densidade - alto teor de ligante
<i>IEA</i>	<i>International Energy Agency</i>
<i>WBCSD</i>	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
ABIFA	Associação Brasileira de Fundição

LISTA DE SÍMBOLOS

NaOH	Hidróxido de sódio
M	Molaridade
CO ₂	Gás carbônico
$\eta/(B_{iv})$	Relação da porosidade e teor volumétrico de ligante
SiO ₂	Óxido de silício
Al ₂ SiO ₃	Óxido de alumínio
Fe	Ferro
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C-A-H	Aluminato de cálcio hidratado
q _u	Resistência à compressão simples
q _t	Resistência à compressão por tração diametral
$\eta/(C_{iv})$	Relação da porosidade e teor volumétrico de cimento
CaO	Óxido de cálcio
M ₂ O	Metal alcalino
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
SO ₃	Óxido sulfúrico
H ₂ O	Água
Al	Alumínio
Na	Sódio
K	Potássio
R ⁺	Cátion alcalino
Ca ²⁺	Íon de cálcio
-Si-O ⁻	Sialato
-Si-OH	Silanol
SiQ	Silício tetraédrico
OH ⁻	Íon hidroxila
C-A-S-H	Aluminossilicato de cálcio hidratado
N-A-S-H	Aluminossilicato de sódio hidratado
Mg ₆ Al ₂ CO ₃ (OH) ₁₆ .4H ₂ O	Hidrotalcita

C2S	Silicato dicálcico
C3A	Aluminato tricálcico
C3S	Silicato tricálcico
C4AF	Ferroaluminato tetracálcico
Na ⁺	Íon de sódio
Al(OH) ⁻⁴	Aluminato
H ₄ SiO ₄	Ácido ortossilícico
M _n -(SiO ₂)-(AlO ₂) _n -wH ₂ O	Aluminossilicato alcalino amorfo hidratado
Al ³⁺	Íon de alumínio
Si ⁴⁺	Íon de silício
1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sódio
KOH	Hidróxido de potássio
K ⁺	Íon de potássio
LiOH	Hidróxido de lítio
RbOH	Hidróxido de rubídio
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sódio
K ₂ SiO ₃	Silicato de potássio
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sódio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CCO	Cal de casca de ovo
CCOH	Cal de casca de ovo hidratada
Na/Al	Razão sódio/alumínio
Si/Al	Razão sílica/alumínio
Mg ₂ SiO ₄	Forsterita
M-S-H	Silicato de magnésio hidratado
CH ₄	Gás metano
Pb	Chumbo
Zn	Zinco
MgO	Óxido de magnésio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio

k	Número de fatores
n_c	Número de pontos centrais
α	Nível de significância
γ_d	Peso específico aparente seco
γ_{dmax}	Peso específico aparente seco máximo
Na_2O	Concentração de álcalis
d	Distância de espaçamento entre planos atômicos
n	Número inteiro (ordem da difração)
λ	Comprimento de onda dos raios-X
KBr	Brometo de potássio
Rh	Ródio
Hg	Mercúrio
Se	Selênio
D_{50}	Diâmetro mediano de partículas
D_{90}	Diâmetro de partícula de 90% da distribuição cumulativa
D_{10}	Diâmetro de partícula de 10% da distribuição cumulativa
CBCA/CCOH	Relações de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo hidratada
A/L	Relação de água e ligante
RAF/ligante	Relação de resíduo de areia de fundição e ligante
w	Teor de umidade
q_u	Resistência à compressão simples
Q	Carregamento aplicado ao corpo de prova na ruptura
D_m	Diâmetro médio do corpo de prova
q_t	Resistência à tração por compressão diametral
F	Força máxima
D	Diâmetro do corpo de prova
l	Comprimento do corpo de prova
G_0	Módulo cisalhante inicial
ρ	Massa específica do material
t_p	Tempo do deslocamento da onda de compressão através corpo de prova

t_s	Tempo de deslocamento da onda cisalhante através corpo de prova
V_p	Velocidade da onda de compressão
V_s	Velocidade da onda cisalhante
η/C_{iv}	Relação de porosidade e teor volumétrico de cimento
η	Porosidade
V_v	Volume de vazios
V_t	Volume total
γS_s	Peso específico seco do solo
γS_c	Peso específico seco do cimento
m_c	Massa de cimento
V	Volume dos materiais da mistura solo-cimento
S	Conteúdo de solo
P	Conteúdo de pozolana
C	Conteúdo de cal
γS_s	Massa específica do solo
γS_p	Massa específica da pozolana
γS_c	Massa específica da cal
B_{iv}	Ligante
SQ	Soma dos quadrados
GL	Graus de Liberdade
SQM	Soma dos quadrados das médias
α	Coefficiente alpha de Cronback
k	Número de itens (questões)
s_i^2	Variância de cada um dos itens
s_T^2	Variância do total
i	Indicador
S_i	Pontuação do indicador “i”
j	Ordem do respondente
I_{ji}	Valor do indicador “i” para cada respondente “j”
W_{ji}	Peso do indicador “i” para cada respondente “j”
S_F	Pontuação final do indicador “i”
p	Número de processos

k	Ordem do processo
S_{ik}	Pontuação do indicador “i” para o processo “k”
SS_i	Pontuação do <i>stakeholder</i> “i”
m	Número de indicadores para cada <i>stakeholder</i> “i”
S_{Fi}	Pontuação final do indicador “i”
NO_x	Óxido de nitrogênio
SO_2	Dióxido de enxofre
Cl_2	Cloro gasoso
O_3	Ozônio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	25
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	25
1.2 OBJETIVO GERAL.....	30
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
1.4 CONTRIBUIÇÃO AO ESTADO DA ARTE	31
1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE	33
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
2.1 RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO	34
2.1.1 Geração e características de RAF.....	34
2.1.2 Alternativas para reutilização de RAF	37
2.1.3 RAF em materiais álcali-ativados.....	41
2.2 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS ARENOSOS	43
2.3 ATIVAÇÃO ALCALINA E LIGANTES ÁLCALI-ATIVADOS	46
2.3.1 Sistema de alto teor de cálcio	48
2.3.2 Sistema de baixo teor de cálcio	51
2.3.3 Cimentos híbridos.....	56
2.3.4 Ativadores alcalinos	61
2.4 USO DE RESÍDUOS EM LIGANTES ÁLCALI-ATIVADOS	63
2.4.1 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar.....	64
2.4.2 Resíduo de casca de ovo.....	66
2.5 ATIVAÇÃO ALCALINA APLICADA EM ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	67
2.6 LIXIVIAÇÃO DE METAIS EM MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS	75
2.7 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E MELHORAMENTO DE SOLOS	79
2.7.1 Contextualização e definições gerais.....	79
2.7.2 Avaliação ambiental do ciclo de vida.....	80
2.7.3 Avaliação do custo do ciclo de vida	84
2.7.4 Avaliação social do ciclo de vida	87
2.7.5 ACV aplicada em melhoramento de solos	89
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	92
3.1 MATERIAIS	92
3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	94
3.2.1 Difração de raios laser	96

3.2.2 Método BET	96
3.2.3 Microscopia eletrônica de varredura	96
3.2.4 Difração de raios-X	97
3.2.5 Espectrometria de fluorescência de raios-X	97
3.2.6 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier	98
3.2.7 Caracterização e classificação ambiental	99
3.2.8 Espectrometria de emissão óptica por plasma indutivamente acoplado.....	101
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	102
3.3.1 Resíduo de areia de fundição.....	102
3.3.2 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar.....	105
3.3.3 Cal de casca de ovo hidratada.....	108
3.3.4 Ligante álcali-ativado	110
3.3.5 Cimento Portland de alta resistência inicial	111
3.4 DOSAGEM E COMPACTAÇÃO	112
3.5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO MECÂNICO E AMBIENTAL.....	114
3.5.1 Resistência à compressão simples	114
3.5.2 Resistência à tração por compressão diametral	118
3.5.3 Pulso ultrassônico.....	119
3.5.4 Durabilidade	120
3.5.5 Índice porosidade/teor volumétrico de ligante	121
3.5.6 Composição química, mineralógica e microestrutura	122
3.5.7 Lixiviação e solubilização de metais	122
3.6 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE	126
3.6.1 Avaliação ambiental do ciclo de vida.....	126
3.6.2 Avaliação do custo do ciclo de vida	134
3.6.3 Avaliação social do ciclo de vida	136
3.6.4 MIVES.....	142
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	145
4.1 LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO.....	145
4.1.1 Efeito dos fatores controláveis na RCS das pastas álcali-ativadas.....	145
4.1.2 Mineralogia, microestrutura e composição química das pastas álcali-ativadas	149
4.2 DESEMPENHO MECÂNICO DE RAF-LAA E RAF-CPV	154
4.2.1 Resistência à compressão simples	154

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral	159
4.2.3 Módulo cisalhante inicial.....	162
4.2.4 Durabilidade	165
4.3 RELAÇÕES COM OS ÍNDICES η/B_{IV} E η/C_{IV}	168
4.3.1 Resistência à compressão simples	169
4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral	172
4.3.3 Módulo cisalhante inicial.....	175
4.3.4 Durabilidade	177
4.4 MINERALOGIA, COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MICROESTRUTURA.....	179
4.5 LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO DE METAIS	184
4.5.1 Lixiviação de metais - NBR 10005	184
4.5.2 Lixiviação de metais em equipamento de coluna - ASTM D4874.....	192
4.5.3 Comparativo entre os métodos NBR 10005 e ASTM D4874	194
4.5.4 Solubilização de metais - NBR 10006.....	196
4.6 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA.....	202
4.7 AVALIAÇÃO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA	207
4.8 AVALIAÇÃO SOCIAL DO CICLO DE VIDA.....	210
4.9 ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE	214
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	217
5.1 CONCLUSÕES	217
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	221
REFERÊNCIAS	223

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Limitações da disposição final de resíduos em aterros devido à redução da disponibilidade de áreas, elevado custo de descarte e impactos ambientais e sociais, tem conduzido à pesquisas para desenvolver estratégias de reaproveitamento de resíduos do setor industrial (GAUTAM *et al.*, 2018; GUNEY; AYDILEK; DEMIRKAN, 2006; YAZOGHLI-MARZOUK *et al.*, 2014). Do outro lado do sistema, tem-se buscado alternativas para substituição de produtos, cujos processos de fabricação demandam elevadas quantidades de recursos não-renováveis e geram expressiva carga de poluentes.

A indústria de fundição de metais apresenta mundialmente grande importância devido à crescente demanda por peças e ferramentas metálicas utilizadas pela indústria automobilística (DYER *et al.*, 2018). O principal poluente gerado por esta indústria é o resíduo de areia de fundição (RAF) (DYER *et al.*, 2018; IQBAL *et al.*, 2020; TITTARELLI, 2018). A estimativa de geração anual de RAF em diversos países situa-se na ordem de milhares a milhões de toneladas, tendo como exemplos: Turquia (300.000 ton) (BAKIS; KOYUNCU; DEMIRBAS, 2006; GUNEY *et al.*, 2010); Espanha (1 milhão ton) (ETXEBERRIA *et al.*, 2010); Índia (1,71 milhões ton); Estados Unidos (9-10 milhões ton) e Brasil (superior a 3 milhões ton) (MASTELLA *et al.*, 2014; MATOS *et al.*, 2019). Nos Estados Unidos, apenas 15% do resíduo é reciclado (TORRES; BARTLETT; PILGRIM, 2017) e a parcela encaminhada para disposição em aterros gera custos anuais estimados em \$135-657 milhões (SIDDIQUE; SINGH; SINGH, 2018). No Brasil, dados sobre reutilização de RAF são escassos e/ou desatualizados, com exceções. No estado de Minas Gerais em 2017, foram geradas aproximadamente 1,3 milhão de toneladas do resíduo, sendo 96,5% dispostas em aterros industriais (FEAM, 2018).

Outro aspecto importante a ser considerado sobre o RAF refere-se a lixiviação de contaminantes, visto que, pode apresentar metais pesados em sua composição (e.g. chumbo, níquel, cobre e mercúrio) (SIDDIQUE; KAUR; RAJOR, 2010). Penkaitis e Sígolo (2012) verificaram que a disposição final de RAF tem causado a contaminação da água subterrânea, no local do aterro, devido a processos de lixiviação e solubilização associados a exposição ao intemperismo e a reações com elementos presentes na área de descarte. Para Dyer *et al.* (2018b), o RAF que vem sendo disposto em aterros, há mais de 30 anos, representa um problema tão

grande quanto o RAF que é constantemente gerado pela indústria metalúrgica, pois as áreas destes aterros tornam-se improdutivas, ocupando grandes espaços, os quais poderiam ser utilizados para fins econômicos ou sociais (e.g. agrícolas e de lazer).

Diversos esforços vêm sendo realizados pela ciência em busca de alternativas para reutilização de RAF, de forma mais expressiva, por meio de pesquisas voltadas a aplicações na construção civil e na engenharia geotécnica. O RAF vem sendo estudado como substituto de areias natural e industrial ou argila para diversas finalidades, como: concretos (IQBAL *et al.*, 2020); bases e sub-bases de rodovias (YAZOGHLI-MARZOUK *et al.*, 2014); preenchimento de aterros em rodovias e leitos de tubulações (ARULRAJAH *et al.*, 2017); misturas asfálticas (DYER *et al.*, 2018); cerâmicas (LIN *et al.*, 2018); argamassa (MATOS *et al.*, 2020; PAUL *et al.*, 2022); estabilização de solos argilosos (BHARDWAJ; SHARMA; SHARMA, 2021), e materiais álcali-ativados (AL-MASHHADANI; CANPOLAT, 2020; SITHOLE *et al.*, 2022).

Contudo, a maioria das pesquisas sobre reuso de RAF limita-se a aplicação em concreto convencional, bem como ao seu uso como substituto parcial das areias natural ou industrial. Em outros materiais de construção como cerâmicas e argamassas, o resíduo é incorporado como um substitutivo parcial de matérias primas, limitado a sua parcela de finos ou a passagem por processo de calcinação. Em materiais álcali-ativados e geopolímeros, o uso de RAF limita-se a adições de 20-40% e/ou a sua parcela de finos (AL-MASHHADANI; CANPOLAT, 2020; APITHANYASAI; SUPAKATA; PAPONG, 2020; BHARDWAJ; KUMAR, 2019). RAF em mistura com cimento Portland para aplicações em rodovias mostra-se uma interessante alternativa para aproveitamento integral do resíduo. RAF pode ser um substituto potencial de areia artificialmente cimentada e compactada em diversas aplicações geotécnicas, como em: leitos de tubulação e fundações rasas, e bases e sub-bases de pavimentos.

Em estabilização de solos (e.g. arenosos), o cimento Portland é um agente cimentante clássico. Todavia, sua produção envolve intenso consumo energético e grande extração de recursos naturais, liberando expressiva quantidade de gases de efeito estufa (SUHENDRO, 2014). Estima-se que a produção de 1 ton desse ligante consome 3,5 GJ/ton de clínquer (IEA; WBCSD, 2018) e 1,5 ton de matéria prima (70% correspondente a calcário), liberando aproximadamente 1 ton de dióxido de carbono (CO₂), isto é, 7% da emissão global de CO₂ (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015; MILLER; MYERS, 2020). Este cenário tem encorajado o desenvolvimento de ligantes mais “sustentáveis” com menores emissões de CO₂

e impactos negativos (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015; MILLER; MYERS, 2020), como os ligantes álcali-ativados (ADESANYA *et al.*, 2021; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

Os ligantes álcali-ativados são produzidos por meio da técnica de ativação alcalina, a qual consiste na reação de um aluminossilicato amorfo (denominado precursor) em ambiente alcalino, induzido por um ativador (fonte de metal alcalino) (PROVIS, 2018). Estes cimentos alcalinos destacam-se por apresentarem propriedades como: resistência química (ambientes ácidos ou sulfatados) (MELLADO *et al.*, 2017; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2012; PROVIS, 2018; WANG *et al.*, 2020a), resistência a altas temperaturas (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PUERTAS; FERNÁNDEZ-CARRASCO, 1996; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2012), e baixo custo de produção (PROVIS, 2018; PROVIS; DEVENTER, 2019).

Uma das características mais atrativas da tecnologia da ativação alcalina é a possibilidade do uso de uma ampla gama de precursores de origem natural (e.g. argilas calcinadas e pozolanas naturais) e resíduos industriais. Alguns exemplos desta última categoria são: resíduo de vidro (BILONDI; MOHSEN; TOUFIGH, 2018; CHEN; CHEN; HUANG, 2017); cinzas da incineração de resíduos municipais (ALMALKAWI; BALCHANDRA; SOROUSHIAN, 2019); vidro de soda-cal (SAMARAKOON; RANJITH; SILVA, 2020); rejeitos da mineração (OBENAU-EMLER; FALAH; ILLIKAINEN, 2020; PERUMAL *et al.*, 2020; SALDANHA *et al.*, 2023); resíduo cerâmico (ABDOLLAHNEJAD *et al.*, 2018, 2019); resíduo de carboneto de cálcio (BILONDI; MOHSEN; TOUFIGH, 2018); cinzas da biomassa de óleo de palma (HOSSAIN *et al.*, 2020); cinza de casca de arroz (FERREIRA *et al.*, 2023; HOSSAIN *et al.*, 2020); cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto (BRUSCHI *et al.*, 2022; PEREIRA DOS SANTOS *et al.*, 2022), etc.

A valorização de resíduos que não apresentam interesse econômico é um dos principais mecanismos de incentivo a tecnologia de ligantes álcali-ativados (PROVIS, 2018). Nesse sentido, pode-se destacar dois resíduos com características interessantes para a ativação alcalina, gerados em grandes quantidades e que não possuem valor agregado: cinza de bagaço de cana-de-açúcar (material precursor) e casca de ovo (fonte de carbonato de cálcio). Oriunda da queima do bagaço de cana-de-açúcar, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) é um resíduo industrial gerado de forma abundante. Estima-se uma geração de 99 milhões de toneladas de CBCA anualmente no mundo (JAGADESH; MURTHY; MURUGESAN, 2020; SEBASTIN *et al.*, 2020), sendo 5,1 milhões de toneladas geradas no Brasil (CONAB, 2022a;

GARCIA; SPERLING, 2017). Esta cinza tem como destinos: (i) descarte em aterros industriais (XU *et al.*, 2019b); (ii) aplicação em lavouras, (porém, o resíduo não apresenta nutrientes minerais apropriados) (SALES; LIMA, 2010) e (iii) em áreas a céu aberto (onde inclui solos sem impermeabilização) (AKRAM; MEMON; OBAID, 2009; MAZA-IGNACIO *et al.*, 2020). A CBCA é uma importante fonte de aluminossilicatos, sendo constituída por 60-85% de óxidos de sílica e alumínio (BERENGUER *et al.*, 2020; CASTALDELLI *et al.*, 2016; XU *et al.*, 2019b) e aproximadamente 62 a 78% corresponde a fase amorfa (BERENGUER *et al.*, 2020; MAZA-IGNACIO *et al.*, 2020).

Estima-se que 4,91 milhões de toneladas de resíduo de casca de ovo foram geradas mundialmente em 2018, sendo 278.250 toneladas no Brasil (ARAÚJO *et al.*, 2021a). A casca de ovo é geralmente disposta em aterros sanitários (FERRAZ *et al.*, 2018), tornando-se uma fonte de poluição (e.g. liberação de gás metano) e um grande desafio ambiental (GAO; XU, 2012; OLIVEIRA; BENELLI; AMANTE, 2013). O resíduo é rico em carbonato de cálcio e ao ser reciclado em cal de casca de ovo, torna-se uma excelente fonte de cálcio amorfo (BARROS *et al.*, 2017) para uso na ativação alcalina. Estudos verificaram que cal de casca de ovo viva e cal de casca de ovo hidratada (CCOH) apresentam teores de óxido de cálcio de 92-94% e 72-77% respectivamente (BECK *et al.*, 2010; CONSOLI *et al.*, 2020a; FERRAZ *et al.*, 2018).

No contexto de estabilização de solos, a técnica de ativação alcalina tem sido explorada majoritariamente em argilas (CORRÊA-SILVA *et al.*, 2020; COUDERT *et al.*, 2019; CRISTELO *et al.*, 2021; FASIHNIKOUTALAB *et al.*, 2020), enquanto que, pesquisas em solos expansivos (SAMUEL; PUPPALA; RADOVIC, 2020; TONINI DE ARAÚJO *et al.*, 2023) e arenosos (CAICEDO, 2020; CONSOLI *et al.*, 2021a) são emergentes. Os precursores mais explorados são as cinzas volantes e escória de alto forno, e como ativadores alcalinos, hidróxidos e silicatos. Outros resíduos industriais como resíduo de vidro moído (CRISTELO *et al.*, 2021), cinza de biomassa de óleo de palma (ABDELJOUAD *et al.*, 2019; POURAKBAR *et al.*, 2017), pó cerâmico (CAICEDO, 2020), cinza de casca de arroz (SERVI *et al.*, 2022) e cinza de bagaço de cana de açúcar (BRUSCHI *et al.*, 2021a, 2021c; PEREIRA DOS SANTOS *et al.*, 2022) vêm sendo explorados como materiais precursores. Ainda, cal de casca de ovo hidratada passou a ser explorada como fonte de cálcio em sistemas álcali-ativados (ACOSTA, 2021; FERREIRA *et al.*, 2023). O comportamento mecânico dos solos estabilizados com ligantes álcali-ativados tem sido avaliado juntamente com mineralogia e microestrutura.

Recentemente, a lixiviação de metais presentes nos resíduos (precursores) tornou-se uma avaliação de interesse (CORRÊA-SILVA *et al.*, 2020; CRISTELO *et al.*, 2021).

Além da valorização de resíduos e do desenvolvimento de novos agentes cimentantes, outra via de crescente interesse na geotecnia refere-se a avaliação de ciclo de vida (ACV), a qual permite avaliar a sustentabilidade de um produto alternativo (DA ROCHA *et al.*, 2016; SALDANHA *et al.*, 2021). Há diversos trabalhos de ACV aplicada no contexto de engenharia geotécnica (DA ROCHA *et al.*, 2022; LEAL *et al.*, 2020; VISENTIN *et al.*, 2022). Em melhoramento de solos, a implementação da técnica remete a recentes pesquisas que exploraram o uso de agentes, como cal hidratada (DA ROCHA *et al.*, 2016; SAMANIEGO, 2015), cinza de biomassa lenhosa (DA COSTA *et al.*, 2020), geopolímero (SAMUEL; PUPPALA; RADOVIC, 2020), cal de casca de ovo (SALDANHA *et al.*, 2021), biocimentação (ALOTAIBI *et al.*, 2022) e cimento álcali-ativado (SALDANHA *et al.*, 2023). Observa-se assim, que a sustentabilidade da estabilização de solos com ligantes álcali-ativados representa um vasto campo de pesquisa a ser explorado.

Diferentemente de precursores tradicionais utilizados para produção de cimentos Portland e concreto (e.g. cinzas volantes e escórias de alto forno), CBCA e casca de ovo são resíduos agroindustriais que ainda não possuem aplicações. Ainda, o uso da CBCA ao invés dos precursores supracitados evitará a competição por matérias-primas com a indústria cimenteira e o aumento de emissão de CO₂ associada a produção de cimento Portland (TONINI DE ARAÚJO *et al.*, 2023). A valorização de resíduos é a via da economia circular que mais beneficia o meio ambiente (SITHOLE *et al.*, 2022). Neste estudo busca-se aplicar o conceito de economia circular para economizar recursos não-renováveis, reutilizar e reciclar resíduos, e reduzir os impactos associados a disposição final de resíduos em aterros sanitários e industriais. Propõem-se duas vias de contribuição com a economia circular pela valorização de RAF, CBCA e cascas de ovos. A primeira via consiste em converter CBCA e casca de ovo em um ligante álcali-ativado de baixo CO₂ que pode ser utilizado como substituto ao cimento Portland. A reutilização e reciclagem de CBCA e casca de ovo, respectivamente, podem gerar receitas para as indústrias sucroalcooleira, processamento de ovos e de alimentos, e evitar custos associados ao descarte desses resíduos em aterros. A segunda via refere-se à reutilização de RAF (em mistura com o cimento álcali-ativado) como substituta de areias naturais artificialmente cimentadas para uso em aplicações geotécnicas (e.g. leitos de tubulação e fundações rasas, bases e sub-bases de pavimentos, etc). Esta forma de reutilização de RAF representa agregar valor a este resíduo, podendo gerar receita para a indústria de fundição de

metais, e reduzir impactos ambientais, econômicos e sociais relacionados a sua disposição em aterro industrial.

De fato, há estudos em ativação alcalina envolvendo RAF como material de enchimento em argamassas e em concretos álcali-ativados, bem como de CBCA como precursor e CCOH como fonte de cálcio em cimentos alcalinos. Entretanto, identifica-se que a estabilização de RAF com ligante álcali-ativado ainda não foi explorada, bem como o uso de CBCA associada a CCOH na ativação alcalina. Visando avançar nessas lacunas do conhecimento, a presente pesquisa objetivou avaliar a estabilização de resíduo de areia de fundição com um novo ligante álcali-ativado de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo. A avaliação compreendeu comportamento mecânico, microestrutura, lixiviação e sustentabilidade, comparativamente ao resíduo de areia de fundição estabilizado com cimento Portland de alta resistência inicial.

Nesse sentido, a presente pesquisa propôs-se a responder as seguintes questões:

Como é a resistência e a microestrutura de um ligante álcali-ativado desenvolvido a partir de cinza de bagaço de cana de açúcar e cal de casca de ovo? Como é o desempenho mecânico e a lixiviação de metais do resíduo de areia de fundição estabilizado com este ligante? Quais os impactos ambientais, econômicos e sociais do ciclo de vida da estabilização de resíduo de areia de fundição com o ligante álcali-ativado, comparativamente ao uso de cimento Portland?

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar comportamento mecânico, microestrutura, lixiviação e sustentabilidade de resíduo de areia de fundição estabilizado com ligante álcali-ativado oriundo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, cal de casca de ovo hidratada e hidróxido de sódio.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência de diferentes proporções de precursor e solução ativadora na resistência à compressão simples de pastas álcali-ativadas para determinar a melhor composição do ligante álcali-ativado;
- Avaliar a composição química, mineralogia e microestrutura do ligante álcali-ativado;

- Determinar a resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, rigidez inicial e durabilidade das misturas de resíduo de areia de fundição e agente cimentante, bem como a influência dos fatores controláveis sob as respostas mecânicas;
- Correlacionar as variáveis resposta de comportamento mecânico e o índice porosidade/teor volumétrico de ligante (η/B_{iv});
- Avaliar a composição química, mineralogia e microestrutura do resíduo de areia de fundição estabilizado com ligante álcali-ativado;
- Comparar a lixiviação e solubilização de metais das misturas do resíduo de areia de fundição cimentadas, por meio de distintos métodos;
- Avaliar o desempenho mecânico e ambiental de resíduo de areia de fundição estabilizado com ligante álcali-ativado, comparativamente ao uso do cimento Portland;
- Avaliar a sustentabilidade (pilares ambiental, econômico e social) do resíduo de areia de fundição com ligante álcali-ativado, comparativamente ao uso de cimento Portland.

1.4 CONTRIBUIÇÃO AO ESTADO DA ARTE

A busca por formas de valorização de resíduos e também por agentes cimentantes alternativos ao cimento Portland conduzem ao desenvolvimento e aplicação de ligantes álcali-ativados. No contexto da geotecnia ambiental, o uso desses cimentos alcalinos na estabilização de solos vem sendo o fator chave de um número crescente de estudos nos últimos anos. As pesquisas têm explorado o desenvolvimento de novos ligantes álcali-ativados, utilizando diversos resíduos como precursores e até mesmo soluções alcalinas alternativas como ativador alcalino, e avaliando a aplicação em diferentes tipos de solos, principalmente solos argilosos e mais recentemente solos expansivos e arenosos, bem como rejeitos de mineração.

O RAF vem sendo estudado em materiais álcali-ativados como substituto parcial de areia natural ou artificial ou como material de enchimento. Todavia, estes usos limitam-se a parcela de finos do resíduo ou a sua exposição a calcinação. Portanto, formas de aproveitamento integral do resíduo tornam-se mais atraentes, dentre elas, o uso em bases e sub-bases de

pavimentos em mistura com cimento. A estabilização de RAF já foi realizada com cimento Portland, entretanto, o uso de ligante álcali-ativado para esta finalidade ainda não foi explorado. Avaliações da estabilização de solos por ligantes álcali-ativados concentram-se em explorar o comportamento mecânico associado a microestrutura da matriz solo-ligante. Recentemente, tem-se observado o crescente interesse em analisar a lixiviação de metais destas matrizes cimentadas, o que é fundamental considerando o uso de resíduos, os quais podem apresentar contaminantes (e.g. metais pesados) em sua composição química. Portanto, avaliar a lixiviação possibilita compreender riscos ambientais que estes materiais oferecem a longo prazo. Entretanto, a lixiviação de materiais álcali-ativados tem sido avaliada por meio de inúmeras normativas para ensaios de lixiviação, em sua maioria criadas para avaliação/classificação de resíduos, além de ensaio de lixiviação em equipamento de coluna, o qual é comumente utilizado em solos contaminados ou em barreiras impermeáveis. Assim, é notório a necessidade de investigar a influência de distintos métodos de ensaio de lixiviação nas concentrações de metais lixiviados dos materiais álcali-ativados.

Outra via de estudo emergente é a avaliação da sustentabilidade por meio de avaliações de ciclo de vida da estabilização de solos com agentes cimentantes. Estas avaliações associadas ao desempenho mecânico-ambiental são fundamentais para determinar a viabilidade técnica-econômica e sustentabilidade do ligante e, conseqüentemente para escolher aquele que atende aos requisitos para a aplicação de interesse. Contudo, a avaliação da sustentabilidade da estabilização de solos com agentes cimentantes tradicionais é recente, e mais ainda envolvendo o uso de ligantes álcali-ativados e os três pilares (ambiental, econômico e social). Portanto, o uso de ferramentas para avaliação de sustentabilidade em solos estabilizados com ligantes álcali-ativados representa um vasto campo de pesquisa a ser explorado.

Neste contexto, a presente tese foi desenvolvida como uma contribuição para:

- Valorização de um subproduto industrial e de dois resíduos agroindustriais;
- Desenvolvimento de um novo ligante álcali-ativado oriundo de resíduos agroindustriais;
- Entendimento sobre comportamento mecânico e microestrutura de resíduo de areia de fundição estabilizado com ligante álcali-ativado;

- Implementação do índice porosidade/teor ligante como método de dosagem racional para estabilização de resíduo de areia de fundição com distintos cimentos e previsão de parâmetros de resistência, rigidez e durabilidade;
- Compreensão sobre o encapsulamento de metais nas misturas resíduo de areia de fundição-ligante álcali-ativado, bem como das diferenças resultantes de distintos métodos de ensaio de lixiviação;
- Viabilidade técnica e sustentabilidade (pilares ambiental, econômico e social) da estabilização de resíduo de areia de fundição com ligante álcali-ativado.

Acredita-se que as contribuições assinaladas acima sejam atrativas para áreas de Geotecnia Ambiental, Engenharia de Materiais, Engenharia Sustentável e Economia Circular, como melhoramento de solos, valorização de resíduos, avaliações de ciclo de vida, materiais sustentáveis na engenharia, dentre outras.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE

No capítulo 1 consta uma introdução, onde são apresentados a problematização e a justificativa da pesquisa, objetivos geral e específicos, bem como a contribuição ao estado da arte. No capítulo 2 é feita uma revisão da literatura acerca dos aspectos relevantes associados ao tema da pesquisa, fornecendo um panorama geral sobre resíduo de areia de fundição, estabilização química de solos arenosos, ligantes álcali-ativados e avaliação de ciclo de vida. No capítulo 3 estão descritos os materiais, variáveis de interesse, programa experimental e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. No capítulo 4 estão apresentados os resultados oriundos do programa experimental e respectivas análises. No capítulo 5 são sintetizadas as considerações finais, abrangendo as conclusões deste estudo e sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas, apêndices e anexo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO

2.1.1 Geração e características de RAF

Mundialmente a indústria de fundição de metais apresenta grande importância devido à crescente demanda por peças e ferramentas metálicas utilizadas principalmente pela indústria automobilística (DYER *et al.*, 2018). A fundição está presente em automóveis, caminhões, máquinas agrícolas, equipamentos de mineração e construção, etc. Os principais metais fundidos são: ferro, alumínio, magnésio, zinco, aço e ligas de cobre (AFS, 2020). Em 2019, a produção mundial de fundição foi estimada em 109 milhões de toneladas métricas, sendo os maiores produtores e suas parcelas: China (44,5%), Índia (10,5%) e Estados Unidos (10,4%). O Brasil ocupa a nona posição, contribuindo com 2,1% desta produção (STATISTA, 2020).

Nos processos produtivos do setor industrial metalúrgico utilizam-se areia para fabricação de peças fundidas. Há dois tipos de areia de fundição que se diferenciam em função do sistema ligante usado. A areia de fundição comumente constituída por areia de alta qualidade (80-95% de sílica), aglomerante (geralmente bentonita, 4-10%), aditivo (pó de carvão, 2-10%) e água (2-5%) é conhecida como “areia verde” (SINGH; SIDDIQUE, 2012). Já a “areia ligada quimicamente” apresenta como sistema ligantes: 1-3% de resinas fenólicas, uretânicas, epóxi, dentre outros. A areia verde é geralmente a areia de moldagem mais utilizada nas indústrias de fundição de metais, e constitui mais de 90% dos materiais de moldagem usados (SIDDIQUE; NOUMOWE, 2008). O RAF do tipo “areia verde” é o objeto de estudo do presente trabalho.

A areia de fundição é utilizada na confecção de moldes de peças fundidas (Figura 1) devido às características como boa condutibilidade térmica e granulometria uniforme. Ao longo do tempo, esta areia sofre deterioração por calor e abrasão mecânica, deixando de ser reincorporada no processo produtivo e necessitando de uma destinação final adequada, geralmente em aterros (BHARDWAJ; KUMAR, 2017; TITTARELLI, 2018). O RAF representa a maior parcela de subprodutos (DYER *et al.*, 2018; TITTARELLI, 2018) e o maior poluente (IQBAL *et al.*, 2020) gerado pela indústria de fundição de metais. Na Turquia, 300.000 toneladas de RAF são geradas e dispostas em aterro anualmente (BAKIS; KOYUNCU; DEMIRBAS, 2006; GUNEY *et al.*, 2010). No Brasil, a geração anual deste resíduo é superior

a 3 milhões de toneladas (MASTELLA *et al.*, 2014; MATOS *et al.*, 2019), concentrando-se principalmente nos estados de São Paulo, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Minas Gerais. Já em outros países como Espanha, Índia e Estados Unidos, estimam-se que sejam geradas anualmente em torno de 1 (ETXEBERRIA *et al.*, 2010) 1,71 e 9-10 milhões de toneladas de RAF respectivamente (SIDDIQUE; SINGH; SINGH, 2018).

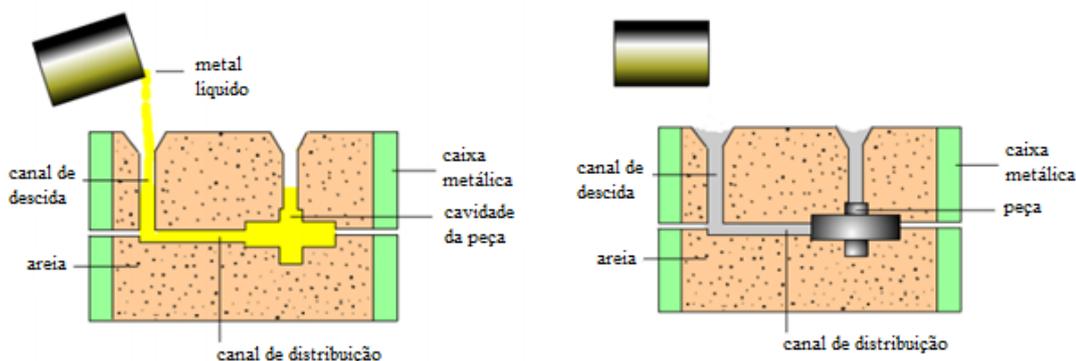


Figura 1 – Fabricação de peças fundidas.

Fonte – Adaptado de PAREDES (2017).

Nos USA, apenas 15% do resíduo é reciclado (TORRES; BARTLETT; PILGRIM, 2017) e a parcela encaminhada para disposição final, em aterros, gera custos anuais estimados em \$ 135-657 milhões (SIDDIQUE; SINGH; SINGH, 2018). Em levantamento da literatura, observou-se que dados sobre reutilização de RAF no Brasil são escassos e/ou desatualizados. Dentre exceções, destaca-se a geração em torno de 1,3 milhão de toneladas de RAF no estado de Minas Gerais, em 2017, das quais, 96,5% foram dispostas em aterros industriais (81,25% terceiros e 15,25% próprios) (FEAM, 2018), assim, infere-se que apenas 3,50% sejam reutilizadas. Para Dyer *et al.* (2018b), o RAF que vem sendo disposto em aterros, há mais de 30 anos, representa um problema tão grande quanto o RAF que é constantemente gerado pela indústria siderúrgica, pois as áreas desses aterros tornam-se improdutivas, ocupando grandes espaços, os quais poderiam ser utilizados para fins econômicos ou sociais (e.g. agrícolas e de lazer).

Entre os tipos de RAF, as areias “verdes” apresentam coloração acinzentada, enquanto que, as areias ligadas quimicamente apresentam coloração castanho médio a castanho claro. Em geral, sua distribuição granulométrica é considerada uniforme, com 80-95% das partículas entre 0,6-0,15 mm (SIDDIQUE; SINGH, 2011). A morfologia de RAF caracteriza-se por partículas com formas sub angular à arredonda (Figura 2) (GUNEY *et al.*, 2010; SIDDIQUE; SINGH, 2011).

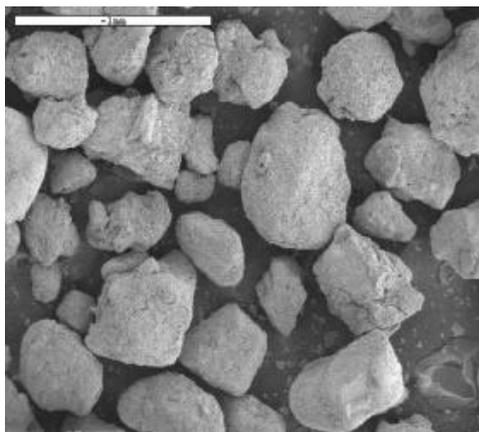


Figura 2 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura de RAF.

Fonte – GUNNEY *et al.* (2010).

Na Tabela 1 estão sintetizadas propriedades relevantes do RAF, levantadas de caracterizações presentes na literatura. Nota-se que o RAF representa uma rica fonte de sílica, oscilando entre 76 a 98%, massa específica real dos grãos de 2,10 a 2,64 g.cm⁻³ e teor de finos variável.

Tabela 1 – Propriedade físicas e químicas de amostras de RAF (areia verde).

Massa específica real dos grãos (g.cm ⁻³)	Finos (>0,075mm) (%)	Composição química majoritária		Referência
		SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	
-	> 6	96,73	0,59	Bakis, Koyuncu e Demirbas (2006)
2,45	24	98,00	0,80	Guney, Aydilek e Demirkan (2006)
2,20	8	87,91	4,70	Siddique, Schutter e Noumowe (2009)
-	< 10	84,90	5,21	Etxeberria <i>et al.</i> (2010)
2,61	18	78,81	6,32	Siddique e Singh (2011)
2,55	0	76,00	4,45	Sahmaram <i>et al.</i> (2011)
-	0	85,40	3,64	Alonso-Santurde <i>et al.</i> (2012)
2,10	13,2	81,85	10,41	Basar e Aksoy (2012, 2013)
-	0	88,50	2,70	Navarro-Blasco <i>et al.</i> (2013)
-	0,3	87,91	4,70	Khatib, Herki e Kenai (2013)
2,61	0	83,93	0,02	Thaarrini e Ramasamy (2016)
2,59	2	84,15	11,82	Arulrajah <i>et al.</i> , (2017)
2,45	9	94,10	1,70	Torres, Bartlett e Pilgrim (2017)
2,10	-	81,50	0,95	Siddique, Singh e Singh (2018)
2,19	0	78,50	5,50	Bhardwaj e Kumar (2019)
2,64	0	84,90	5,21	Bhardwaj e Sharma (2020)
2,38	-	78,10	9,69	Matos <i>et al.</i> (2020)
-	-	86,60	2,91	Apithanyasai, Supakata e Papong (2020)

Outro aspecto importante a ser considerado sobre o RAF refere-se a lixiviação de contaminantes (IQBAL *et al.*, 2020). O lixiviado do resíduo pode apresentar matéria orgânica dissolvida, macro componentes inorgânicos (e.g. ferro, zinco, alumínio, sulfato, cloreto e amônia) e metais

pesados (e.g. chumbo, níquel, cobre e mercúrio) (SIDDIQUE; KAUR; RAJOR, 2010). Penkaitis e Sígolo (2012) classificaram uma amostra de RAF como sendo resíduo não-perigoso, conforme NBR 10004 (ABNT, 2004a). No entanto, constatou-se a contaminação de água subterrânea no aterro onde este resíduo está disposto. Esta contaminação ocorreu devido aos processos de lixiviação e solubilização do RAF associados à sua exposição ao intemperismo e às reações com elementos presentes na área de descarte. Portanto, conhecer as características do lixiviado do RAF é importante para o gerenciamento do resíduo e também para desenvolver alternativas de aproveitamento (SIDDIQUE; KAUR; RAJOR, 2010).

2.1.2 Alternativas para reutilização de RAF

No Brasil, normativas e legislações estaduais foram criadas para estabelecer diretrizes para uso de RAF em: concreto asfáltico (ABNT, 2009a; CETESB, 2007; CONSEMA-SC, 2008; SANTA CATARINA, 2018); artefatos de concreto não estrutural (CETESB, 2007; CONSEMA-SC, 2008; SANTA CATARINA, 2018); material de cobertura diária em aterro sanitário (ABNT, 2009a; SANTA CATARINA, 2018); “fabricação de telhas, tijolos e outros artigos de barro cozido para artigos em cerâmica, ao assentamento de tubulações e de artefatos para pavimentação, base, sub-base, reforço de subleito para execução de estradas, rodovias e vias urbanas” [Lei Estadual nº 17.479 (SANTA CATARINA, 2018)]. Ainda, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos dispõe de um guia com ferramentas para incentivar os estados americanos a desenvolverem programas de reutilização de RAF (USEPA, 2006).

Diversos esforços vêm sendo realizados pela ciência em busca de alternativas para reutilização de RAF, de forma mais expressiva, por meio de pesquisas voltadas a aplicações na construção civil e na engenharia geotécnica. O RAF vem sendo estudado como substituto de areias natural e industrial ou argila para diversas finalidades, como: concretos (COPPIO *et al.*, 2019; IQBAL *et al.*, 2020; SIDDIQUE; SINGH; SINGH, 2018); bases e sub-bases de rodovias (YAZOGHLI-MARZOUK *et al.*, 2014); preenchimento de aterros em rodovias e leitos de tubulações (ARULRAJAH *et al.*, 2017); misturas asfálticas (DYER *et al.*, 2018); cerâmicas (LIN *et al.*, 2018); argamassa (MATOS *et al.*, 2020; PAUL *et al.*, 2022); estabilização de solos argilosos (BHARDWAJ; SHARMA; SHARMA, 2021; PATEL; CHAUHAN, 2020), e materiais álcali-ativados e geopolímeros (AL-MASHHADANI; CANPOLAT, 2020; SITHOLE *et al.*, 2022).

Siddique, Schutter e Noumowe (2009) observaram que substituições de 10, 20 e 30% geraram um aumento marginal nas propriedades de resistência do concreto, possivelmente em função

do RAF apresentar granulometria mais fina que a areia natural e pelo alto teor de sílica (87,91%). Para Etxeberria *et al.* (2010), concreto contendo RAF com propriedades mecânicas adequadas, pode ser produzido utilizando-se maiores relações água/cimento. Guney *et al.* (2010) verificou que substituições de agregado fino de até 10% são adequadas para produzir concreto de alta resistência, visto que, teores superiores causam reduções nas resistências à compressão e à tração e no módulo de elasticidade do material. Resultados semelhantes foram observados por Parashar *et al.* (2020), que explicam tal comportamento em função da menor massa específica real das partículas de RAF (em relação a areia natural) e pela redução da densidade das misturas com o aumento da substituição do agregado pelo resíduo.

Conforme Siddique e Singh (2011), adições de RAF no concreto impactam na trabalhabilidade e capacidade de absorção de água, mas também melhoram as propriedades de resistência do material. Resultados observados por outros autores (BASAR; AKSOY, 2012; KHATIB; HERKI; KENAI, 2013) mostraram que adições de RAF aumentam a absorção de água e afetam negativamente o comportamento de resistência. Trabalhos como de Basar e Aksoy (2012) e Siddique, Singh e Singh (2018) recomendam uma substituição de agregados finos máxima de 20%. Já para Parashar *et al.* (2020), a substituição de agregados finos por RAF é de até 10%, pois acima dessa parcela verificou-se a degradação da resistência e durabilidade do concreto.

Coppio *et al.* (2019) observaram que concretos com 100% de RAF tendem a ser mais porosos e menos resistentes, além disso, RAF (coletado em aterro) mostrou-se inadequado para uso no material, enquanto que, RAF coletado na indústria pode ser utilizado em concreto não estrutural. Isto porque, RAF do aterro apresentava maior teor de finos, os quais absorvem maior quantidade de água, afetando a hidratação do cimento, bem como expressiva presença de metais que pode interferir na aderência entre agregados e ligante. Portanto, observa-se que concretos contendo RAF apresentam comportamento variável, e as quantidades incorporadas se limitam às características do resíduo que proporcionem propriedades satisfatórias ao material.

RAF associado a agentes estabilizadores, principalmente cimento Portland, tem sido objeto de estudos de materiais para uso em pavimentação de rodovias. A utilização de subprodutos industriais no setor de infraestrutura possibilitaria o reaproveitamento em larga escala, pois a construção de pavimentos rodoviários apresenta uma demanda incessante de agregados (GUNEY; AYDILEK; DEMIRKAN, 2006; YAZOGHLI-MARZOUK *et al.*, 2014).

Guney, Aydilek e Demirkan (2006) realizaram testes laboratoriais para avaliar o reaproveitamento de RAF em camadas de sub-base de rodovias. As misturas contemplaram RAF e brita (55% ou 73%) com 5% de cal ou de cimento Portland. Os resultados demonstraram aumento da resistência nas misturas com maior energia de compactação e teor de umidade ótima. Juntamente com a resistência, as misturas apresentaram bom comportamento durante ciclos de congelamento e descongelamento. Além disso, testes de lixiviação indicaram que a passagem de água pelo material não libera componentes indesejáveis.

Já em aplicação em campo, Yazoghli-Marzouk *et al.*, (2014) avaliaram a substituição de 100% de areia natural por RAF em camada de sub-base para construção de uma rodovia (França). Verificou-se que este resíduo misturado com 5,5% de cimento Portland apresentou satisfatória resistência à tração, sem lixiviação de metais e compostos a nível de poluição, conforme normativas francesas e europeias. Ensaio geotécnicos (Proctor, índice de suporte Califórnia e permeabilidade) e de lixiviação realizados por Arulrajah *et al.* (2017) apontaram que RAF apresenta potencial para ser utilizado como material para aterros em estradas e em leitos de tubulações. Para os autores, o uso de RAF como substituo da areia industrial (oriunda da britagem de rochas) reduz a energia incorporada e a pegada de carbono.

O RAF também vem sendo estudado como agregado fino substituto da areia industrial em misturas de concreto asfáltico. Em substituições de agregados finos por 0-20% de RAF, Bakis, Koyuncu e Demirbas (2006) verificaram que o aumento do teor de resíduo resultava na redução quase linear da resistência à tração, sendo recomendando o uso de até 10%. Em estudo sobre a lixiviação de metais, Dyer *et al.* (2018b) observou que RAF, como substituto integral (100%) da areia industrial, teve seus metais encapsulados eficientemente na matriz asfáltica.

Na produção de cerâmicas, RAF foi avaliado como substituto parcial de argila. Alonso-Santurde *et al.* (2012) identificaram que tijolos cerâmicos com 35% de RAF (calcinação com argila a 1050 °C) apresentam boas propriedades físicas. O estudo de Lin *et al.* (2018) indica que telhas com até 15% de resíduo (passante na peneira #100 - 0,150 mm) apresentam boas resistências a soluções alcalinas e ácidas, resistência à flexão e propriedade de absorção de água. Tais propriedade foram influenciadas pela presença de impurezas (Fe, Ca e Mg - que contribuem para a formação da fase vítrea) e pela temperatura do processo de fabricação.

O resíduo também foi avaliado como material para uso em argamassas. Basar e Aksoy (2013) observaram a eficiente encapsulação de contaminantes de argamassas produzidas com substituição de areia natural por 75% RAF, e cimento Portland e cal. Com 50% de RAF,

argamassas contendo cimento de aluminato de cálcio apresentaram satisfatória resistência à compressão e imobilização de metais, como observado por Navarro-Blasco *et al.* (2013). Os trabalhos de Basar e Aksoy (2013) e Navarro-Blasco *et al.* (2013) sugerem que as misturas de RAF-cimento Portland podem ter como finalidades, a aplicação como material de aterro ou para argamassa em alvenaria. Para Matos *et al.* (2019), blocos de concreto contendo 100% de RAF apresentam resistência satisfatória, contudo, faz-se necessário realizar investigações sobre durabilidade e lixiviação. Matos *et al.* (2020) avaliaram substituições de cimento por RAF na fração inferior a 150 μm (calcinada 600-900°C, 1h), tendo verificado que argamassa contendo 10% do resíduo calcinado demonstra resistência similar ao material de referência (0% RAF).

Como material para estabilização de solos argiloso, adições de até 20% de RAF resultam no aumento da densidade aparente seca máxima (BHARDWAJ; SHARMA, 2020; BHARDWAJ; SHARMA; SHARMA, 2021; KUMAR; PALIWAL; JAIN, 2016; PATEL; CHAUHAN, 2020). No trabalho de Bhardwaj e Sharma (2020), RAF (20%), cal (9%) e melação de cana-de-açúcar (subproduto viscoso que contém resinas, 10%) reduziram a expansão e índice de plasticidade, bem como melhoram a resistência à compressão simples do solo.

Mais recentemente, Paul *et al.* (2022) investigaram a influência de RAF em substituições de 0, 10, 30, 50 e 100% da areia natural nas propriedades mecânicas de argamassas. Os autores constataram que a substituição integral altera expressivamente a resistência e processos de fissuração dos materiais cimentícios. Uma substituição de até 30% causa uma ligeira variação das propriedades mecânicas da argamassa, sendo que o concreto permaneceu na classe de resistência à compressão C30/37 (i.e. relação da resistência entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos). Por sua vez, Sithole *et al.* (2022) identificaram a viabilidade técnica (resistência, durabilidade e lixiviação) de um concreto “sustentável, em que a areia natural foi substituída em 30% por RAF e o ligante é composto por escória de alto forno ativada alcalinamente.

Contudo, a maioria das pesquisas sobre reuso de RAF limita-se a aplicação em concreto convencional, bem como limita-se ao seu uso como substituto parcial da areia natural (BHARDWAJ; KUMAR, 2019) ou da areia industrial. Além disso, em outros materiais de construção como cerâmicas e argamassas, RAF é incorporado como um substitutivo parcial de matérias primas, limitado a sua parcela de finos e/ou a passagem por processo de calcinação. Em materiais álcali-ativados e geopolímeros, o uso de RAF limita-se a adições de 20-40% e/ou a sua parcela de finos. Cabe ressaltar que a parcela de finos corresponde a pequenas quantidades

do resíduo, anteriormente exposto na Tabela 1. RAF em mistura com cimento, para aplicações em rodovias, mostra-se uma interessante alternativa para aproveitamento integral do resíduo. Por fim, alternativas que maximizem a reutilização do RAF não somente estarão contribuindo para torná-lo um material de valor agregado, como também para a redução de impactos associados ao descarte em aterros e à exploração de recursos naturais, bem como para minimizar custos e impactos da fabricação de materiais convencionais.

2.1.3 RAF em materiais álcali-ativados

Estudos envolvendo ativação alcalina e RAF são relativamente recentes e voltados principalmente a produção de concretos. Na Tabela 2 é apresentada uma síntese destas pesquisas, abordando a função do RAF, precursores e ativadores utilizados, material produzido, propriedades e comportamento avaliados e respectiva referência. Na sequência, os trabalhos são discutidos para melhor compreensão do modo de aproveitamento do RAF.

Tabela 2 – Síntese de estudos envolvendo uso de RAF e ativação alcalina.

Função do RAF	Precursores e ativadores	Material	Avaliações	Referência
Substituto da areia natural	EAF, cinzas de fundo, NaOH, Na ₂ SiO ₃	<i>Paver</i> de concreto geopolimérico	Resistências mecânicas e à ataque ácido, e absorção de água	Thaarrini e Ramasamy (2016)
Substituto da areia natural/industrial	CV, NaOH, Na ₂ SiO ₃	<i>Paver</i> de concreto geopolimérico	Resistência à compressão simples e absorção de água	Kewal (2017)
Substituto da areia natural	CV, EAF, NaOH, Na ₂ SiO ₃	Concretos geopolimérico e álcali-ativados	Resistência, permeabilidade e microestrutura	Bhardwaj e Kumar (2019)
Substituto de material de enchimento	CV, EAF, NaOH	Geopolímero	Resistência, durabilidade e microestrutura	Al-Mashhadani e Canpolat (2020)
Substituto da areia natural/industrial	CV, escória de aciaria, NaOH e Na ₂ SiO ₃	Bloco geopolimérico	Resistência, lixiviação e ACV	Apithanyasai, Supakata e Papong (2020)
Substituto da areia natural	EAF granulada	Concreto	Resistência, durabilidade, MEV, FTIR, DRX e lixiviação	Sithole <i>et al.</i> (2022)

Thaarrini e Ramasamy (2016) produziram *pavers* de concreto geopolimérico utilizando 50% de RAF, em substituição a areia natural, escória de alto forno, cinzas de fundo e distintos ativadores alcalinos. O material, fabricado em ambiente de baixa alcalinidade (4M NaOH) e cura em temperatura ambiente, apresentou satisfatória resistência mecânica, menor absorção de

água e maior resistência à ataque químico, em relação ao concreto convencional. Também para produção de *pavers* via ativação alcalina, Kewal (2017) observou que o material contendo 60% de RAF, como agregado fino, apresentou alta resistência à compressão simples (66MPa) e absorção de água satisfatória.

Bhardwaj e Kumar (2019) avaliaram RAF como substituto (0-100%) da areia natural em concreto geopolimérico de cinzas volantes (matéria prima pobre em CaO) e concreto de escória de alto forno (matéria prima rica em CaO) álcali-ativada. Os autores verificaram que a presença de RAF reduziu a trabalhabilidade de ambos concretos, com drástico efeito a partir de 40% de substituição, possivelmente em função da presença de partículas finas no resíduo (argila, cinza e impurezas). Até 60% e 20% de RAF nos concretos geopolimérico e álcali-ativado, respectivamente, houve melhoria na resistência e na sorptividade dos materiais. Concretos com 100% de RAF alcançaram resistências superiores a 45% da verificada no concreto de referência (0% RAF). Além disso, os concretos com RAF apresentaram menores energia incorporada e emissões de CO₂ em relação ao concreto convencional com resistência semelhante. Até 40% de RAF, há uma redução dos valores dos dois parâmetros, após essa substituição, há um aumento devido a necessidade de adição de superplastificante.

Al-Mashhadani e Canpolat (2020) produziram geopolímeros contendo RAF como substituto de areia industrial e calcário triturado (materiais de enchimento), além de cinzas volantes, escória e NaOH. Geopolímeros contendo até 20% de RAF apresentaram matrizes compactas e boas resistências à compressão e à flexão. No estudo de Apithanyasai, Supakata e Papong (2020), bloco geopolimérico produzido com 40:30:30 de RAF e cinzas volantes (ambas passante na peneira #200) e escória de aciaria, apresentou bom comportamento mecânico e eficiência para encapsular metais pesados. Além disso, este contribuiu para a redução de impactos ambientais quando comparado ao bloco de concreto, resultante de uma avaliação de ciclo de vida (ACV).

Recentemente Sithole *et al.* (2022) exploraram o desenvolvimento de um concreto “sustentável” a partir do uso de escória de alto forno granulada álcali-ativada (EAFGAA), como substituta do cimento Portland ordinário, e RAF como substituinte integral da areia natural. Após 90 dias de cura, a formulação EAFGAA/RAF/brita de 40/30/30 apresentou uma resistência à compressão simples de 12,7 MPa. Os corpos de prova de concreto apresentaram propriedades de durabilidade aceitáveis. Além disso, os resultados de lixiviação mostraram que

os metais foram imobilizados satisfatoriamente na matriz de concreto. Os autores recomendam o uso do concreto desenvolvido em unidades de alvenaria.

Com base na literatura supracitada, nota-se que as pesquisas iniciais estão voltadas ao desenvolvimento de concretos geopolimérico e álcali-ativado, além de geopolímeros, onde o RAF atua como substituto parcial ou integral de agregados finos e materiais de enchimento, limitando-se a adições de 20-40% e/ou a sua parcela de finos. Neste cenário, identifica-se ainda, a possibilidade de explorar RAF e ativação alcalina na geotecnia, por meio da estabilização do resíduo com uso de ligante álcali-ativado. Assim, tornando o RAF um material de valor agregado, e um potencial substituto de areia cimentadas e compactadas em diversas aplicações geotécnicas (e.g. leitos de tubulação e fundações rasas, e bases e sub-bases de pavimentos).

2.2 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS ARENOSOS

Na estabilização química de solos, a melhoria das propriedades de engenharia ocorre por meio da adição de agentes químicos (e.g. cimento, cal, cinzas, cal-pozolanas, etc.) e diferentes mecanismos (troca catiônica, floculação e aglomeração, reações pozolânicas e carbonatação) (FIROOZI *et al.*, 2017). Esse processo é influenciado por diversos fatores, como por exemplo: características do solo; presença de matéria orgânica; presença de sulfatos e sulfetos; teor de ligante; compactação; teor de umidade, e tempo e condições de cura, dentre outros. O melhoramento de solos com cimento é uma técnica atrativa em projetos de construção de bases de pavimentos estabilizadas, revestimentos de canais e camada de suporte para fundações rasas (CONSOLI *et al.*, 2010, 2012). Mais especificadamente, misturas de solo arenoso-cimento podem ser utilizadas na construção de paredes compactadas estabilizadas, leitos de dutos, sapatas e em bases e sub-bases de pavimentos (CONSOLI *et al.*, 2021b).

Classicamente solos arenosos são estabilizados com a adição de cimento Portland (FIROOZI *et al.*, 2017). As reações do cimento são independentes do tipo de minerais presentes no solo e são desencadeadas pelo contato do agente com água e/ou ar, conduzindo à hidratação do cimento (SHERWOOD, 1993). Este processo ocorre em cinco fases. Na primeira fase (duração em minutos) ocorrem as reações de hidratação e dissolução do cimento, com liberação de íons Ca^{2+} , Al^{+3} e SiO^- . Na fase de indução tem início a produção de compostos hidratados (silicatos de cálcio hidratado, C-S-H) e o endurecimento. Na terceira fase ocorre a aceleração das reações,

promovendo aumento de resistência e crescimento de produtos da hidratação. Já a quarta fase é definida pela desaceleração deste crescimento e início do desenvolvimento da microestrutura. Na quinta e última fase são formados os produtos da hidratação definitivos, cujo processo pode se estender por anos, dependendo do tipo de cimento (MINDESS; YOUNG; DARWIN, 2002).

Quando a água é adicionada ao solo-cimento, ocorre a hidratação do cimento, resultando na formação de compostos cimentícios, e conseqüentemente no enrijecimento da matriz solo-cimento (FIROOZI *et al.*, 2017). A estabilização do solo ocorre por meio de ligações cimentícias formadas nos pontos de contato intergranulares, de forma similar ao concreto, porém, o ligante não preenche todos os espaços vazios (CARDOSO; RIBEIRO; NÉRI, 2017). De acordo com Cardoso, Ribeiro e Néri (2017), os compostos resultantes da hidratação do cimento geram conexões físicas entre os grãos do solo, as quais são responsáveis por promover aumento de resistência à compressão e de rigidez e fornecer resistência à tração em solos granulares. O grau de vínculo dessas conexões e as melhorias no comportamento mecânico do solo estão associados ao volume ocupado pelos géis cimentantes nos poros entre os grãos.

A adição de cimento em solos arenosos promove melhorias na resistência, rigidez e durabilidade como verificado em diversos trabalhos da literatura (AL-AGHBARI; MOHAMEDZEIN; TAHA, 2009; CARDOSO; RIBEIRO; NÉRI, 2017; CONSOLI *et al.*, 2007, 2009a, 2010, 2012, 2013; DA FONSECA; CRUZ; CONSOLI, 2009; DAS; YEN; DASS, 1995; PEREIRA DOS SANTOS, 2021; SHOOSH PASHA; SHIRVANI, 2015). Consoli *et al.* (2009a) avaliou a influência da razão volumétrica vazios/cimento no módulo cisalhante inicial e nos parâmetros de resistência efetiva de Mohr-Coulomb de misturas areia-cimento, com teores de ligante variando de 1-12%. Verificou-se que o aumento da razão vazios/cimento resultou em reduções na rigidez e nos valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito. A resistência à compressão simples (q_u) e resistência à tração por compressão diametral (q_t) das mesmas misturas areia-cimento foram avaliadas por Consoli *et al.* (2010), considerando distintos teores de cimento e densidades. Os autores concluíram que: a redução da densidade das misturas compactadas promove ganhos nas q_t e q_u ; o índice η/C_{iv} mostrou-se um parâmetro adequado para ambas q_t e q_u das misturas, e que relação q_t/q_u parece ser única para solo-cimento avaliado, independentemente da porosidade e do teor de cimento.

O índice η/C_{iv} possibilita prever a resistência de solos cimentados, ajustando-o para o solo de interesse, podendo ser aplicado como uma metodologia de dosagem racional. Para um melhor

ajuste, utiliza-se um expoente “k”, em função do tipo de solo e dos materiais utilizados na estabilização. Na avaliação da q_t de três solos distintos melhorados com a adição de cimento Portland, Consoli *et al.* (2011) verificaram que o conteúdo volumétrico do agente cimentante é ajustado por um expoente distinto em função do tipo de solo. Para areia de Osório não foi necessário o uso do expoente ($k=1$), enquanto que, para misturas de areia siltosa do Portocimento e areia argilosa de Botucatu-cimento os expoentes foram 0,21 e 0,28 respectivamente.

Estudo realizado por Consoli *et al.*, (2012) verificou que o índice η/C_{iv} é adequado para avaliar a rigidez inicial (G_0) e a q_u de misturas solo-cimento, tendo considerado dois solos arenosos e diferentes teores de cimento Portland (2-7%) e porosidades. Segundo os autores, a redução da porosidade resultou em ganho da q_u em função do aumento no número de contatos entre os grãos. Para uma mesma porosidade, a areia bem graduada apresentou valores de resistência superiores aos da areia uniforme, sugerindo uma influência considerável da distribuição granulométrica do solo no comportamento mecânico. Além disso, para ambos solos, q_u e rigidez inicial aumentaram de forma quase linear com os acréscimos no teor de cimento.

Consoli *et al.* (2013) investigaram a influência de distintos tipos de cimento Portland, teores do ligante (3-9%), densidades, tempos de cura e η/C_{iv} na q_u de misturas areia-cimento. Neste trabalho, o índice η/C_v mostrou-se apropriado para avaliar a q_u das misturas para todos os tipos de cimentos e períodos de cura, bem como obteve-se uma equação única (relacionando η/C_{iv} , q_u e tempo de cura) que pode ser usada para os diferentes tipos de cimento. Assim, para determinado tipo de cimento e período de cura de interesse, é possível identificar a quantidade de cimento e a porosidade apropriados para a mistura atingir a resistência definida em projeto.

De uma forma geral, tem-se utilizado teores de cimento Portland que variam entre 1 a 17% e observando-se que a resistência e a rigidez de misturas areia-cimento é uma função da dosagem, da porosidade e do teor volumétrico de cimento (CONSOLI *et al.*, 2007, 2009a, 2010, 2012, 2013; DA FONSECA; CRUZ; CONSOLI, 2009). Contudo, a produção de cimento Portland é um processo de consumo intensivo de energia e extração de recursos naturais, enquanto libera consideráveis quantidades de poluentes atmosféricos (SUHENDRO, 2014). Estima-se que a produção de 1 tonelada desse ligante consome 3,5 GJ/ton de clínquer (IEA; WBCSD, 2018) e 1,5 toneladas de matéria prima (70% correspondente a calcário), gerando aproximadamente 1 tonelada de CO₂, isto é, 7% da emissão global GEE. Assim, o processo produtivo de cimento Portland é uma das principais fontes emissoras de gases de efeito estufa (GEE) (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015; MILLER; MYERS, 2020).

Neste contexto, agentes cimentantes alternativos vêm despertando crescente atenção da comunidade científica e do setor comercial. Este interesse está encorajando o desenvolvimento de novos e mais “sustentáveis” ligantes, com menores emissões de CO₂ e impactos negativos (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015; MILLER; MYERS, 2020). Ligantes álcali-ativados constituem uma opção alternativa ao cimento tradicional e possibilitam o aproveitamento de resíduos e/ou subprodutos industriais (ADESANYA *et al.*, 2021; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

2.3 ATIVAÇÃO ALCALINA E LIGANTES ÁLCALI-ATIVADOS

Sendo uma das classes de materiais cimentantes, os ligantes álcali-ativados são produzidos por meio da técnica de ativação alcalina, a qual consiste na reação de um aluminossilicato amorfo (chamado de precursor) em ambiente alcalino, induzido por um ativador (fonte de metal alcalino). Este ligante endurecido ou cimento alcalino pode ser resultante de fases alcalino-aluminossilicato hidratado e/ou alcalino-alcalino terroso-aluminossilicato (PROVIS, 2018).

Frequentemente ligantes álcali-ativados são confundidos com a terminologia de “geopolímeros” (PROVIS, 2018; PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). A história da tecnologia de ativação alcalina teve início em 1985, com a produção de um ligante oriundo de escória de alto forno e soda cáustica, seguida de importantes investigações realizadas por Kühl (1908-1930), Purdon (em 1940), Glukhovsky (em 1957) e Krivenko (em 1986) (KRIVENKO, 2017). O conceito de “geopolímero” foi introduzido em 1980 por Davidovits (DAVIDOVITS, 1982). Geopolímeros apresentam fase ligante quase exclusivamente de aluminossilicatos e altamente coordenada, oriunda em meio reacional com baixo teor de cálcio, formando estruturas poliméricas tridimensionais (DAVIDOVITS, 2018). Contudo, ambos materiais (ligantes álcali-ativados e geopolímeros) são abrangidos pela esfera mais ampla da ativação alcalina (PROVIS, 2018; PROVIS; VAN DEVENTER, 2014), conforme esquematização da Figura 3.

A química dos sistemas cimentantes é tridimensionalmente condensada em um sistema como CaO-Al₂O₃-SiO₂-M₂O-Fe₂O₃-SO₃-H₂O (onde M representa um metal alcalino), de forma a apresentar a posição dos materiais álcali-ativados (MAA) em relação ao cimento Portland e sistemas cimentantes sulfoaluminatos. Cimentos Portland e sistema de cimentos aluminato/sulfoaluminatos apresentam maiores teores de Ca em relação aos MAA. Enquanto

que, maiores concentrações de Al e álcalis e menores concentrações de Ca tendem a formar materiais com maior ordem estrutural, os geopolímeros (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

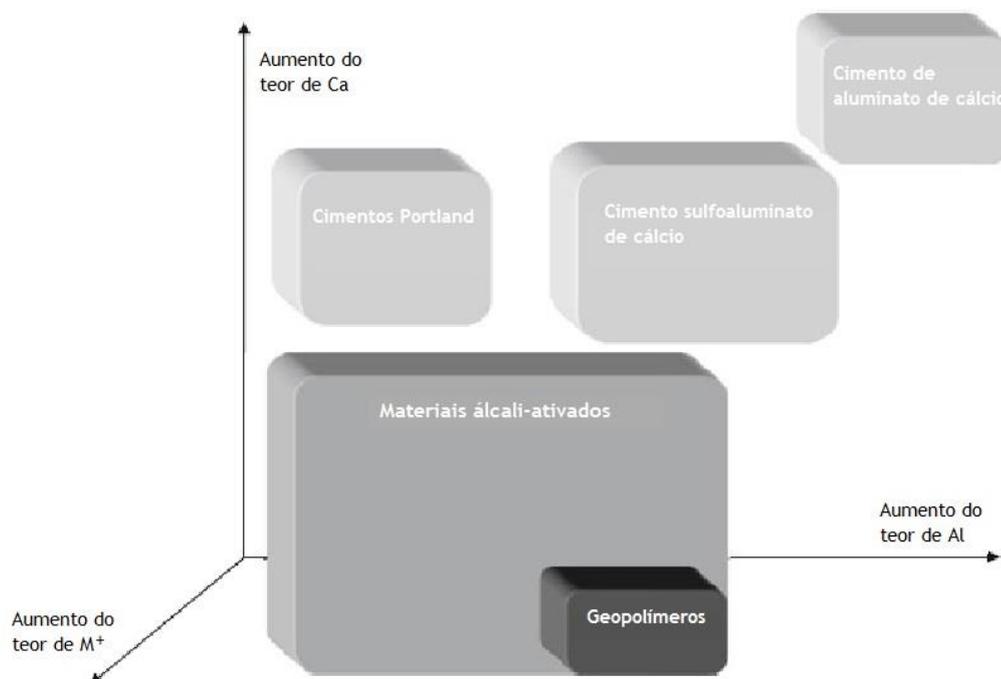


Figura 3 – Classificação química de materiais álcali-ativados.

Fonte – Adaptado de PROVIS e VAN DEVENTER (2014).

Para Provis (2018), os ligantes álcali-ativados representam um componente chave para a sustentabilidade futura na indústria mundial de materiais de construção. O autor aborda importantes aspectos sobre barreiras e incentivos para absorção desta tecnologia. As barreiras estão mais conectadas à setores industriais do que à esfera técnica, por exemplo: domínio da cadeia produtiva de abastecimento, abrangendo fornecedores de álcalis historicamente desconectados da indústria de construção, e competição por precursores já utilizados em cimentos Portland compostos. Os principais incentivos incluem a redução de emissões de CO₂ e a valorização de resíduos sem valor agregado. Já as prioridades de pesquisas em MAA contemplam: desenvolver e otimizar planejamento de misturas (desempenho e custos), considerando ampla gama de precursores e ativadores; avaliar características de durabilidade e expandir a base técnica sobre avaliação ambiental de precursores e ativadores (PROVIS, 2018).

Uma das características mais atrativas da tecnologia da ativação alcalina consiste na possibilidade de uso de uma ampla gama de precursores de origem natural (argilas calcinadas

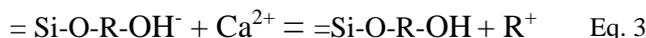
e pozolanas naturais) e subprodutos ou resíduos industriais (e.g. escória de alto forno e cinzas volantes) (PROVIS, 2018; PROVIS; DEVENTER, 2019). Além da variedade de materiais precursores, os ligantes álcali-ativados destacam-se por apresentarem propriedades como: resistência química (ácidos ou sulfatos) (MELLADO *et al.*, 2017; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2012; PROVIS, 2018; WANG *et al.*, 2020a), resistência a altas temperaturas (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PUERTAS; FERNÁNDEZ-CARRASCO, 1996; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2012), e custo de produção (PROVIS, 2018; PROVIS; DEVENTER, 2019).

A produção destes ligantes alternativos ocorre por duas vias principais: mistura de uma parte (forma de pó combinado com água) e de duas partes (ativador líquido). O sistema de mistura de duas partes possivelmente é a via predominante no início da implantação da ativação alcalina nos diversos mercados, e majoritariamente os produtos já existentes são produzidos por esse caminho (PROVIS, 2018). De acordo com a natureza dos componentes cimentantes (sistema CaO-SiO₂-Al₂O₃), os ligantes álcali-ativados são agrupados em duas categorias: (i) cimentos com alto teor de cálcio e (ii) cimentos com baixo teor de cálcio. Tais grupos são gerados distintamente pelos sistemas de alto teor de cálcio e de baixo teor de cálcio respectivamente. Ainda, tem-se um terceiro modelo de ativação alcalina, o qual descreve a produção de cimentos alcalinos híbridos (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

2.3.1 Sistema de alto teor de cálcio

No modelo 1, sistema de alto teor de cálcio [(Na,K)₂O-CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O], precursores ricos em sílica e cálcio, como por exemplo escória de alto forno (SiO₂ e CaO superior a 70%) (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015) são ativados em ambientes alcalinos relativamente moderados (<3M) (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PUERTAS; FERNÁNDEZ-CARRASCO, 1996; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015) e temperatura de cura ambiente (AWOYERA; ADESINA, 2019; PACHECO-TORGAL; CASTRO-GOMES; JALALI, 2008).

O modelo que descreve a ativação alcalina de materiais ricos em sílica e cálcio foi proposto por Glukhovsky e Krivenko, compreendendo uma série de reações sumarizadas pelas Equações 1-3. Nas fases iniciais de hidratação, o cátion alcalino (R⁺) atua como catalisador por meio de troca catiônica com Ca²⁺. Acredita-se que com o avanço das reações, os cátions são absorvidos pela estrutura (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).



Em síntese, o processo de ativação alcalina de escória envolve diversas etapas, iniciando pela destruição das ligações constituintes do precursor e posterior policondensação dos produtos formados, como pode ser observado na Figura 4.

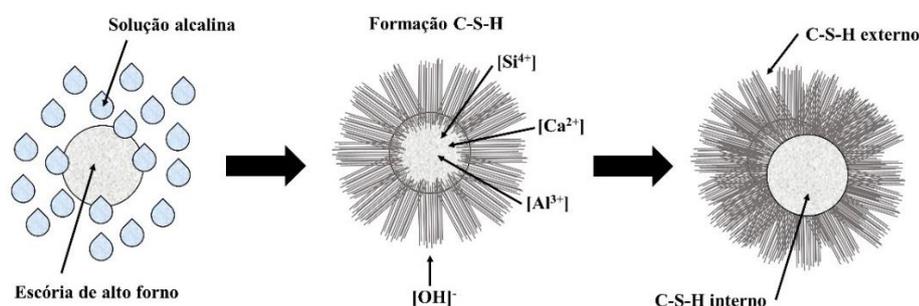


Figura 4 – Modelo teórico do mecanismo de reação para ativação alcalina de escória.

Fonte – GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ (2015).

A ativação alcalina da escória pode variar conforme constituição química e mineralogia deste material, bem como pelo tipo e concentração do ativador, sendo os mais utilizados: hidróxido de sódio e silicato de sódio (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015; LI; SUN; LI, 2010). No sistema de alto teor de cálcio, o principal produto formado é o gel C-A-S-H (Aluminossilicato de cálcio hidratado), similar ao gel C-S-H resultante da hidratação do cimento Portland, porém, com variações na composição e estrutura. Já o produto secundário, este varia conforme composição dos precursores, tipo e concentração do ativador alcalino, condições de cura (e.g. temperatura e tempo), pH, dentre outros fatores (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

Inicialmente reportado por Schilling *et al.* (1994), na escória álcali-ativada ocorre a absorção do alumínio na estrutura do gel C-S-H, onde os tetraedros de alumínio substituem tetraedros de silício em posições de ponte, originando unidades SiQ^1 , SiQ^2 e $\text{SiQ}^2(1\text{Al})$. Tal descoberta foi sendo mais explorada nos anos consecutivos com equações para cálculo do comprimento das cadeias de silício e relação Si/Al no gel por ressonância magnética nuclear (RICHARDSON *et al.*, 1994; RICHARDSON; CABRERA, 2000; RICHARDSON; GROVES, 1997). Estudos de

Fernández-Jiménez (2000) e Fernández-Jiménez e Puertas (2003) mostraram que a presença do alumínio resulta em géis de cadeias lineares longas, e possivelmente inter-cadeias esporádicas, ligações Si-O-Al e estruturas reticuladas [$Q^3(nAl)$], assim, gel C-S-H torna-se gel C-A-S-H. A estrutura do gel é composta por cadeias lineares longas de tetraedros de silicatos (unidades Q^2) ligados a camadas centrais de Ca-O e tetraedros de alumínio ocupando posições de ponte.

O tipo de ativador alcalino exerce influência sob o grau de condensação do silicato do gel. Na ativação com hidróxido de sódio, o alumínio conecta-se a cadeias lineares, ou seja, muitas unidades $Q^2(1Al)$, mas nenhuma unidade Q^3 (Figura 5a) (PALOMO *et al.*, 2014). O processo de ativação da escória com NaOH também ocorre de forma rápida devido a elevada presença de íons OH^- (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PUERTAS, 2001). O uso do ativador silicato de sódio gera estruturas altamente condensadas, promovendo a formação de cadeia lineares com estruturas ocasionalmente reticuladas (Figura 5b) (PALOMO *et al.*, 2014).

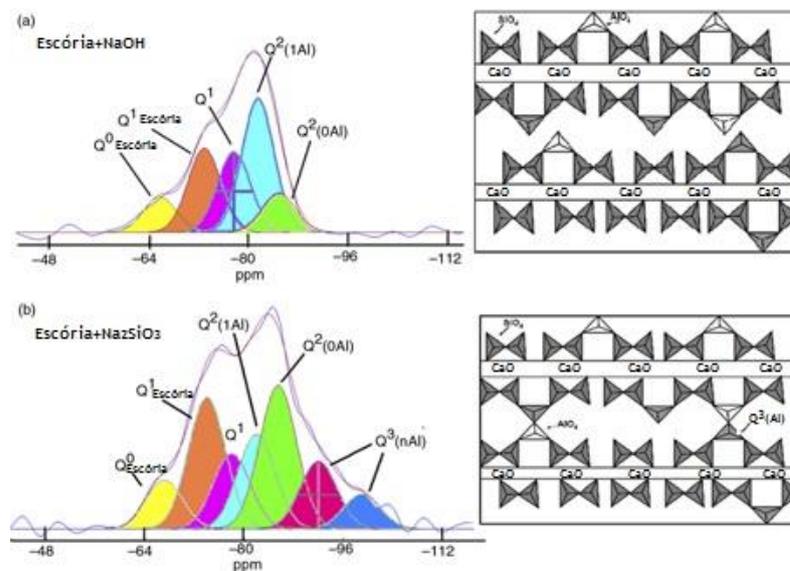


Figura 5 – Modelo estrutural para gel C-S-H contendo Al: (a) cadeias lineares de gel C-A-S-H e (b) cadeias lineares com estruturas ocasionalmente reticuladas, formando planos de gel C-A-S-H.

Fonte – Adaptado de PALOMO *et al.* (2014).

Na Tabela 3 está exposta uma comparação entre os produtos comumente formados na hidratação do cimento Portland e os produtos de alto e baixo teor de cálcio dos cimentos alcalinos (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). Observa-se que o produto primário de hidratação do cimento Portland ordinário (CPO) é o gel do tipo C-S-H,

já os produtos secundários compreendem portlandita, etringita e monossulfoaluminato de cálcio. Os produtos de reação dos cimentos alcalinos são análogos aos resultantes da hidratação do CPC, onde o produto primário corresponde a um gel, C-A-S-H ou N-A-S-H e com diversos produtos secundários, ambos dependentes do sistema álcali-ativado envolvido.

Tabela 3 – Síntese dos produtos precipitados em distintos tipos de ligantes.

Tipo de ligante	Cimento Portland		Cimentos Alcalinos	
	Ordinário	(Na,K) ₂ O-CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O	(Na,K) ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O	(Na,K) ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O
	Primário	C-S-H	C-A-S-H	N-A-S-H
Produtos das reações		Portlandita	Hidrotalcita	Hidrotalcita
		Etringita	[Mg ₆ Al ₂ CO ₃ (OH) ₁₆ .4H ₂ O]	Hidroxisodalita
	Secundário	Monossulfoaluminato de cálcio	C ₄ AH ₁₃ CASH ₈ C ₄ AcH ₁₁ C ₈ Ac ₂ H ₂₄	Zeolita P Na-chabazita Zeolita Y Faujasita

C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; N= Na₂O; H= H₂O; c = CO₂

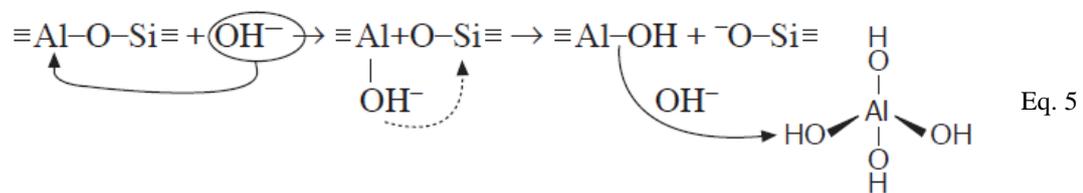
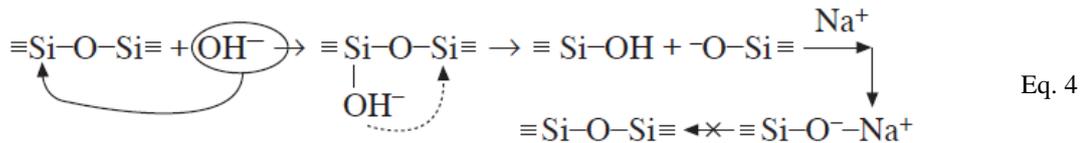
Fonte – Adaptado de GARCIA-LODEIRO, PALOMO e FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ (2015).

2.3.2 Sistema de baixo teor de cálcio

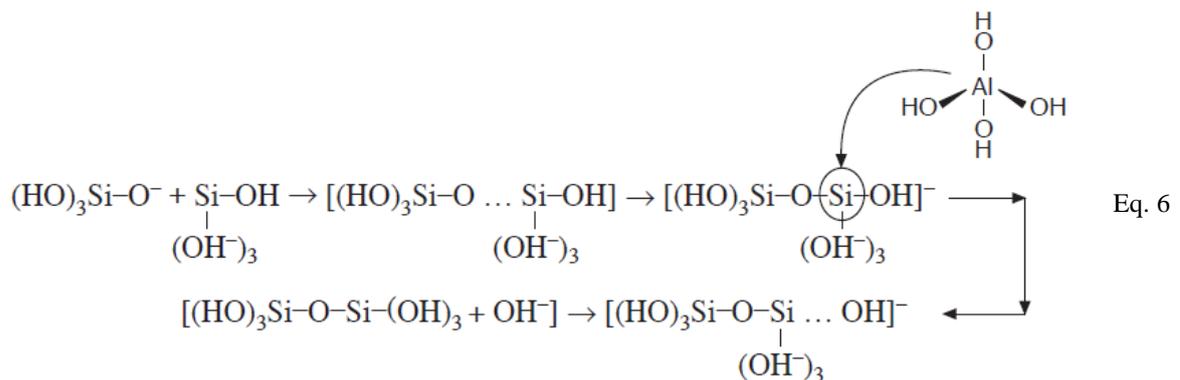
No modelo 2, sistema de baixo teor de cálcio [(Na,K)₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O], os precursores são compostos majoritariamente por sílica e alumínio e baixos teores de CaO, tais como: metacaulim e cinzas volantes. A primeira pozolana é oriunda da calcinação da argila caulinita em temperaturas de 650 a 850°C (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2000; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). O metacaulim é um material amorfo com elevada desordem estrutural, e altamente reativo em meio alcalino (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2000). Já o segundo material é oriundo da queima de carvão mineral, com variações em suas características conforme tipo de carvão e condições de incineração (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). Neste sistema é necessário trabalhar com meios altamente alcalino (~10M) (DUXSON *et al.*, 2007) e temperaturas de cura superiores a 60° C (DUXSON *et al.*, 2007; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

Proposto por Glukhovsky em 1994, o mecanismo geral de reações para ativação alcalina de materiais ricos em sílica e alumínio (e.g. cinzas volantes) compreende três etapas: (i) dissolução-coagulação; (ii) coagulação-condensação e (iii) condensação-cristalização (DUXSON *et al.*, 2007; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). Inicialmente os íons OH⁻, oriundos do ativador alcalino, redistribuem suas densidades eletrônicas em torno dos átomos de sílica, provocando enfraquecimento e rompimento das

ligações Si-O-Si (Equação 4). Resultante deste ataque, tem-se a formação de espécies de silanol (-Si-OH) e sialato (-Si-O⁻). Neste meio, o cátion alcalino neutraliza a carga negativa resultante, concomitantemente em que a formação de ligações -Si-O⁻-Na⁺ inibe a reversão para siloxano (Si-O-Si). Da mesma forma, íons OH⁻ atacam as ligações Si-O-Al, dissolvendo espécies de alumínio e formando outras complexas, em sua maioria, ânions Al(OH)₄⁻ (Equação 5) (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).



Na etapa coagulação-condensação, tem-se o acúmulo de espécies iônicas, promovendo o contato entre os produtos desagregados e inicia-se a policondensação, formando estruturas coaguladas. A interação entre monômeros (i.e. unidade básica do polímero) de sílica origina dímeros (formando ligações Si-O-Si), os quais reagem com outros monômeros para formar polímeros, como mostra na Equação 6. O estágio supracitado é catalisado pelo grupo OH⁻ (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).



Resultante da polimerização do ácido ortossilícico (H₄SiO₄), os clusters (i.e. aglomerados nanométricos) passam a se expandirem, gerando coloides. No processo de polimerização, os aluminatos atuam pela substituição isomórfica do tetraedro de silício. Já o metal alcalino, além de atuar como catalisador de reações na primeira etapa, na segunda exerce a função de

componente estrutural (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). No estágio de condensação-cristalização, partículas na fase sólida conduzem à precipitação dos produtos, os quais dependem da mineralogia e composição química do precursor, do ativador alcalino e das condições de cura. As etapas descritas referem-se a ativação alcalina de metacaulim e cinzas volantes, porém, alguns aspectos apresentam variações na esfera técnica (DUXSON *et al.*, 2007; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

Palomo, Fernández-Jimenez e Kovalchuck (2005) propuseram um modelo de ativação alcalina de cinzas volantes, baseado na síntese de zeolitas dada por estágios: nucleação e crescimento. Na nucleação, ocorre a dissolução de aluminatos e a formação de espécies mais complexas via polimerização. Este estágio compreende as duas primeiras etapas do modelo de Glukhovsky (1994). O estágio de crescimento consiste em um processo lento, onde os núcleos um tamanho crítico e há o crescimento de cristal. Como resultado final, tem-se a formação de uma estrutura amorfa, constituída principalmente pelo gel N-A-S-H (Aluminossilicato de sódio hidratado) (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

Posteriormente, este modelo foi revisado, adicionando-se estágios ao processo de formação de gel N-A-S-H. Em síntese, ao entrar em contato com a solução alcalina, o aluminossilicato dissolve-se em monômeros de sílica e alumínio, que ao interagirem, formam dímeros, trímeros, tetrâmeros e assim sucessivamente. Quando a solução torna-se saturada, ocorre a precipitação do gel N-A-S-H. Inicialmente, este gel, denominado Gel 1, é rico em alumínio, pois já nas primeiras horas, há um alto teor de íons Al^{3+} no meio alcalino em função das ligações Al-O serem mais fracas do que as Si-O, e portanto, dissolvem-se mais rapidamente (DUXSON *et al.*, 2007; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). Tal comportamento pode ser observado em termos de solubilização de alumínio e sílica em função do pH, exposto na Figura 6, onde a dissolução de alumínio ocorre com pH acima de 8, enquanto a sílica necessita de meios mais alcalinos (MITCHELL; SOGA, 2005).

Com a progressiva dissolução de alumínio, os grupos Si-O do precursor começam a se dissolver, elevando a concentração de sílica no meio, bem como no gel N-A-S-H, agora denominado de Gel 2. Tal processo é chamado de reorganização estrutural e é responsável pela composição final do polímero, bem como pela microestrutura e porosidade, e consequentemente por muitas propriedades físicas do cimento alcalino resultante (DUXSON *et al.*, 2007; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). Os estágios do modelo supracitado são esquematizados graficamente na Figura 7.

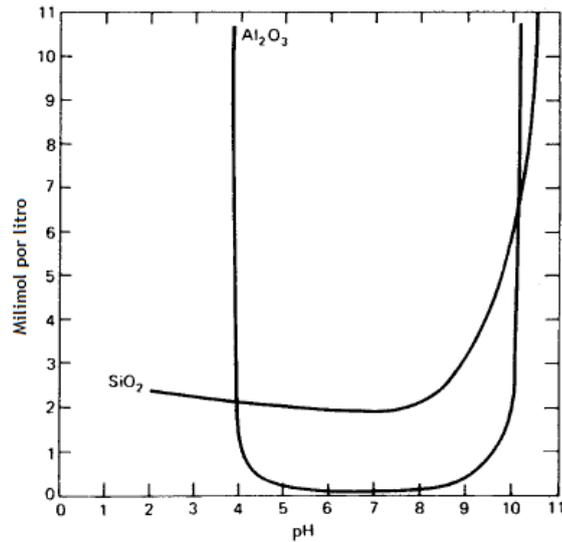


Figura 6 – Solubilização de alumínio e sílica amorfa em água.

Fonte – MITCHELL e SOGA (2005).

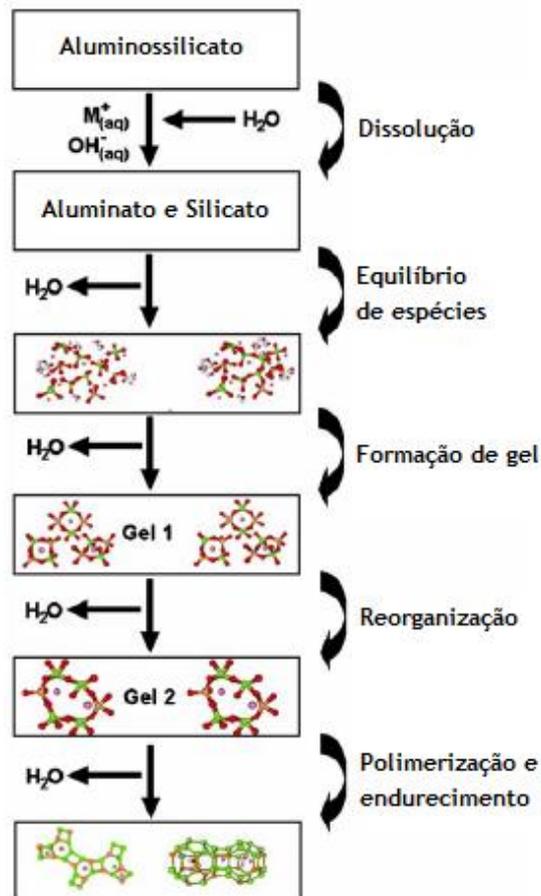


Figura 7 – Modelo conceitual para geopolimerização.

Fonte – Adaptado de DUXSON *et al.* (2007).

O produto primário das reações no sistema de baixo teor de cálcio é o aluminossilicato alcalino amorfo hidratado ($M_n-(SiO_2)-(AlO_2)_n-wH_2O$), também denominado de gel N-A-S-H ou polímero inorgânico alcalino, cuja estrutura está exposta na Figura 8. Pode-se observar uma estrutura tridimensional formada por tetraedros de silício e alumínio distribuídos aleatoriamente. O produto secundário deste sistema são as zeolitas (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

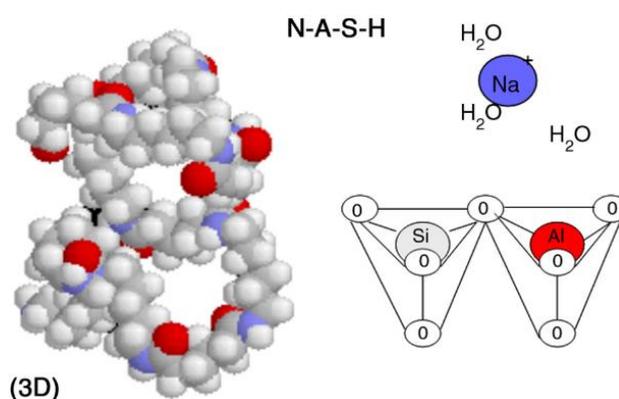


Figura 8 – Projeção plana da estrutura tridimensional de um gel N-A-S-H.

Fonte – PALOMO *et al.* (2014).

A temperatura de cura desempenha importante papel na cinética das reações, acelerando a dissolução de Al^{3+} e Si^{4+} dos precursores. Em pastas de cinzas volantes álcali-ativadas, Palomo, Alonso e Fernández-Jiménez (2004) verificaram que a elevação da temperatura provoca o aumento exponencial da resistência, reduzindo o tempo necessário para alcançar uma determinada resistência, conforme Figura 9. Curas mais longas promovem a formação de produtos ricos em sílica e materiais com maior resistência mecânica (DUXSON *et al.*, 2007; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). Entretanto, a partir de determinados tempos e temperaturas de cura, os incrementos de resistência tornam-se lentos, podendo se tornar prejudiciais (CRIADO *et al.*, 2007; KRIVENKO; KOVALCHUK, 2007).

A umidade relativa de cura inicial desempenha importante função na ativação alcalina. Criado *et al.* (2012) verificaram que, independente do ativador usado na ativação de cinzas volantes, valores baixos de umidade relativa (40-50%), a 85 °C, promoveram formação de bicarbonatos alcalinos e perda de umidade do sistema. Segundo os autores, a redução do pH do meio (pela carbonatação) e menor disponibilidade de água retardam a dissolução da parcela vítrea do precursor, prejudicando a cinética das reações. Sob condições de alta umidade relativa (~98%)

a 85 °C, os poros encontram-se saturados, impedindo a difusão de CO₂ (KOVALCHUCK; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2007). Para Almeida *et al.*, (2017), o processo de carbonatação em cinzas volantes álcali-ativadas por ser evitado controlando as condições de cura, onde maiores razões temperatura/umidade relativa resultam em maiores resistências.

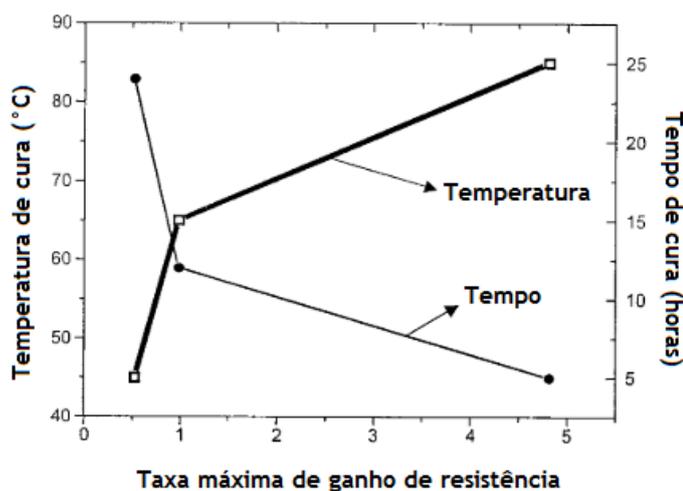


Figura 9 – Taxa máxima de ganho de resistência mecânica versus tempo de cura e temperatura.

Fonte – Adaptado de PALOMO, ALONSO e FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ (2004).

2.3.3 Cimentos híbridos

O terceiro modelo de ativação alcalina pode ser entendido como uma combinação dos dois modelos anteriores (alto e baixo teor de cálcio). No sistema atual, precursores contendo teores intermediários de cálcio e possíveis misturas de precursores são ativados alcalinamente, formando um produto denominado “cimento alcalino híbrido” (GARCÍA-LODEIRO *et al.*, 2012; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

Os cimentos híbridos subdividem-se em dois grupos. O primeiro compreende misturas com baixo teor de clínquer de cimento Portland e alto teor de fonte mineral (acima de 60-70%) (GARCÍA-LODEIRO *et al.*, 2012; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015; PALOMO *et al.*, 2007). Como exemplos, pode-se citar: cinzas volantes + cimento (PALOMO *et al.*, 2007); cinzas volantes + cinzas de fundo + clínquer (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2016); rejeito de bauxita + escória + cimento (KRIVENKO *et al.*, 2017); resíduo de telha cerâmica + cimento (MURILLO; DELVASTO; GORDILLO, 2017); cinzas

volantes + cinzas de incinerador de resíduos sólidos municipais + clínquer (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2017); rejeito de bauxita + escória + cimento (ALONSO *et al.*, 2018); escória + cinzas volantes + clínquer (MARTAUZ *et al.*, 2016; QU *et al.*, 2020); cinzas volantes + cimento + pó de calcário (MILLÁN-CORRALES *et al.*, 2020), dentre outros. O segundo grupo inclui misturas que não contêm o cimento tradicional, tais como: escória de alto forno e cinzas volantes (ALONSO *et al.*, 2018); resíduo de cerâmica vermelha e cal de carbureto (CAICEDO, 2020); cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto (BRUSCHI *et al.*, 2021a) e vidro moído e cal de carbureto (CONSOLI *et al.*, 2021a; LOTERO *et al.*, 2021).

Nesse terceiro modelo, os produtos formados são complexos, pois compreendem uma mistura de géis cimentantes ((C,N)-A-S-H e N-(C)-A-S-H), e dependem da composição química dos materiais de partida, tipo e concentração do ativador alcalino e temperatura de cura (GARCÍA-LODEIRO *et al.*, 2012; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). Em condições de equilíbrio (i.e. exclui principalmente estágios reacionais iniciais) e na presença de quantidades suficientes de cálcio, os meios com pH acima de 12 favorecem a formação de gel C-A-S-H ao invés de gel N-A-S-H, conforme Figura 10 (GARCÍA-LODEIRO *et al.*, 2012; GARCÍA-LODEIRO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2013).

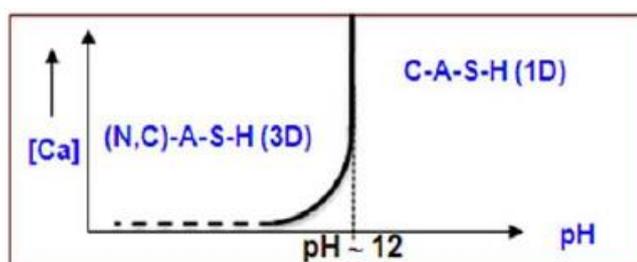


Figura 10 – Modelo proposto para definir a estabilidade de gel N-A-S-H em função de pH e conteúdo de cálcio.

Fonte – GARCÍA-LODEIRO *et al.* (2012).

Análises de EDX (espectroscopia de energia dispersiva de raios-X) e micrografias por MET (microscopia eletrônica de transmissão) (Figuras 11 e 12) em pastas álcali-ativadas contendo 70% de cinzas volantes e 30% cimento Portland ordinário revelaram uma mistura complexa de géis amorfos C-A-S-H e (N,C)-A-S-H coprecipitados em 28 dias. Com o passar do tempo (após 1 ano), nesse mesmo sistema observou-se a presença de diferentes géis, com destaque para o gel C-A-S-H (Figura 11) (GARCÍA-LODEIRO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2013).

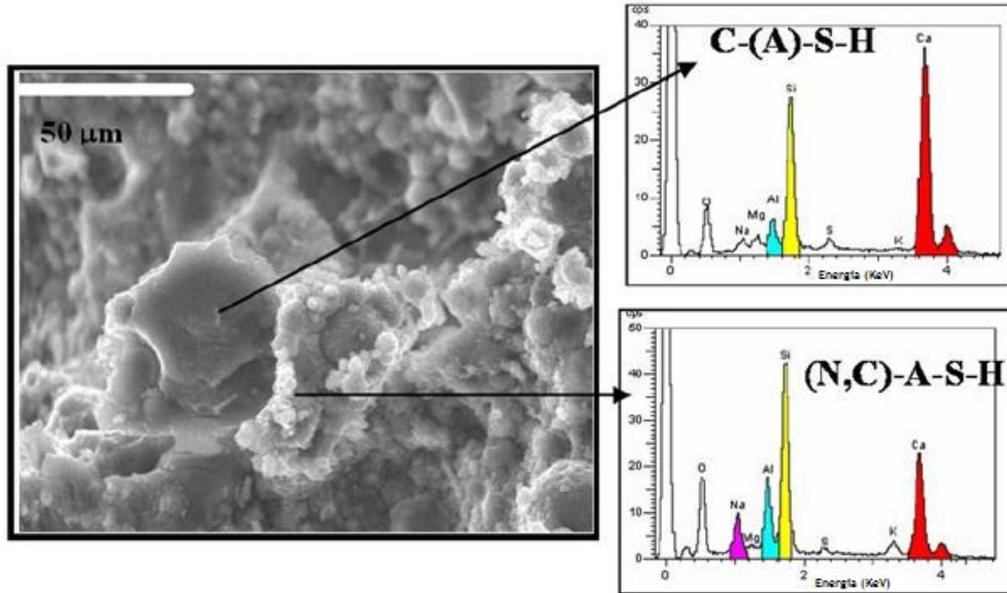


Figura 11 – Coprecipitação de géis C-A-S-H e (N,C)-A-S-H em 70% CV + 30% CPO álcali-ativadas.

Fonte – GARCÍA-LODEIRO *et al.* (2012).

García-Lodeiro, Fernández-Jiménez e Palomo (2013) também observaram que os géis (N,C)-A-S-H se desenvolveram até atingir composições com elevadas relações Ca/Si e Si/Al (altos teores de Ca e baixos teores de Al), como ilustrado na Figura 12.

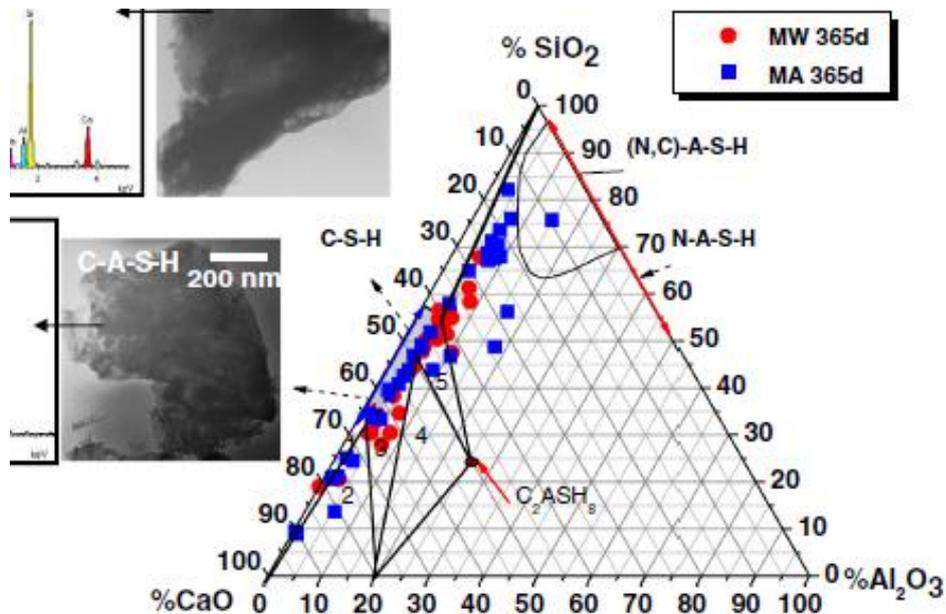


Figura 12 – Análises EDX de géis MW (misturas cinza-cimento hidratadas com água) e MA (misturas cinza-cimento álcali-ativadas), projetadas no plano CaO-Al₂O₃-SiO₂ e micrografias por MT de ambos géis.

Fonte – GARCÍA-LODEIRO, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ e PALOMO (2013).

Na Figura 12, o Al é redistribuído das estruturas 3D dos géis tipo N-A-S-H para estruturas 2D dos géis tipo C-A-S-H, bem como há a possibilidade do Al reagir com Ca e formar fases secundárias (GARCÍA-LODEIRO, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ E PALOMO, 2013). Os mesmos autores também avaliaram a influência de diferentes ativadores alcalinos (NaOH e Na₂CO₃), verificando que estes influenciam na cinética das reações e nos tipos de produtos secundários, contudo, não alteram os principais géis formados ((N,C)-A-S-H/C-A-S-H).

García-Lodeiro, Fernández-Jiménez e Palomo (2013) propuseram um modelo de ativação alcalina para misturas de cimentos contendo elevadores teores de sílica e alumínio e baixo teor de cálcio: 70% cinzas volantes + 30% CPO + solução NaOH. Na Figura 13 pode-se observar que este modelo é composto por estágios denominados A, B, C, D e E. No Estágio A ocorre a dissolução das fontes de aluminossilicatos e cálcio (em solução básica), via rompimento das ligações T-O-T (T: Si ou Al) nas cinzas volantes e das ligações Ca-O e Si-O no CPO, resultando em diversas espécies químicas dissolvidas. Ao atingir a saturação do meio, ocorre a precipitação de um gel de aluminossilicato, N-A-S-H (Estágio B). Inicialmente, a composição desse gel apresenta-se com elevado teor de alumínio (GARCÍA-LODEIRO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2013; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

Provenientes da dissolução do CPO, espécies de Ca²⁺ e silicato reagem para formar o gel C-S-H. Com o progresso das reações, há mais grupos Si-O sendo dissolvidos, oriundos da fonte de aluminossilicatos e de silicato de cálcio, aumentando a presença de silício no meio e sua absorção pelos géis. Dessa forma, o gel N-A-S-H alteraria de gel tipo 1 (Gel 1, relação Si/Al próximo a 1) para gel tipo 2 (Gel 2, relação Si/Al próximo a 2). A absorção de Si pelo gel C-S-H promove o aumento do grau de polimerização, ou seja, cadeias com três tetraedros de sílica passam a ter cinco ou mais (Estágio C) (GARCÍA-LODEIRO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2013; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

No Estágio D, os íons Ca²⁺ e Al(OH)₄⁻ presentes em solução, passam a difundir-se pela matriz cimentante formada. Um quantidade pequena de íons Ca²⁺ (excluindo os do gel C-S-H) passa a interagir com o gel N-A-S-H, dando origem ao gel (N,C)-A-S-H. Devido ao raio iônico similar e ao potencial eletronegativo nos íons Na⁺ e Ca²⁺, os íons Ca²⁺ substituem os Na⁺ via troca iônica, mantendo a estrutura 3D do gel (N,C)-A-S-H. Também, conforme aumenta a concentração de alumínio em solução, eles passam a fazer parte da composição do gel C-S-H, estando presentes em posição de pontes, gerando gel C-A-S-H. O alumínio em posição de ponte promove a reticulação das cadeias, gerando estruturas 2D. Tal estágio ocorre aos 28 dias

(GARCÍA-LODEIRO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2013; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

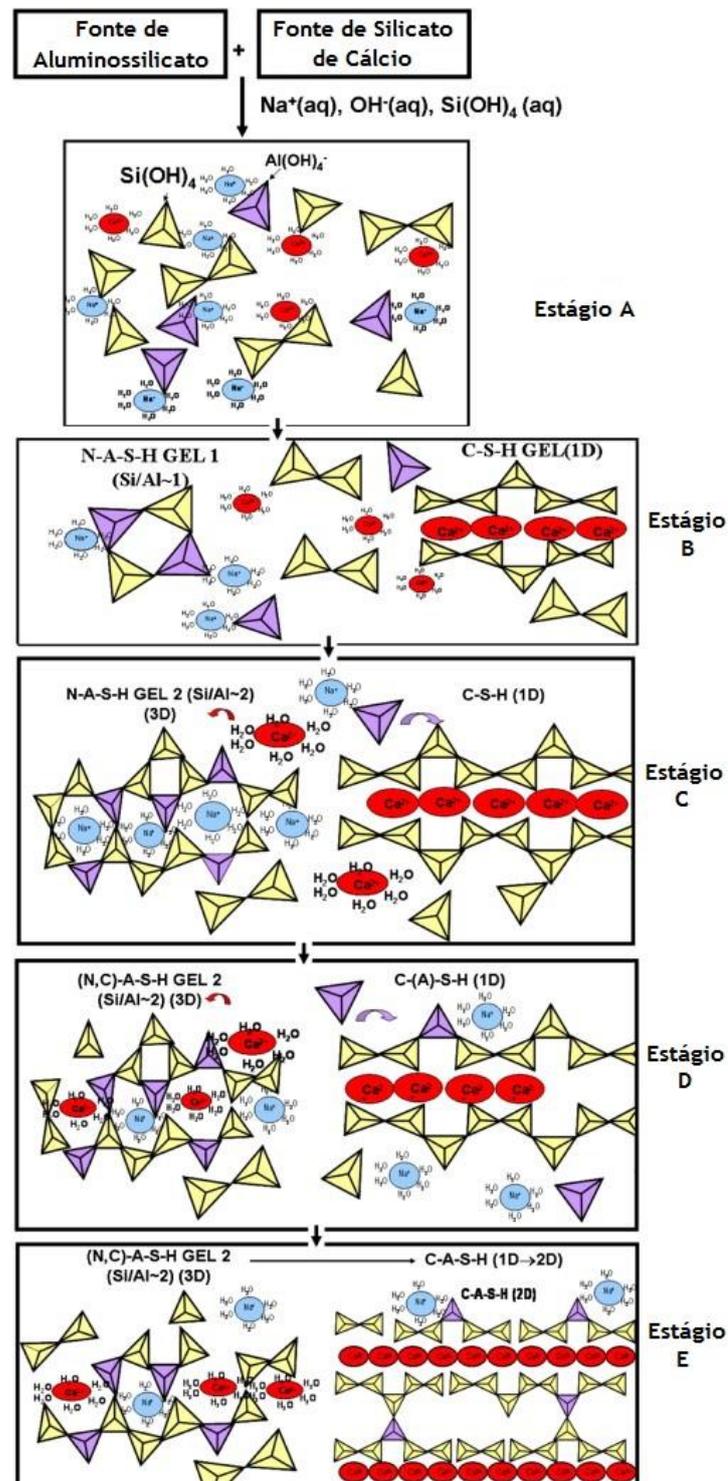


Figura 13 – Modelo de ativação alcalina para misturas de cimentos com alto teor de Si e Al e baixo teor de Ca.

Fonte – Adaptado de GARCÍA-LODEIRO, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ e PALOMO (2013).

Por fim, o último estágio é observado em cimento híbrido com 365 dias. No Estágio E, íons de Ca^{2+} que ainda estão presentes em solução, continuam a difundir-se e interagem com o gel (N,C)-A-S-H. A tentativa de formar ligações Si-O-Ca gera um efeito polarizador do Ca^{2+} , conseqüentemente distorcendo e rompendo as ligações Si-O-Al. Em função do gel N-A-S-H liberar alumínio, há uma menor formação de estruturas polimerizadas (e.g. gel C-A-S-H). Concomitantemente, gel C-A-S-H, gerado nos estágios anteriores, absorve íons de silício e alumínio (GARCÍA-LODEIRO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2013; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

Em um cenário hipotético futuro, a parcela de cinza que não reagiu, somada a partículas de cimento coexistiriam com fases secundárias (e.g. carbonatos) e géis (N,C)-A-S-H/ C-A-S-H na matriz consistiriam um sistema, o qual evoluiria para formar um gel termodinamicamente estável: gel C-A-S-H (GARCÍA-LODEIRO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2013).

2.3.4 Ativadores alcalinos

O ativador alcalino consiste em uma substância que libera cátion de metal alcalino ou metal alcalino terroso, promovendo a elevação do pH do meio reacional e catalisando a dissolução do precursor (em estado sólido). As fontes de ativadores alcalinos mais usuais incluem hidróxidos alcalinos, silicatos, carbonatos e sulfatos (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). Os hidróxidos alcalinos são bases fortes formadas por um metal alcalino (M^+) associado a um ânion hidróxido (OH^-). Os íons OH^- atuam como catalisadores da dissolução dos cátions Si^{4+} e Al^{3+} (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO; CRIADO, 2006; PROVIS; VAN DEVENTER, 2014), sendo os mais utilizados: hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH).

Em ativação de cinzas volantes, Fernández-Jiménez, Palomo e Criado (2006) observaram que NaOH tem maior capacidade de catalisar reações do que KOH. Segundo os autores, apesar do KOH apresentar maior capacidade de dissolução devido a superior alcalinidade gerada, NaOH é quem promove maior liberação de monômeros de silicato e aluminato. Tal comportamento é explicado em função principalmente do tamanho do cátion Na^+ ser inferior ao K^+ e, portanto, exercer maior influência na cinética das reações. Por outro lado, o tamanho de cátion maior (K^+) favorece a formação de maiores monômeros de silicatos ligados a $\text{Al}(\text{OH})^-$, bem como a menor esfera de hidratação ($\text{K}^+ < \text{Na}^+$) conduz a reações de policondensação mais densas, gerando um matriz com maior resistência mecânica (PHAIR; VAN DEVENTER, 2001).

Na ativação alcalina, o uso de hidróxidos alcalinos como de lítio (LiOH) e rubídio (RbOH) limita-se a disponibilidade escassa, custos e baixa solubilidade em água (a 25°C) (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). Contudo, o NaOH é comumente o ativador alcalino mais utilizado em função da ampla disponibilidade e baixa viscosidade (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Viscosidade e entalpia de dissolução são importantes propriedades a serem consideradas nos hidróxidos alcalinos. Estes apresentam vantagem perante os silicatos, pois sua viscosidade não excede a da água em mais de um fator de 10. Entretanto, em soluções concentradas de hidróxidos, a liberação de grande quantidade de calor pode se tornar uma situação problemática em um cenário industrial (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). Em ligantes álcali-ativados com altas concentrações de hidróxidos alcalinos, o excesso de álcalis pode reagir com o CO₂ atmosférico e formar cristais de carbonatos, conhecidos como eflorescências, podendo ser prejudiciais a estrutura do material (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

Os silicatos mais utilizados como ativadores alcalinos são o silicato de sódio (Na₂SiO₃) e o silicato de potássio (K₂SiO₃). Estes atuam aumentando a velocidade de polimerização das espécies iônicas presentes no meio reacional. Os ativadores de silicatos possibilitam a adição de sílica ao sistema, a qual prontamente interage com as espécies de alumínio em solução, promovendo a aceleração das reações e formando géis com maior teor de sílica e um material com maior resistência mecânica (CRIADO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2005).

Os carbonatos de potássio e de outros metais alcalinos não são muito utilizados na produção dos ligantes, ao contrário do carbonato de sódio (Na₂CO₃). Entretanto, no sistema contendo Na₂CO₃ como ativador, há o potencial de formação de carbonatos/bicarbonatos (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). A ativação alcalina de fontes de aluminossilicatos também pode ser realizada utilizando sulfato de sódio (Na₂SO₄) como ativador alcalino. Entretanto, ligantes álcali-ativados com Na₂SO₄, em um sistema sem a presença de clínquer, não apresentam resistências satisfatórias (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

Ainda cabe destacar que, há estudos investigando a produção de ativadores alcalinos provenientes de resíduos, que demonstram resultados satisfatórios em relação aos ativadores alcalinos comerciais. Alguns exemplos desses ativadores alternativos são: resíduo de vidro + NaOH (TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2015); cinza de casca de arroz + NaOH (ABDULKAREEM *et al.*, 2021; KAMSEU *et al.*, 2017); resíduo de vidro + NaOH

(ABDULKAREEM *et al.*, 2021), e solução alcalina reciclada oriunda da indústria de transformação de alumínio (CRISTELO *et al.*, 2021; GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2020).

2.4 USO DE RESÍDUOS EM LIGANTES ÁLCALI-ATIVADOS

Os ligantes álcali-ativados vêm recebendo crescente atenção por possibilitarem substancial reaproveitamento e reciclagem de resíduos e subprodutos industriais (ABDOLLAHNEJAD *et al.*, 2019; ABDULKAREEM *et al.*, 2021), e conseqüentemente contribuírem para redução de impactos associados ao descarte de resíduos. Neste cenário, é importante que tais materiais precursores sejam altamente disponíveis, minimizando custos de transporte, bem como emissões de poluentes atmosféricos (ABDULKAREEM *et al.*, 2021). Segundo Abdulkareem, Havukainen e Nuortila-Jokinen (2021), um dos aspectos à serem melhorados refere-se a uma abordagem padronizada para os cimentos alternativos, quando comparado ao cimento Portland.

Além dos precursores tradicionais (metacaulim, cinzas volantes e escória de alto forno), diversos resíduos vem sendo usados para produzir ligantes álcali-ativados, tais como: resíduo de vidro (BILONDI; MOHSEN; TOUFIGH, 2018; CHEN; CHEN; HUANG, 2017); cinzas da incineração de resíduos municipais (ALMALKAWI; BALCHANDRA; SOROUSHIAN, 2019); vidro de soda-cal (MARTINEZ-LOPEZ; ESCALANTE-GARCIA, 2016; SAMARAKOON; RANJITH; SILVA, 2020); rejeitos da mineração (OBENAU-EMLER; FALAH; ILLIKAINEN, 2020; PERUMAL *et al.*, 2020); resíduo cerâmico (ABDOLLAHNEJAD *et al.*, 2018, 2019); resíduo de carboneto de cálcio (BILONDI; MOHSEN; TOUFIGH, 2018); cinzas da biomassa de óleo de palma (HOSSAIN *et al.*, 2020); cinza de casca de arroz (ALMALKAWI; BALCHANDRA; SOROUSHIAN, 2019; FERREIRA *et al.*, 2023; HOSSAIN *et al.*, 2020); cinza de bagaço de cana-de-açúcar (BRUSCHI *et al.*, 2021a; CASTALDELLI *et al.*, 2016); cal de carbureto (BRUSCHI *et al.*, 2021a; PEREIRA DOS SANTOS *et al.*, 2022), dentre outros.

Considerando que, valorizar resíduos que não apresentam interesse econômico é um dos principais mecanismos de incentivo a tecnologia de ligantes álcali-ativados, pode-se destacar dois resíduos com características interessantes para a ativação alcalina, gerados em grandes quantidades e não possuem valor agregado: cinza de bagaço de cana-de-açúcar e casca de ovo.

2.4.1 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais cultivadas em mais de 110 países, em torno de 2 bilhões de toneladas anualmente, sendo os maiores produtores: Brasil, Índia, Tailândia e China respectivamente (FAOSTAT, 2021). No Brasil foram produzidas aproximadamente 579 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2021/2022, colhidas principalmente nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Goiás (CONAB, 2022a).

No processamento da cana-de-açúcar, a indústria sucroalcooleira (produtora de açúcar, álcool e outros derivados) gera seu primeiro subproduto, o bagaço da cana-de-açúcar, o qual é empregado como combustível em caldeiras (SULTANA; RAHMAN, 2013). Estas por sua vez, geram vapor d'água, auxiliando na produção de açúcar e etanol e em processos de cogeração de energia (GOPINATH *et al.*, 2018), tornando as usinas autossustentáveis energeticamente, e em alguns casos, detentoras de energia para venda (CONAB, 2019). Segundo a CONAB (2019), a biomassa da cana (bagaço) pelletizada é um dos *commodities* para atender a economia de baixo carbono. Nas caldeiras industriais, após a queima do bagaço de cana-de-açúcar tem-se a geração do resíduo agroindustrial: cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA).

Globalmente, estima-se uma geração de 99 milhões de toneladas de CBCA (JAGADESH; MURTHY; MURUGESAN, 2020; SEBASTIN *et al.*, 2020). A partir da produção de 579 milhões de toneladas de cana-de-açúcar no Brasil (CONAB, 2022a), e considerando que o processamento de 1 tonelada de cana-de-açúcar gere 8,76 kg de CBCA, sendo todo bagaço queimado em caldeiras (GARCIA; SPERLING, 2017), pode-se estimar que 5,1 milhões de toneladas do resíduo são geradas anualmente. A CBCA normalmente tem três diferentes destinos: (i) uso como fertilizante em lavouras, porém, o resíduo não apresenta nutrientes minerais apropriados (SALES; LIMA, 2010); (ii) descarte em aterros industriais (XU *et al.*, 2019b) ou (iii) em áreas a céu aberto (onde inclui solos sem impermeabilização) (AKRAM; MEMON; OBAID, 2009; MAZA-IGNACIO *et al.*, 2020).

A CBCA é uma importante fonte de aluminossilicatos: 60 a 85% da sua constituição química é óxidos de sílica e alumínio (BERENQUER *et al.*, 2020; CASTALDELLI *et al.*, 2016; SULTANA; RAHMAN, 2013; XU *et al.*, 2019b) e aproximadamente 62 a 78% corresponde a fase amorfa (BERENQUER *et al.*, 2020; MAZA-IGNACIO *et al.*, 2020). A formação de expressivas quantidades de sílica amorfa nessa cinza é dependente do processo de calcinação do bagaço em temperaturas entre 600 a 700°C (QUEDOU; WIRQUIN; BOKHOREE, 2021).

A composição mineralógica da CBCA geralmente apresenta quartzo (SiO_2), microclínio (KAlSi_3O_8) e cristobalita (BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015; BERENGUER *et al.*, 2020; SULTANA; RAHMAN, 2013). Distintas amostras da cinza apresentaram área superficial específica e densidade relativa variando entre 0,45-0,65 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ e 1,91-2,72 respectivamente (BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015; BERENGUER *et al.*, 2020). Em função das suas propriedades, a CBCA é considerada um material pozolânico (BERENGUER *et al.*, 2020).

Segundo Payá *et al.* (2017), a CBCA apresenta grande potencial para uso em melhoramentos de solos e desenvolvimento de novos materiais na construção civil. Estudos observaram resultados satisfatórios na aplicação da cinza em: telhas (substitutivo da argila-20%) (SOUZA *et al.*, 2011); solos expansivos (estabilizador, 25% de CBCA + cal) (HASAN *et al.*, 2016); pisos cerâmicos (substitutivo de quartzo-2,5%) (SCHETTINO; HOLANDA, 2015); tijolos (substitutivo da argila em 20%) (FARIA; GURGEL; HOLANDA, 2012; MAZA-IGNACIO *et al.*, 2020), e concreto como substituto da areia em 20-30% (MORETTI; NUNES; SALES, 2018; SALES; LIMA, 2010) e de cimento Portland (AMIN *et al.*, 2022; LOGANAYAGAN; MOHAN; DHIVYABHARATHI, 2021; QUEDOU; WIRQUIN; BOKHOREE, 2021).

Entretanto, é importante observar que o uso de CBCA como material pozolânico limita-se a 10-35% na substituição de matérias primas tradicionais em materiais de construção. Tal limitação também pode estar associada ao fato da cinza não ser um material com propriedades padronizadas. Distintas temperaturas de queima do bagaço de cana-de-açúcar origina cinzas com propriedades variáveis, como: áreas superficiais e pesos específicos em função da presença de partículas de carbono (leves, porosas ou fibrosas), composições químicas, graus de amorficidade e morfologias (BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015; XU *et al.*, 2019b).

Visando o “desenvolvimento sustentável” associado a redução do consumo do cimento tradicional, pesquisas vem sendo realizadas para produzir ligantes alternativos que minimizem o consumo de energia e de recursos naturais, bem como a emissão de CO_2 . O desenvolvimento de ligantes por meio da ativação alcalina de fontes de aluminossilicatos (como a CBCA) é uma opção muito interessante para alcançar o objetivo supracitado (PEREIRA *et al.*, 2015).

Na literatura, ainda há poucos estudos que exploram o uso de CBCA como um precursor na ativação alcalina. Pesquisas analisaram: CBCA com escória de alto forno (CASTALDELLI *et al.*, 2013; PEREIRA *et al.*, 2015) e CBCA e cinzas volantes (CASTALDELLI *et al.*, 2016) para produção de ligantes e argamassas álcali-ativadas, e CBCA e cal de carbureto (BRUSCHI *et al.*, 2021a) em ligante álcali-ativado para estabilização de rejeito de bauxita e rejeito de

mineração de ouro (PEREIRA DOS SANTOS *et al.*, 2022). Em geral, materiais álcali-ativados contendo CBCA apresentaram boa resistência mecânica e durabilidade.

2.4.2 Resíduo de casca de ovo

Em função do aumento da população mundial e a necessidade de produzir mais alimentos para suprir a demanda, tem-se observado uma grande produção e consumo de ovos de galinha (WAHEED *et al.*, 2019). Maior produtor mundial de ovos, a China produziu cerca de 478 bilhões de unidades em 2018. Já o Brasil (quinto colocado no ranking), produziu cerca de 53 bilhões de ovos (FAOSTAT, 2020). Além do consumo de ovos diretamente nas residências, diversos setores da indústria utilizam ovos como matéria prima em produtos, tais como: alimentos industrializados; suplementos alimentares para humanos e animais, e ovos pasteurizados. Essa grande diversidade amplia ainda mais o consumo de ovos e a geração de resíduo de casca de ovo (FERRAZ *et al.*, 2018; WAHEED *et al.*, 2019).

Estima-se que 4,91 milhões de toneladas de resíduo de casca de ovo foram geradas mundialmente em 2018, sendo 278.250 toneladas no Brasil (ARAÚJO *et al.*, 2021a). Este resíduo é geralmente disposto em aterros sanitários (FERRAZ *et al.*, 2018), tornando-se uma fonte de poluição (liberação de gás metano) (GAO; XU, 2012; OLIVEIRA; BENELLI; AMANTE, 2013) e um problema de saúde humana, pois a biodegradação da casca de ovo promove crescimento microbiano e pode atrair animais transmissores de doenças (e.g. ratos e mosquitos) (FERRAZ *et al.*, 2018; YADAV *et al.*, 2021).

O resíduo de casca de ovo representa um rica fonte de carbonato de cálcio (CaCO_3) e pode ser utilizado como substituto do calcário para a produção de cal (SALDANHA *et al.*, 2021). A reciclagem da casca de ovo em agentes químicos estabilizadores responsável por transformar o resíduo em um produto de valor agregado (FERRAZ *et al.*, 2018), bem como contribui para a redução de impactos ambientais relacionados a extração mineral (e.g. extração e processamento do calcário) (SALDANHA *et al.*, 2021) e problemas ambientais e sociais e custos associados a disposição em aterros sanitários (FERRAZ *et al.*, 2018; PRASAD *et al.*, 2016).

Nos últimos anos, esforços vem sendo realizados para valorização do resíduo. Casca de ovo e produtos reciclados vem sendo estudados em aplicações de engenharia, tais como: cal de casca de ovo (CCO) + pó de *tuffeau* (tipo de calcário, França) (BECK *et al.*, 2010), e pó de casca de

ovo para produção de argamassas (JABER; MAHDI; HASSAN, 2020; PLYIA; CREE, 2015); geopolímeros de pó de casca de ovo (60% CaO) + cinzas volantes em pavimentos (SHEKHAWAT; SHARMA; MARTAND, 2019, 2020); pó de casca de ovo + cal (ANOOP *et al.*, 2017), CCO + escória de alto forno (BENSAIFI *et al.*, 2019), e CCO + resíduo de vidro (CONSOLI *et al.*, 2020a; SALDANHA *et al.*, 2021) para estabilização de solos, e pó de nano casca de ovo + CBCA como substituto parcial de cimento em concreto (AMIN *et al.*, 2022).

O resíduo ao ser reciclado em cal de casca de ovo (CCO) torna-se uma excelente fonte de cálcio amorfo. Isso porque, o carbonato de cálcio, principal constituinte mineral da casca de ovo, é convertido em óxido de cálcio após processo de calcinação (~1000°C) (BARROS *et al.*, 2017). Estudos verificaram que cal virgem de casca de ovo e cal de casca de ovo hidratada (CCOH) apresentam teores de CaO de 92-94% e 72-77% respectivamente (BECK *et al.*, 2010; CONSOLI *et al.*, 2020a; FERRAZ *et al.*, 2018). Tais teores são superiores aos da cal calcítica (56%) (SAMPAIO; ALMEIDA, 2005) e cal dolomítica (33%) (SOUZA; BRAGANA, 2013). Além disso, após uma ACV, Saldanha *et al.* (2021) e Tonini de Araújo *et al.* (2021) verificaram que a produção de cal de casca de ovo causa menos impactos ambientais do que a produção de cal dolomítica, em função de evitar a extração e o beneficiamento de calcário.

A casca de ovo é uma rica fonte de cálcio ainda pouco explorada na técnica de ativação alcalina (ADESANYA *et al.*, 2021), principalmente a CCO na produção de ligantes álcali-ativados. A composição química da CCO é uma excelente fonte de CaO para uso em sistemas de alto teor de cálcio ou híbridos. Recentemente a CCO foi utilizada em sistemas álcali-ativados a base de resíduo de vidro (ACOSTA, 2021) e cinza de casca de arroz (FERREIRA *et al.*, 2023).

2.5 ATIVAÇÃO ALCALINA APLICADA EM ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização química introduz materiais cimentantes em solos para o melhoramento de propriedades de engenharia como resistência e durabilidade. Há muito tempo, cimento Portland e cal vêm sendo utilizados como ligantes, sendo o primeiro, o mais favorável para rápidos ganhos de resistência. As moléculas de água presentes no solo reagem com os silicatos/aluminatos de cálcio do ligante, formando os géis: silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H). Todavia, esses agentes cimentantes estão associados a aspectos negativos como consumo de recursos não-renováveis, custo financeiro e

emissões de gases de efeito estufa. Sendo assim, faz-se necessário desenvolver ligantes alternativos ambientalmente e economicamente sustentáveis (SARGENT, 2015).

Neste cenário, a via tradicional para novos ligantes tem sido a reutilização de resíduos ou subprodutos industriais, especialmente aqueles que são ricos em aluminossilicatos (Tabela 3). O uso de cal como agente alcalino em materiais fontes de aluminossilicatos pode ser considerado o ponto de partida para introdução de cimentos alcalinos na geotecnia, apesar da cal não ser um agente fortemente alcalino e apresentar baixa solubilidade (i.e. restringe a disponibilidade de álcalis e pH do meio), em comparação a ativadores alcalinos utilizados na ativação alcalina (e.g. hidróxidos, silicatos e aluminatos) (CAICEDO, 2020).

Os estudos iniciais remetem a misturas de cinza volante, cimento Portland, bentonita e cal como uma técnica de remediação de solos contaminados (AL-TABBAA; EVANS, 1998, 1999). Trabalhos posteriores avaliaram a estabilização de solos com distintos ligantes: cinza volante + cal de carbureto (CONSOLI *et al.*, 2001); escória de alto forno + gipsita vermelha (pedra de gesso) + cal (HUGHES; GLENDINNING, 2004; HUGHES *et al.*, 2011); escória de alto forno + cinza volante + cal/cimento Portland (WILKINSON; HAQUE; KODIKARA, 2010); cinza volante + cinza de biomassa + cimento Portland (HORPIBULSUK; RACHAN; SUDDEEPPONG, 2011); cinza volante + cinza de biomassa + cal de carbureto (VICHAN; RACHAN, 2013); resíduo de vidro + cinza volante + cal de carbureto (CONSOLI *et al.*, 2019a); resíduo de vidro + cal de carbureto (CONSOLI *et al.*, 2018a, 2021c), etc.

Neste contexto, a introdução de ativadores alcalinos nos resíduos fontes de aluminossilicatos aumenta o pH do meio, possibilitando a ocorrência de reações pozolânicas e ligações cimentantes, maximizando o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos (SARGENT, 2015). Em estabilização de solo mole, Cristelo, Glendinning e Pinto (2011) observaram que a adição de cinza volante álcali-ativada (20-40%) melhorou a resistência à compressão simples (RCS), atingindo 11,4 e 43,4 MPa em 28 e 365 dias respectivamente.

Cristelo *et al.* (2012b) investigaram a influência do teor de cálcio (Ca) nas cinzas volantes para o melhoramento de solos moles. Os autores verificaram que misturas solo-cinza com alto teor de Ca álcali-ativadas (10-20%) atingem maiores resistência a curto prazo (1 semana), enquanto que, a médio-longo prazo (12 semanas), misturas solo-cinza com baixo teor de Ca alcançam resistência superiores a solo-cimento Portland e solo-cal, devido a formação de estruturas 3D. Em estudo similar, Cristelo *et al.* (2013) observaram que, misturas de solo mole com cinza

volante de baixo teor de Ca (>5%) álcali-ativada (20-40%) apresentaram RCS semelhante a solo-cimento Portland em 28 dias, e atingiram 43,4 MPa em 365 dias. Além disso, identificaram o aumento da RCS com a redução da relação teor de álcalis/precursor, mostrando que há uma correlação entre o nível de dissolução, relação ativador/precursor e resistência mecânica. Esta última verificação também foi observada por Cristelo *et al.* (2012), na avaliação do comportamento de um solo residual de granito em mistura com cinza volante álcali-ativada (15-30%). O material estabilizado atingiu RCS próxima a 24 MPa, sob cura de 60° em 7 dias.

No melhoramento das propriedades mecânicas de solo aluvial com ativação alcalina de diversos resíduos industriais, Sargent *et al.* (2013) verificaram que o solo com escória de alto forno álcali-ativada (10%) apresentou melhores resistência e durabilidade, atingindo 6 MPa em 28 dias. Por sua vez, Zhang *et al.* (2013) notaram que solo argiloso estabilizado com ligante álcali-ativado (3-15%) a base de metacaulim resultou na formação de um material com microestrutura mais homogênea e compacta, com ganhos de resistência, principalmente aos 7 dias.

Yi, Li e Liu (2015) identificaram que escória de alto forno ativada com cal de carbureto e Na₂SO₄ foi o ligante álcali-ativado (30%) que promoveu maior ganho de RCS à uma argila marinha, sendo superior ao solo-cimento Portland. O estudo de Yaghoubi *et al.* (2018) mostrou que maiores conteúdos de escória favorecem maiores RCS de mistura de argila marinha com cinza volante-escória álcali-ativada (20%), pois o Ca da escória contribui mais do que Si e Al presentes na cinza. No trabalho de Du *et al.* (2015), misturas de caulim-escória de alto forno álcali-ativada após 120 dias apresentaram RCS superior a de caulim-cimento Portland. Após ciclos de molhagem-secagem, foi observado a redução da RCS e do módulo secante do caulim-ligante álcali-ativado devido ao maior potencial de encolhimento (maior volume de mesoporos) e menor pH do material estabilizado, conduzindo a formação de micro rachaduras.

Já em misturas de caulim com cinza volante (com alto teor de Ca) álcali-ativada (20-50%), Coudert *et al.* (2019) verificaram que o caulim não é reativo, independente do seu conteúdo no sistema, ele não afetou o desenvolvimento das reações e nem os produtos formados. Os autores ainda observaram a formação de fases de cadeias de cálcio-silício mais estáveis do que os hidratos de cálcio-alumínio encontrados em sistema contendo cal, sugerindo maior estabilidade do material a longo prazo. Entretanto, a formação de thernadita (i.e. um sal altamente solúvel em água) sugere a necessidade de investigações sobre a durabilidade do material estabilizado.

Na estabilização de solo argiloso com misturas de escória de alto forno/cinza volante álcali-ativadas (4-20%), Singhi, Laskar e Ahmed (2016) identificaram que a utilização de cinza

volante como precursor resulta em menores RCS, quando comparado ao uso de escória, sob cura a temperatura ambiente. Na mistura solo-escória álcali-ativada, o conteúdo de precursor é o fator que mais afeta a resistência (ganhos expressivos com teor acima de 8%), além das relações Na/Al e Si/Al que governam a cinética das reações. Já Du *et al.* (2017) verificaram que a aplicação de escória de alto forno ativada por Na_2SiO_3 e cal de carbureto promoveu o melhoramento da RCS e permeabilidade do material de forma superior ao cimento Portland, em solo argiloso. A adição do ligante resultou na maior presença de produtos de hidratação, preenchendo os vazios do solo e contribuindo para o ganho de resistência.

Pourakbar *et al.* (2017) avaliaram a estabilização de solo argiloso com cinza de bagaço de óleo de palma (CBOP) álcali-ativada (20%) e microfibras de volastonita (i.e. metassilicato natural de cálcio), tendo observado melhoria na resistência mecânica, alterando o material de frágil para mais dúctil, com a adição de fibras. O mesmo material precursor foi avaliado no estudo de Abdeldjouad *et al.* (2019) para estabilização de solos argilosos, investigando a influência do teor de argila na RCS solos com CBOP álcali-ativada (20%). Os autores verificaram que os minerais de argila presentes no solo influenciam o comportamento mecânico das misturas, em que as contendo maior teor de caulinita alcançaram maiores resistência em 28 dias.

Em aplicação de 15% cinza vulcânica álcali-ativada em solo argiloso, Ghadir e Ranjbar (2018) verificaram o aumento da RCS de 2 para 12 MPa em condições secas (15% umidade relativa, 40°C), enquanto que, o melhoramento com cimento Portland é favorecido sob condições úmidas (85% umidade relativa, 25°C), devido a função da água e do pH na cinética de reações da ativação alcalina e na hidratação do cimento. Além disso, observaram que o aumento da molaridade da solução de NaOH (4-12 M) resulta na maior dissolução de aluminossilicatos e formação de géis, e conseqüentemente em maiores ganhos de RCS da mistura solo-ligante. Já em misturas de solo argiloso com cinza volante álcali-ativada, Araújo *et al.* (2020) verificaram que a formação dos géis cimentantes ocorre em idade precoce, e entre 28 a 90 dias de cura, o desenvolvimento do gel deve-se a sua cristalização, refletindo no incremento da resistência.

No trabalho de Rivera *et al.* (2020), um solo argiloso tratado com 30% de cinza volante, escória de alto forno e cal hidratada apresentou variações de volume e perda de massa ligeiramente inferiores ao solo-cimento Portland, após ciclos de molhagem-secagem. Já no solo argiloso com escória de alto forno álcali-ativada com distintos ativadores alcalinos, Fasihnikoutalab *et al.* (2020) observaram que a adição de NaOH à Mg_2SiO_4 (forsterite, mineral rico em magnésio)

promoveu a maior dissolução de Ca e Mg presentes na escória e na forsterite, originando misturas de géis C-S-H e M-S-H (silicato de magnésio hidratado).

O melhoramento de solos expansivos com a técnica de ativação alcalina é recente e ainda há poucos trabalhos na literatura. Miao *et al.* (2017) utilizaram cinza vulcânica álcali-ativada (10%) para estabilizar um solo expansivo. O ligante contendo KAO promoveu melhoramento expressivo das propriedades mecânicas: redução do índice de plasticidade em mais de 50%; redução da porcentagem de expansão (15,7% para 2,3%), e atingiu uma RCS de 16,6 MPa em 90 dias. Os autores identificaram os seguintes estágios: solo dilatado na presença da solução alcalina; policondensação e redução volumétrica irreversível, e solidificação associada as interações físicas e ligações químicas de Si-O-Si(Al) ou Al-O-Al(Si).

Mazhar, Guharay e Kar (2020) investigaram a estabilização de um solo argiloso expansivo usando uma ligante álcali-ativado (LAA) a base de cinzas volantes. As misturas solo-LAA apresentaram expressiva melhorias nas propriedades geotécnicas, especialmente em termo de Índice de suporte Califórnia e resistência à compressão simples. Além disso, constatou-se que a redução da expansão e do índice de plasticidade está associada a densidade de intertravamento, alterações morfológicas e formação de compostos cimentícios.

Samuel, Puppala e Radovic (2020) avaliaram o melhoramento de um solo expansivo com o uso de geopolímero a base de metacaulim. Foram verificadas melhorias na RCS e alteração de volume, conforme acréscimo na dosagem (4-15% geopolímero) e no tempo de cura (0-28 dias). O comportamento de expansão e retração do solo expansivo foi reduzido expressivamente com a adição do geopolímero, de 80-95% e 50-90% respectivamente. Os autores recomendaram o uso de 10% do geopolímero para melhoramento do solo de alta plasticidade. A determinação o índice de sustentabilidade mostrou que o tratamento do solo com geopolímero é uma alternativa mais sustentável em relação ao tratamento com uso de cal.

Por sua vez, Nagaraju, Sunil e Chaudhary (2021) investigaram o comportamento de expansão e microestrutura de um solo expansivo tratado com 0-20% de geopolímero a base de escória de alto forno. Verificou-se que o aumento do conteúdo de geopolímero melhora o potencial de expansão do solo, reduzindo de 9,2 a 6,6%, com a adição de 20% do agente cimentante. Este comportamento foi explicado devido a formação de gel C-S-H, e conseqüentemente, de um material com uma matriz mais densa, como revelado por análises de MEV.

A ativação alcalina aplicada a estabilização de solos arenosos também é uma temática ainda pouco explorada. Na investigação do comportamento mecânico de uma areia siltosa

estabilizada com cinza volante álcali-ativada (18 e 33%), Rios *et al.* (2017) notaram um aumento expressivo da rigidez do material com o tempo de cura, quase dobrando de 28 para 90 dias. No trabalho de Caicedo (2020), a adição de um ligante álcali-ativado de pó cerâmico e cal de carbureto (18 e 54%) promoveu o melhoramento das propriedades mecânicas de um solo arenoso. Porosidade, conteúdo de ligante e a interação entre eles são os fatores que mais afetaram o comportamento das misturas solo-ligante. Foram alcançadas RCS de 6,44 e 11,08 MPa em 7 e 28 dias respectivamente. RCS, rigidez e durabilidade das misturas solo-ligante foram satisfatoriamente correlacionadas com o índice $\eta/B_{iv}^{0,28}$.

Ao investigarem o comportamento geomecânico de uma argila mole estabilizado com escória de alto forno álcali-ativada (7,5%), Corrêa-Silva *et al.* (2020) observaram a maximização da resistência ao cisalhamento e rigidez do solo-ligante álcali-ativado e um comportamento tensão-deformação a solos artificialmente cimentados com CPO. Análises microestruturais indicaram a presença de gel C-A-S-H nas misturas de 28 dias, justificando a expressiva melhora na resistência e rigidez nesse período. Resultados de ensaio de lixiviação demonstraram que a presença da escória, na mistura, não representa risco de contaminação ambiental.

O estudo de Cristelo *et al.* (2021) destaca-se pela estabilização de uma argila com adição de ligante álcali-ativado (20 e 30%) oriundo exclusivamente de resíduos. Cinza volante e resíduo de vidro foram usados como precursores, enquanto que, uma solução alcalina reciclada da extrusão de alumínio foi utilizada como ativador alcalino. Distintos cimentos alcalinos foram avaliados variando as relações cinza volante-resíduo de vidro (100/00, 75/25, 50/50, 25/75 e 00/100) e ativador/precursor (0,4-0,85). Resultados revelaram que o aumento na relação cinza/vidro e redução do ativador/precursor melhoram a RCS (>11 MPa, 28 dias), como também observado na rigidez. A avaliação da durabilidade em distintas soluções (pH 4, 7 e 10) revelou que o material solo-ligante sofre maior deterioração no ambiente ácido. Testes de lixiviação mostraram que Pb e Zn presentes no resíduo não representam riscos de contaminação.

Por sua vez, Consoli *et al.* (2021c) avaliaram a estabilização de areia de Osório com um ligante oriundo de cal de carbureto, resíduo de vidro moído e solução de NaOH, comparativamente a aplicação da cal e pozolana sem ativador alcalino. A adição NaOH (3M) apresentou efeito positivo sobre o comportamento mecânico das misturas areia-ligante, com aumentos de 30% na RCS e rigidez e 240% na durabilidade. As respostas mecânicas das misturas foram satisfatoriamente correlacionadas com o índice $\eta/B_{iv}^{0,28}$. O melhor comportamento foi

observado nas misturas que apresentaram a coexistência dos géis C-S-H e (C,N)-S-H (i.e. cimento híbrido) em suas matrizes. Tais géis desenvolveram-se em maior presença quando comparado ao gel resultante de reações pozolânicas, nas misturas sem a presença de NaOH.

Recentemente Tonini de Araújo *et al.* (2023) investigaram a estabilização de solo argiloso com ligante álcali-ativado a base de CBCA e CCOH. Constatou-se que menor porosidade e maior teor de ligante (i.e. menor índice $\eta/B_{iv}^{0,28}$) resultou em maior resistência, rigidez e durabilidade. Os fatores mais influentes no comportamento mecânico do solo-ligante foram peso específico aparente seco, teor de ligante e temperatura de cura. Também foram observadas a formação de fases minerais com estruturas semelhantes a géis cimentantes C-S-H e (C,N)-A-S-H.

O uso de ligantes álcali-ativados também vem sendo explorado para estabilização de rejeitos da mineração, tais como: rejeito de mineração de bauxita (BRUSCHI *et al.*, 2021a, 2021c, 2022); rejeito de mineração de ouro (PEREIRA DOS SANTOS, 2021; PEREIRA DOS SANTOS *et al.*, 2022), e rejeito de mineração de ferro (SERVI *et al.*, 2022). A estabilização dos rejeitos de mineração de bauxita e de ouro foi realizada com um ligante álcali-ativado a base de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, comparativamente ao uso de cimento Portland, sendo estudados o comportamento mecânico e lixiviação. Servi *et al.* (2022) investigaram o comportamento mecânico de rejeito de mineração de ferro estabilizado com cimento Portland e com cimento álcali-ativado (oriundo de cinza de casca de arroz e cal de carbureto), com uso potencial em métodos alternativos de disposição final.

A Tabela 4 sintetiza os estudos relacionados a estabilização de solos mediante ativação alcalina. Em sua maioria, a técnica tem sido explorada em solos argilosos, enquanto que, pesquisas em solos expansivos, arenosos e rejeitos de mineração são emergentes. Os precursores mais explorados são as cinzas volantes e escória de alto forno, e como ativadores alcalinos, hidróxidos e silicatos. Outros resíduos industriais como vidro moído, cinza de biomassa de óleo de palma (CBOP), pó cerâmico, CCA e CBCA vêm sendo explorados como materiais precursores. Além disso, identificam-se duas linhas de investigações complementares: avaliação do comportamento mecânico e avaliações de mineralogia e microestrutura dos solos estabilizados. Recentemente, a lixiviação de contaminantes presentes nos resíduos industriais tornou-se uma avaliação de interesse. Contudo, as combinações entre distintos precursores e ativadores alcalinos resultam em sistemas com grande número de variáveis envolvidas (e.g. teor de precursores, concentração do ativador alcalino, relação precursor/ativador; teor de umidade,

condições de cura, etc.). Os produtos resultantes destes sistemas também são objetos para investigações quanto as suas composições químicas e microestruturais.

Tabela 4 – Pesquisas relacionadas a ligantes álcali-ativados para estabilização de solos.

Solo	Precursor	Ativador	Avaliações	Referência
Argiloso	CV	NaOH + Na ₂ SiO ₃	RCS	Cristelo, Glendinning e Pinto (2011)
Argiloso	CV	NaOH + Na ₂ SiO ₃	RCS, DRX e MEV-EDS	Cristelo <i>et al.</i> (2012b)
Areia siltosa	CV	NaOH/NaCl	RCS e MEV-EDS	Cristelo <i>et al.</i> (2012)
Argila arenosa	CV	NaOH	RCS e DRX	Cristelo <i>et al.</i> (2013)
Aluvial	EAF, CV e gipsita vermelha	NaOH + Na ₂ SiO ₃	RCS, Durabilidade e DRX	Sargent <i>et al.</i> (2013)
Argiloso	Metacaulim	NaOH + Na ₂ SiO ₃	RCS, DRX e MEV	Zhang <i>et al.</i> (2013)
Argila marinha	EAF	NaOH/Na ₂ CO ₃ /Na ₂ SO ₄ -cal de carbureto	RCS, DRX, MEV e PIM	Yi, Li e Liu (2015)
Argiloso	EAF	MgO (magnésia reativa)	RCS e Durabilidade	Du <i>et al.</i> (2015)
Argiloso	EAF e CV	NaOH	RCS	Singhi, Laskar e Ahmed (2016)
Argiloso	EAF	Na ₂ SiO ₃ + CC	RCS, Condutividade hidráulica, MEV, PIM e Termogravimetria	Du <i>et al.</i> (2017)
Argiloso	CBOP	NaOH/KAO	RCS, DRX MEV-EDS	Pourakbar <i>et al.</i> (2017)
Expansivo	CV	Ca(OH) ₂ /KAO	RCS, DRX, MEV, Expansão e Lixiviação	Miao <i>et al.</i> (2017)
Areia siltosa	CV	NaOH + Na ₂ SiO ₃	RCS e Rigidez	Rios <i>et al.</i> (2017)
Argila marinha	CV e EAF	NaOH + KAO	RCS e MEV-EDS	Yaghoubi <i>et al.</i> (2018)
Argiloso	Cinza vulcânica	NaOH	RCS, DRX e MEV	Ghadir e Ranjbar (2018)
Argiloso	CBOP	KAO	RCS, DRX e MEV	Abdeldjoud <i>et al.</i> (2019)
Argiloso	CV	Na ₂ SiO ₃	DRX, Termogravimetria, FTIR, Espectroscopia RMN, MEV	Coudert <i>et al.</i> (2019)
Argiloso	CV	NaOH + Na ₂ SiO ₃	Triaxial	Araújo <i>et al.</i> (2020)
Argiloso	EAF e CV	NaOH + Na ₂ SiO ₃	Resistência e Durabilidade	Rivera <i>et al.</i> (2020)

*CV: Cinza volante; EAF: Escória de alto forno; RVM: Resíduo de vidro moído; RPC: Resíduo de pó cerâmico; CC: Cal de carbureto; CBCA: Cinza de bagaço de cana-de-açúcar; CCA: Cinza de casca de arroz; RCS: Resistência à compressão simples; RCD: Resistência à tração por compressão diametral; DRX: Difração de raios-X; MEV: Microscopia eletrônica de varredura; EDS: Espectroscopia por energia dispersiva; FTIR: Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier; RMN: Ressonância magnética nuclear; PIM: Porosimetria por intrusão de mercúrio

Resíduo de areia de fundição estabilizado com ligante álcali-ativado de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo: Desempenho mecânico, microestrutura, lixiviação e sustentabilidade

Tabela 4 – Pesquisas relacionadas a ligantes álcali-ativados para estabilização de solos (continuação).

Solo	Precursor	Ativador	Avaliações	Referência
Argiloso	EAF	NaOH + Mg ₂ SiO ₄ (forsterite)	RCS, DRX e MEV-EDS	Fasihnikoutalab <i>et al.</i> (2020)
Expansivo	CV	NaOH + Na ₂ SiO ₃	Limites de Atterberg, RCS, CBR, Expansão, DRX, FTIR, MEV	Mazhar, Guharay e Kar (2020)
Expansivo	Metacaulim	KAO + sílica ativa	RCS, Expansão e Retração	Samuel, Puppala e Radovic (2020)
Arenoso	RPC e cal de carbureto	NaOH	RCS, Rigidez, Durabilidade, DRX e MEV-EDS	Caicedo (2020)
Argiloso	EAF	NaOH	Resistência, Rigidez, MEV-EDS, DRX e Lixiviação	Corrêa-Silva <i>et al.</i> (2020)
Expansivo	EAF	NaOH	Expansão e MEV	Nagaraju, Sunil e Chaudhary (2021)
Argiloso	CV e RVM	Solução reciclada da extrusão de Al	RCS, Rigidez, Durabilidade, DRX e Lixiviação	Cristelo <i>et al.</i> (2021)
Arenoso	CC e RVM	NaOH	RCS, Rigidez, Durabilidade, DRX e MEV/EDS	Consoli <i>et al.</i> (2021c)
Rejeito de mineração de bauxita	CBCA e CC	NaOH	RCS, RCD, Rigidez e Durabilidade	Bruschi <i>et al.</i> (2021a, 2021b)
Rejeito de mineração de bauxita	CBCA e CC	NaOH	Lixiviação	Bruschi <i>et al.</i> (2022)
Rejeito de mineração de ouro	CBCA e CC	NaOH	RCS, RCD, Rigidez, Durabilidade e Lixiviação	Pereira dos Santos (2021); Pereira dos Santos <i>et al.</i> (2022)
Rejeito de mineração de ferro	CCA e CC	NaOH + Na ₂ SiO ₃	RCS, RCD, Durabilidade e MEV/EDS	Servi <i>et al.</i> (2022)
Solo argiloso	CBCA e CCOH	NaOH	RCS, RCD, Rigidez, Durabilidade, Expansão, DRX, MEV/EDS	Tonini de Araújo <i>et al.</i> , (2023)

*CV: Cinza volante; EAF: Escória de alto forno; RVM: Resíduo de vidro moído; RPC: Resíduo de pó cerâmico; CC: Cal de carbureto; CBCA: Cinza de bagaço de cana-de-açúcar; CCA: Cinza de casca de arroz; RCS: Resistência à compressão simples; RCD: Resistência à tração por compressão diametral; DRX: Difração de raios-X; MEV: Microscopia eletrônica de varredura; EDS: Espectroscopia por energia dispersiva; FTIR: Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier; RMN: Ressonância magnética nuclear; PIM: Porosimetria por intrusão de mercúrio; CBR: *California Bearing Ratio*

2.6 LIXIVIAÇÃO DE METAIS EM MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS

Determinar se o material álcali-ativado representa riscos ambientais por meio da lixiviação de metais vem tornando-se um fator fundamental na avaliação de viabilidade técnica do material que incorpora resíduos. A análise de lixiviação em materiais álcali-ativados vem sendo realizada por métodos distintos, não havendo uma normativa padronizada internacionalmente para esta finalidade específica. Os ensaios de lixiviação utilizados estão descritos por: método

1311 (USEPA, 1992); método 1312 (USEPA, 1994); EN12457 (NEN, 2002); HJ/T 299 (HJ, 2007a); HJ/T 300 (HJ, 2007b); D4874 (ASTM, 2014); CEN/TS 14429 (ES, 2015a); EN 14997 (ES, 2015b), e os métodos propostos por Bruschi *et al.* (2022) e Shagñay *et al.* (2023).

Nos extratos lixiviados são determinadas as concentrações de metais e comparadas aos limites máximos estabelecidos por diversas normas e respectivos fins, tais como: EPA-F-94-001 (USEPA, 1999) - qualidade de água potável; Lista holandesa (VROM, 2000) - qualidade de água subterrânea; Decisão do Conselho 2003/33/CE (COUNCIL, 2003) - resíduos inertes e não-perigosos; Decreto Holandês (RIJKS WATERSTAAT ENVIRONMENT, 2007) - materiais de construção no solo; IWRG 631 (USEPA, 2009) - resíduo sólido inerte; CONAMA 460 (CONAMA, 2013) - qualidade do solo; FINLEX (2017) - resíduo reaproveitado em construções de terra, e USEPA (2020) - qualidade de água potável.

Na literatura há diversos estudos publicados recentemente sobre a lixiviação de metais em materiais álcali-ativados de forma complementar a avaliação de desempenho mecânico ou focados essencialmente no desempenho ambiental. Na sequência são abordados alguns destes estudos com a finalidade de expor distintos materiais da categoria e métodos de ensaio de lixiviação, bem como os principais resultados. Neste contexto, Hoy *et al.* (2016) avaliaram a lixiviação de metais de um geopolímero de material asfáltico fresado (RAP)-cinzas volantes por meio do ensaio TCLP (*Toxicity characteristic leaching procedure*) – método 1311, regulamentado pelo órgão ambiental americano (USEPA). A finalidade deste ensaio é avaliar a periculosidade de um resíduo sólido e as especificações do método são muito similares as da NBR 10004 (ABNT, 2004a) (classificação de resíduo sólido). Verificou-se que as concentrações dos metais (As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg, Se e Ag) não ultrapassaram os limites máximos estabelecidos por normativas internacionais [EPA-F-94-001 (USEPA, 1999), IWRG 631 (USEPA, 2009)], demonstrando que o geopolímero não apresenta riscos ambientais para aplicação em bases de pavimentos. Por meio do ensaio TCLP, Wang *et al.* (2018) identificaram que a escória de ferro-níquel após álcali-ativação apresentou redução expressiva na lixiviação de Mg e Cr, transformando o resíduo perigoso em um material de construção não-tóxico.

Keulen, Zomeren e Dijkstra (2018) avaliaram a lixiviação de metais de escória-cinza volantes ativadas alcalinamente, em estado monolítico (blocos de concreto) e granular, utilizando as normas EN7375 (NEN, 2004) e EN 14997 (ES, 2015b), respectivamente. Aplicado no concreto, o material álcali-ativado lixivia metais dentro da faixa de concentrações verificadas no concreto

com cimento Portland tradicional, a qual é inferior aos limites regulatórios EN7375 (NEN, 2004). Segundo os autores, escória-cinzas volante álcali-ativadas atendem os limites de lixiviação holandeses para aplicação em materiais de construção granulares, quando o ligante apresenta até 30% de cinzas em sua composição. Ainda, as concentrações de As, Mo, Se, V e Cr lixiviadas do sistema álcali-ativado estão compreendidas dentro da faixa observada em misturas de cimento Portland (contendo escória ou cinzas volantes). As concentrações de metais em ambos extratos lixiviados foram inferiores aos limites estabelecidos pelo Decreto Holandês (RIKSWATERSTAAT ENVIRONMENT, 2007) para materiais de construção no solo.

Xu *et al.* (2019a) exploraram a lixiviação de metais de cinzas volantes da incineração de resíduos sólidos municipais ativadas alcalinamente por meio de distintos ensaios “de batelada” (i.e. ensaios de caracterização de resíduos). Foram utilizados ensaios descritos pelas seguintes normativas: HJ/T 299 (HJ, 2007a) e HJ/T 300 (HJ, 2007b) (normas chinesas que diferenciam pela solução ácida utilizada); método 1311 (USEPA, 1992) (ensaio TCLP); método 1312 (USEPA, 1994) (simula ambiente de chuva ácida) e CEN/TS 14429 (ES, 2015a) (avalia a influência do pH na lixiviação de resíduos sólidos por meio da adição de ácido ou base). Os resultados dos quatro primeiros ensaios de lixiviação mostraram que os lixiviados apresentaram valores distintos de pH, que influenciaram diretamente na lixiviação de metais. Por exemplo, ocorreu lixiviação de Cu, Cr e Pb em ambientes ácidos com $\text{pH} < 6$. Os autores sugerem que a norma CEN/TS 14429 (ES, 2015a) é mais abrangente para avaliar o comportamento de lixiviação de metais em ambientes com diferentes condições de pH.

Adediran, Yliniemi e Illikainen (2021) avaliaram a lixiviação de ligantes álcali-ativados de escória faialita granulada (i.e. escória rica em ferro) com base na norma EN12457 (NEN, 2002), a qual regulamenta ensaio de lixiviação para classificação de resíduo. Verificou-se que o ligante álcali-ativado lixiviou metais em concentrações inferiores aos limites máximos estabelecidos para uso em estruturas pavimentadas na Finlândia [Lei 843 (FINLEX, 2017)].

Cristelo *et al.* (2021) investigaram a lixiviação de metais de uma argila estabilizada com ligante álcali-ativado de cinza volante e resíduo de vidro (precursores) e solução alcalina reciclada da extrusão de alumínio (ativador alcalino). O ensaio de lixiviação foi realizado conforme método estabelecido pela EN12457 (NEN, 2002). As concentrações de metais dos extratos lixiviados foram comparadas aos limites estabelecidos pela Decisão do Conselho 2003/33/CE para resíduos inertes e não-perigosos (COUNCIL, 2003). O resultado do teste mostrou que o chumbo (Pb) e o zinco (Zn) presentes no resíduo de vidro não representam riscos de contaminação.

Pereira dos Santos (2021) avaliou a lixiviação de metais de rejeito de mineração de ouro estabilizado com ligante álcali-ativado (oriundo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto) por meio de ensaio em equipamento de coluna [D4874 (ASTM, 2014)]. A autora constatou que a matriz rejeito-ligante encapsulou metais satisfatoriamente (e.g. Al, Mn, Ba, Cd, Cu, Cr e Zn) perante os limites estabelecidos por normas internacionais [(VROM, 2000), (CONAMA, 2013) e USEPA (2020)]. Ainda, o ligante álcali-ativado mostrou-se mais eficiente para encapsulamento de metais do que o cimento Portland na mistura com rejeito de ouro.

Bruschi *et al.* (2022) investigaram a lixiviação de rejeito de bauxita estabilizado com ligante álcali-ativado oriundo de resíduos (cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto) por meio de uma adaptação do ensaio de durabilidade [D559 (ASTM, 2015)] com base na NEM7375 (NEN, 2004). Esta última norma regulamenta o ensaio de lixiviação de contaminantes de materiais monolíticos imersos em água desmineralizada. A adaptação consistiu em imergir os corpos de prova em água destilada ao longo do ensaio de durabilidade (ciclos de molhagem-secagem) e após cada ciclo de molhagem foi feita a amostragem do líquido. Os autores verificaram que a mistura rejeito-ligante álcali-ativado demonstrou boa capacidade de encapsulamento de Al, Cr e Se perante limites de qualidade de águas.

Recentemente Shagñay *et al.* (2023) avaliaram a lixiviação de pastas álcali-ativadas (escória de alto forno+Na₂SO₄) por meio da imersão de amostras de 3cm em solução 6M NH₄NO₃ (catalisador da cinética de lixiviação) durante 28 dias, com base em Garcia-Lodeiro *et al.* (2021). Os autores verificaram que materiais álcali-ativados apresentaram maior resistência a descalcificação em relação ao cimento Portland, devido à ausência de portlandita e alto grau de polimerização das cadeias de silicatos. Íons K⁺ e Na⁺ atingiram a máxima concentração em solução após uma semana. A lixiviação de Mg ocorreu nas primeiras horas e diminuiu com o aumento do pH do meio ao longo do tempo.

De forma geral, nos trabalhos acima mencionados, os materiais álcali-ativados foram submetidos a ensaios de lixiviação após o período de cura de 7 ou 28 dias. Já o tamanho das partículas do material, solução utilizada e duração do ensaio variaram conforme o método escolhido. Com exceção do ensaio em equipamento de coluna, nos demais, os corpos de prova foram rompidos para atingir tamanho inferior a 3 cm, 9,5 mm, 4 mm ou 1 mm. Como solução extratora foi utilizada água destilada ou solução ácida. Já os períodos de duração dos ensaios variaram de aproximadamente 18h a 28 dias. Para determinação das concentrações de metais

nos extratos líquidos, observou-se um padrão do uso de ICP-OES. Por fim, as concentrações de metais quantificadas foram comparadas com os limites estabelecidos por diversas normas, principalmente por aquelas que regulamentam qualidade das águas.

2.7 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E MELHORAMENTO DE SOLOS

2.7.1 Contextualização e definições gerais

A engenharia geotécnica detém importante responsabilidade sob os impactos ambientais envolvidos em obras de infraestrutura e projetos de construção. Como consequência, a avaliação da sustentabilidade vem se tornando um peça-chave em estudos nesta área (DA ROCHA *et al.*, 2016, 2022). Pesquisas em aplicações de engenharia geotécnica ou geotecnologia voltadas à sustentabilidade estão compreendidas em duas grandes categorias: aquelas que preenchem lacunas relacionadas ao tema (e.g. avanços em uso de materiais alternativos e engenharia inovadora) e aquelas que desenvolvem estruturas e ferramentas de avaliação da sustentabilidade (BASU; MISRA; PUPPALA, 2015; PLATI, 2019).

Conforme o relatório de Brundtland, o desenvolvimento sustentável consiste em um “desenvolvimento que atenda às necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender suas próprias necessidades” (WCED, 1987). Segundo Ness *et al.* (2007), o objetivo da avaliação da sustentabilidade é fornecer uma análise dos sistemas natureza-sociedade integrados, sob perspectiva global para local, aos tomadores de decisão, de modo a auxiliá-los na execução de ações que contribuem para tornar a sociedade sustentável. A sustentabilidade é considerada o principal objetivo político do desenvolvimento futuro da humanidade, bem como do desenvolvimento de produto. Seus três componentes ou três “pilares” são o ambiental, o econômico e o social, e devem ser avaliados e equilibrados para desenvolver um novo produto ou melhor os já existentes (KLOEPFFER, 2008).

As ferramentas de avaliação de sustentabilidade podem ser divididas em três categorias: (i) indicadores/índices; (ii) ferramentas de avaliação integrada e (iii) avaliação relacionada a produto (NESS *et al.*, 2007). Indicadores e índices de sustentabilidade estão recebendo crescente importância como uma importante ferramenta para desenvolvimento de políticas públicas e performance corporativa referente a melhorias ambientais, econômicas e sociais ou tecnológicas. Tais indicadores simplificam, quantificam, analisam e comunicam informações

complexas, possibilitando assim, traduzir fenômenos e apontar tendências (KUMAR *et al.*, 2012). As ferramentas de avaliação integrada são utilizadas para auxiliar tomadas de decisões de políticas de projetos em uma localidade específica, permitindo gerenciar problemas complexos. Nesta categoria, destacam-se como principais ferramentas: análises multicritério; análises de riscos; análises de vulnerabilidade e análises de custo-benefício. Estas são frequentemente aplicadas em problemas ambientais (NESS *et al.*, 2007). Dentro da categoria de avaliação de sustentabilidade relacionada a produto, pode-se destacar a ACV.

2.7.2 Avaliação ambiental do ciclo de vida

A ideia de avaliação de ciclo de vida (ACV) teve suas origens na década de 60 devido ao surgimento de preocupações quanto a degradação ambiental e ao acesso de recursos naturais não-renováveis, como reações ao discurso de “limites do crescimento”. O desenvolvimento do método de ACV teve início nos Estados Unidos e norte Europeu, concentrando-se em estudos de embalagens focados em consumo energético e redução de emissões. Tais estudos foram desenvolvidos para indústrias (em colaborações indústria-universidade), as quais faziam usos internos e não compartilhavam com as demais partes interessadas (e.g. fornecedores, clientes e comunidade externa). Entre os anos de 1970 a 1990, houve um aumento em colaborações internacionais e coordenação da comunidade científica, com avanços no desenvolvimento metodológico de ACV gerados dentro de universidades. A partir deste momento, iniciou-se a consolidação da metodologia de ACV e o crescente número de estudos encomendados pelo setor industrial e órgãos governamentais, bem como divulgação de resultados em jornais/revistas científicas e relatórios de indústrias e governos (BJØRN *et al.*, 2018).

A ACV consiste em uma técnica de gestão ambiental, com método padronizado por normativas internacionais [ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b)], voltada para a avaliação de impactos ambientais de um produto ou serviço durante seu ciclo de vida (SALDANHA *et al.*, 2021). Os resultados de uma ACV são quantitativos, informando quando o sistema de um determinado produto pode impactar sobre o meio ambiente, e científicos, onde os fluxos são fundamentados em medições. O princípio de ACV consiste em obter a “melhor estimativa”, aplicando o mesmo nível de “preocupação” em toda a modelagem de avaliação de impacto. Entretanto, os modelos limitam-se a desempenho médios de processos, não abrangendo eventos

raros ou muito complexos. A abrangência também é um fator limitante na ACV, pois simplificações e generalizações são necessárias à modelagem do sistema (BJØRN *et al.*, 2018).

A ACV pode ser dividida em dois tipos: ACV de consequências e ACV de atribuição. No primeiro tipo identificam-se as consequências ambientais de uma decisão em um sistema de produto, o que implica que o mercado e consequências econômicas podem ser considerados. Na ACV de atribuição se estabelece encargos associados a produção e utilização de um produto em um ponto do tempo (passado recente) (SAMANIEGO, 2015). Na ACV de atribuição tem-se diferenciações por: berço ao portão; berço ao local; berço ao túmulo e berço ao berço. Do berço ao portão corresponde a uma avaliação de ciclo de vida do produto parcial: da extração das matérias primas (berço) ao portão da fábrica (portão), i.e, antes de ser distribuído ao consumidor. Do berço ao local remete a energia incorporada de componentes individuais de um edifício, ou seja, energia para: extrair matérias primas; montar em produtos úteis e transportar até o local. A avaliação do berço ao túmulo corresponde a ACV completa: da extração de matérias primas (berço) ao descarte final (túmulo). Do do berço ao berço é semelhante ao berço ao túmulo, porém, a fase de descarte corresponde a reciclagem (SAMANIEGO, 2015).

A ACV é realizada em quatro fases: (i) definição de objetivo e escopo; (ii) análise do inventário do ciclo de vida; (iii) avaliação de impacto do ciclo de vida e (iv) interpretação dos resultados (ABNT, 2009b). A Figura 14 sintetiza as fases da ACV. A definição de objetivo e escopo fornece uma contextualização do sistema referente a limites do sistema e unidade funcional.

No objetivo de uma ACV é necessário declarar: a aplicação pretendida e suas razões (justificativa), e o “público alvo” (ABNT, 2009b). Por exemplo, “o objetivo da ACV é avaliar os impactos ambientais para diferentes misturas solo-cinza-cal, a serem aplicadas em barreiras de impermeabilização em aterro sanitário”. Nesta etapa, é definido o tipo de ACV: ACV convencional (áreas de melhoria de um produto); ACV comparativa (dois ou mais produtos) e ACV resumida (avaliação de apenas um impacto) (ABNT, 2009b; REBITZER *et al.*, 2004).

O escopo da ACV compreende: sistema do produto de interesse; funções do sistema de produto (e quando em estudos comparativos, inclui as funções dos sistemas); unidade funcional; fronteiras do sistema de produto e limitações (ABNT, 2009b). A ACV pode ser dividida em ACV atribucional e ACV consequencial. A primeira é direcionada para descrever os fluxos físicos ambientais pertinentes para o sistema, enquanto que, o foco da segunda ACV é descrever consequências ambientais oriundas de uma tomada de decisão (REBITZER *et al.*, 2004). Já a unidade funcional consiste na medida quantitativa da função ou serviço da ACV, tendo como

finalidade, fornecer uma referência, a qual, as entradas e saídas são relacionadas. Além disso, possibilita comparar sistemas com a mesma unidade funcional (ABNT, 2009b). Este componente da ACV permite comparar e analisar bens ou produtos alternativos, geralmente expressa em termos de quantidade de material (e.g. 1 kg ou 1m⁻³) (REBITZER *et al.*, 2004).

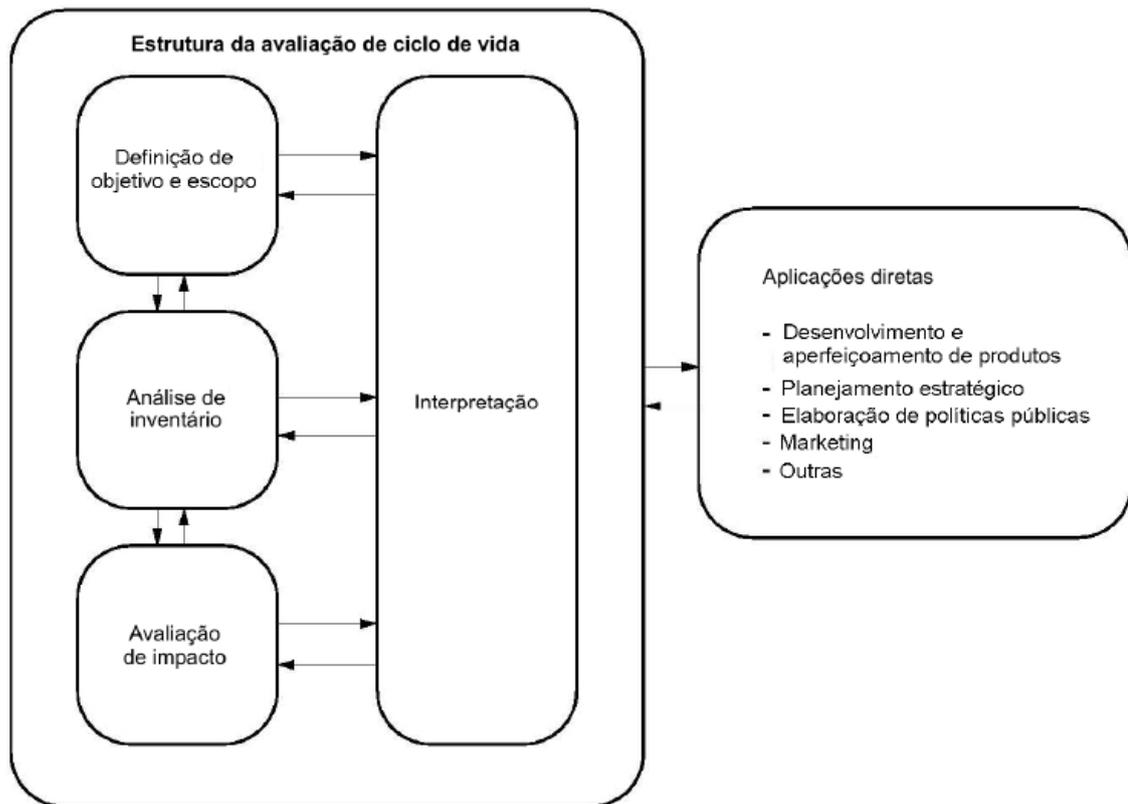


Figura 14 – Fases e aplicações de uma ACV.

Fonte – ABNT (2009b).

Em consonância com o objetivo e escopo, define-se os limites ou a fronteira do sistema, os quais indicam o subconjunto da coleção global de fluxos e processos, ou seja, modelos de sistema de produto fazem parte do estudo. Fora dos limites do sistema, entradas e saídas deixam de ser contabilizados. É recomendado descrever os modelos usados, bem como assinalar os pressupostos ou considerações que nortearam tais escolhas (ABNT, 2009b). Para estabelecer os limites do sistema, a ISO 14044 recomenda critérios por massa, energia ou significância ambiental. Critério por massa ou energia inclui todas as entradas e saídas que contribuem de forma cumulativa mais do que uma porcentagem definida para uma saída de massa ou energia

do sistema de produto. Já o critério por significância ambiental exclui as entradas e saídas cuja contribuição, para a carga ambiental, é inferior a uma porcentagem limite (ABNT, 2009c).

A análise do inventário (fase 2) compreende a compilação e quantificação dos dados de entradas e saídas pertinentes do sistema de um produto, ao longo de seu ciclo de vida (ABNT, 2009b). Tais dados podem ser adquiridos de distintas fontes: medições diretas; literatura; relatórios internos; base de dados de inventários de ciclo de vida (disponíveis em *softwares* como *openLCA* e *SimaPro*) e entrevistas. Todos eles apresentam vantagens e desvantagens associadas a fatores como dados diretos ou indiretos, custo, tempo, representatividade e padronização.

Na avaliação de impactos do ciclo de vida – AICV (fase 3) as entradas e saídas identificadas na fase anterior são associados, ou seja, os dados do inventário são convertidos em impactos ambientais quantificáveis. Esta avaliação associa os resultados da fase de inventário a categorias de impacto, onde para cada categoria, é selecionado um indicador de categoria de impacto de ciclo de vida, para quantificar emissões e uso de recursos. Estes impactos podem ser entendidos como consequências das entradas e saídas do sistema sob: saúde humana; plantas e animais ou disponibilidade futura de recursos naturais (ABNT, 2009b).

As metodologias de AICV podem estar localizadas no fim da cadeia (*endpoints*) ou ao longo dela (*midpoints*). *Endpoint* é o último resultado de um mecanismo ambiental, como por exemplo, o aumento do nível do mar é resultado das mudanças climáticas. As categorias de *endpoints* são: saúde humana, qualidade do ecossistema, e recursos naturais e serviços do sistema. Os *midpoints* estão associados aos impactos ambientais, enquanto que, os *endpoints* estão associados aos danos (Figura 15) (JOLLIET *et al.*, 2004; UNEP-SETAC, 2011).

Etapas de classificação e caracterização são obrigatórias na fase de AICV. Na classificação, atribui-se categoria de impacto aos resultados do inventário, e na caracterização, faz-se a conversão destes resultados em unidade dos indicadores de categoria, por exemplo, mudanças climáticas em CO₂ e gás metano (CH₄). Enquanto que, normalização (score de impacto em escala comum), ponderação (atribuição de importância à cada categoria) e agregação (agregar categorias em um único indicador) são etapas opcionais (ABNT, 2009c).

Ainda, há em torno de 13 métodos para AICV, majoritariamente desenvolvidos em países europeus, sendo utilizados globalmente, incluindo em estudos no Brasil. Tais métodos diferenciam-se, entre si, por avaliarem distintas categorias de impactos, por meio de uma série de modelos de caracterização (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016).

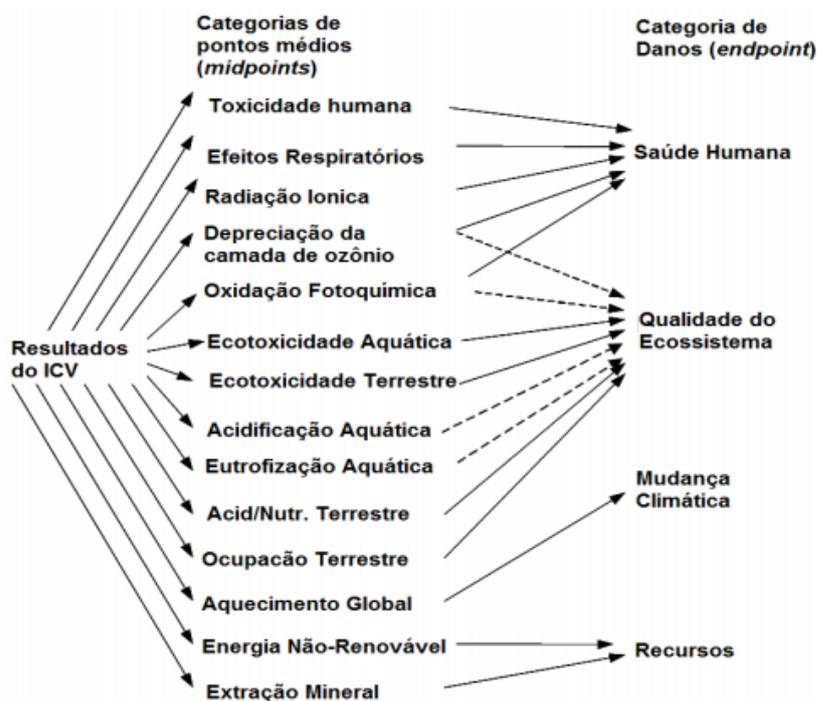


Figura 15 – Categorias de impactos para *mindpoint* e *endpoint*.

Fonte – PIEKARSKI *et al.* (2013).

Na última fase são feitas interpretações dos resultados do inventário e da avaliação dos impactos, em relação ao objetivo, determinando quais as entradas, saídas e impactos ambientais são mais importantes. Esta fase também traz conclusões, limitações e recomendações à tomadores de decisões (ABNT, 2009b, 2009c). Recomenda-se que os resultados sejam apresentados em recursos gráficos de fácil interpretação, como diagramas radar ou ternário.

2.7.3 Avaliação do custo do ciclo de vida

A avaliação do custo do ciclo de vida (ACCV) é o mais antigo entre as três técnicas de ACV. Foi desenvolvido originalmente, em 1933, por um escritório de contabilidade dos EUA, que solicitou uma avaliação de custos de tratores que considera-se o ciclo de vida desse produto (UNEP-SETAC, 2011). A ACCV é considerada uma técnica versátil que pode ser aplicada a diferentes fins e em distintos estágios do ciclo de vida do projeto, fornecendo suporte em tomada de decisões. Também, pode ser implementado tanto como uma avaliação absoluta (auxiliar em processo orçamentário), quanto uma avaliação relativa (comparar tecnologias alternativas) (LANGDON, 2007; RÖDGER; KJÆR; PAGOROPOULOS, 2018).

No cenário atual, há distintos ACCV para diferentes setores e produtos industriais, sendo eles: ACCV convencional; ACCV ambiental e ACCV social. A ACCV convencional (ou financeiro) é o método original e sinônimo de “custo total de propriedade”. Geralmente é utilizado para auxiliar aquisição de equipamentos de capital e produtos. Para esta ACCV foram desenvolvidos diversas normativas (e.g. ISO 15663:2000 e IEC 60300-3-3) (LANGDON, 2007; RÖDGER; KJÆR; PAGOROPOULOS, 2018; UNEP-SETAC, 2011). Por sua vez, a ACCV ambiental alinha-se ao AACV em aspectos de unidade funcional, limites do sistema e fases metodológicas (LANGDON, 2007; RÖDGER; KJÆR; PAGOROPOULOS, 2018). Para ACCV ambiental, o trabalho realizado pelo grupo de pesquisa do SETAC (Sociedade de Toxicologia Ambiental e Química) resultou na metodologia descrita em Hunkeler *et al.* (2008). Já a ACCV social inclui atribuir valor (monetização) a outras externalidades, abrangendo impactos ambientais e os sociais. Este tipo de ACCV monetiza impactos como: bem-estar social; qualidade do trabalho; saúde; qualidade de vida; custo social de doenças respiratórias devido a poluição atmosférica, dentre outros (LANGDON, 2007; RÖDGER; KJÆR; PAGOROPOULOS, 2018).

Aspectos como tempo, custos internos e custos externos devem ser observados na ACCV. Em alguns estudos, tempo é um fator importante para avaliação de custo de um produto. Assim, todos os custos devem ser ajustados para um determinado ano (e.g. considerando a inflação). Já os custos internos são os custos suportados pelos atores envolvidos diretamente no ciclo de vida do produto. Por sua vez, os custos externos são aqueles suportados por atores relacionados indiretamente no ciclo de vida do produto, por exemplo, os custos resultantes de uma forma de poluição ou outros impactos sociais (RÖDGER; KJÆR; PAGOROPOULOS, 2018; UNEP-SETAC, 2011). A Figura 16 apresenta uma diferenciação gráfica dos três tipos de ACCV.

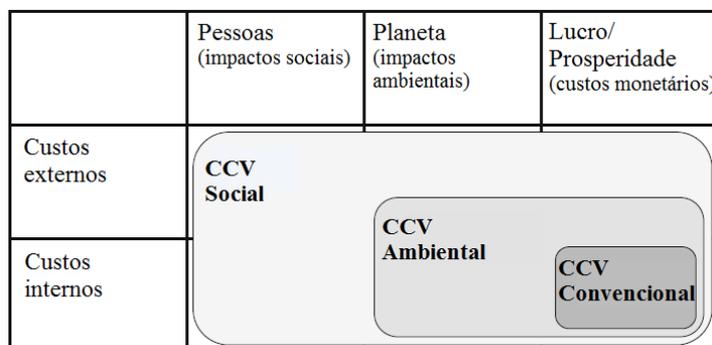


Figura 16 – Comparação dos três tipos de ACCV.

Fonte – Adaptado de RÖDGER KJÆR e PAGOROPOULOS (2018).

A ACCV ambiental também pode incluir custos externos que precisam ser internacionalizados, por exemplo: custos de emissões de CO₂ por um automóvel (RÖDGER; KJÆR; PAGOROPOULOS, 2018; UNEP-SETAC, 2011). A Tabela 5 apresenta uma comparação entre abordagens para monetarização, e a Tabela 6 uma visão comparativa das variáveis da ACCV.

Tabela 5 – Comparação entre distintas abordagens para monetarização de GEE em CO_{2eq}.

Exemplo	Custo por ton CO ₂ equivalente (€)	Referência	Método para monetarização
Esquema de comércio de emissões da União Europeia	8	Comissão Europeia e Direção Geral de Ação Climática: Mercados de carbono europeu e internacionais	Preço de mercado
Programa de compensação de carbono	24	Programa de compensação de carbono recuperado em agosto, 2015 (<i>myclimate.org</i>)	Redução de custo
Método Stepwise2006	83	Weidema (2009)	Restrição orçamentária

Fonte – Adaptado de RÖDGER, KJÆR e PAGOROPOULOS, (2018).

Tabela 6 – Comparação de distintas variáveis da ACCV.

Variáveis	ACCV Convencional	ACCV Ambiental	ACCV Social
Objetivo	Comparação das diferentes variantes do custo do ciclo de vida	Avaliação de todos custos do ciclo de vida que são diretamente suportados por todos partes interessadas conectadas para o ciclo de vida do produto	Avaliação de todos custos do ciclo de vida que são suportados por qualquer pessoa na sociedade
Definição do ciclo de vida	Vida econômica, muitas vezes excluindo fim de vida	Ciclo de vida completo	Ciclo de vida completo
Perspectivas	Principalmente uma parte interessada, fabricante ou do usuário	Um ou mais partes interessadas conectadas ao ciclo de vida	Qualquer pessoa na sociedade, frequentemente governos
Referência unitária	Produto ou projeto	Unidade funcional	Unidade funcional
Tipos de custos	Custos internos de uma parte interessada, focando principalmente na aquisição e custos de propriedade	Custos internos de partes interessadas conectadas ao ciclo de vida, mais custos externos e benefícios esperados para serem internalizados como taxas para CO ₂	Custos internos de todos atores mais os custos externos (impactos em terceiros)
Ajustes para inflação	Sim	Sim	Sim
Desconto de resultados	Consistente com fatores de desconto que variam entre 5 e 10%	Não. Descontando os resultados do CCV faria a análise inconsistente com a suposição de estado estacionário de ACV	Consistente, mas geralmente fatores de baixo desconto (< 3%)
Consistente com ACV ambiental?	Não	Sim, mas com risco de contabilizar duas vezes os impactos ambientais monetizados	Não
Normativas	Várias normativas, incluindo ISO 15663, IEC 60300-3-3, ISO 15686	Nenhuma, mas segue as normativas ISO 14040/14044	Atualmente sem padronização

Fonte – Adaptado de RÖDGER, KJÆR e PAGOROPOULOS (2018).

Resíduo de areia de fundição estabilizado com ligante álcali-ativado de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo: Desempenho mecânico, microestrutura, lixiviação e sustentabilidade

2.7.4 Avaliação social do ciclo de vida

A avaliação social do ciclo de vida (ASCV) desenvolveu-se nas últimas duas décadas como um mecanismo para prática de Responsabilidade Social Corporativa (i.e. implementação de princípios de desenvolvimento sustentável no âmbito de negócios), oriunda no contexto da normativa ISO 26000 para Responsabilidade social (ISO, 2010) e Diretrizes G3 para Relatórios de sustentabilidade (GRI, 2006). A ASCV é uma ferramenta holística e sistêmica para compreender aspectos sociais envolvidos na cadeia de valor de produtos ou serviços da sociedade (GARRIDO, 2017). A ASCV consiste em uma série de métodos com o objetivo de avaliar potencial positivo e negativo social (UNEP-SETAC, 2009). Nesta análise, considera-se como potenciais impactos, aqueles que podem ser vivenciados pelos *stakeholders* (GARRIDO, 2017), como: trabalhadores, comunidade local, sociedade, consumidores, etc. A ASCV pode ser realizada em conjunto ou não com a AACV e ACCV (GARRIDO, 2017). As fases da ASCV correspondem as fases da AACV, seguindo a ISO 14044 (UNEP-SETAC, 2009).

No cenário atual existem duas abordagens de ASCV, nomeadas de: ASCV tipo I e ASCV tipo II. Tipo I é conhecida por “ASCV de desempenho social”, enquanto a do tipo II, por “ASCV do caminho do impacto”. No tipo I, a avaliação visa fornecer uma aproximação de potenciais impactos presumidos. Por exemplo, a avaliação das práticas (desempenho social) das organizações envolvidas no ciclo de vida do produto, observando se elas atendem ou não as expectativas de toda a sociedade, relativas a aspectos de responsabilidade social. Tais aspectos envolvem: “condições de trabalho, saúde e segurança, e relações com a comunidade local” (GARRIDO, 2017). ASCV tipo II (menos usual), os potenciais impactos sociais são modelados considerando a relação entre a fonte do impacto e o impacto que exerce sob o bem-estar humano, tal relação é denominada como “via de impacto”. As vias de impacto são cadeias ou relações pontuais, cujas atividades são rastreadas aos seus resultados sociais finais (GARRIDO, 2017). Garrido (2017) cita exemplos como: os impactos da renda na expectativa de vida das pessoas ou os impactos da distribuição de renda sob a taxa de mortalidade de crianças.

Os avanços em ASCV têm sido relativamente recentes, não havendo uma metodologia consolidada e padronizada (GARRIDO, 2017; KLOEPFFER, 2008). Enquanto isso, abordagens qualitativas e semi quantitativas vêm sendo utilizadas como substitutas de uma ASCV quantitativa (KLOEPFFER, 2008). Contudo, sua prática é orientada por diretrizes reconhecidas internacionalmente, como pelo “Guia de ACV social de produtos” do Programa das Nações Unidas para o meio ambiente (UNEP-SETAC, 2009). Este guia propõe um quadro

metodológico geral abordando uma série de etapas para avaliação de impactos socioeconômicos do ciclo de vida de produto (UNEP-SETAC, 2009). Este “mapa” estabelece uma linha de base para definição de como a ASCV será realizada, dando muita flexibilidade de experimentação para praticante e legitimando que ASCV ainda está em desenvolvimento (GARRIDO, 2017).

Em cada etapa do ciclo de vida do produto pode-se avaliar uma gama de potenciais impactos sociais. Uma categoria de partes interessadas apresenta interesses em comum devido a uma ligação semelhante com o sistema do produto avaliado. As diretrizes do guia sugerem cinco categorias e uma lista de potenciais impactos sociais denominados “subcategorias de impactos”(UNEP-SETAC, 2009). Geralmente as subcategorias de impacto são classificadas de acordo com as partes interessadas, as quais estão vinculadas, conforme exposto na Tabela 7.

Os indicadores utilizados para avaliar cada impacto não são padronizados. Assim, cada estudo especifica os indicadores que serão usados em função do contexto da avaliação e da disponibilidade de dados (GARRIDO, 2017). Já a coleta de dados específicos pode ser realizada por meio de: auditoria de documentação empresarial; auditoria de documentação de instituições de autoridades ou organizações não governamentais; metodologias participativas; entrevistas dirigidas e semi dirigidas e questionários (UNEP-SETAC, 2009).

Estudos recentes no contexto da engenharia geotécnica têm optado por diversas formas de estrutura, coleta de dados e avaliação dos impactos na ASCV. Por exemplo, Visentin *et al.* (2022) avaliaram 4 *stakeholders* (trabalhadores, comunidade local, sociedade e cadeia de valor), 12 categorias de impactos e 31 indicadores. Para inventário da ASCV, foram coletados dados secundários em relatórios atualizados de organizações de interesse. Já a importância das categorias de impactos e indicadores sociais foram avaliadas por meio de questionário online aplicado à especialistas de áreas relacionadas ao tema. Da Rocha *et al.* (2022) consideram 3 *stakeholders* (trabalhadores, comunidade local e sociedade) e 35 indicadores apresentados em “*Methodological Sheets of UNEP/SETAC*”. Os autores avaliaram os impactos na ASCV por meio de questionário aplicado a profissionais da indústria e da ciência com vasta experiência.

Todavia, a ASCV apresenta limitações por: novidade da ferramenta; dificuldades de acesso de dados; dificuldades com uso de dados qualitativos, metodologias e indicadores; pouco conhecimento acerca das relações de cadeias casuais; pouca habilidade do praticante de ASCV, e limitada comunicação de resultados, dentre outros (UNEP-SETAC, 2009). Visentin *et al.* (2022) recomendam o uso de dados primários ou setoriais para mensurar os impactos da

fabricação do produto sob os *stakeholders* no ciclo de vida. Segundo Rocha *et al.* (2022), diferentemente dos impactos ambientais, os impactos sociais são mais complexos e subjetivos às suposições e distintas visões das pessoas envolvidas na avaliação.

Tabela 7 – Categorias de partes interessadas (*stakeholders*) e subcategorias de impacto.

Categoria de partes interessadas	Subcategorias de impacto
Trabalhadores	Liberdade de associação e negociação coletiva
	Trabalho infantil
	Salário justo
	Jornada de trabalho
	Trabalho forçado
	Igualdade/discriminação
	Saúde e segurança
	Benefícios sociais e previdência social
	Acesso a recursos materiais
	Acesso a recursos imateriais
Comunidade local	Migração
	Herança cultural
	Condições de vida seguras e saudáveis
	Direitos dos povos indígenas
	Engajamento da comunidade
	Emprego local
	Vida segura
	Compromisso público sobre questões de desenvolvimento sustentável
Sociedade	Contribuição para o desenvolvimento econômico
	Prevenção e mediação de conflito armado
	Desenvolvimento tecnológico
	Corrupção
	Saúde e segurança
Consumidores	Mecanismo de retorno
	Privacidade do consumidor
	Transparência
	Responsabilidade de fim de vida
	Competição saudável
Outros atores da cadeia de valor	Respeito pelos direitos de propriedade intelectual
	Promoção da responsabilidade social corporativa
	Relações com fornecedores
	Fim da vida
	Mecanismo de retorno

Fonte – Adaptado de UNEP-SETAC (2009) e GARRIDO (2017).

2.7.5 ACV aplicada em melhoramento de solos

Além do interesse pelo aproveitamento de resíduos e desenvolvimento de agentes cimentantes alternativos, outra via de crescente interesse na geotecnia refere-se a ACV (DA ROCHA *et al.*, 2016; SALDANHA *et al.*, 2021). Pesquisas que compreendem a avaliação da sustentabilidade de aplicações no contexto geotécnico são relativamente recentes. Há trabalhos de ACV (ambiental e/ou econômica) aplicada em: estruturas de contenção (DAMIANS *et al.*, 2015;

GIRI; REDDY, 2015); estacas de concreto (LI; ZHENG, 2019); técnicas de reparos de taludes em rodovias (LEAL *et al.*, 2020); sistemas de drenagem de rodovias (FATHOLLAHI; COUPE, 2021); métodos de melhoramento de solos (RAYMOND *et al.*, 2021); métodos de investigação de solos (PURDY *et al.*, 2022); pavimentos alternativos (DA ROCHA *et al.*, 2022), dentre outros. Ainda, há estudos recentes que abordam ASCV de métodos de produção de nFeZ (nanopartículas de ferro zero-valente) para remediação de áreas contaminadas (VISENTIN *et al.*, 2022) e de pavimentos tradicional e alternativos (DA ROCHA *et al.*, 2022).

Em melhoramento de solos, a técnica de ACV remete a pesquisas que exploraram o uso de agentes, como cal hidratada (DA ROCHA *et al.*, 2016; SAMANIEGO, 2015), cinza de biomassa lenhosa (DA COSTA *et al.*, 2020), geopolímero (SAMUEL; PUPPALA; RADOVIC, 2020), cal de casca de ovo (SALDANHA *et al.*, 2021), biocimentação (ALOTAIBI *et al.*, 2022) e cimento álcali-ativado (SALDANHA *et al.*, 2023). Uma síntese destes trabalhos está exposta na Tabela 8 e respectiva descrição dos principais resultados é abordada na sequência.

Tabela 8 – Pesquisas referente a ACV aplicada em melhoramento de solos.

Solo	Agente	Avaliação	Considerações	Referência
Dispersivo	Cal	ACV ambiental	Energia incorporada em distintas dosagens solo-cal (ligante e porosidade)	Samaniego (2015)
Dispersivo	Cal	ACV ambiental	Comparação entre distintas dosagens solo-cal (ligante e porosidade) que atingem resistência e rigidez alvos	Da Rocha <i>et al.</i> (2016)
Solo agrícola	Cinza de biomassa lenhosa	ACV ambiental	Cinza aplicada em: calagem ou fertilização do solo	Da Costa <i>et al.</i> (2020)
Solo expansivo	Geopolímero a base de metacaulim	Índice de sustentabilidade	Recurso consumido, impacto ambiental e impacto socioeconômico	Samuel, Puppala e Radovic (2020)
Solo arenoso	Cal de casca de ovo	ACV ambiental	Comparação entre cal de casca de ovo e cal industrial	Saldanha <i>et al.</i> (2021)
Solo arenoso	Carbonato precipitado induzido por enzimas	ACV ambiental	Comparação entre biocimentação e uso de cimento Portland	Alotaibi <i>et al.</i> , (2022)
Rejeito de mineração de ferro	Cimento álcali-ativado	ACV ambiental	Cimento de metacaulim e Na ₂ SiO ₃ oriundos de vias alternativas vs. Cimento oriundo de metacaulim e Na ₂ SiO ₃ produzidos de formas convencionais	Saldanha <i>et al.</i> (2023)

Samaniego (2015) utilizou a ferramenta de ACV para analisar a energia incorporada de distintas dosagens solo-cal na estabilização de solo dispersivo. O autor verificou que o menor custo

energético refere-se a misturas mais compactadas e com menores teores de cal. Da Rocha *et al.* (2016) utilizaram a ACV para avaliar os impactos ambientais de misturas solo dispersivo-cal. Os autores verificaram que dosagens com menor teor de cal e maior densidade têm um menor impacto sob as sete categorias de impactos avaliadas. Ainda, a produção da cal representa mais de 75% da energia incorporada, emissão de GEE e oxidação fotoquímica.

Da Costa *et al.* (2020) aplicaram a ACV para avaliar os impactos ambientais de cinza de biomassa lenhosa para melhoramento de solo. Verificou-se que os menores impactos são causados quando essa cinza foi utilizada na calagem de solos, em substituição a cal. Por sua vez, Samuel, Puppala e Radovic (2020) utilizaram um índice de sustentabilidade para avaliar os impactos da estabilização de um solo expansivo com um geopolímero de metacaulim, em comparação com a cal. Constatou-se que o geopolímero causou menos impactos nas categorias aquecimento global, acidificação e eutrofização, e é a alternativa mais sustentável.

Saldanha *et al.* (2021) compararam os impactos ambientais da produção de 1kg de cal de casca de ovo em relação a produção de 1kg de cal hidratada, por meio da ferramenta de ACV. Os autores verificaram que a cal de casca de ovo apresenta menores impactos nas categorias de ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade terrestre e ocupação do solo, em relação a cal tradicional, quando são eliminados os processos de extração e beneficiamento do calcário.

Alotaibi *et al.* (2022) avaliaram os impactos ambientais da estabilização de areia com biocimentação (precipitação de carbonato induzida por enzima urease) comparativamente ao cimento Portland. Constatou-se que o melhoramento do solo com biocimentação apresenta 90% menos potencial de esgotamento abiótico e 3% menos potencial de aquecimento global. O uso de biocimentação causa maiores impactos nas categorias de acidificação e eutrofização.

Recentemente Saldanha *et al.* (2023) realizaram uma ACCV da estabilização de rejeito de mineração de ferro com cimento álcali-ativado oriundo de metacaulim (produzido com estéril de mineração) e silicato de sódio em pó, oriundo de rejeitos do processo de flotação (cimento 1). Comparativamente avaliou-se o uso de metacaulim comercial e silicato de sódio produzido pelo processo de secagem hidrotérmica por pulverização (cimento 2). Constatou-se que o cimento 1 é mais sustentável devido ao menor consumo de energia e de recursos naturais.

A partir dos trabalhos acima relatados, nota-se que a aplicação de ACV em melhoramento de solos representa um vasto campo de pesquisa a ser explorado, principalmente a avaliação da sustentabilidade (pilares ambiental, econômico e social) do uso de ligantes álcali-ativados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais desta pesquisa são: (i) resíduo de areia de fundição; (ii) cinza de bagaço de cana-de-açúcar; (iii) cal de casca de ovo hidratada; (iv) hidróxido de sódio e (v) cimento Portland de alta resistência inicial. A Tabela 9 sintetiza a denominação adotada e função de cada material.

Tabela 9 – Materiais e respectivas denominações e funções.

Material	Denominação	Função
Resíduo de areia de fundição	RAF	Material à ser estabilizado
Cinza de bagaço de cana-de-açúcar	CBCA	Precursor-fonte de aluminossilicatos
Cal de casca de ovo hidratada	CCOH	Fonte de cálcio
Hidróxido de sódio	NaOH	Ativador alcalino
Cimento Portland de alta resistência inicial	CPV	Agente cimentante tradicional

A utilização de CCOH juntamente com a CBCA justifica-se como uma forma de equilibrar a presença de CaO em relação a Si_2O_3 e Al_2O_3 no sistema ligante, possibilitando que a cinética das reações de ativação alcalina desenvolva-se em temperatura ambiente. A dissolução da cal hidratada permite alcançar meios com pH superior a 12,4 e trabalhar com ativadores alcalinos em menores concentrações (CONSOLI *et al.*, 2021a; LOTERO *et al.*, 2021).

O RAF desta pesquisa é oriundo do processo produtivo de uma indústria de produção de peças fundidas de ferro cinzento e nodular, localizada no município de Erechim, região norte do Rio Grande do Sul (RS), Brasil. O processo mencionado está representado na Figura 17. A geração de RAF corresponde a cerca de 173 toneladas ao mês, equivalente anual de 2.084 toneladas, sendo que 39,5% (823 ton/ano) é encaminhada à uma indústria de cerâmica (RS) e 60,5% (1.261 ton/ano) é destinada à um aterro industrial (Santa Catarina). O último destino implica em altos custos para a indústria, e também pode-se inferir que ocupa uma vasta área de terra.

Por apresentar um baixo teor de umidade (0,19%), o RAF não foi submetido a processo de secagem. Para evitar a possível presença de algum material indesejado, o resíduo foi submetido ao peneiramento (peneira de 2mm), retendo uma quantidade ínfima, ou seja, praticamente 100% do resíduo foi aproveitado para a finalidade dessa pesquisa.

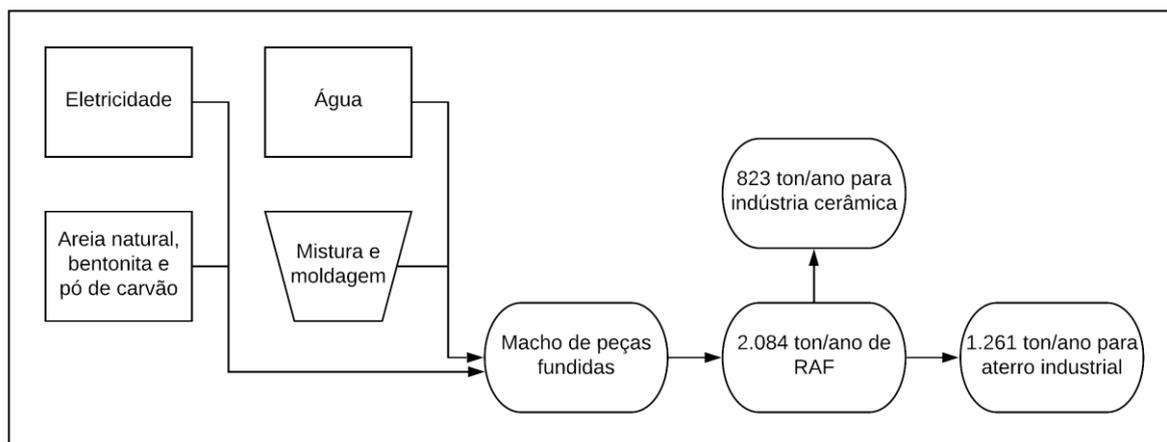


Figura 17 – Processo produtivo de peças fundidas de ferro e geração de RAF.

A CBCA é proveniente de uma indústria de processamento de subprodutos de cana-de-açúcar, localizada no município de Porto Xavier, região noroeste do RS. Oriunda de uma queima sob temperatura não controlada, aproximadamente 12 toneladas são geradas mensalmente entre os meses de abril e novembro (época da colheita), isto corresponde a 108 toneladas ao ano. Referente a destinação final do resíduo, a cinza é depositada sob o solo sem impermeabilização e a céu aberto, em uma propriedade pertencente a indústria. A CBCA foi submetida a simples processos como secagem (48h a 50°C) e peneiramento (malha #200, abertura 75µm).

No Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG) - UFRGS, foi produzida a cal a partir de cascas de ovos fornecidas por duas confeitarias, localizadas no centro de Porto Alegre, (RS). A produção da CCOH compreendeu os processos de: (i) coleta manual, (ii) lavagem manual, (iii) secagem, (iv) moagem e (v) calcinação das cascas; (vi) hidratação da cal; (vii) secagem, (viii) destorroamento e (ix) peneiramento (Figura 18). O processo de calcinação das cascas de ovo fundamentou-se em trabalhos da literatura que observaram as condições para obter maior conversão de CaCO_3 (presente no resíduo) em CaO (WONG; ANG, 2018) e uma cal mais reativa (ZAMAN *et al.*, 2018).

NaOH em micropérolas foi utilizado como ativador alcalino em função da capacidade ativadora, conforme literatura supracitada (item 2.3). Este reagente, com 98% de pureza, foi adquirido de uma empresa de reagentes químicos, localizada na cidade de Porto Alegre (RS).

Foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial – CPV ARI como agente cimentante tradicional, pois seu rápido ganho de resistência permite selecionar 7 dias como um dos períodos de cura avaliados na pesquisa.

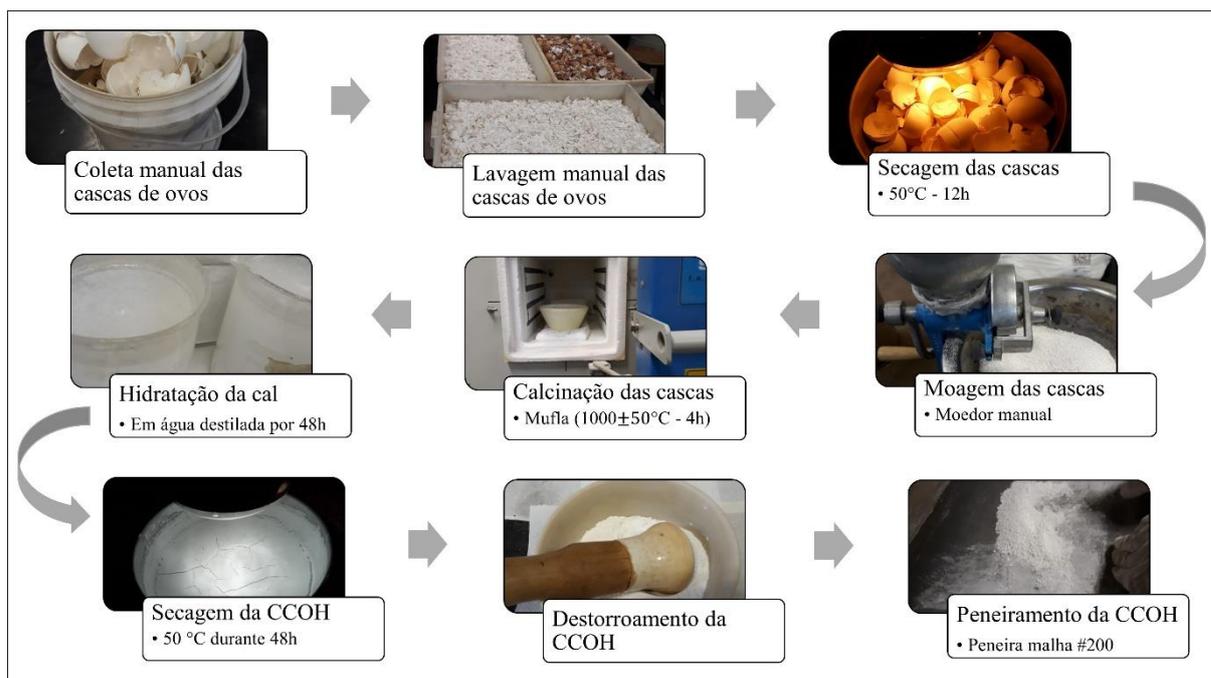


Figura 18 – Processo produtivo da produção de CCOH em laboratório.

3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

A Figura 19 apresenta um panorama gráfico com as atividades da pesquisa, compreendidas em 3 grandes etapas. A etapa 1 compreendeu a produção de CCOH, preparo de CBCA e caracterização dos materiais da pesquisa, conforme descrição no item 3.1. Na etapa 2 realizou-se a produção do ligante álcali-ativado com determinação da resistência à compressão simples das pastas álcali-ativadas, bem como caracterização mineralógica, química e morfológica daquela que apresentou maior resistência. A etapa 3 abrangeu as atividades relacionadas a estabilização do RAF-ligante álcali-ativado, bem como avaliação de desempenho mecânico, microestrutura, lixiviação e solubilização de metais e sustentabilidade, comparativamente a misturas RAF-cimento Portland. Planejamentos experimentais foram elaborados para auxiliar a execução das etapas 2 e 3, bem como para avaliar os fatores que afetaram de forma significativa cada variável resposta de comportamento mecânico.

A Tabela 10 apresenta uma síntese do programa de caracterização física, química, mineralógica e ambiental (lixiviação e solubilização de metais). Na sequência é feita uma breve descrição das técnicas de caracterização ou métodos, além de suas especificações e equipamentos utilizados para esta pesquisa.

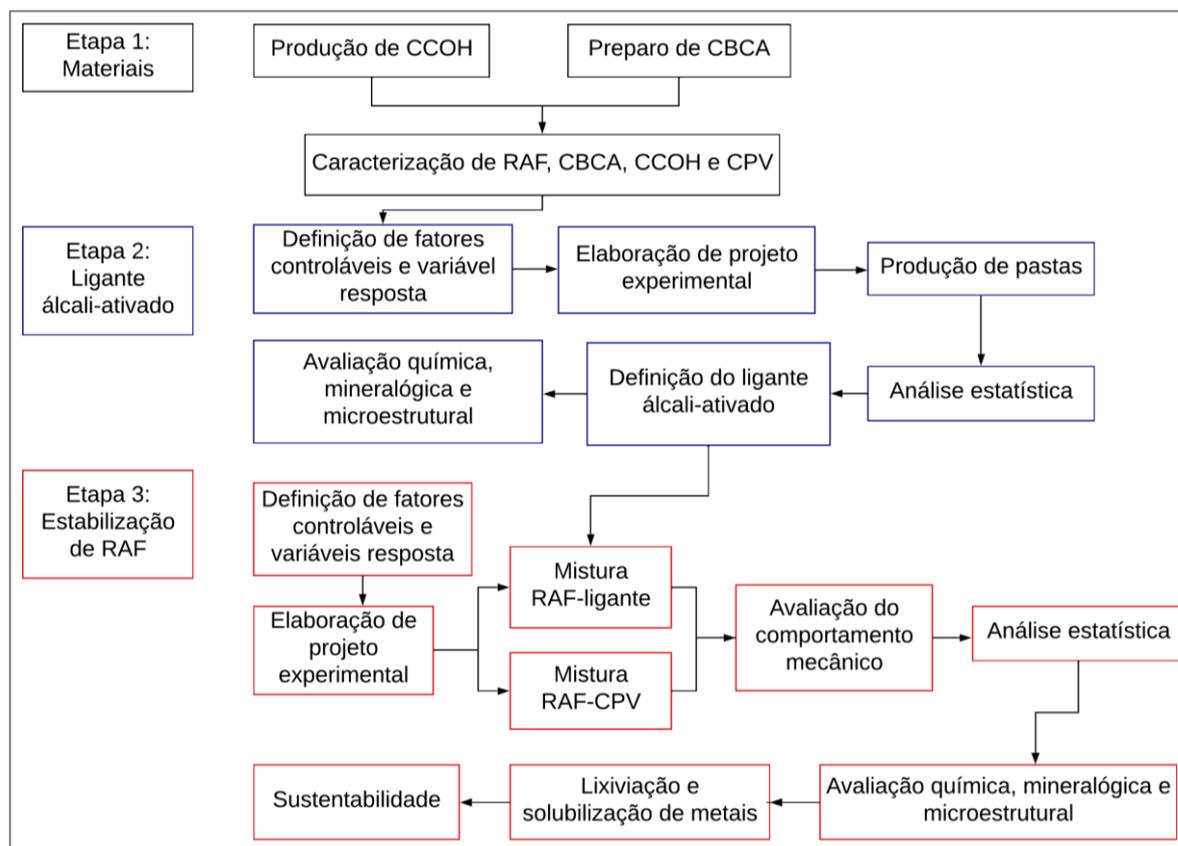


Figura 19 – Esquematização das etapas da pesquisa.

Tabela 10 – Síntese do programa de caracterização dos materiais.

Caracterização	Avaliação	Método/técnica	RAF	CBCA	CCOH	CPV	Local
Física	Limite de liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2017a)	X				
	Limite de plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016)	X				
	Massa específica real dos grãos	NBR 6458 (ABNT, 2017b)	X				UFRGS
	Massa específica real dos grãos	NBR 16605 (ABNT, 2017c)		X	X	X	
	Granulometria por sedimentação	NBR 7181 (ABNT, 2018a)	X				
	Granulometria a laser	Difração de raios laser		X	X		UNESC
	Área superficial específica	BET		X	X		
Química	Composição química	FRX	X	X	X	X	USP UFRGS
	Índice de atividade pozolânica	NBR 15895 (ABNT, 2010)		X			UFFS
Mineralógica	Composição mineralógica	DRX	X	X	X	X	UPF USP
Morfológica	Morfologia das partículas	MEV	X	X			UPF
Ambiental	Lixiviação (toxicidade) e solubilização de metais	NBR 10004 (ABNT, 2004a)	X	X		X	UFFS

BET: Método Brunauer-Emmett-Teller; FRX: espectrometria de fluorescência de raios-X; DRX: difração de raios-X; MEV: Microscopia eletrônica de varredura;

3.2.1 Difração de raios laser

A análise granulométrica por difração de raios laser é uma técnica para determinação de diâmetro de partículas, com uma faixa de aplicação analítica compreendida entre 0,1 a 3000 μm . Consiste na determinação do ângulo de difração laser, o qual é relacionado ao tamanho da partícula. Neste método, as partículas com maiores diâmetros espalham o raio a menores ângulos e vice-versa (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007).

A distribuição granulométrica da CBCA e da CCOH foram determinadas por meio da técnica de difração de raios laser (ou difração à laser), em um analisador de tamanho de partículas (marca *Cilas*, modelo 1064).

3.2.2 Método BET

Área superficial específica de materiais é usualmente determinada pelo método de Brunauer-Emmett-Teller (BET). Este fundamenta-se em isotermas de adsorção de moléculas de gás inerte (nitrogênio ou argônio) à superfície do sólido, em uma gama de pressões. A partir do volume de gás obtido no ensaio e utilizando a equação do método, determina-se o volume de nitrogênio necessário para recobrir a superfície adsorvente com uma monocamada (SINHA *et al.*, 2019).

A área superficial específica da CBCA e da CCOH foram mensuradas pelo método de BET, usando o equipamento *QuantaChrome* (modelo NOVA 1200e).

3.2.3 Microscopia eletrônica de varredura

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) consiste na aplicação de um fino feixe de elétrons, oriundo de uma coluna óptico-eletrônica e o sistema de lentes, para analisar a superfície da amostra ponto a ponto e em camadas sucessivas, transmitindo o sinal do detector à uma tela catódica, a qual está em perfeita sincronização com o feixe de elétrons primário. A MEV possibilita investigar a morfologia superficial e a microestrutura de materiais sólidos, além da análise dos elementos químicos presentes na amostra. Também, fornece imagem da amostra com aspecto tridimensional e exames em pequenos aumentos e com elevada profundidade de foco (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

A microestrutura dos materiais desta pesquisa e de misturas RAF-LAA foram avaliadas pela técnica de MEV, em um microscópio eletrônico de varredura (Marca *Tescan*, modelo Vega 3), com uso do modo de imagens SE (Elétrons Secundários), feixe de elétrons a 10kV e detector EDS. Amostras das misturas foram submetidas a paralização das reações químicas. Foram extraídas amostras de dimensões 1 cm x 1 cm, posteriormente imersas em acetona (48h), secas em estufa (40°C, 24h) (CAICEDO, 2020) e mantidas acondicionadas em sacos herméticos.

3.2.4 Difração de raios-X

A técnica de difração de raios-X (DRX) baseia-se na incidência de raios-x em uma amostra, os quais são difratados pelas estruturas cristalinas, conforme a Lei de Bragg ($2d\sin\theta=n\lambda$), onde: d é a distância de espaçamento entre os planos atômicos, específica de cada fase cristalina; n é um número inteiro (ordem da difração) e λ corresponde ao comprimento de onda dos raios-x incidentes. Gera-se um difratograma, onde cada pico equivale à um tipo de mineral, que por sua vez possui um valor d que é tabelado e específico de cada mineral. A DRX é aplicada na identificação de fases cristalinas dos materiais e na quantificação de propriedade estruturais (e.g. deformação, tamanho e orientação dos cristalitos) (TONEY, 1992).

A técnica de DRX foi utilizada para identificar as fases cristalinas dos minerais que constituem os materiais e misturas avaliadas nesta pesquisa. O procedimento foi realizado em um difratômetro de raios-X [marca *Siemens - BRUKER AXS*, modelo D-5000 (θ - 2θ)] equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), operando a 40 kV e 25 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário. As amostras em pó foram analisadas no intervalo angular de 2 a 72° 2θ em passo de 0.05°/1s utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 2 mm e 0.2 mm no detector.

3.2.5 Espectrometria de fluorescência de raios-X

O princípio da espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) fundamenta-se no efeito fotoelétrico, onde ao incidir raios-x primário sobre a amostra, ocorre a excitação dos átomos e consequente transição de elétrons entre os níveis energéticos. Em resposta, há a emissão de raios-x secundários ou fluorescente (fótons). A energia contida nesses raios-x fluorescentes está associada ao número atômico de cada elemento químico em particular (HUANG, 1992). A FRX permite determinar a composição química de materiais de forma rápida e não destrutiva.

A técnica de FRX foi usada para determinação da composição química dos materiais. Os teores de óxidos foram determinados de amostras fundidas (elementos maiores) e amostras prensadas (elementos menores), na calibração de padrões de rochas tabelados (GOVINDARAJU, 1989). Foi utilizado um espectrômetro de fluorescência de raios-X equipado com tubo de ródio (Rh), marca *Rigaku*, modelo RIX 2000. A perda ao fogo foi realizada a 1020 °C por 2h.

3.2.6 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

A Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é uma análise não-destrutiva que possibilita identificar a presença de grupos funcionais e ligações, e consequentemente compostos de interesse na estrutura de uma amostra. A FTIR fundamenta-se nas vibrações atômicas de uma molécula que absorve somente frequências e energias específicas da radiação infravermelha. Assim, moléculas são detectadas e classificadas por FTIR em função de cada uma delas ter distinto espectro infravermelho. O espectrômetro de FTIR utiliza um interferômetro para medir a energia transmitida para a amostra. O interferograma (i.e. gráfico de intensidade de sinal por tempo) resultante é transmitido da amostra, onde os comprimentos de ondas específicos são absorvidos (UNDAVALLI; LING; KHANDELWAL, 2021). O espectro de absorbância ou espectro em transmitância é obtido por meio de uma transformada de Fourier, que resumidamente consiste em uma transformação matemática de domínio de tempo para o domínio de frequência (JANSSENS, 2006).

A técnica de FTIR foi utilizada para identificar grupos funcionais/ligações presentes na pasta álcali-ativada. Para tanto, os espectros de FTIR analisaram formações de ligação e foram conduzidos em pó finamente moído (tamanho de partículas inferior a 0,075 mm), usando um espectrômetro FT-IR *Thermo Scientific Nicolet iS5*, dentro da faixa de 4000–400 cm^{-1} e com uma resolução de 1 cm^{-1} . Paletes foram preparados com corpos de prova homogeneizados em 1% de KBr (i.e. brometo de potássio, não apresenta espectro de absorção na faixa 4000–400 cm^{-1}) seco e moído. Esta análise foi realizada no Laboratório de Construção Civil da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Algumas misturas RAF-LAA também foram submetidas à análise por FTIR para complementar as avaliações feitas por DRX e MEV, e consequentemente os resultados de comportamento mecânico. A técnica de FTIR aplicada a RAF-LAA foi realizada em um espectrômetro FT-IR *Perkin Elmer Spectrum 1000*, dentro da faixa de 4000–400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e

intervalo de 2 cm^{-1} . Paletes foram preparados com 0,1 g de amostra seca e moída em 0,3g de KBr. Esta análise foi realizada no Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) da UFRGS.

3.2.7 Caracterização e classificação ambiental

A classificação de um resíduo sólido é regulamentada pela NBR 10004 (ABNT, 2004a). Para classificação quanto a toxicidade, o procedimento inicial é a obtenção do extrato lixiviado do resíduo, conforme procedimento estabelecido pela NBR 10005 (ABNT, 2004b). Resumidamente tal procedimento consiste em misturar uma amostra do resíduo (100g de RAF ou CBCA) com água destilada (1:16 de resíduo/água), e submeter à agitação magnética (5 min), para posterior determinação do pH. Tendo obtido o pH de cada resíduo (8,4 para RAF e 8,6 para CBCA), adiciona-se 3,5 mL de ácido clorídrico e posterior aquecimento (50°C , 10 min). Após essa etapa, mantido pH superior a 5, adiciona-se a solução extratora n° 2 (solução de ácido acético de pH 2,88). Caso o pH for inferior a 5, adiciona-se ao material a solução extratora n° 1: solução de ácido acético e hidróxido de sódio (pH de aproximadamente 4,93). Na sequência, a mistura (amostra + água + solução extratora) é acondicionada em frascos de politetrafluoretileno (PTFE ou teflon - material inerte) e submetida a agitação por 18h (25°C) a 30 rpm em um agitador rotatório de frasco, conforme Figura 20.



Figura 20 - Agitador rotatório de frasco do ensaio de lixiviação da NBR 10005.

Finalizada a etapa de agitação, realiza-se a filtração a vácuo (Figura 21), obtendo-se assim, o extrato lixiviado. Para filtração utiliza-se papel filtro quantitativo (gramatura $80\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) e uma bomba a vácuo. Na sequência, faz-se a determinação de metais no lixiviado e posterior comparação com os valores limites do anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004a). Apresentando

um ou mais metais em concentração superior a normatizada, classifica-se a amostra como sendo “Resíduo perigoso – classe I”, caso contrário, “Resíduo não perigoso – classe II”.



Figura 21 – Exemplo da filtração a vácuo para extrato lixiviado de CBCA.

Quando verificada a segunda opção, dá-se continuidade ao processo de classificação por meio da obtenção do extrato solubilizado, cujo procedimento é descrito pela NBR 10006 (ABNT, 2004c). O ensaio de solubilização consiste basicamente em misturar uma amostra do resíduo (250g de RAF ou CBCA) com água destilada (1L), em um béquer (1,5L), e submeter à agitação magnética (5 min). Após este processo, o recipiente foi coberto com filme de PVC e mantido em repouso por 7 dias, em temperatura controlada de 25°C, conforme Figura 22. Na sequência, a mistura resíduo-água é submetida a filtração a vácuo, obtendo-se assim, o extrato solubilizado.

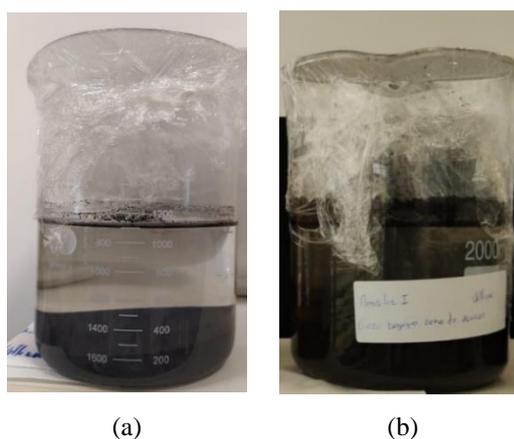


Figura 22 – Ensaio de solubilização em etapa de repouso para RAF (a) e CBCA (b).

Após a obtenção do extrato solubilizado, determina-se a concentração de metais e compara-se com os valores limites do anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004a). Apresentando um ou mais

contaminantes em concentração acima do limite, classifica-se a amostra como sendo “Resíduo não-inerte – classe II A”, caso contrário, “Resíduo inerte – classe II B”. A presença de surfactantes no extrato solubilizado é avaliada conforme procedimento estabelecido pela Associação Americana de Saúde Pública (APHA, 2017). Já a determinação de metais nos extratos lixiviados e extratos solubilizados pode ser realizada por meio da técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

Os ensaios de lixiviação (NBR 10005) e solubilização de metais (NBR 10006) foram realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental e Resíduos, e a análise de ICP-OES foi realizada na Central analítica, ambos localizados na UFFS, campus Erechim.

3.2.8 Espectrometria de emissão óptica por plasma indutivamente acoplado

O princípio da espectrometria de emissão óptica por plasma indutivamente acoplado (*Inductively coupled plasma optical emission spectrometry*, ICP-OES) consiste na vaporização da amostra e atomização dos elementos de interesse em plasma de argônio (gás inerte). A aplicação de energia sob um átomo resulta na sua excitação e liberação de energia sob a forma de radiação (luz), cujo comprimento de onda está relacionado com a transição eletrônica ocorrida. Em cada comprimento de onda, a radiação emitida permite identificar o elemento responsável pela emissão, e a medida da intensidade possibilita obter a concentração do elemento contido na amostra. As radiações emitidas por um determinado elemento compõem o seu espectro de emissão (CHEREMISINOFF, 1996). A ICP-OES permite determinar mais de 70 elementos químicos em níveis de detecção de parte por bilhão (ppb) a parte por milhão (ppm) (NEIKOV; YEFIMOV, 2019). A técnica é geralmente utilizada para quantificar metais em amostras líquidas (concentração em ppm) (CHEREMISINOFF, 1996).

Nesta pesquisa, a ICP-OES foi utilizada para quantificação de metais nos extratos lixiviados e solubilizados de RAF, CBCA e cimento Portland. As análises foram realizadas no espectrômetro de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICPE - marca *Shimadzu*, modelo ICPE-9800), utilizando solução padrão multi elemento *ICP Certipur* (marca *Merck*), na central analítica da UFFS. Posteriormente, a técnica será utilizada para a determinação de metais em lixiviados de RAF-ligante álcali-ativado e RAF-cimento Portland.

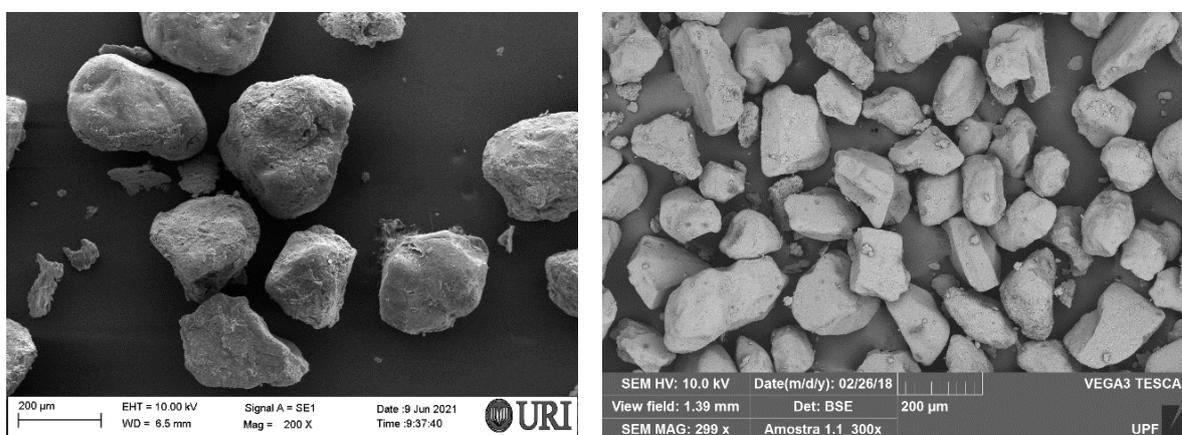
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.3.1 Resíduo de areia de fundição

O RAF consiste em um material de coloração acinzentada (Figura 23) com partículas de formatos sub angular à arredondado (Figura 24a), semelhante as caracterizações do resíduo existentes na literatura (item 2.1.1) e as partículas da areia de Osório (Figura 24b).



Figura 23 – Amostra de RAF (areia verde) desta pesquisa.



(a)

(b)

Figura 24 – Morfologia das partículas de RAF (a) e areia de Osório (b).

A curva de distribuição granulométrica do RAF está apresentada na Figura 25, bem como suas propriedades físicas estão expostas na Tabela 11. A massa específica real dos grãos é de $2,61 \text{ g.cm}^{-3}$, compreendida na média ($2,10$ a $2,64 \text{ g.cm}^{-3}$) observada na literatura (item 2.1.1) e semelhante a areia de Osório (CONSOLI *et al.*, 2021a). O RAF apresenta granulometria constituída majoritariamente por partículas de tamanho correspondente a areia fina (95,92%),

semelhante as caracterizações de RAF de outros estudos (KHATIB; HERKI; KENAI, 2013; NAIK *et al.*, 2012; SIDDIQUE; SINGH, 2011) e da areia de Osório (CONSOLI *et al.*, 2021a).

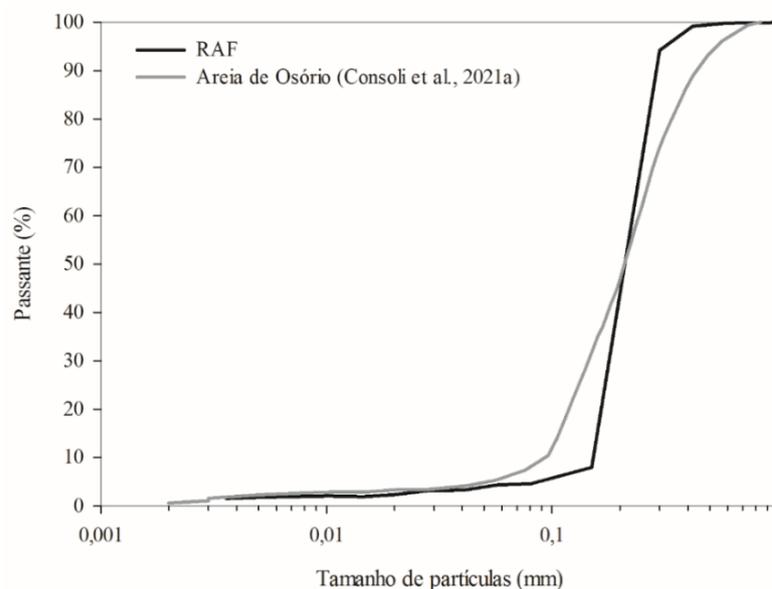


Figura 25 – Curva de distribuição granulométrica do RAF.

Tabela 11 – Propriedades físicas do RAF.

Propriedade	RAF	Areia Osório
Limite de liquidez (%)	-	-
Limite de plasticidade (%)	-	-
Índice de plasticidade	Não plástico	Não plástico
Massa específica real dos grãos ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2,61	2,63
Areia grossa (%) – $0,6 \leq d < 2$ mm	0,0	0,0
Areia média (%) – $0,2 \leq d < 0,6$ mm	0,80	0,3
Areia fina (%) – $0,06 \leq d < 0,2$ mm	95,92	97,6
Silte (%) – $0,002 \leq d < 0,06$ mm	1,74	1,6
Argila (%) – $d < 0,002$ mm	1,54	0,5
Classificação – D2487 (ASTM, 2017)	SP (areia mal graduada)	SP

A mineralogia do RAF é composta essencialmente por quartzo (SiO_2), com picos de elevado grau de cristalinidade (finos e de alta intensidade), como exposto no difratograma da Figura 26. O resíduo apresenta um alto teor de óxido de silício (90,40%) em sua composição química, além dos óxidos de alumínio (2,94%) e ferro (2,07%) (Tabela 12).

A partir dos resultados do ensaio de classificação de resíduo (Tabela 13), verificou-se que o extrato lixiviado do RAF apresenta metais em concentrações abaixo do limite máximo dos anexos F da NBR 10004 (ABNT, 2004a), ou seja, resíduo não-perigoso. O extrato solubilizado

apresentou concentrações de inferiores ao limite máximo do anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004a), classificando o RAF como resíduo-inerte (Classe II-B).

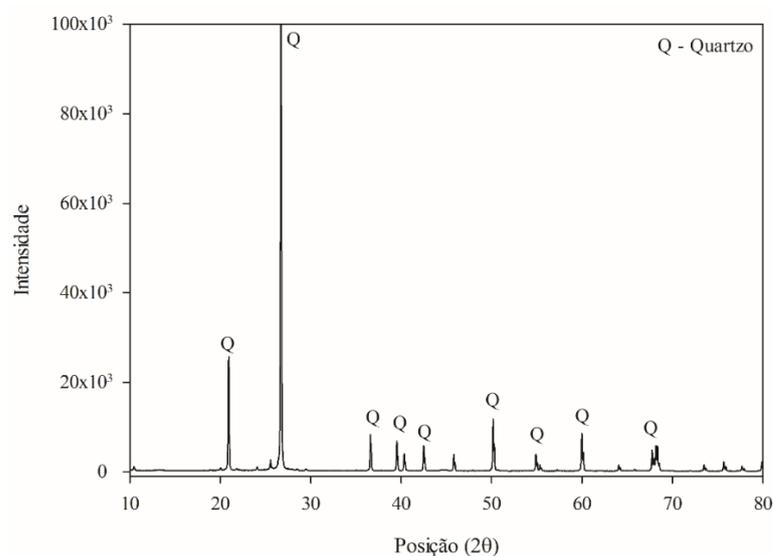


Figura 26 – Difratograma do RAF.

Tabela 12 – Composição química do RAF.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Outro	Perda ao fogo
Teor (%)	90,40	2,94	2,07	0,45	0,41	0,18	0,17	0,14	0,14	0,09	0,17	2,85

Fonte – BRAGAGNOLO *et al.* (2018).

Tabela 13 – Composição química dos extratos lixiviado e solubilizado do RAF.

Elemento	Extrato lixiviado		Elemento	Extrato solubilizado	
	Concentração (mg.L ⁻¹)	Limite (mg.L ⁻¹) Anexo F		Concentração (mg.L ⁻¹)	Limite (mg.L ⁻¹) Anexo G
Ag	0,002	5	Ag	0,003	0,05
As	0,000	1	Al	0,000	0,2
Ba	0,262	70	As	0,000	0,01
Cd	0,006	0,5	Ba	0,000	0,7
Cr total	0,006	5	Cd	0,002	0,005
Hg	0,000	0,1	Cr	0,001	0,05
Pb	0,001	1	Cu	0,000	2
Se	0,000	1	Fe	0,000	0,3
			Hg	0,000	0,001
			Mn	0,09	0,1
			Na	42,9	200
			Pb	0,000	0,01
			Se	0,000	0,01
			Zn	0,000	5
			Cl	4,13	250
			Surfactantes	Não detectado	0,5

Resíduo de areia de fundição estabilizado com ligante álcali-ativado de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo: Desempenho mecânico, microestrutura, lixiviação e sustentabilidade

3.3.2 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

A morfologia da CBCA caracteriza-se por aglomerados de partículas com distintos tamanhos e formas: fibrosa (1); prismática (2) e irregular (3) (Figura 27), conforme Bahurudeen e Santhanam (2015). As partículas mais alongadas correspondem as fibras do bagaço de cana de açúcar que sofreram queima incompleta.

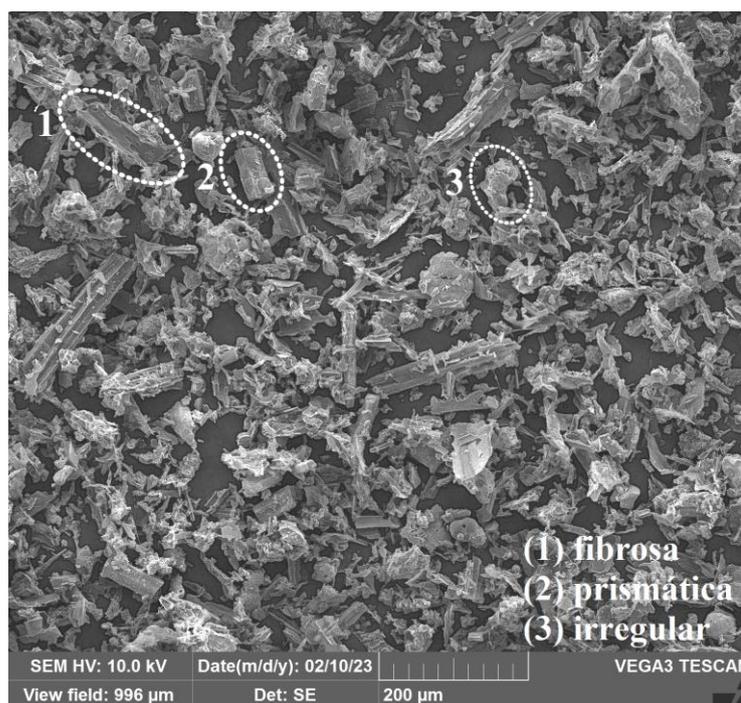


Figura 27 – Morfologia das partículas de CBCA com magnificação de 500x.

A curva granulométrica e propriedades físicas da CBCA estão apresentadas na Figura 28 e na Tabela 14 respectivamente. A cinza é constituída principalmente por partículas de tamanho de silte (90,13%) e apresenta elevada área superficial específica de $125,15 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (conforme item 2.4.1). O índice de atividade pozolânica (IAP) da CBCA é $817,6 \text{ mg de Ca(OH)}_2/\text{g de pozolana}$. A NBR 15895 (ABNT, 2010) não estabelece um valor mínimo para o IAP, entretanto, a norma francesa NFP 18-513 (AFNOR, 2012) define uma referência mínima de $700 \text{ mg de Ca(OH)}_2/\text{g de pozolana}$, sugerindo que a CBCA é de fato um material pozolânico.

A CBCA apresenta em sua mineralogia quartzo (SiO_2), magnetita (Fe_3O_4) e hematita (Fe_2O_3). Pode-se observar no difratograma da Figura 29, formas amorfas e picos de quartzo com baixo grau de cristalinidade (picos de baixa intensidade). Esse resíduo é composto principalmente por óxidos de silício (60,65%), ferro (13,87%) e alumínio (5,76%), além de titânio (4,14%),

potássio (2,90%), magnésio (1,97%) e cálcio (1,40%), dentre outros (Tabela 15). O elevado teor de Fe_2O_3 (13,87%) na composição CBCA avaliada difere-se do teor médio (4,8%) observado em amostras da cinza na literatura (SOARES *et al.*, 2014; XU *et al.*, 2019b). Acredita-se que esse teor esteja associado ao tipo de solo onde a cana-de-açúcar é cultivada em Porto Xavier. O solo da área do município pertence as designações regionais de “Charrua” e “Ciríaco” (PORTO XAVIER, 2013). Os Neossolos litólico eutrófico chernossólico (Unidade Charrua) ocorrem associados aos Chernossolos argilúvico férrico típico (Unidade Ciríaco), os quais por sua vez, apresentam elevados teores de Fe_2O_3 (18%) (FEPAM, 2003).

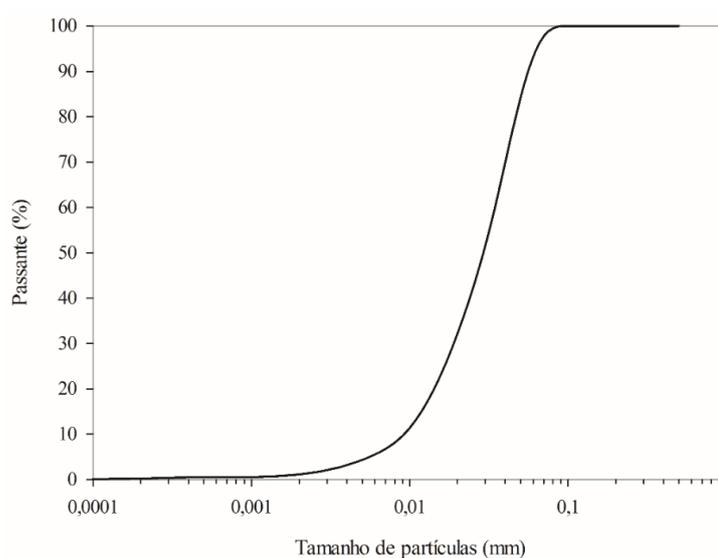


Figura 28 – Curva de distribuição granulométrica da CBCA.

Tabela 14 – Propriedades físicas da CBCA.

Propriedade	Resultado
Limite de liquidez (%)	-
Limite de plasticidade (%)	-
Índice de plasticidade	Não plástica
Areia grossa (%) – $0,6 \leq d < 2$ mm	0
Areia média (%) – $0,2 \leq d < 0,6$ mm	0
Areia fina (%) – $0,06 \leq d < 0,2$ mm	8,88
Silte (%) – $0,002 \leq d < 0,06$ mm	90,13
Argila (%) – $d < 0,002$ mm	0,99
Diâmetro mediano de partículas – D_{50} (μm)	31,01
Diâmetro de partícula de 90% da distribuição cumulativa – D_{90} (μm)	55,85
Diâmetro de partícula de 10% da distribuição cumulativa – D_{10} (μm)	9,18
Massa específica real dos grãos ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2,08
Área superficial específica ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	125,15
Índice de atividade pozolânica ($\text{mg Ca(OH)}_2/\text{g}$ de pozolana)	817,6

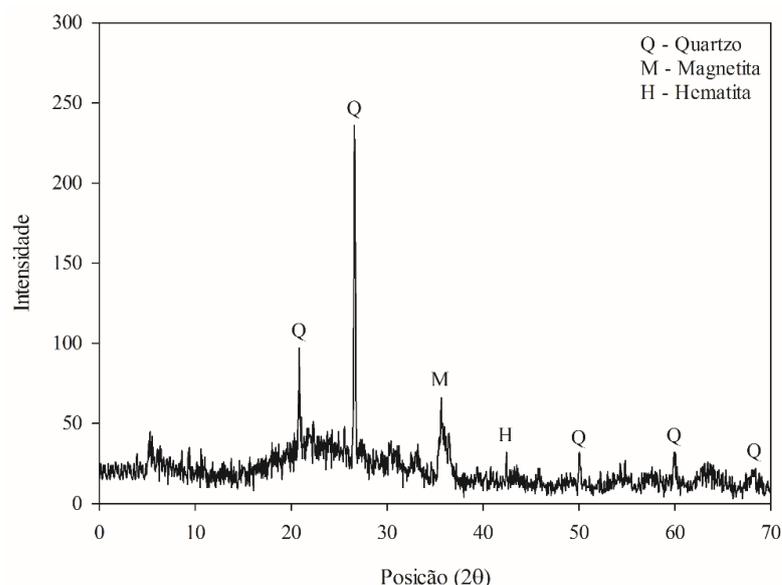


Figura 29 – Difratograma da CBCA.

Tabela 15 – Composição química da CBCA.

Óxidos	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	MnO	Na ₂ O	PF
Teor (%)	60,65	13,87	5,76	4,14	2,90	1,97	1,40	1,26	0,45	0,22	7,38
Elemento	Y	Pb	Ni	Cu	Sr	Zr	Zn	Nb	Rb	Cr	Ba
ppm	26,5	18,6	48,0	189,6	66,5	249,4	343,1	31,1	67	100,9	260,2

Fonte – BRUSCHI *et al.*, (2021a).

A CBCA é considerada um material pozolânico também pela soma de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ igual a 80,24%, que é superior ao mínimo (50%) estabelecido pela C618 (ASTM, 2019a). Em comparação com outras amostras de CBCA, este teor total é superior ao encontrado no trabalho de Quedou, Wirquin e Bokhoree (2021) (58,94%) e inferior ao determinado na cinza (95,29%) por Loganayagan, Mohan e Dhivyabharathi (2021). Ainda conforme a C618 (ASTM, 2019a), o conteúdo de PF da CBCA (7,38%) é aprovado para pozolana classe N.

Com base nos dados da Tabela 16, verificou-se que não houve lixiviação de metais em concentração superior a estabelecida pelo anexo F da NBR 10004: Resíduo não-perigoso. Enquanto que, extrato solubilizado da cinza apresentou manganês (Mn) e chumbo (Pb) em concentrações acima do limite estabelecido pelo anexo G da NBR 10004. Portanto, a CBCA classifica-se como um Resíduo não-inerte (classe IIA, i.e., resíduo com propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água). Classificações de amostras de cinza de bagaço de cana-de-açúcar encontradas na literatura também classificaram este resíduo como “Resíduo não-inerte” (ALTOÉ; SALES; MARTINS, 2019; SALES; LIMA, 2010). Alguns autores (FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011; SOARES *et al.*, 2014) relatam que

as características físico-químicas das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar apresentam variações em função do tipo de solo de cultivo, espécie de cana e das condições de queima do bagaço (e.g. temperatura, tempo, circulação de ar e resfriamento).

Tabela 16 – Composição química dos extratos lixiviado e solubilizado da CBCA.

Elemento	Extrato lixiviado		Elemento	Extrato solubilizado	
	Concentração (mg.L ⁻¹)	Limite (mg.L ⁻¹) Anexo F		Concentração (mg.L ⁻¹)	Limite (mg.L ⁻¹) Anexo G
Ag	0,000	5	Ag	0,000	0,05
As	0,000	1	Al	0,000	0,2
Ba	0,08	70	As	0,000	0,01
Cd	0,000	0,5	Ba	0,000	0,7
Cr total	0,000	5	Cd	0,000	0,005
Hg	0,000	0,1	Cr	0,000	0,05
Pb	0,06	1	Cu	0,000	2
Se	0,000	1	Fe	0,000	0,3
			Hg	0,000	0,001
			Mn	0,68	0,1
			Na	1,79	200
			Pb	0,04	0,01
			Se	0,000	0,01
			Zn	0,000	5
			Cl	6,29	250
			Surfactantes	Não detectado	0,5

3.3.3 Cal de casca de ovo hidratada

A distribuição granulométrica e as propriedades físicas da CCOH estão apresentadas na Figura 30 e na Tabela 18 respectivamente. Este material é constituído principalmente por partículas de tamanho correspondente a silte (93,01%) e possui área superficial específica de 4,18 m².g⁻¹.

Em sua composição mineralógica, a CCOH apresenta os minerais portlandita (Ca(OH)₂) e calcita (CaCO₃) (Figura 31). Nestes minerais, aproximadamente 73% é constituído por óxido de cálcio (CaO), além de óxido de magnésio (MgO) e outros em parcela residual (<1%), conforme resultado da análise de FRX (Tabela 17). O teor de perda ao fogo (25,14%) deve-se a presença de moléculas de água, oriundas do processo de hidratação do material, conforme anteriormente determinado por CONSOLI *et al.* (2020).

Tabela 17 – Composição química da CCOH.

Óxidos	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Perda ao fogo
Teor (%)	72,90	1,17	0,36	0,31	0,13	25,14

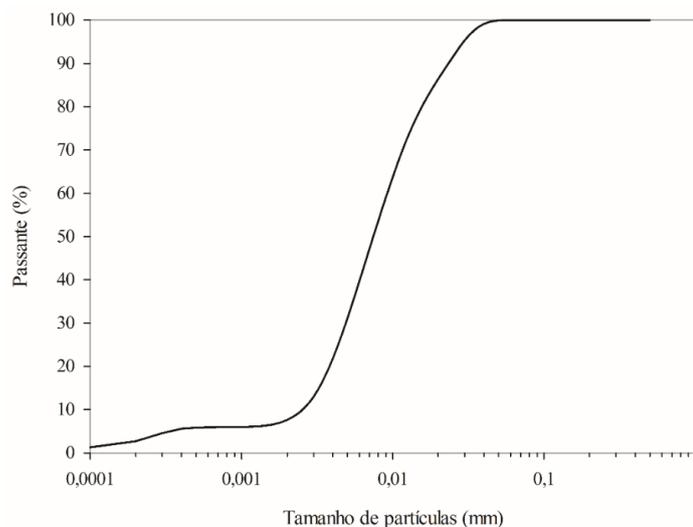


Figura 30 – Curva de distribuição granulométrica da CCOH.

Tabela 18 – Propriedades físicas da CCOH.

Propriedade	Resultado
Limite de liquidez (%)	-
Limite de plasticidade (%)	-
Índice de plasticidade	Não plástica
Massa específica real dos grãos ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2,24
Área superficial específica ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	4,18
Areia grossa (%) – $0,6 \leq d < 2$ mm	0
Areia média (%) – $0,2 \leq d < 0,6$ mm	0
Areia fina (%) – $0,06 \leq d < 0,2$ mm	0
Silte (%) – $0,002 \leq d < 0,06$ mm	93,01
Argila (%) – $d < 0,002$ mm	6,99
Diâmetro mediano de partículas – D_{50} (μm)	10,27
Diâmetro de partícula de 90% da distribuição cumulativa – D_{90} (μm)	23,37
Diâmetro de partícula de 10% da distribuição cumulativa – D_{10} (μm)	2,53

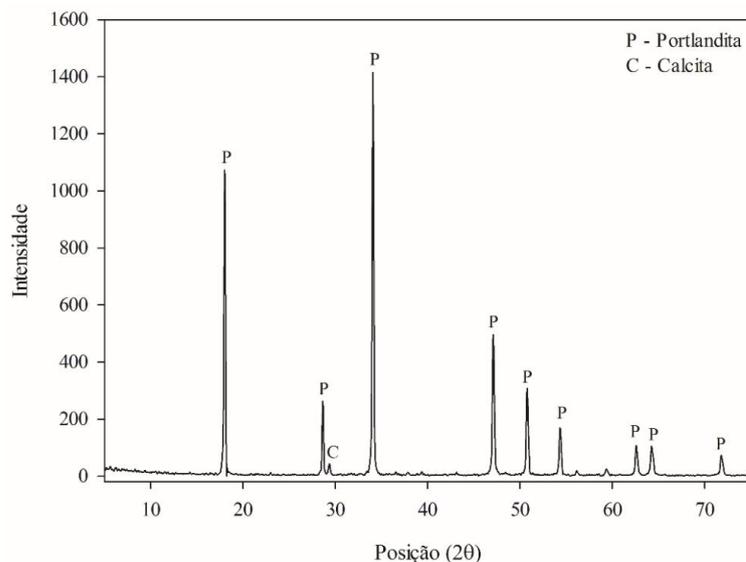


Figura 31 – Difratoograma da CCOH.

3.3.4 Ligante álcali-ativado

O novo ligante álcali-ativado foi desenvolvido em conjunto com a pesquisadora Mariana Tonini de Araújo (TONINI DE ARAÚJO, 2022). Pastas álcali-ativadas foram produzidas considerando distintas relações de CBCA/CCOH, água/ligante (A/L) e concentrações de NaOH. Para tanto, adotou-se um planejamento fatorial completo para 3 fatores, avaliados em diferentes níveis. Na Tabela 19 estão sintetizados os fatores e respectivos níveis. A combinação dos níveis dos fatores (4x5x5), com duas repetições, resultou na fabricação de 200 pastas álcali-ativadas em moldes cilíndricos de PVC (37 mm de diâmetro e 74 mm de altura). Após o período de cura de 7 dias (23°C e umidade relativa de 95%), as pastas álcali-ativadas foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão simples (RCS), conforme C39/C39 M (ASTM, 2020a).

Tabela 19 – Fatores e níveis do planejamento experimental das pastas.

Fatores controláveis	Símbolo	Níveis				
		1	2	3	4	5
CBCA/CCOH	A	1,5	2,33	4,0	9,0	-
A/L	B	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
NaOH (M)	C	0,0 (água destilada)	0,5	1,0	2,0	3,0

O ligante álcali-ativado foi submetido a avaliação microestrutural, com auxílio das técnicas de FRX, FTIR, DRX e MEV/EDS, para determinação da composição química, mineralogia e morfologia do material respectivamente. Para tanto, realizou-se a coleta de amostras dos corpos de prova de interesse e subsequente processo de paralização das reações químicas, conforme Caicedo (2020). Até o momento da execução das análises microestruturais, as amostras foram mantidas acondicionadas em sacos herméticos para evitar o contato com ar e umidade.

O efeito da ativação alcalina no pH da mistura CBCA-CCOH foi avaliado por meio da determinação do pH [D6739 (ASTM, 2020b)] de misturas CBCA-CCOH-água destilada e CBCA-CCOH-solução de NaOH. Resumidamente 5g de CBCA-CCOH foi misturada a 100 ml de água destilada ou de solução de hidróxido de sódio (1M), e submetida a agitação sob temperatura de 23±2°C durante 5 min em um agitador magnético. Após foi realizada a medição do pH, em um pHmetro digital (HI 2221 Hanna, eletrodo em Ag/AgCl), previamente calibrado.

3.3.5 Cimento Portland de alta resistência inicial

O cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) apresenta massa específica real das partículas igual a $3,15 \text{ g.cm}^{-3}$. Sua mineralogia caracteriza-se pela presença de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), alita ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), calcita e belita ou larnita ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) (Figura 32). Devido ao CPV-ARI conter até 10% de material carbonático em sua composição [NBR 16697 (ABNT, 2018b)], a calcita está presente na mineralogia do cimento Portland. Possivelmente não foi detectado pico característico de aluminatos em função deste coincidir com o da alita. Composição mineralógica semelhante do CPV-ARI foi verificada por Maciel *et al.* (2019).

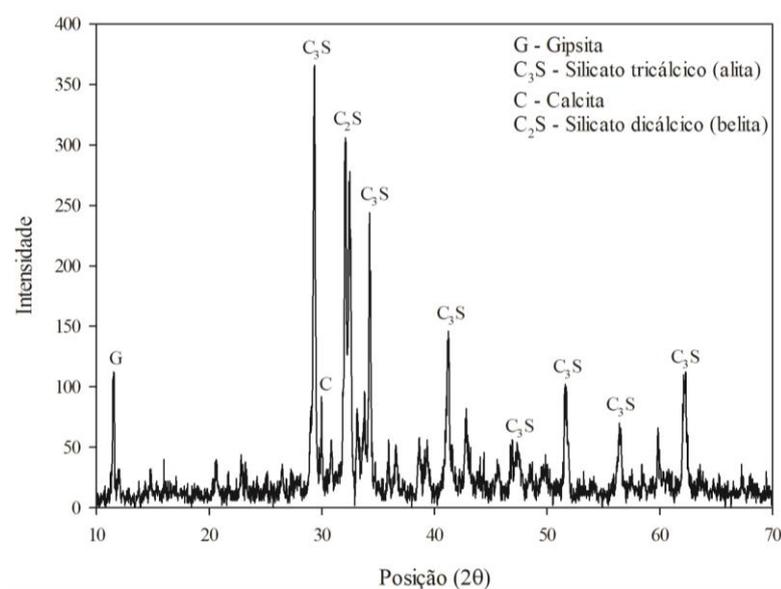


Figura 32 – Difratograma do CPV-ARI.

A composição química do CPV-ARI é dada majoritariamente por óxido de cálcio (57,7%), além de óxidos de silício (17,8%), magnésio (5,35%), alumínio (5,28%), ferro (3,97%), enxofre (2,09%), dentre outros (Tabela 20). Devido a volatilização das moléculas de água presentes na gipsita e do CO_2 oriundo do calcário, a perda ao fogo (PF) foi de 5,18%, sendo esta inferior ao limite máximo (6,5%) estabelecido pela NBR 16697 (ABNT, 2018b).

Tabela 20 – Composição química do CPV-ARI.

Óxidos (%)	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	SrO	Na ₂ O	P ₂ O ₅
	57,7	17,8	5,35	5,28	3,97	2,09	1,26	0,40	0,29	0,24	0,12
	MnO	BaO	ZnO	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	NiO	CuO	PF			
	0,11	0,07	0,06	0,03	0,02	0,02	0,01	5,18			

Para auxiliar na compreensão sobre a lixiviação e solubilização de metais de misturas RAF-CPV, o agente cimentante CPV-ARI foi submetido aos ensaios da NBR 10005 e NBR 10006. As concentrações de metais dos extratos lixiviados e solubilizados estão apresentadas na Tabela 21. Devido as concentrações de metais presentes no extrato lixiviado do CPV serem inferiores aos limites do anexo F da NBR 10004, constatou-se que o cimento não apresenta toxicidade por metais. Entretanto, verificou-se que as concentrações de Ba, Cr, Fe e Na no extrato solubilizado excederem os limites do anexo G da NBR 10004. Estes metais também foram observados por Bertoli *et al.* (2015) no extrato solubilizado de uma amostra de CPV-ARI.

Tabela 21 – Composição química dos extratos lixiviado e solubilizado do CPV-ARI.

Elemento	Extrato lixiviado		Elemento	Extrato solubilizado	
	Concentração (mg.L ⁻¹)	Limite (mg.L ⁻¹) Anexo F		Concentração (mg.L ⁻¹)	Limite (mg.L ⁻¹) Anexo G
Ag	0,028	5	Ag	0,013	0,05
As	0,000	1	Al	0,000	0,2
Ba	1,07	70	As	0,000	0,01
Cd	0,002	0,5	Ba	0,72	0,7
Cr total	0,86	5	Cd	0,001	0,005
Hg	0,000	0,1	Cr	0,19	0,05
Pb	0,000	1	Cu	0,000	2
Se	0,000	1	Fe	1,25	0,3
			Hg	0,000	0,001
			Mn	0,000	0,1
			Na	255	200
			Pb	0,000	0,01
			Se	0,000	0,01
			Zn	0,000	5

3.4 DOSAGEM E COMPACTAÇÃO

Ao RAF aplicou-se a relação CBCA/CCOH de 80/20 (isto é, 80% CBCA e 20% CCOH) nos teores de 15 e 25%. A definição das relações RAF/ligante fundamentou-se em pesquisas de estabilização de solos arenosos mediante ativação alcalina (CAICEDO, 2020; CRISTELO *et al.*, 2012b; RIOS *et al.*, 2017), além de testes preliminares com substituições de 10 e 15%, onde a substituição de 10% não demonstrou resultados satisfatórios. Afim de obter-se uma resistência considerável e a menor substituição possível aplicando à mistura, definiu-se as seguintes relações: 85/15 e 75/25, i.e., 85 e 75% de RAF para 15 e 25% de ligante respectivamente. Realizou-se ensaios de compactação [D1557 (ASTM, 2012)] das misturas do RAF com as

substituições pré-definidas de CBCA+CCOH (15 e 25%), considerando reaproveitamento de material. Para aferir o maior peso específico e, conseqüentemente valores de resistência mais elevados, os ensaios de compactação das misturas foram realizados com a energia modificada. As curvas de compactação e os valores de peso específico aparente seco máximo e teor de umidade das misturas estão apresentados na Figura 33 e Tabela 22 respectivamente.

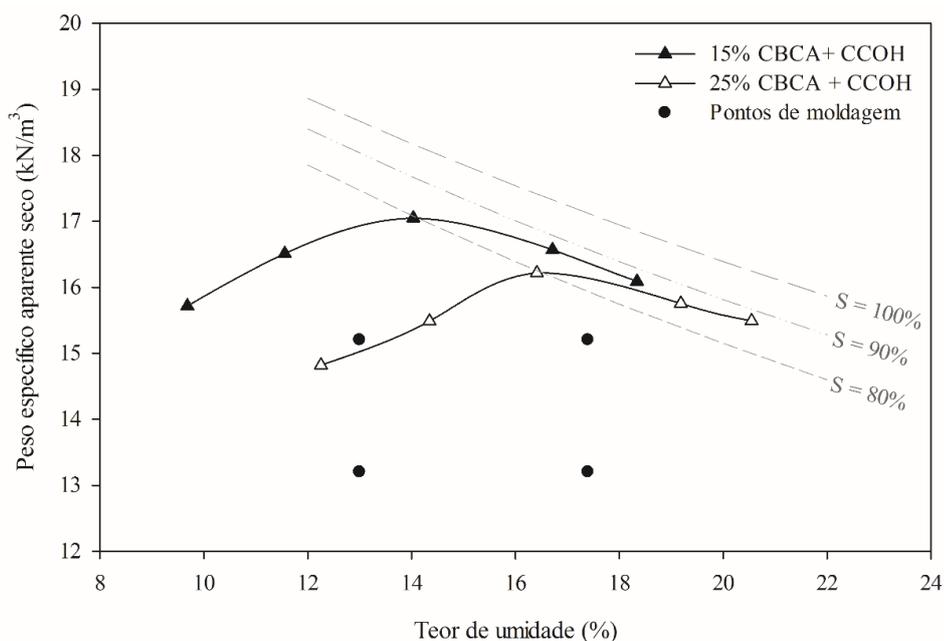


Figura 33 – Curvas de compactação das misturas e pontos de moldagem.

Tabela 22 – Ensaio de compactação das misturas RAF-LAA.

	Peso específico aparente seco máximo (kN.m^{-3})	Teor de umidade (%)
RAF-15% ligante	17,05	14,03
RAF-25% ligante	16,22	16,41
Escolhidos para avaliação	15,2 e 13,2	17,4 e 13

Os valores de peso específico aparente seco escolhidos partiram dos resultados encontrados para a mistura com 25% de CBCA+CCOH, pois o valor de peso específico aparente seco máximo dessa mistura ($\gamma_{dmax}=16,22 \text{ kN.m}^{-3}$) está contido na extensão da curva de compactação da mistura de 15% ($\gamma_{dmax}=17,05 \text{ kN.m}^{-3}$). Entretanto, testes preliminares de moldagem de corpos de prova demonstraram que valores acima de $15,2 \text{ kN.m}^{-3}$ eram impraticáveis devido a limitações técnicas impostas pelas condições do processo (capacidade do macaco hidráulico e do molde cilíndrico). Portanto, adotou-se um γ_{dmax} de trabalho de $15,2 \text{ kN.m}^{-3}$, e também há dois pontos abaixo (correspondendo a $13,2 \text{ kN.m}^{-3}$), a fim de avaliar a

influência da porosidade no comportamento mecânico das misturas. Para avaliar a influência do teor de umidade inicial, escolheu-se um ponto abaixo da umidade ótima da mistura 15% ($w = 14,03\%$) e um ponto acima da umidade ótima da mistura 25% ($w = 16,41\%$). Considerando a exequibilidade dos corpos de prova, os teores de umidade iniciais escolhidos foram 13 e 17,4%, e os pesos específicos foram de 15,2 e 13,2 kN.m^{-3} .

3.5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO MECÂNICO E AMBIENTAL

3.5.1 Resistência à compressão simples

3.5.1.1 Planejamento experimental para RCS

Misturas RAF-ligante álcali-ativado (RAF-LAA) e RAF-cimento Portland (RAF-CPV) foram submetidos ao ensaio de RCS [NBR 12025 (ABNT, 2012)]. Planejamento de experimentos foram realizados nas avaliações de comportamento mecânico, conforme Montgomery (2017). Para RAF-LAA, seguiu-se um planejamento experimental do tipo 2^k para 5 fatores ($k=5$), com duas repetições, e com 5 pontos centrais (igual ao número de fatores), resultando em 69 corpos de prova submetidos a RCS, de forma aleatorizada. Os fatores e seus níveis e matriz do planejamento experimental estão apresentados nas Tabelas 23 e 24 respectivamente.

Tabela 23 – Fatores e níveis do planejamento experimental para RCS de RAF-LAA.

Fatores controláveis	Símbolo	Nível inferior	Ponto central	Nível superior
		-1	0	+1
Umidade inicial (%)	A	13,0	15,2	17,4
Peso específico (kN.m^{-3})	B	13,2	14,2	15,2
Agente cimentante (%)	C	15	20	25
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	D	23	31,5	40
Tempo de cura (dias)	E	7	17,5	28

Os teores de ligante e os valores de estudo para umidade inicial e peso específico foram escolhidos a partir dos ensaios de compactação (item 3.4). As temperaturas de cura de 23°C e 40°C foram adotadas considerando: a primeira como a temperatura ambiente, e a segunda, como sendo a temperatura média máxima atingida no Rio Grande do Sul (SEPLAG, 2021). Os tempos de cura de 7 e 28 dias foram escolhidos por serem os períodos de tempo de maior

interesse na estabilização de solos com ligantes álcali-ativados conforme literatura (BRUSCHI *et al.*, 2021b; PEREIRA DOS SANTOS *et al.*, 2022; TONINI DE ARAÚJO *et al.*, 2023).

Tabela 24 – Matriz do planejamento experimental para RCS de RAF-LAA.

Número de ensaios	Fatores									
	Níveis reais					Níveis codificados				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
2	13,0	13,2	15	23	7,0	-1	-1	-1	-1	-1
2	17,4	13,2	15	23	7,0	1	-1	-1	-1	-1
2	13,0	15,2	15	23	7,0	-1	1	-1	-1	-1
2	17,4	15,2	15	23	7,0	1	1	-1	-1	-1
2	13,0	13,2	25	23	7,0	-1	-1	1	-1	-1
2	17,4	13,2	25	23	7,0	1	-1	1	-1	-1
2	13,0	15,2	25	23	7,0	-1	1	1	-1	-1
2	17,4	15,2	25	23	7,0	1	1	1	-1	-1
2	13,0	13,2	15	40	7,0	-1	-1	-1	1	-1
2	17,4	13,2	15	40	7,0	1	-1	-1	1	-1
2	13,0	15,2	15	40	7,0	-1	1	-1	1	-1
2	17,4	15,2	15	40	7,0	1	1	-1	1	-1
2	13,0	13,2	25	40	7,0	-1	-1	1	1	-1
2	17,4	13,2	25	40	7,0	1	-1	1	1	-1
2	13,0	15,2	25	40	7,0	-1	1	1	1	-1
2	17,4	15,2	25	40	7,0	1	1	1	1	-1
2	13,0	13,2	15	23	28,0	-1	-1	-1	-1	1
2	17,4	13,2	15	23	28,0	1	-1	-1	-1	1
2	13,0	15,2	15	23	28,0	-1	1	-1	-1	1
2	17,4	15,2	15	23	28,0	1	1	-1	-1	1
2	13,0	13,2	25	23	28,0	-1	-1	1	-1	1
2	17,4	13,2	25	23	28,0	1	-1	1	-1	1
2	13,0	15,2	25	23	28,0	-1	1	1	-1	1
2	17,4	15,2	25	23	28,0	1	1	1	-1	1
2	13,0	13,2	15	40	13,0	-1	-1	-1	1	1
2	17,4	13,2	15	40	17,4	1	-1	-1	1	1
2	13,0	15,2	15	40	13,0	-1	1	-1	1	1
2	17,4	15,2	15	40	17,4	1	1	-1	1	1
2	13,0	13,2	25	40	13,0	-1	-1	1	1	1
2	17,4	13,2	25	40	17,4	1	-1	1	1	1
2	13,0	15,2	25	40	13,0	-1	1	1	1	1
2	17,4	15,2	25	40	17,4	1	1	1	1	1
5	15,2	14,2	20	31,5	17,5	0	0	0	0	0

Buscando fazer uma comparação direta entre RAF-LAA e RAF-CPV, o sistema RAF-CPV seria avaliado perante os mesmos fatores controláveis e níveis do sistema RAF-LAA, ou seja, mesmos valores de: massa de agente cimentante; teor de umidade, peso específico aparente seco, temperatura de cura e tempo de cura. Entretanto, testes preliminares para RAF-CPV demonstraram que os corpos de prova moldados com peso específico aparente seco de 13,2 kN.m⁻³ (nível inferior do γ_d de RAF-LAA) não apresentavam estrutura mínima para serem desmoldados. Este γ_d pode ser considerado baixo para misturas de RAF-cimento tradicional,

visto que, ele foi extraído das curvas de compactação de RAF com CBCA+CCOH, onde a CBCA ocupa um grande volume. Sendo assim, para as misturas RAF-CPV, γ_d foi um fator fixado em $15,2 \text{ kN.m}^{-3}$. Portanto, seguiu-se um PE do tipo 2^k para 4 fatores, com duas repetições, e com 4 pontos centrais (igual ao número de fatores), resultando em 36 corpos de prova submetidos a RCS, de forma aleatorizada. Os fatores e seus níveis e a matriz do planejamento experimental estão expostos nas Tabelas 25 e 26 respectivamente.

Tabela 25 – Fatores e níveis do planejamento experimental para RCS de RAF-CPV.

Fatores controláveis	Símbolo	Nível inferior	Ponto central	Nível superior
		-1	0	+1
Umidade inicial (%)	A	13,0	15,2	17,4
Agente cimentante (%)	B	15	20	25
Temperatura (°C)	C	23	31,5	40
Tempo de cura (dias)	D	7	17,5	28

Tabela 26 – Matriz do planejamento experimental para RCS de RAF-CPV.

Número de ensaios	Fatores							
	Níveis reais				Níveis codificados			
	A	B	C	D	A	B	C	D
2	13,0	15	23	7	-1	-1	-1	-1
2	17,4	15	23	7	1	-1	-1	-1
2	13,0	25	23	7	-1	1	-1	-1
2	17,4	25	23	7	1	1	-1	-1
2	13,0	15	40	7	-1	-1	1	-1
2	17,4	15	40	7	1	-1	1	-1
2	13,0	25	40	7	-1	1	1	-1
2	17,4	25	40	7	1	1	1	-1
2	13,0	15	23	28	-1	-1	-1	1
2	17,4	15	23	28	1	-1	-1	1
2	13,0	25	23	28	-1	1	-1	1
2	17,4	25	23	28	1	1	-1	1
2	13,0	15	40	28	-1	-1	1	1
2	17,4	15	40	28	1	-1	1	1
2	13,0	25	40	28	-1	1	1	1
2	17,4	25	40	28	1	1	1	1
4	15,2	20	31,5	17,5	0	0	0	0

3.5.1.2 Mistura, moldagem e cura dos corpos de prova para RCS

Referente ao processo de mistura dos materiais, primeiramente misturou-se o RAF, a CBCA e CCOH dentro de um saco plástico. Nas misturas RAF-CBCA-CCOH foram adicionadas a quantidade necessária de álcalis (Na_2O), na forma de solução de NaOH (definida na dosagem) e a quantidade de água necessária para atingir a umidade alvo. Primeiramente adicionou-se água

aos materiais e realizou-se a mistura deles até notar-se uma homogeneização, subsequentemente acrescentou-se a solução alcalina, e por fim, fez-se uma nova mistura até a obtenção de um material homogêneo. Cada amostra foi compactada da seguinte forma: material compactado estaticamente em três camadas em um corpo de prova cilíndrico (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) para cada peso específico seco alvo. Entre cada uma das camadas foi realizada a escarificação para promover uma melhor aderência entre elas. Após a moldagem, as amostras foram removidas dos moldes cilíndricos e tiveram seus pesos, diâmetros e alturas medidos com precisão de 0,01g e 0,1 mm. O critério de aceitação de diâmetro, altura e umidade inicial dos corpos de prova correspondia a uma variação de até 2% do valor alvo.

Na sequência, cada corpo de prova foi inserido em um saco plástico, devidamente identificado. Para os tempos de cura de 7 e 28 dias, os corpos de prova sem cura térmica foram alocadas em uma sala com temperatura controlada de 23 ± 2 °C e umidade relativa de 95% (ASTM, 2019b). Enquanto que, os corpos de prova sob cura térmica, foram acondicionadas dentro de uma caixa com água, equipada com 3 termostatos (dois posicionados nas laterais e um no fundo), 1 bomba submersa e 2 sensores de temperatura (base e topo), mantendo uma temperatura de aproximadamente 40°C, conforme exposto na Figura 34. Restando 1 dia para o término do período de cura, os corpos de prova foram imersos em água durante 24 horas para reduzir a sucção, conforme proposto por Consoli, Dalla Rosa e Saldanha (2011). Assim, os corpos de prova sem cura térmica, foram imersos em uma caixa com água, localizada na sala com temperatura controlada (23 ± 2 °C). Os sob cura térmica tiveram seus sacos plásticos retirados e permaneceram na caixa com água a 40°C até completar a cura.

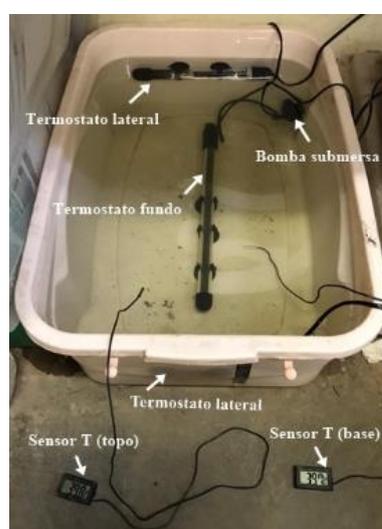


Figura 34 – Caixa com água para cura térmica dos corpos de prova.

3.5.1.3 Execução do ensaio de RCS

O rompimento dos corpos de prova foi realizado em uma prensa automática com células de carga de capacidade de 10 e 20kN, utilizadas conforme a previsão de resistência de cada amostra. A velocidade de deformação dos ensaios foi de 1,14 mm.min⁻¹. Como critério de aceitação dos dados obtidos, estabeleceu-se que as resistências individuais das duas repetições poderiam apresentar um desvio de até 10% da resistência média.

A RCS foi calculada conforme Equação 7, onde: RCS é resistência a compressão simples (MPa); Q é o carregamento aplicado ao corpo de prova no momento da ruptura (N), e D_m corresponde ao diâmetro médio do corpo de prova, aferido no topo, centro e base (mm).

$$RCS = \frac{Q}{\left(\frac{\pi D_m^2}{4}\right)} \quad \text{Eq. 7}$$

3.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

3.5.2.1 Planejamento experimental para RCD

RAF-ligante álcali-ativado e RAF-cimento foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RCD) [NBR 7222 (ABNT, 2011)]. Para ambos, seguiu-se um planejamento experimental idêntico ao elaborado para a avaliação de RCS (Tabelas 23 e 25), ou seja, foram fabricados 69 corpos de prova de RAF-LAA e 36 corpos de prova de RAF-CPV.

3.5.2.2 Mistura, moldagem e cura dos corpos de prova para RCD

Os processos de mistura, moldagem, cura e imersão em água dos corpos de prova para o ensaio de RCD foram executados de forma idêntica aos submetidos a RCS, conforme descrição no item anterior (3.5.1.2).

3.5.2.3 Execução do ensaio de RCD

O rompimento dos corpos de prova ocorreu de forma idêntica ao descrito no item 3.5.1.2, bem como o critério de aceitação dos resultados de RCD foi o mesmo do estabelecido para RCS.

A RCD foi calculada conforme Equação 8, onde: RCD é resistência à tração por compressão diametral (MPa); F é a força máxima obtida no ensaio (N); D corresponde ao diâmetro do corpo de prova (mm), e l é o comprimento do corpo de prova (mm).

$$RCD = \frac{2F}{(\pi D l)} \quad \text{Eq. 8}$$

3.5.3 Pulso ultrassônico

3.5.3.1 Planejamento e moldagem de corpos de prova para pulso ultrassônico

Sendo que o ensaio de pulso ultrassônico de RAF-LAA e RAF-CPV precede o de RCS, ou seja, o mesmo corpo de prova é submetido a ambas avaliações, o planejamento experimental e a moldagem de corpos de prova são idênticos nos dois ensaios.

3.5.3.2 Execução do ensaio de pulso ultrassônico

O módulo cisalhante (G_0) pode ser determinado como uma relação entre a velocidade de propagação de uma onda cisalhante e a massa específica do meio, conforme Equação 9, onde: G_0 é o módulo cisalhante inicial (MPa); ρ corresponde a massa específica do material (kg.m^{-3}), e V_s é a velocidade da onda cisalhante (m.s^{-1}). O tempo de propagação da onda cisalhante é independente da frequência empregada, em meios considerados não dispersivos.

$$G_0 = \rho \times V_s^2 \quad \text{Eq. 9}$$

Para estimar o módulo cisalhante a pequeníssimas deformações, realizou-se o ensaio de pulso ultrassônico com auxílio do instrumento PundiLab(+), em que foram feitas medições dos tempos de propagação de onda de compressão e de cisalhamento pelos corpos de prova cilíndricos. A onda de compressão foi induzida pela vibração de transdutores a uma frequência de 54kHz, e a segunda (cisalhamento), pela vibração de outros tipos transdutores a 250kHz.

O ensaio teve início após término do período de cura dos corpos de prova. Previamente a cada nova leitura, na interface corpo de prova-transdutor adicionou-se um gel específico para auxílio na transmissão e leitura do sinal. Após, fez-se a leitura do tempo do deslocamento da onda de compressão através corpo de prova (t_p), e subsequentemente tempo de deslocamento da onda cisalhante (t_s). Por meio da relação entre a altura média de cada corpo de prova e o tempo aferido, determinou-se as respectivas velocidades (V_p e V_s). Foram feitas três medições

correspondentes ao tempo t_p , sendo esse resultante da média das três, e mais de dez relativas ao tempo t_s . A leitura do t_p foi obtida diretamente no instrumento, e a leitura do t_s , por sua vez, foi realizada na interface computacional do PundiLab(+).

3.5.4 Durabilidade

3.5.4.1 Programa experimental para ensaio de durabilidade

A durabilidade das misturas RAF-LAA e RAF-CPV foi avaliada por meio de ciclos de molhagem e secagem, conforme ensaio estabelecido pela norma D559 (ASTM, 2015). Por se tratar de um ensaio que exige elevadas quantidades de materiais, o programa experimental para o ensaio de durabilidade foi reduzido, de modo a avaliar tratamentos de maior interesse do ponto de vista dos resultados de RCS, RCD e G_0 . O programa experimental deste ensaio está apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – Programa experimental do ensaio de durabilidade para RAF com distintos ligantes.

Ligante utilizado	Fatores fixos e controláveis				
	Teor de ligante (%)	Peso específico ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	Teor de umidade (%)	Temperatura de cura ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo de cura (dias)
LAA	15 e 25	13,2 e 15,2	13 e 17,4	23	7
CPV	15 e 25	15,2	13 e 17,4	23	7

3.5.4.2 Mistura, moldagem e cura dos corpos de prova para durabilidade

Para este ensaio, foram fabricados corpos de prova com dimensões de 100 mm de diâmetro e 120 mm de altura (volume correspondente a $944 \pm 11 \text{ cm}^3$). Os procedimentos de mistura de materiais, moldagem dos corpos de prova e acondicionamento para cura foram similares aos realizados para avaliações de RCS e RCD.

3.5.4.3 Execução do ensaio de durabilidade

O método da D559 (ASTM, 2015) permite determinar perda de massa, variação de umidade e variação de volume dos corpos de prova provenientes de ciclos de molhagem, secagem e escovação dos mesmos. Após o término do período de cura, os corpos de prova foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem. Cada um dos 12 ciclos teve uma duração de 48

horas, distribuídas da seguinte forma: (i) 5 horas de imersão em água; (ii) 42 horas de secagem em estufa a 71 °C e (iii) 1 hora de intervalo para escovação. Os corpos de prova foram escovados verticalmente por meio de: 18 a 20 passadas de escova na lateral do corpo de prova, cobrindo-o duas vezes, e mais 4 escovadas no topo e na base. Cada passagem de escova foi realizada com uma força média de 13 N. Para tanto, esse procedimento foi executado sobre uma balança. Os corpos de prova foram pesados cada vez que saíam da estufa e logo após a escovação, portanto, foram feitas determinações de perda de massa a cada ciclo.

3.5.5 Índice porosidade/teor volumétrico de ligante

Estudos de Consoli *et al.* (2007), Consoli *et al.* (2009), Consoli *et al.* (2012), Consoli *et al.* (2013) apresentam a metodologia de dosagem racional para solos artificialmente cimentados, que está alicerçada no índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) Equação 10. A porosidade (η) é definida como a razão entre o volume de vazios (V_v) e o volume total (V_{total}) de um corpo de prova. Cada um dos materiais possui uma massa específica distinta (γ_{s_s} e γ_{s_c} respectivamente), as quais são incluídas no cálculo da porosidade. O teor volumétrico de cimento é calculado de acordo com a Equação 11, considerando a massa de cimento (m_c), peso específico seco do cimento (γ_{s_c}) e o volume dos materiais da mistura (V).

$$\frac{V_v}{V_c} = \frac{V_v/V_{total}}{V_c/V_{total}} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad \text{Eq. 10}$$

$$C_{iv} = \frac{V_c}{V} = \frac{m_c/\gamma_{s_c}}{V} \quad \text{Eq. 11}$$

Considerando a influência da porosidade pelo teores de cal e de pozolana em solos estabilizados, Consoli *et al.* (2018b) e Consoli *et al.* (2019b) propuseram o índice porosidade/teor volumétrico de ligante (η/B_{iv}). Esse índice é definido pelas Equações 12 e 13. A porosidade (η) é dada em função do peso específico aparente seco (γ_d) e do conteúdo de solo (S), pozolana (P) e cal (C). A massa específica de cada um dos materiais (γ_{s_s} , γ_{s_p} e γ_{s_c} para solo, pozolana e cal respectivamente) é considerada no cálculo da porosidade. O ligante (B_{iv}) é calculado a partir das relações volumétricas dos agentes estabilizadores (pozolana e cal).

$$\eta = 100 - 100 \left\{ \left[\frac{\gamma_d}{\frac{S}{100} + \frac{P}{100} + \frac{C}{100}} \right] \left[\frac{S}{\gamma_{s_s}} + \frac{P}{\gamma_{s_p}} + \frac{C}{\gamma_{s_c}} \right] \right\} \quad \text{Eq. 12}$$

$$B_{iv} = \frac{V_P + V_C}{V} = \frac{m_P/\gamma_{sp} + m_C/\gamma_{sc}}{V} \quad \text{Eq. 13}$$

3.5.6 Composição química, mineralógica e microestrutura

As amostras de RAF-LAA que apresentaram melhor comportamento mecânico, em cada temperatura e tempo de cura avaliado, foram submetidas a análise da mineralogia, composição química e microestrutura pelas técnicas de DRX, FTIR e MEV respectivamente. A paralização das reações foi realizada conforme descrição supracitada no item 3.3.4. As especificações dessas amostras estão expostas na Tabela 28.

Tabela 28 – Níveis dos fatores correspondentes as amostras de RAF-LAA avaliadas por DRX, FTIR e MEV.

Amostra	Teor de LAA (%)	Peso específico aparente seco (kN.m ⁻³)	Umidade inicial (%)	Temperatura de cura (°C)	Tempo de cura (dias)
1				23	7
2	25	15,2	17,4	23	28
3				40	7
4				40	28

3.5.7 Lixiviação e solubilização de metais

As análises de lixiviação consistiram em avaliar a capacidade de transferência de metais presentes na composição das misturas RAF-LAA e RAF-CPV, por meio da dissolução no meio extrator (i.e. solução ácida ou água destilada, dependendo do método). A análise de solubilização referiu-se à capacidade de diluição de metais (presentes nas misturas) em água.

3.5.7.1 Planejamento e execução dos ensaios

Posterior aos ensaios mecânicos (RCS, RCD, rigidez e durabilidade), misturas de RAF-LAA e RAF-CPV foram submetidas a avaliação por lixiviação e solubilização de metais. Foram moldados corpos de prova com dimensões idênticas aos de RCS e RCD (50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento), bem como seguindo os mesmos procedimentos de mistura de materiais, moldagem e acondicionamento para cura (item 3.5.1.2)

Após a finalização do tempo de cura, as amostras foram submetidas a ensaios de lixiviação por dois métodos: norma brasileira NBR 10005 (ABNT, 2004b) e norma internacional D4874

(ASTM, 2014). O ensaio de lixiviação da NBR 10005 (ABNT, 2004b) é utilizado para classificação de resíduos sólidos, e é muito similar ao método 1311 - TCLP (*Toxicity characteristic leaching procedure*) da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 1992). Métodos de classificação de resíduos sólidos vêm sendo utilizados para avaliar a lixiviação de metais em materiais álcali-ativados (ADEDIRAN; YLINIEMI; ILLIKAINEN, 2021; CRISTELO *et al.*, 2021; HOY *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2019a).

Também realizou-se o ensaio de solubilização de metais, descrito pela NBR 10006 (ABNT, 2004c). As misturas RAF-LAA e RAF-CPV foram submetidas ao ensaio de solubilização com a finalidade de avaliar o comportamento de dissolução de metais destes materiais, quando expostas a um ambiente distinto aos condicionados pelos ensaios de lixiviação, anteriormente expostos. Neste ensaio, cada mistura (fragmentada em partes menores) permaneceu imersa em água destilada durante 7 dias (sem agitação), o que condicionou um ambiente altamente alcalino. Para os ensaios de lixiviação e solubilização pelas normativas brasileiras, após o período de cura, os corpos de prova foram rompidos para passagem na peneira 9,5 mm (Figura 35). Os procedimentos seguintes seguiram as especificações descritas no item 3.2.7.

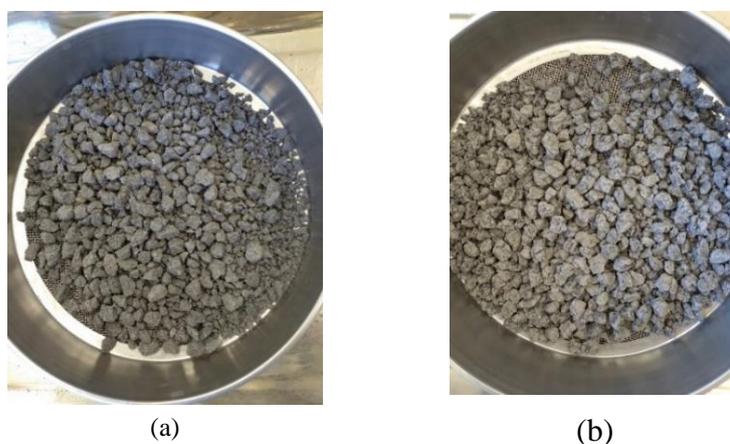


Figura 35 – Corpos de prova de RAF-LAA (a) e RAF-CPV (b) após passagem na peneira 9,5mm.

O programa experimental destes ensaios está apresentado na Tabela 29 e compreendeu duas etapas. A etapa 1 correspondeu a uma avaliação mais ampla, variando teor de ligante, peso específico e teor de umidade e fixando a temperatura e tempo de cura. A partir dos resultados da etapa 1, considerou-se investigar possíveis alterações na lixiviação e solubilização de metais dos corpos de prova com maior período de cura (28 dias), visto que ao longo do tempo ocorre maior precipitação de géis cimentantes, principalmente no sistema LAA. Para a etapa 2, fixou-

se os valores de peso específico e teor de umidade que resultaram em melhor comportamento mecânico (e.g. maiores peso específico e teor de umidade).

Tabela 29 – Programa experimental dos ensaios de lixiviação e solubilização de metais.

Etapas	Tipo de ligante	Fatores controláveis e fixos				
		Teor de ligante (%)	Peso específico aparente seco (kN.m^{-3})	Teor de umidade (%)	Temperatura de cura ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo de cura (dias)
Etapa 1	LAA	15 e 25	13,2 e 15,2	13 e 17,4	23	7
	CPV	15 e 25	15,2	13 e 17,4	23	7
Etapa 2	LAA ou CPV	15 e 25	15,2	17,4	23	28

Por sua vez, o ensaio de lixiviação em equipamento de coluna (Figura 36) foi realizado conforme a D4874 (ASTM, 2014), em corpo de prova com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, utilizando água destilada em fluxo ascendente. Por se tratar de um ensaio mais lento em relação ao normativa brasileira, o programa experimental foi reduzido de modo a avaliar somente os corpos de prova com peso específico e teor de umidade que resultaram em melhor comportamento mecânico, conforme apresentado na Tabela 30.



Figura 36 – Ensaio de lixiviação em equipamento de coluna.

A faixa de condutividade hidráulica de cada corpo de prova foi determinada com base na adaptação do método de carga constante para fluxo laminar de água através de solos granulares,

conforme D2434 (ASTM, 2019c), em parede flexível com confinamento e fluxo ascendente do próprio ensaio de coluna. Considerando os limites estabelecidos na Tabela 31, de acordo com a faixa de condutividade hidráulica obtida, determinou-se o gradiente hidráulico para uso em cada corpo de prova no ensaio de lixiviação em equipamento de coluna. Neste estudo, a faixa de gradiente hidráulico variou de 2 a 10.

Tabela 30 – Programa experimental do ensaio de lixiviação em coluna conforme D4874.

Tipo de ligante	Fatores controláveis e fixos				
	Teor de ligante (%)	Peso específico aparente seco (kN.m^{-3})	Teor de umidade (%)	Temperatura de cura ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo de cura (dias)
LAA ou CPV	15 e 25	15,2	17,4	23	7

Tabela 31 – Gradiente hidráulico máximo em função da condutividade hidráulica de cada corpo de prova.

Condutividade hidráulica (m/s)	Gradiente hidráulico máximo recomendado - D5084 (ASTM, 2016)	RAF-LAA		RAF-CPV	
		15%	25%	15%	25%
1×10^{-5} a 1×10^{-6}	2			X	X
1×10^{-6} a 1×10^{-7}	5	X			
1×10^{-7} a 1×10^{-8}	10		X		
1×10^{-8} a 1×10^{-9}	20				
menor que 1×10^{-9}	30				

A norma D4874 (ASTM, 2014) recomenda que as coletas de lixiviados sejam feitas em 1 até 8 vezes o volume de vazios do corpo de prova, considerando um ensaio com duração de $24 \pm 3\text{h}$, ou outro período correspondente ao volume de vazios de interesse. Nesta pesquisa, mistura de RAF com 25% de LAA correspondeu a um material com elevada cimentação e baixa porosidade, sendo assim, para todos os corpos de prova ensaiados foi possível coletar pelo menos uma vez o volume de vazios ($1V_v$) dentro do período de $24 \pm 3\text{h}$. A coleta de cinco vezes o volume de vazios ($5V_v$) foi realizada também em períodos de tempo distintos, conforme as características de cada corpo de prova, com o objetivo de avaliar possíveis alterações nas concentrações de metais lixiviados ao longo do tempo.

Os ensaios de lixiviação (NBR 10005) e solubilização (NBR 10006) foram realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental e Resíduos da UFFS, campus Erechim. O ensaio de lixiviação em equipamento de coluna (ASTM 4874) foi realizado no Laboratório de Geotecnia Ambiental da Universidade de Passo Fundo, campus Passo Fundo (RS). Os extratos lixiviados e solubilizados coletados foram acondicionados em ambiente resfriado ($< 4^{\circ}\text{C}$) para posteriores etapas de filtração e quantificação de metais.

3.5.7.2 Análise dos extratos lixiviados e solubilizados

Os extratos lixiviados e solubilizados foram submetidos à filtração a vácuo para remoção de material particulado e posterior determinação das concentrações de metais (Ag, Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Na, Pb, Se e Zn) por meio da técnica de ICP-OES, na Central analítica da UFFS, campus Erechim (RS). As concentrações de metais determinadas foram comparadas com limites de toxicidade e solubilidade da NBR 10004 (ABNT, 2004a) e de toxicidade da EPA (USEPA, 2004), bem como com valores orientadores para qualidade de águas estabelecidos por diferentes normativas nacional e internacionais [CONAMA 460 (CONAMA, 2013), Lista Holandesa (VROM, 2000) e EPA (USEPA, 2022a)]. Leituras de pH foram realizadas com auxílio de um pHmetro digital (HI 2221 Hanna, eletrodo em Ag/AgCl).

3.6 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

3.6.1 Avaliação ambiental do ciclo de vida

A avaliação ambiental do ciclo de vida (AACV) foi realizada com base nas normativas ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b), e envolveu quatro fases: (i) definição de objetivo e escopo; (ii) análise de inventário; (iii) avaliação de impacto e (iv) interpretação de resultados. O *software SimaPro* v.9.4 foi utilizado como ferramenta para a avaliação dos impactos ambientais.

Para o comparativo de impactos ambientais entre misturas RAF-LAA e RAF-CPV, considerou-se uma RCS alvo de 2,1 MPa. Este valor corresponde a resistência mínima para uma mistura solo-cimento em 7 dias a 23°C para uso em base de pavimentos (DNIT, 2010). A RCS de 2,1 MPa está associada a uma finalidade específica do solo estabilizado (base de pavimentos), sendo utilizada como um valor de referência nesta pesquisa. Para uma RCS de 2,1 MPa (em 7 dias a 23°C), o índice $\eta/B_{iv}^{0,28}$ corresponde a 19,82 para RAF-LAA (Equação 23) e 24,56 para RAF-CPV (Equação 27). Considerando os valores correspondentes de $\eta/B_{iv}^{0,28}$, foram definidas duas dosagens para RAF-LAA e uma dosagem para RAF-CPV. Para RAF-LAA foram propostas as dosagens: ADBL (alta densidade-baixo teor de ligante) e BDAL (baixa densidade-alto teor de ligante). Para RAF-CPV avaliou-se somente a dosagem da condição ADBL (alta densidade-baixo teor de ligante), em função do peso específico fixado, cuja justificativa

encontra-se no item 3.4. As dosagens dos sistemas avaliados estão sintetizadas na Tabela 32, compreendendo densidades na faixa de 13-15 kN.m⁻³ e teores de ligantes entre 15 e 25%. O teor de ligante definiu os demais parâmetros das dosagens (peso específico aparente seco, porosidade, teor volumétrico de ligante).

Tabela 32 – Síntese das dosagens para a AACV dos sistemas RAF-LAA e RAF-CPV.

Sistema	Dosagem	γ_d (kN.m ⁻³)	B (%)	η (%)	B _{iv} (%)	$\eta/B_{iv}^{0,28}$	RCS (MPa)
RAF-LAA	ADBL	15	16	39,34	11,57	19,82	2,1
	BDAL	13,7	25	43,43	16,51		
RAF-CPV	ADBL	14,9	16	43,50	7,70	24,56	

3.6.1.1 Objetivo e escopo

O objetivo desta AACV consistiu em avaliar os impactos ambientais de duas alternativas de estabilização de RAF e suas dosagens, para a unidade funcional de 1 m³ de RAF estabilizado. O quantitativo de materiais para a unidade funcional definida está apresentado na Tabela 33.

Tabela 33 – Quantitativo de materiais para 1 m³ de RAF estabilizado com distintos ligantes.

Materiais	Dosagem		
	LAA-ADBL	LAA-ADBL	CPV-ADBL
RAF (kg.m ⁻³)	1281,40	1045,37	1273,69
CBCA (kg.m ⁻³)	195,26	278,77	-
CCOH (kg.m ⁻³)	48,81	69,69	-
NaOH (kg.m ⁻³)	8,22	11,74	-
CPV-ARI (kg.m ⁻³)	-	-	242,61
Água (kg.m ⁻³)	263,58	239,88	263,84

A AACV compreendeu uma análise do berço ao portão (*cradle-to-gate*), a qual exclui as fases de uso, manutenção e disposição final. A estabilização de RAF com LAA envolveu os seguintes processos: (i) transporte de RAF; (ii) produção e transporte de CCOH; (iii) transporte do CBCA, (iv) produção e transporte de NaOH, e (v) construção (mistura, homogeneização e compactação). Por sua vez, a estabilização de RAF com CPV envolveu os processos de: (i) transporte de RAF, (ii) produção e transporte de cimento Portland, e (iii) construção (mistura, homogeneização e compactação). A estrutura dos sistemas de estabilização RAF-LAA e de RAF-CPV e respectivos limites estão apresentados nas Figuras 37 e 38 respectivamente.

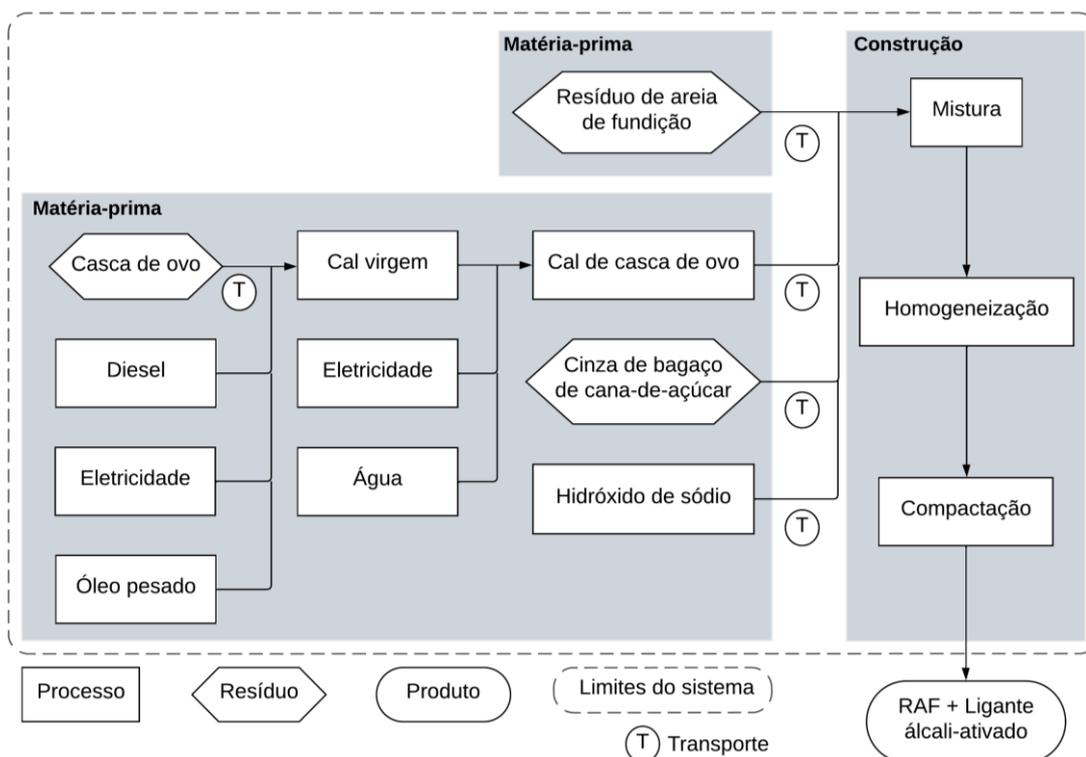


Figura 37 – Limites do sistema de estabilização do RAF com LAA.

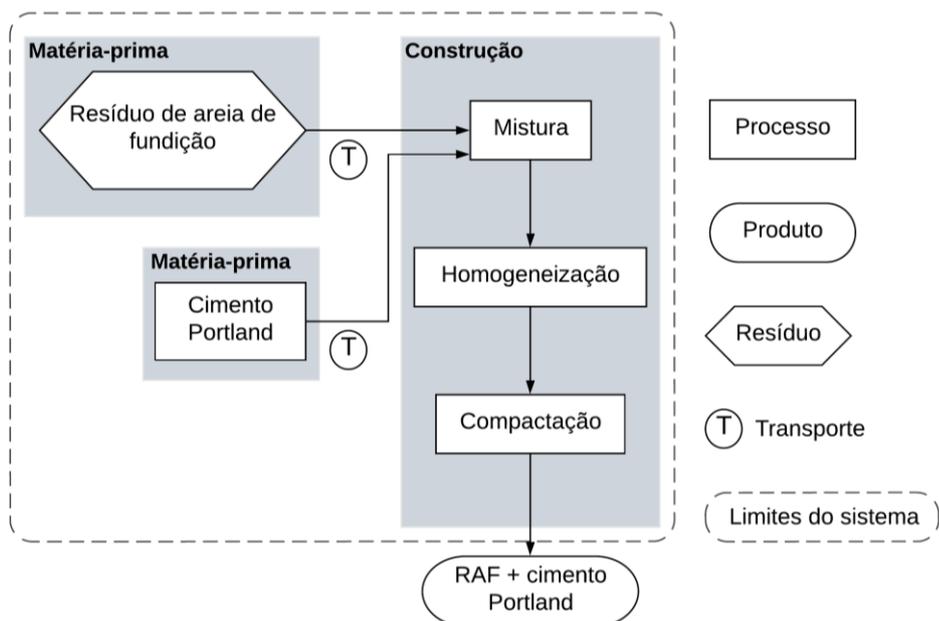


Figura 38 – Limites do sistema de estabilização do RAF com CPV.

Nos limites dos sistemas RAF-LAA e RAF-CPV considerou-se o consumo de diesel, bem como o consumo de água local. O diesel foi consumido pelos maquinários usados no transporte de

materiais e na mistura, homogeneização e compactação de RAF-ligante. Na estabilização de RAF com LAA considerou-se também o consumo de diesel por uma betoneira utilizada no preparo da solução ativadora no local (em campo), pois o NaOH foi recebido em forma de micro pérolas (estado sólido). Ainda, os impactos ambientais da cadeia produtiva de CBCA e cascas de ovos não foram contabilizados, pois tratam-se de resíduos dispostos em aterros.

3.6.1.2 Análise de inventário

Para a AACV foram utilizados dados secundários da base de dados *Ecoinvent* (versão 3.5), disponível no *SimaPro*. A produção de “CCO virgem” compreendeu: (i) calcinação de cascas de ovos; (ii) consumo de eletricidade por maquinários e serviços administrativos; (iii) utilização de óleo no processo de calcinação, e (iv) utilização de infraestrutura. Já a produção da “CCOH” abrangeu: (i) processamento da cal virgem; (ii) hidratação da cal com água; (iii) consumo de eletricidade por maquinários e serviços administrativos, e (iv) utilização de infraestrutura. Por sua vez, a produção de “hidróxido de sódio” (célula de membrana) compreendeu: (i) processo de eletrólise em célula de membrana, e (ii) produção, purificação e restauração da solução salina. O processo de eletrólise em célula de membrana para produção de NaOH foi escolhido por ser a tecnologia utilizada nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (ABICLOR, 2014), e também em novas plantas de produção de cloro e álcalis (ROSALES-HUAMANI *et al.*, 2021). A produção de “cimento Portland” incluiu: (i) produção de clínquer; (ii) extração de gesso; (iii) extração e beneficiamento do calcário; (iv) consumo de eletricidade por maquinário (energia hidrelétrica - produção brasileira), e (v) utilização de infraestrutura. Os impactos ambientais associados ao transporte de materiais, mistura, homogeneização e compactação de RAF-ligante foram contabilizados através do consumo de diesel pelos maquinários.

Os quantitativos de materiais para 1m^3 de RAF estabilizado (Tabela 33) foram inseridos no *software SimaPro* para estimativa dos impactos ambientais causados pela produção destes materiais. Por sua vez, o quantitativo do consumo de diesel para o transporte de materiais está exposto na Tabela 34, e as considerações estão apresentadas na sequência. Considerou-se: um caminhão com potência de 360 HP, eficiência de $18\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ e capacidade de 14 m^3 (30 toneladas) (DA ROCHA *et al.*, 2022). Para o transporte foram consideradas quatro distâncias: (i) 370 km para cada trecho do transporte de RAF, devido a distância entre Porto Alegre e o local onde situa-se a indústria geradora de RAF (Erechim, RS); (ii) 550 km para cada trecho do transporte da CBCA baseado na distância entre Porto Alegre e o local onde se encontra a indústria

geradora de cinza (Porto Xavier, RS); (iii) 80 km para cada trecho do transporte de cascas de ovos, considerando a distância dos fornecedores do resíduo, e (iv) 30 km para cada trecho do transporte de CCOH, hidróxido de sódio e cimento Portland, em função destes materiais estarem disponíveis em Porto Alegre. Além disso, foram feitas as seguintes considerações (DA ROCHA *et al.*, 2022): (i) velocidade média de 65 km.h⁻¹ para o transporte de RAF e CBCA; (ii) velocidade média de 55 km.h⁻¹ para o transporte de cascas de ovos, CCOH, hidróxido de sódio e cimento Portland, e (iii) tempo de carga/descarga de materiais de 20 min (0,33 h).

Com base nas considerações supracitadas, cálculos foram realizados para quantificar o consumo de diesel no transporte de materiais. O cálculo do tempo de deslocamento (h) compreendeu a distância (km) percorrida em ambos trechos (ida e volta) dividida pela velocidade média do caminhão (km.h⁻¹), e posterior adição do tempo de carga/descarga (0,33h em cada trecho). A capacidade real de carga (ton) foi calculada através da multiplicação da densidade natural de cada material (kg.m⁻³) [D7481 (ASTM, 2018)] pela capacidade do caminhão (14m³). O tempo de deslocamento (h) foi dividido pela capacidade real de carga (ton), resultando em horas/tonelada, que multiplicada pela eficiência do caminhão (18 L.h⁻¹) resultou em litros/tonelada. Esta última multiplicada pelo quantitativo de material (Tabela 33) (ton) resultou no consumo total de diesel (L) para o transporte de materiais (Tabela 34).

Foram realizados cálculos do consumo de diesel pelos maquinários usados na mistura, homogeneização e compactação (SINAPI, 2022) de RAF-ligante (Tabela 35). Inicialmente, definiu-se a taxa de consumo de diesel (L.h⁻¹) pelos maquinários. As taxas de consumo de diesel da motoniveladora e do rolo compactador vibratório (liso) foram extraídas do fabricante *Caterpillar* (CATERPILLAR, 2018). Considerou-se um consumo baixo de diesel para RAF-CPV e um consumo médio para RAF-LAA, pois este último compreende material (CBCA) que requer condições de campo de médio impacto. O trator com grade de disco rebocável, o caminhão pipa e o rolo compactador de pneus (estático) são maquinários que não possuem especificação técnica do fabricante *Caterpillar*, assim, adotou-se um consumo de diesel de 15% da potência do maquinário (DA ROCHA *et al.*, 2016, 2022). O consumo de diesel da betoneira foi definido com base nas Tabelas e Composições de Preços para Orçamentos (TCPO) (PINI, 2010). A taxa de consumo de diesel (L.h⁻¹) multiplicada pelo tempo gasto por maquinário para processar 1 m³ (h.m⁻³) resultou no consumo de diesel (L) para 1 m³ da mistura.

Na Tabela 36 estão sintetizados os dados quantitativos que foram inseridos no *SimaPro* para análise de inventário de 1 m³ de mistura de RAF-ligante. O sistema RAF-LAA envolveu os processos de: (i) consumo de diesel para o transporte dos materiais e pelos maquinários utilizados na estabilização de RAF; (ii) consumo de cal hidratada; (iii) consumo de NaOH, e (iv) consumo de água. O sistema RAF-CPV compreendeu os processos de: (i) consumo de diesel para o transporte dos materiais e pelos maquinários utilizados na estabilização de RAF; (ii) consumo de cimento Portland, e (iii) consumo de água.

3.6.1.3 Avaliação de impacto

Para a avaliação de impacto ambiental utilizou-se a metodologia CML-IA (CML, 2016), recomendada por *Product Category Rules for Type III Environmental Product Declaration of Construction Products to EN 15804:2012* (BRE, 2013). Além da metodologia CML-IA ser geralmente utilizada (DA ROCHA *et al.*, 2016, 2022; TONINI DE ARAÚJO, 2022), a sua implementação gera resultados muito similares aos fornecidos pela metodologia TRACI, como observado anteriormente por Tonini de Araújo (2022). A avaliação considerou o modelo de alocação “*Allocation at the point of substitution*” (GOEDKOOOP *et al.*, 2016) e dez categorias de impactos: (i) aquecimento global (kg CO₂-eq); (ii) depleção da camada de ozônio (kg CFC-11-eq); (iii) oxidação fotoquímica (kg C₂H₄-eq); (iv) ecotoxicidade aquática em água doce (kg 1.4-DB eq); (v) ecotoxicidade aquática marinha (kg 1.4-DB eq); (vi) acidificação (kg SO₂-eq); (vii) eutrofização (kg PO₄-eq); (viii) ecotoxicidade terrestre (kg 1.4-DB eq); (ix) toxicidade humana (kg 1.4-DB eq) e (x) depleção de recursos abióticos (kg Sb-eq).

3.6.1.4 Interpretação de resultados e análise de sensibilidade

A interpretação dos resultados consistiu na combinação da análise de inventário com a avaliação de impacto para identificar os impactos ambientais, buscando fazer recomendações com base em limitações e potencialidades. Além disso, uma análise de sensibilidade é necessária para verificar a robustez das conclusões da AACV. Nesta pesquisa, realizou-se análises de sensibilidade para avaliar a influência de distintas distâncias de transporte de CBCA (originalmente advinda de longa distância, 550 km) nos impactos ambientais da estabilização de RAF com LAA. Assim, outras distâncias de transporte de CBCA foram avaliadas: 450, 350, 250, 150, 50 e 30 km.

Tabela 34 – Consumo de diesel para o transporte dos materiais.

Materiais	Distância (km)	Tempo de deslocamento (h)	Densidade natural (kg.m ⁻³)	Capacidade real de carga (ton)	Horas/ton	Litros/ton	LAA-ADBL		LAA-BDAL		CPV-ADBL	
							Ton	Total (L)	Ton	Total (L)	Ton	Total (L)
RAF	370	12,05	1435,5	20,10	0,60	10,79	1,28	13,83	1,05	11,28	1,27	13,75
CBCA	550	17,59	298,0	4,17	4,22	75,89	0,20	14,82	0,28	21,16	-	-
NaOH	30	1,76	964,0	13,50	0,13	2,34	0,01	0,02	0,02	0,05	-	-
Casca de ovos	80	3,58	1231,5	17,24	0,21	3,73	0,10	0,36	0,14	0,52	-	-
CCOH	30	1,76	450,5	6,31	0,28	5,02	0,05	0,24	0,07	0,35	-	-
CPV	30	1,76	1025,0	14,35	0,12	2,20	-	-	-	-	0,24	0,53

Tabela 35 – Consumo de diesel pelos maquinários e equipamentos na mistura, homogeneização e compactação de RAF-ligante.

Maquinário ^a	Potência (HP)	LAA-ADBL e LAA-BDAL				CPV-ADBL			
		Litros/h	Horas/m ³	Litros/m ³	Total (L)	Litros/h	Horas/m ³	Litros/m ³	Total (L)
Motoniveladora	125	11,90	0,008	0,095	0,095	8,05	0,008	0,064	0,064
Trator com grade de disco rebocável	83,8	12,58	0,006	0,075	0,075	12,58	0,006	0,075	0,075
Caminhão pipa	226,8	34,03	0,004	0,136	0,136	34,03	0,004	0,136	0,136
Rolo compactador de pneus (estático)	110	16,50	0,005	0,083	0,083	16,50	0,005	0,083	0,083
Rolo compactador vibratório (liso)	80	9,10	0,006	0,055	0,055	6,65	0,006	0,040	0,040
Betoneira ^c	2	0,30	0,077	0,023	0,023	-	-	-	-

^a Cadernos técnicos de composições para aterros, bases, sub bases e imprimções (SINAPI, 2022);

^b Catálogo do fabricante *Caterpillar* (CATERPILLAR, 2018);

^c Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO) (PINI, 2010).

Tabela 36 – Dados da análise de inventário.

Sistema	Dosagem	Input	Processo*	Quantidade	Unidade
RAF-LAA	ADBL	Maquinários/equipamentos para mistura, homogeneização e compactação	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>	16,75	MJ
		Transporte, RAF	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>	495,98	MJ
		Transporte, CBCA	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>	531,39	MJ
		Transporte, NaOH	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>	0,69	MJ
		Transporte, casca de ovos	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>	13,07	MJ
		Transporte, CCOH	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>	8,78	MJ
			<i>Lime, hydrated, loose weight **</i>	48,82	kg
		Produção de matéria-prima	<i>Sodium hydroxide, without water, {RoW} chlor-alkali electrolysis, membrane cell</i>	8,22	kg
			<i>Tap water {RoW}, underground water without treatment</i>	263,58	kg
		RAF-LAA	BDAL	Maquinários/equipamentos para mistura, homogeneização e compactação	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>
Transporte, RAF	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>			404,63	MJ
Transporte, CBCA	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>			758,64	MJ
Transporte, NaOH	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>			0,99	MJ
Transporte, casca de ovos	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>			18,66	MJ
Transporte, CCOH	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>			12,54	MJ
	<i>Lime, hydrated, loose weight **</i>			69,69	kg
Produção de matéria-prima	<i>Sodium hydroxide, without water, {RoW} chlor-alkali electrolysis, membrane cell</i>			11,74	kg
	<i>Tap water {RoW}, underground water without treatment</i>			239,88	kg
RAF-CPV	ADBL			Maquinários/equipamentos para mistura, homogeneização e compactação	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>
		Transporte, RAF	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>	493,00	MJ
		Transporte, cimento Portland	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>	19,18	MJ
			<i>Cement, Portland {BR}</i>	242,60	kg
		Produção de matéria-prima	<i>Tap water {RoW}, underground water without treatment</i>	263,84	kg

* Processos do banco de dados *Ecoinvent* v. 3.5

** Eletricidade: matriz energética brasileira

3.6.2 Avaliação do custo do ciclo de vida

3.6.2.1. Custos diretos

Para determinar os custos diretos da estabilização de 1 m³ de RAF com LAA ou CPV, considerou-se: (i) custos de composições analítico (encargos sociais não desonerados) das Tabelas de preço (Porto Alegre, RS) do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI (CAIXA, 2022), e (ii) custos providos por fornecedores dos materiais, localizados em Porto Alegre. No primeiro estão inclusos os custos associados a manutenção, depreciação e juros dos maquinários. Na Tabela 37 estão discretizados os custos diretos dos seguintes processos: (i) mistura, homogeneização e compactação de solo-ligante; (ii) transporte de materiais; (iii) aquisição de matérias-primas, e (iv) consumo de combustível.

Os processos de mistura, homogeneização e compactação compreenderam a utilização de maquinários e abrangeu os custos de mobilização e mão-de-obra (operador/servente). A mistura RAF-LAA também incluiu os custos com a betoneira e mão-de-obra do operador. Tais custos foram calculados sob o número de horas despendidas por maquinários (Tabela 35) e pelo servente e operador (Tabela 37) no processamento de 1 m³ de mistura, multiplicado pelo preço unitário do maquinário ou servente/operador (CAIXA, 2022).

O processo de transporte de materiais abrangeu os custos com o caminhão basculante e o motorista. O número de horas para o transporte de material resultou da multiplicação das horas/ton pela quantidade de material (ton). O número de horas para a mão-de-obra do motorista compreendeu o número total de horas necessário para o transporte dos materiais. O custo total para o transporte resultou da multiplicação do número de horas despendido no transporte de cada material pelo preço unitário do caminhão e da mão-de-obra do motorista (CAIXA, 2022).

O processo de aquisição de matérias-primas incluiu os custos de aquisição dos materiais. Inicialmente considerou-se a quantidade (kg) de cada material por 1 m³ de RAF estabilizado (Tabela 34). O custo unitário de cada material (kg) correspondeu a média do custo de aquisição (abril de 2022) de quatro fornecedores localizados em Porto Alegre. Adotou-se o custo da CCOH como sendo igual ao custo da cal comercial. O custo total de cada material resultou da quantidade de cada material (kg) multiplicado pelo respectivo custo unitário (\$/kg).

Por fim, o processo de consumo de combustível compreendeu o custo do diesel consumido pelos maquinários (os usados no transporte de materiais e na estabilização de RAF). O custo do

diesel resultou da média do custo do litro (abril de 2022) de postos de combustíveis localizados em Porto Alegre. O consumo total de diesel resultou do consumo do combustível pelos maquinários [Tabela 36 (1 L diesel igual a 35,86 MJ)] multiplicado pelo custo do litro de diesel.

Tabela 37 – Dados da composição de custos diretos para 1 m³ de RAF estabilizado.

Dosagem	Processo	Componente	Quantidade	Unidade	Custo unitário (\$)	Custo total (\$)	
Todas	Mistura, homogeneização e compactação	Motoniveladora	0,008	h	46,15	0,37	
		Trator com grade de disco	0,006	h	23,63	0,14	
		Caminhão pipa	0,004	h	51,96	0,21	
		Rolo de pneus estático	0,005	h	34,40	0,17	
		Rolo vibratório liso	0,006	h	26,41	0,16	
		Servente	0,200	h	3,67	0,73	
LAA-ADBL	Preparo da solução NaOH	Operador de betoneira	0,077	h	1,03	0,08	
		Betoneira	0,077	h	3,57	0,27	
	Transporte de materiais	Caminhão basculante, RAF	0,77	h	50,39	38,72	
		Caminhão basculante, CBCA	0,82	h	50,39	41,49	
		Caminhão basculante, NaOH	0,001	h	50,39	0,05	
		Caminhão basculante, Cascas	0,02	h	50,39	1,02	
		Caminhão basculante, CCOH	0,01	h	50,39	0,69	
		Motorista	1,63	h	4,63	7,53	
	Aquisição de matéria-prima	CCOH	48,82	kg	0,14	4,94	
		NaOH	8,22	kg	9,81	80,63	
	Consumo de combustível	Transporte de materiais	29,28	L	1,24	36,35	
		Maquinários, construção	0,47	L	1,24	0,58	
	LAA-BDAL	Preparo da solução NaOH	Operador de betoneira	0,077	h	1,03	0,08
			Betoneira	0,077	h	3,57	0,27
Transporte de materiais		Caminhão basculante, RAF	0,63	h	50,39	31,59	
		Caminhão basculante, CBCA	1,18	h	50,39	59,23	
		Caminhão basculante, NaOH	0,002	h	50,39	0,08	
		Caminhão basculante, Cascas	0,03	h	50,39	1,46	
		Caminhão basculante, CCOH	0,02	h	50,39	0,98	
		Motorista	1,85	h	4,63	8,58	
Aquisição de matéria-prima		CCOH	69,69	kg	0,14	9,91	
		NaOH	11,74	kg	9,81	115,12	
Consumo de combustível		Transporte de materiais	33,34	L	1,24	41,38	
		Maquinários, construção	0,47	L	1,24	0,58	
CPV-ADBL		Transporte de materiais	Caminhão basculante, RAF	0,76	h	50,39	38,49
			Caminhão basculante, CPV	0,03	h	50,39	1,50
	Motorista		0,79	h	4,63	3,68	
	Aquisição de matéria-prima	Cimento Portland (CPV)	242,61	kg	0,16	37,82	
	Consumo de combustível	Transporte de materiais	14,28	L	1,24	17,73	
		Maquinários, construção	0,40	L	1,24	0,49	

3.6.2.2 Custos indiretos

Além dos custos diretos, determinou-se os custos indiretos traduzidos pelo custo social do CO₂ da estabilização de RAF com distintos cimentos. O custo social do CO₂ corresponde ao valor

monetizado dos danos à sociedade causados por uma tonelada extra de emissões do poluente atmosférico. Tais danos refletem os impactos em: saúde humana; serviços dos ecossistemas naturais; produtividade agrícola; demanda energética; propriedades devido aos riscos da elevação do nível do mar e de desastres naturais, etc. (NASEM, 2017). O custo social do CO₂ foi calculado com base na tabela “*ES-1: Social Cost of CO₂, 2020-2050 (in 2020 dollars per metric ton of CO₂)*” no “*Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990*”. Para o ano de 2020 com uma taxa de desconto de 3%, o custo social de uma tonelada de CO₂ é de \$51 (IWG, 2021).

3.6.3 Avaliação social do ciclo de vida

3.6.3.1 Método de pesquisa

O método da avaliação social do ciclo de vida (ASCV) desta pesquisa foi desenvolvido pela autora em conjunto com pesquisadora a Mariana Tonini de Araújo (TONINI DE ARAÚJO, 2022). Este estudo piloto avaliou os impactos sociais do ciclo de vida da estabilização de solo com distintos ligantes. A ASCV compreendeu uma análise do “berço ao portão” e os limites do sistema incluíram a produção de matéria-prima, transporte de materiais e construção. Os impactos da produção de diesel não foram contabilizados, pois apenas fornecedores e processos intimamente relacionados ao produto final devem ser avaliados sob o ponto de vista social.

3.6.3.2 Estruturação

A estrutura hierárquica da ASCV é composta por três partes interessadas ou “*stakeholders*” (trabalhadores, comunidade local e sociedade) e dez indicadores sociais baseados nas “*Methodological Sheets*” da UNEP (2021) e no livro “*Handbook for Product Social Impact Assessment*”(GOEDKOOOP *et al.*, 2020). Na Tabela 38 estão expostos os processos considerados na ASCV e na Tabela 39, os *stakeholders* e indicadores sociais adotados.

Tabela 38 – Processos relacionados aos sistemas RAF-LAA e RAF-CPV.

Ligante	Produção de cal	Produção de NaOH	Produção de cimento Portland	Transporte de materiais	Mistura, homogeneização e compactação de RAF-ligante
LAA	X	X		X	X
CPV			X	X	X

Resíduo de areia de fundição estabilizado com ligante álcali-ativado de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo: Desempenho mecânico, microestrutura, lixiviação e sustentabilidade

Tabela 39 – *Stakeholders* e indicadores sociais.

<i>Stakeholder</i>	Indicador Social
Trabalhadores	Acidentes de trabalho
	Salário médio
	Participação feminina
	Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores
Comunidade local	Riscos à saúde e segurança
	Empresa/indústria informa, consulta e envolve a comunidade local
Sociedade	Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades
	Contribuição do serviço/produto com o progresso econômico
	Compromisso com pautas de sustentabilidade
	Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico

3.6.3.3 Elaboração do questionário de pesquisa

Inicialmente selecionou-se dez indicadores para os três *stakeholders*: Trabalhadores (quatro); Comunidade local (três) e Sociedade (três). Os indicadores “Acidentes de trabalho”, “Salário médio” e “Participação feminina” foram selecionados dentre os sete indicadores listados para o *stakeholder* “Trabalhadores” no *Handbook for Product Social Impact Assessment*. O indicador “Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores” foi selecionado dentre os oito indicadores sugeridos para “Trabalhadores” no *Methodological Sheets*. Os três indicadores para o *stakeholder* “Comunidade local”: “Riscos à saúde e segurança”; “Empresa/indústria informa, consulta e envolve a comunidade local” e “Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades” foram escolhidos dentre os cinco indicadores discretizados no *Handbook*. Os três indicadores para o *stakeholder* “Sociedade”: “Contribuição do serviço/produto com o progresso econômico”; “Compromisso com pautas de sustentabilidade” e “Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico” foram selecionados dentre cinco indicadores listados no *Methodological Sheets*.

A seleção dos indicadores foi realizada com base em três critérios. O primeiro critério consistiu em selecionar indicadores que refletissem potencialidades e desafios da realidade social do mercado de trabalho no Brasil. O segundo critério foi selecionar indicadores que pudessem ser mensurados por dados primários coletados através de questionário/entrevista aplicado a um grupo específico de pessoas. O terceiro critério fundamentou-se em indicadores cujos distintos cenários envolvessem conceitos de fácil compreensão e distinção pelos participantes. Por exemplo, é complexo segregar o indicador “Oportunidades iguais/Discriminação” em distintos cenários, bem como para os participantes escolherem apenas uma alternativa de cenário, pois trata-se de um indicador muito abrangente e de múltiplas percepções. Acredita-se que a

avaliação do indicador supracitado requer o ponto de vista de um grande número de participantes, afim de obter-se uma resposta mais representativa da realidade do setor. Portanto, o indicador “Oportunidades iguais/Descriminação” não cumpre os critérios dois e três. Por sua vez, o indicador “Salário médio” é fundamental para entendimento da realidade social dentro dos setores do mercado de trabalho brasileiro (cumpre o critério 1); dados primários sobre o indicador são facilmente mensurados pela ferramenta de questionário (cumpre o critério 2); e a segregação em distintos cenários é facilitada pelo uso da expressão “piso salarial da categoria”, a qual é de fácil compreensão pelos participantes (cumpre o critério 3).

Os indicadores sociais foram mensurados por meio da aplicação de um questionário a especialistas e trabalhadores de setores do mercado de trabalho que envolvem os processos listados na Tabela 38. Com base nos processos envolvidos, foram avaliados os seguintes setores do mercado de trabalho: (i) transporte rodoviário; (ii) construção de estradas; (iii) produção de cimento Portland; (iv) produção de cal, e (v) produção de hidróxido de sódio.

O questionário de pesquisa desenvolvido foi dividido em três partes. A primeira parte compreende perguntas para o participante informar o setor de atuação e profissão ou cargo ocupado, bem como definições e exemplos das três categorias sociais (trabalhadores, comunidade local e sociedade). Para avaliar os indicadores, a segunda parte contém dez perguntas (uma para cada indicador) com seis alternativas de resposta para cada uma delas. A terceira parte contempla quatro perguntas que visam avaliar a importância ou o peso dos indicadores sociais. O questionário foi estruturado com um layout simples, contendo: linguagem compreensível; perguntas claras; alternativas de respostas excludentes e alternativa que evita obrigatoriedade de resposta quando o participante não sabe ou não deseja informar. O questionário de pesquisa acima descrito encontra-se no Apêndice A.

3.6.3.4 Coleta de dados

Como plano de recrutamento de participantes, considerou-se potenciais participantes da pesquisa: colegas de trabalho dos pesquisadores envolvidos (caso 1) e pessoas localizadas por meio da mídia social profissional “LinkedIn” (caso 2). Todos os participantes são maiores de idade (acima de 18 anos). Para o primeiro caso, o convite individual para participação foi enviado de forma individual por e-mail com um remetente e um destinatário. Neste e-mail foi esclarecido ao candidato a participante de pesquisa que antes da entrevista seria apresentado o

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido para sua anuência. Foi enfatizada a importância de o candidato salvar este Termo e que o mesmo pode se retirar da pesquisa a qualquer momento e não responder qualquer questão. Para o segundo caso, o convite individual para participação foi enviado via chat do LinkedIn. Todos os demais procedimentos descritos para o caso 1 foram utilizados no caso 2. Os procedimentos de recrutamento seguiram o item 2 do OFÍCIO CIRCULAR Nº2/2021/CONEP/SECNS/MS. As entrevistas foram realizadas por distintos instrumentos de comunicação (e.g. Google Meet, chat do LinkedIn, via telefônica), escolhidos conforme a preferência do(a) participante(a).

Não foi delimitada uma população de estudo em relação a faixa etária, sexo, local de origem, etc., pois não era relevante para a aquisição de dados desta pesquisa. O foco neste caso foi o conhecimento do entrevistado na área de interesse da pesquisa, independentemente de gênero, idade, raça, cor, dentre outros. Entretanto, destaca-se novamente que somente pessoas acima de 18 anos foram convidadas a participar, já que menores de idade não possuíam a experiência profissional necessária para o preenchimento do questionário proposto.

3.6.3.5 Compilação e análise de dados

Para avaliação da confiabilidade do tipo consistência interna do questionário, calculou-se o coeficiente *Alpha Cronbach* (DONG; NG, 2015; VISENTIN *et al.*, 2022). O coeficiente *Alpha Cronbach*, descrito por Lee J. Cronback (CRONBACK, 1951), mensura a correlação entre as respostas, avaliando como cada item (questão) reflete na confiabilidade de um teste ou escala. O coeficiente está descrito na Equação 14 (BLAND; ALTAMAN, 1997), onde k é o número de itens (questões), s_i^2 é a variância de cada um dos itens, e s_T^2 é a variância do total (soma de cada item para cada respondente).

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum s_i^2}{s_T^2} \right) \quad \text{Eq. 14}$$

A variância do somatório de um grupo de variáveis independentes é a soma de suas variâncias. Assim, se os itens são idênticos e perfeitamente correlacionados todo s_i^2 será igual e $s_T^2 = k^2 s_i^2$, ou seja, $\frac{\sum s_i^2}{s_T^2} = \frac{1}{k}$ e $\alpha = 1$. Se os itens são independentes $s_T^2 = \sum s_i^2$ e $\alpha = 0$. Como consequência, ao comparar os grupos, valores de α entre 0,7 e 0,8 são satisfatórios (BLAND; ALTAMAN, 1997). Abaixo de 0,7, a consistência interna é considerada baixa. Valores altos ($\alpha > 0,9$) sugerem a presença de redundância ou duplicação, ou seja, há itens do questionário que

mensuram o mesmo elemento de uma dimensão (construto) (STREINER, 2003). Além disso, α elevados podem indicar que expressiva parcela da variação deve-se a fatores vinculados ao participante (e.g. inteligência, diligência no estudo, motivação no tema, etc) (TABER, 2018).

Após avaliar a confiabilidade das respostas obtidas para ambas classificações, os dados foram compilados para cálculo da pontuação final dos *stakeholders*. Os cálculos seguintes foram baseados em Dong e Ng (2015), Hossain *et al.* (2018) e Visentin *et al.* (2022). Primeiramente, para cada processo, a pontuação de cada indicador social resultou da média da soma dos resultados obtidos após a multiplicação das respostas dos entrevistados sobre a importância e avaliação de cada indicador, conforme Equação 15. Onde S_i é a pontuação do indicador “i”, n é o número de respondentes, j é a ordem do respondente, I_{ji} é o valor do indicador “i” (-2 a +2) para cada respondente “j”, e W_{ji} é o peso do indicador “i” (0,0 a 1,0) para cada respondente “j”.

$$S_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (I_{ji} \times W_{ji}) \quad \text{Eq. 15}$$

A avaliação dos indicadores pelos participantes (parte 2 do questionário) foi convertida em uma escala de +2 a -2: (+2) fortemente negativo; (+1) positivo; (0) neutro; (-1) positivo, e (-2) fortemente negativo (UNEP, 2021) (Tabela 40). No caso em que o participante não soube ou não desejou responder alguma questão do questionário, atribuiu-se nota 0 (zero) ao valor do indicador (I_{ji}). A importância de cada indicador social (parte 3 do questionário) foi distribuída partindo de 0,1 (opção menos importante) a 1 (opção mais importante), conforme Tabela 40.

Tabela 40 – Escalas de avaliação dos indicadores sociais e da sua importância.

Indicadores sociais		Importância dos indicadores sociais	
Opção assinalada pelo participante	Escala	Importância atribuída ao indicador pelo participante	Escala
1 ^a	+2	1 ^o	1,0
2 ^a	+1	2 ^o	0,9
3 ^a	0	3 ^o	0,8
4 ^a	-1	4 ^o	0,7
5 ^a	-2	5 ^o	0,6
6 ^a	0	6 ^o	0,5
		7 ^o	0,4
		8 ^o	0,3
		9 ^o	0,2
		10 ^o	0,1

Assim, a soma da pontuação do indicador “i” para cada processo do ligante avaliado resultou na pontuação final do indicador (Equação 16). Onde S_{Fi} é a pontuação final do indicador “i”, p é o número de processos, k é ordem do processo, e S_{ik} é a pontuação do indicador “i” para o processo “k”. Após o cálculo da pontuação final para cada indicador social, a pontuação do *stakeholder* é calculada conforme Equação 17. Onde: SS_i é a pontuação do *stakeholder* “i”, m é o número de indicadores para cada *stakeholder* “i” e S_{Fi} é a pontuação final do indicador “i”.

$$S_{Fi} = \sum_{k=1}^p S_{ik} \quad \text{Eq. 16}$$

$$SS_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{Fi} \quad \text{Eq. 17}$$

3.6.3.6 Aprovação no Comitê de Ética em Pesquisa

Devido a ASCV envolver a obtenção de informações por meio da aplicação de questionário a um determinado número de pessoas, fez-se necessário encaminhar o Projeto de Pesquisa intitulado “Análise de ciclo de vida social de misturas solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland” (Apêndice A) para apreciação e aprovação, primeiramente pela Comissão de Pesquisa de Engenharia (COMPESQ) e, após pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) da UFRGS, via Plataforma Brasil. Para avaliação no CEP, além do Projeto de Pesquisa, foi necessário encaminhar os seguintes documentos: Questionário de pesquisa; Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (Apêndice A); Folha de rosto para pesquisa envolvendo seres humanos, e Parecer da COMPESQ (Anexo A). O Projeto de Pesquisa foi aprovado pelo CEP da UFRGS sob o n° CAAE (Certificado de Apresentação de Apreciação Ética) 62830022.6.0000.5347, conforme o Parecer Consubstanciado n° 5.686.824 (Anexo A).

3.6.3.7 Participantes da pesquisa

Foram contatadas um total de 55 pessoas, sendo que 19 responderam o questionário, ou seja, uma taxa de participação de aproximadamente 35%. Na Tabela 41 é apresentada a formação profissional ou o cargo/função dos participantes da pesquisa, em cada um dos setores avaliados.

Tabela 41. Profissionais participantes em cada setor.

Setor	Profissão/Formação	Cargo
Transporte rodoviário	Não informado	Diretor – Proprietário
	Engenheiro Civil	Gerente de contratos
	Administradora	Sócia – Proprietária
	Engenheiro Civil	Proprietário
Construção de estradas	Engenheira civil	Projetista de estradas e Fiscal de obras de estradas
	Engenheiro civil	Gerente de contratos
	Engenheira civil	Fiscal de obras de estradas
	Engenheiro Civil	Supervisor de obras de infraestrutura rodoviária
	Engenheiro Civil	Consultor do DNIT
	Engenheiro Civil	Supervisor de obras rodoviárias
Produção de cimento Portland	Engenheiro Civil	Consultor de desenvolvimento de negócios e marketing
	Engenheiro	Não informado
	Engenheiro Civil	Gerente de projetos
Produção de cal	Engenheiro electricista	Consultor em produção de calcário, cal e derivados
	Não informado	Vendedor externo
	Não informado	Consultor de vendas
Produção de hidróxido de sódio	Químico Industrial	Supervisor de laboratório industrial
	Engenheiro Químico	Analista de marketing e produto
	Engenheiro Químico	Engenheiro de processos sênior

3.6.4 MIVES

A agregação dos três pilares da sustentabilidade (ambiental, econômico e social) em um score único foi realizada com uso do MIVES (*Spanish Integrated Value Model for the Sustainability Assessment*). O MIVES é um método de tomada de decisão multicritério fundamentado em funções de valor para avaliar a satisfação das partes interessadas, possibilitando obter um índice de sustentabilidade. Este método relaciona dados de entrada e saída para a unidade funcional avaliada e para cada um dos pilares da sustentabilidade. Nele há um diagrama hierárquico onde as diversas características do processo são organizadas geralmente em três níveis: requerimentos (i.e. os pilares); critérios e indicadores quantificáveis, com seus respectivos pesos (PONS; DE LA FUENTE; AGUADO, 2016). A Tabela 42 expõe os requerimentos, critérios e indicadores utilizados nesta pesquisa. Pode-se observar que os pesos foram igualmente distribuídos entre os requerimentos, bem como entre os critérios e indicadores relativos a cada requerimento.

Como os indicadores podem apresentar unidades de medida distintas, faz-se a padronização em unidades de valor ou satisfação por meio de uma função valor (V_i). Para definir a V_i é necessário determinar o grau de satisfação produzido por uma alternativa para o indicador. No MIVES, a satisfação é classificada em uma escala de 0 a 1: 0 corresponde a satisfação mínima ($S_{mín}$) e 1

reflete a satisfação máxima ($S_{m\acute{a}x}$). A V_i pode assumir uma tendência crescente ou decrescente e distintas formas (linear, c\^oncava, convexa, formato S) (ALARCON *et al.*, 2011).

Tabela 42 – Requerimentos, criterios e indicadores usados no metodo MIVES para esta pesquisa.

Requerimento	Peso (%)	Criterio	Peso (%)	Indicador	Peso (%)	
Ambiental	33,3	Ar	33,3	Aquecimento global (kg CO ₂ eq)	33,3	
				Depleção da camada de ozonio (kg CFC-11 eq)	33,3	
				Oxidação fotoquímica (kg C ₂ H ₄ -eq)	33,3	
		Uso da água e impactos relacionados	33,3	33,3	Ecotoxicidade aquática em água doce (kg 1.4-DBeq)	25,0
					Ecotoxicidade aquática marinha (kg 1.4-DB eq)	25,0
					Acidificação (kg SO ₂ -eq)	25,0
					Eutrofização (kg PO ₄ -eq)	25,0
		Terra e ecossistema	33,3	33,3	Ecotoxicidade terrestre (kg 1.4-DB eq)	33,3
					Toxicidade humana (kg 1.4-DB eq)	33,3
					Depleção de recursos abióticos (kg Sb-eq)	33,3
Econômico	33,3	Custos diretos	50,0	Construção (\$)	25,0	
				Transporte de materiais (\$)	25,0	
				Aquisição de mteria-prima (\$)	25,0	
				Consumo de combustível (\$)	25,0	
		Custos indiretos	50,0	Custo social do CO ₂ (\$)	100	
Social	33,3	Trabalhadores	33,3	Acidentes de trabalho	25,0	
				Salário médio	25,0	
				Participação feminina	25,0	
				Empresa/ndustria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores	25,0	
				Riscos  saúde e segurança	33,3	
		Comunidade local	33,3	33,3	Empresa/ndustria informa, consulta e envolve a comunidade local	33,3
					Empresa/ndustria oferece desenvolvimento de habilidades	33,3
					Contribuição do serviço/produto com o progresso econômico	33,3
		Sociedade	33,3	33,3	Compromisso com pautas de sustentabilidade	33,3
					Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico	33,3

Neste estudo, para os indicadores ambientais e econômicos foi atribuída uma V_i decrescente convexa pelas seguintes razões: (i) o aumento do valor do indicador resulta em menor satisfação (i.e. o máximo valor do indicador corresponde a $S_{mín}$) e (ii) para assegurar que as alternativas estejam o mais próximo possível do ponto de $S_{máx}$. A função convexa é frequentemente utilizada para indicadores ambientais e econômicos. A atribuo de uma V_i crescente linear aos indicadores sociais justifica-se por: (i) maior valor do indicador corresponder ao ponto de $S_{máx}$ e (ii) aumento do valor do indicador refletir no aumento constante da satisfação. Conforme Alarcon *et al.* (2011), a expressão matemática para a função valor é dada pela Equação 18:

$$V_{ind} = B \cdot \left[1 - e^{-K \cdot \left(\frac{|X - S_{min}|}{C} \right)^P} \right] \quad \text{Eq. 18}$$

Onde: V_{ind} é o valor do indicador que está sendo avaliado; B é o fator que garante o valor de V_i entre 0 e 1 (assume-se que a máxima satisfação possui valor 1, e calcula-se o fator conforme a Equação 19); $S_{máx}$ e $S_{mín}$ são os pontos de máxima (valor 1) e mínima satisfação (valor 0), respectivamente; X é a abscissa que gera um valor igual a V_{ind} ; P define a forma da curva da função como côncava ($P < 1$), forma S ou convexa ($P > 1$) e linear ($P = 1$); C é o parâmetro que define o x-valor do ponto de inflexão para curvas com $P > 1$; K é o parâmetro que define aproximadamente o y-valor no ponto C . Baseando-se em Alarcon *et al.* (2011), os valores de P , K e C utilizados para cada indicador estão expostos na Tabela 43.

$$B = \frac{1}{1 - e^{-K \cdot \left(\frac{|S_{máx} - S_{mín}|}{C} \right)^P}} \quad \text{Eq. 19}$$

Tabela 43 – Indicador e respectivas forma da V_i e valores de P , K e C .

Indicador	Tendência	Forma	C	K	P
Ambiental	Decrescente	Convexa	$C = (3X_{máx} + X_{mín})/4$	0,05	3
Econômico	Decrescente	Convexa	$C = (3X_{máx} + X_{mín})/4$	0,05	3
Social	Crescente	Linear	$X_{mín}$	0,1	1

Para obter o valor do critério (V_{Cr}), o valor de cada indicador (V_{ind}) foi calculado por meio da função V_i e ponderado por um peso atribuído (P_{ind}), conforme Equação 20, onde t é o número de indicadores. O valor de cada pilar ou requerimento (V_{req}) foi determinado por pesos atribuídos aos critérios (P_{Cr}), por meio da Equação 21, onde u é número de critérios. Por fim, o valor final (V_{final}) foi calculado através do peso atribuído a cada pilar (P_{req}), conforme Equação 22, onde v é o número de pilares (neste estudo, três pilares da sustentabilidade).

$$V_{Cr} = \sum_1^t V_{ind} \times P_{ind} \quad \text{Eq. 20}$$

$$V_{req} = \sum_1^u V_{Cr} \times P_{Cr} \quad \text{Eq. 21}$$

$$V_{final} = \sum_1^v V_{req} \times P_{req} \quad \text{Eq. 22}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO

4.1.1 Efeito dos fatores controláveis na RCS das pastas álcali-ativadas

Na Tabela 44 estão apresentadas as correlações dos fatores avaliados nas pastas álcali-ativadas. Nota-se que maiores razões água/ligante (A/L) e molaridades das amostras resultaram em maiores concentrações de álcalis (%Na₂O). Essa concentração corresponde a porcentagem em massa entre o teor de álcalis (Na₂O) do ativador alcalino (NaOH) e o teor de CBCA+CCOH.

Tabela 44 – Porcentagem de álcalis nas pastas álcali-ativadas.

Razão A/L	Molaridade (M)	Porcentagem de Álcalis (%Na ₂ O)
1,2	0,5	1,94
	1	3,95
	2	8,2
	3	12,88
1,0	0,5	1,61
	1	3,25
	2	6,78
	3	10,49
0,9	0,5	1,44
	1	2,94
	2	6,06
	3	9,36
0,8	0,5	1,28
	1	2,61
	2	5,35
	3	8,19
0,7	0,5	1,12
	1	2,25
	2	4,63
	3	7,17

Na Figura 39 é apresentado a RCS das pastas álcali-ativadas, em que é possível observar que as maiores resistências foram alcançadas na concentração 1M, e comportamento contrário ocorreu nas concentrações de 0 e 3M. As pastas de A/L 1,2 com 3M e A/L de 0,7 com água destilada (0M) apresentaram resistências muito baixas. No sentido físico, estas resistências muito baixas significam que os corpos de prova não apresentaram resistências suficientes para resistirem aos esforços da desmoldagem, ou seja, para as pastas serem removidas dos seus moldes de PVC.

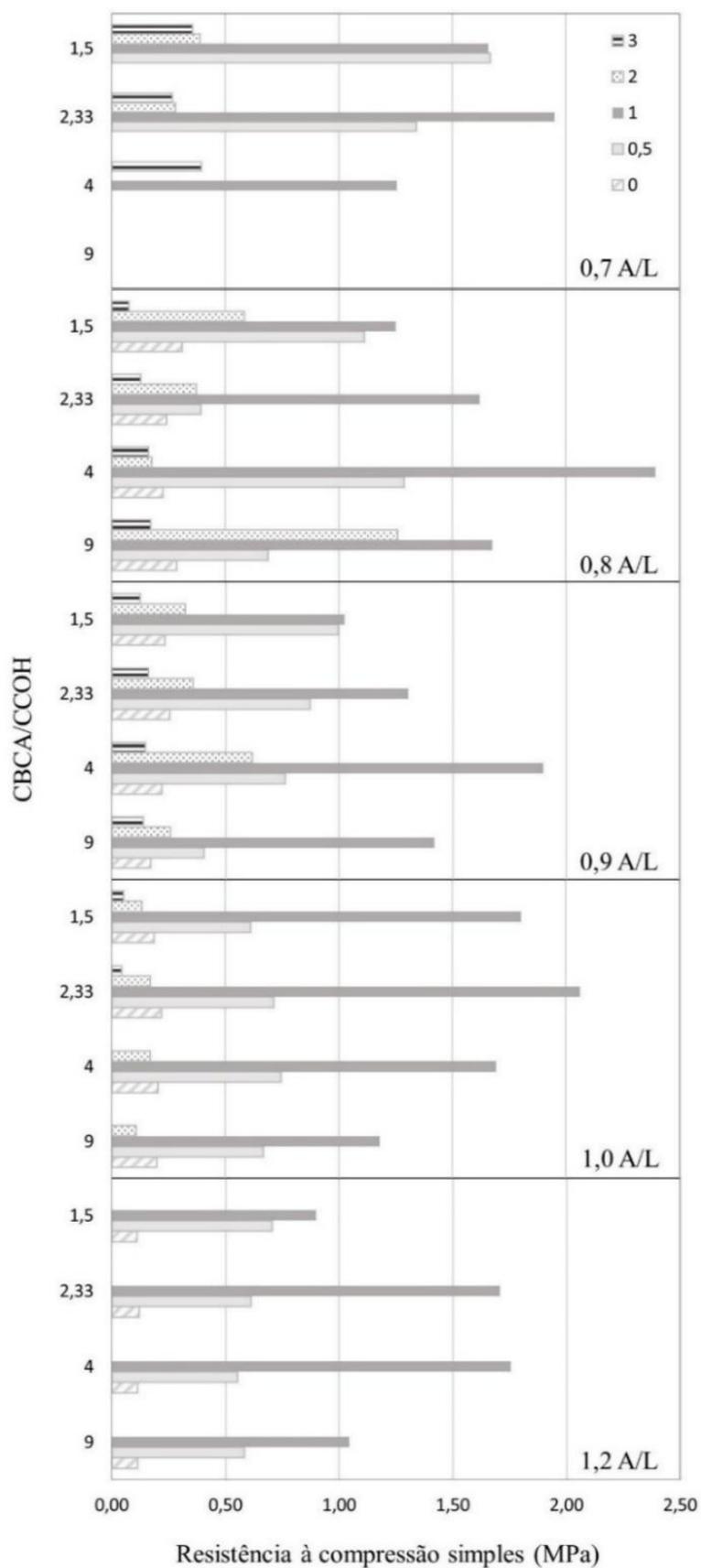


Figura 39 – RCS das pastas álcali-ativadas.

Pastas com concentração de ativador de 2M não apresentaram RCS superiores as com 3M. Já as com 0,5M mostraram resistência maiores, porém, inferiores as verificadas nas pastas de concentração 1M. A adição de um ativador alcalino aumentou o pH das misturas: de 12,81, para a amostra de água destilada CBCA/CCOH, para 14 para a mistura CBCA/CCOH-1M NaOH. Assim, a adição de 1M aumentou o pH da mistura e, conseqüentemente, acelerou a taxa de dissolução do precursor. Portanto, a ausência do ativador alcalino (0M) e o excesso de porcentagem de álcalis nas soluções de 3M são prejudiciais para a RCS. Isto ocorre porque uma quantidade mínima de íons hidroxila é necessária para a dissolução de sílica e alumínio, porém, maiores concentrações de álcalis levam a menores taxas de dissolução do hidróxido de cálcio, prejudicando a formação de produtos reacionais e conseqüentemente reduzindo a resistência mecânica (LEI; LAW; YANG, 2021; YIP; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005).

A maior RCS verificada (2,39 MPa) corresponde a pasta com 80/20 de CBCA/CCOH (razão igual a 4), molaridade de 1M e razão A/L de 0,8 (2,61 de Na₂O, Tabela 44). A segunda maior RCS, 2,06 MPa, foi observada na pasta com 70/30 de CBCA/CCOH (razão igual a 1,33), molaridade de 1M e razão A/L de 1,0 (3,25% de Na₂O, Tabela 30). Também, resistências expressivas foram observadas nas pastas com razão CBCA/CCOH de 2,33 (em A/L de 0,7 e 1,0) e 4 (em A/L de 0,8, 0,9 e 1,2).

Segundo Temuujin, Williams e Riessen (2009), a presença de fonte de cálcio em pastas álcali-ativadas, curadas em temperatura ambiente, promove maior dissolução de aluminossilicatos, bem como acelera a formação de produtos reacionais, e conseqüentemente ganhos de resistência. Também, Buchwald, Dombrowski e Weil (2005) ao avaliarem a influência da adição de cálcio (0-40%) em geopolímeros de cinza volante ativados por cloreto de sódio, identificaram que a maior RCS e formação de produtos de reação surgem da adição de 30% de Ca(OH)₂. Em estudo posterior, para geopolímeros com as mesmas características supracitadas, mas com adição de cálcio de 0-20%, as maiores resistências foram observadas na adição de cálcio de 20% (DOMBROWSKI; BUCHWALD; WEIL, 2007).

Para identificação da influência dos fatores controláveis sob a RCS, realizou-se uma ANOVA, que está apresentada na Tabela 45. Os resultados da ANOVA mostram que todos os fatores e as interações entre eles influenciam de forma significativa (valor-p<0,05) a RCS das pastas álcali-ativadas com um nível de confiança de 95%. Por meio do valor-F pode-se observar a magnitude dos efeitos dos fatores, sendo a maior, correspondente ao fator molaridade (903,99), seguida pela razão A/L (33,63). Tais resultados podem ser visualizados no gráfico de efeitos

principais sob a RCS, na Figura 40 onde a linha pontilhada corresponde a resposta média de todos experimentos realizados.

Na Figura 40 pode-se observar que a molaridade possui efeito de maior magnitude sob a RCS das pastas álcali-ativadas, com o valor médio máximo observado na concentração de 1M. Na sequência, A/L apresentou maior efeito na VR para a razão de 0,8. Por fim, CBCA/CCOH exerceu uma menor influência na RCS, e o maior valor de resistência foi observado na razão de 2,33, bastante próximo ao na razão 4. Para determinar se os grupos de resultados da razão 2,33 e da 4 são estatisticamente iguais ou não, realizou-se comparações múltiplas de médias pelo teste de *Tukey*, baseado na diferença mínima significativa.

Tabela 45 – ANOVA da RCS das pastas álcali-ativadas.

Fontes	SQ	GL	SQM	Valor-F	Valor-p	Verificação
CBCA/CCOH	1,91	3	0,40	27,65	0,000	Significante
A/L	1,93	4	0,48	33,63	0,000	Significante
Molaridade	51,92	4	12,98	903,99	0,000	Significante
CBCA/CCOH *A/L	4,84	12	0,40	28,07	0,000	Significante
CBCA/CCOH *Molaridade	4,32	12	0,36	25,07	0,000	Significante
A/L * Molaridade	2,08	16	0,13	9,05	0,000	Significante
CBCA/CCOH *A/L *Molaridade	6,94	48	0,14	10,08	0,000	Significante

SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de Liberdade; SQM: Soma dos quadrados das médias.

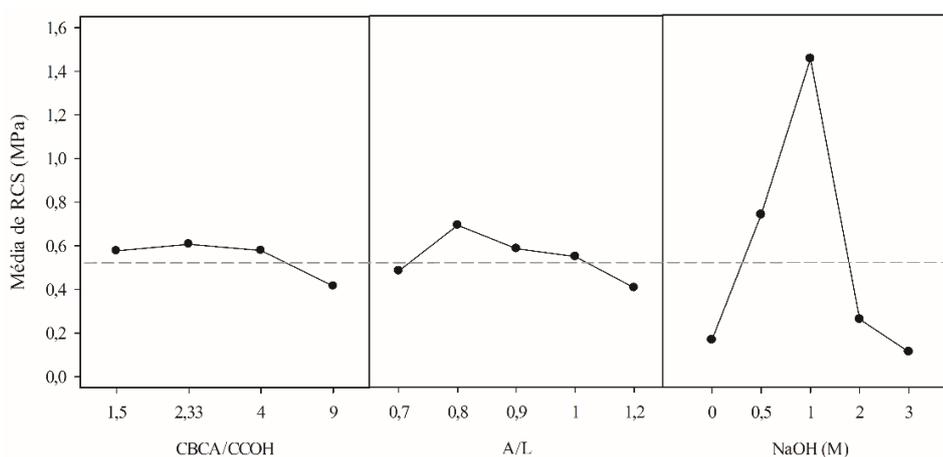


Figura 40 – Efeitos principais na RCS das pastas álcali-ativadas.

Como a interação entre os fatores foi significativa, a comparação é realizada fixando um nível de fator e comparando a média entre níveis dos outros fatores. Primeiramente, a molaridade de 1M foi fixada e comparou-se os valores médios de interação CBCA/CCOH*A/L (Tabela 46).

Em seguida, fixou-se a razão A/L em 0,8 e comparou-se os valores médios da interação CBCA/CCOH*Molaridade (Tabela 47). De acordo com a Tabela 46, os tratamentos 4*0,8, 1,5*0,7, 9*0,8, 2,33*0,7 e 4*0,9 (CBCA/CCOH*A/L) são estatisticamente iguais, mas o primeiro tratamento (4*0,8) resulta em um maior valor médio de RCS. Na Tabela 47, os dois primeiros tratamentos (4*1 e 2,33*1, para CBCA/CCOH*Molaridade) são estatisticamente iguais, mas o primeiro tratamento alia maior valor médio de RCS e menor consumo de CCOH, em relação ao segundo tratamento. Assim, adotou-se como melhor combinação dos fatores: CBCA/CCOH igual a 4, A/L igual a 0,8 e molaridade igual a 1M (2,61% de Na₂O).

Tabela 46 – Comparação múltipla de médias pelo método de *Tukey* para CBCA/CCOH*A/L.

CBCA/CCOH*A/L	Repetições	Média (MPa)	Agrupamento ¹
4,00 * 0,8	10	0,85	a
9,00 * 0,8	10	0,82	a b
1,50 * 0,8	10	0,61	c d e f
2,33 * 0,8	10	0,55	d e f

¹Médias que compartilham uma letra são estatisticamente iguais.

Tabela 47 – Comparação múltipla de médias pelo método de *Tukey* para CBCA/CCOH *Molaridade.

CBCA/CCOH*Molaridade	Repetições	Média (MPa)	Agrupamento ¹
4,00 * 1,0	10	1,80	a
9,00 * 1,0	10	1,73	a
1,50 * 1,0	10	1,27	b
2,33 * 1,0	10	1,06	c

¹Médias que compartilham uma letra são estatisticamente iguais.

4.1.2 Mineralogia, microestrutura e composição química das pastas álcali-ativadas

A amostra que apresentou maior resistência à compressão simples (i.e. 0,8 A/L, 1M, e 4 CBCA/CCOH) foi analisada quanto a sua composição química, mineralogia e microestrutura. O resultado de FRX (Tabela 48) mostrou que a pasta álcali-ativada é composta majoritariamente por óxidos de silício (40,45%) e cálcio (31,81%) oriundos da cinza e da cal respectivamente. Observou-se teores expressivos de óxidos de ferro (10,03%), sódio (4,05%) e alumínio (3,03%). Fe₂O₃ e Al₂O₃ são oriundos da CBCA, e Na₂O do ativador alcalino.

A mineralogia do ligante (Figura 41) apresenta de fases de quartzo (SiO₂), cristobalita (SiO₂), calcita (CaCO₃), vaterita (CaCO₃) e magnetita (Fe₃O₄). Quartzo, cristobalita, magnetita e calcita são provenientes da CBCA e CCOH respectivamente. Mineral polimorfo da CaCO₃, a vaterita foi gerada após a desidratação do carbonato de cálcio hidratado amorfo (oriundo da CCOH)

devido ao elevado pH e baixa temperatura (23°C) nas reações de ativação alcalina. Na pasta álcali-ativada não há a presença de portlandita da CCOH, indicando que ela foi consumida com os aluminossilicatos amorfos durante as reações. Géis cimentantes (e.g. C-(N)-A-S-H) estão presentes no difratograma do LAA na forma de um halo amorfo. O deslocamento do pico entre os padrões da cinza e da pasta álcali-ativada (22° te 30° 2θ respectivamente) ocorreu em consequência dos produtos das reações geopoliméricas da cinza (COSTA *et al.*, 2021), visto que a cal não apresenta halo amorfo (Figura 41).

Tabela 48 – Composição química da pasta álcali-ativada.

Óxidos (%)	SiO ₂	CaO	FeO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MgO	MnO	SO ₃	Cl	Outros
	40,45	31,81	10,03	4,05	3,32	3,03	2,50	1,76	1,36	0,48	0,47	0,36	0,38

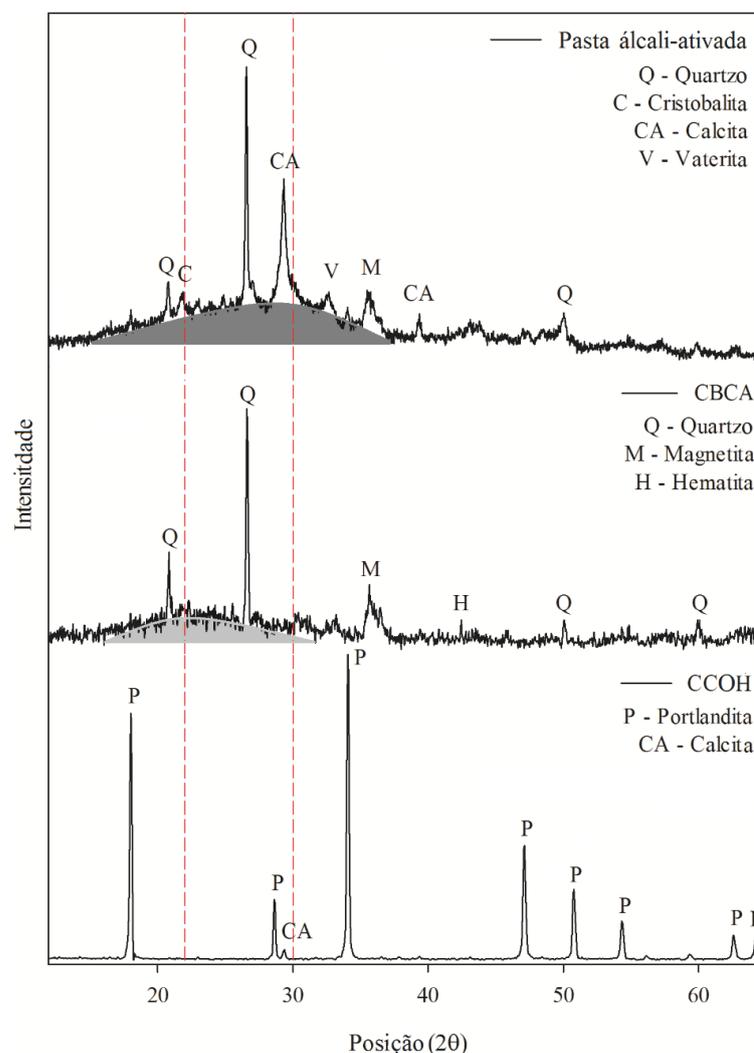


Figura 41 – Difratogramas da pasta álcali-ativada versus CBCA e CCOH.

Nas imagens de MEV (Figura 42a-b) observa-se que o precursor está envolto por uma matriz cimentante. Entretanto, esta matriz apresenta uma estrutura menos densa e com mais poros (i.e. padrões pretos indicam a ausência de material) do que materiais cimentantes convencionais. Cabe ressaltar que reações de álcali-ativação ainda estão ocorrendo na pasta aos 7 dias de cura. Na Figura 41a pode-se notar a presença de uma fibra de CBCA, a qual é composta por Si e carbono (Figura 42c). Possivelmente esta fibra não foi dissolvida no processo de ativação alcalina em função de não apresentar estrutura amorfa. Na imagem de EDS (Figura 42b) observam-se áreas ricas em Ca, Si, Na e Al. Estas áreas sugerem o processo de gelificação do precursor ativado (CBCA) no sistema contendo cálcio (oriundo da CCOH).

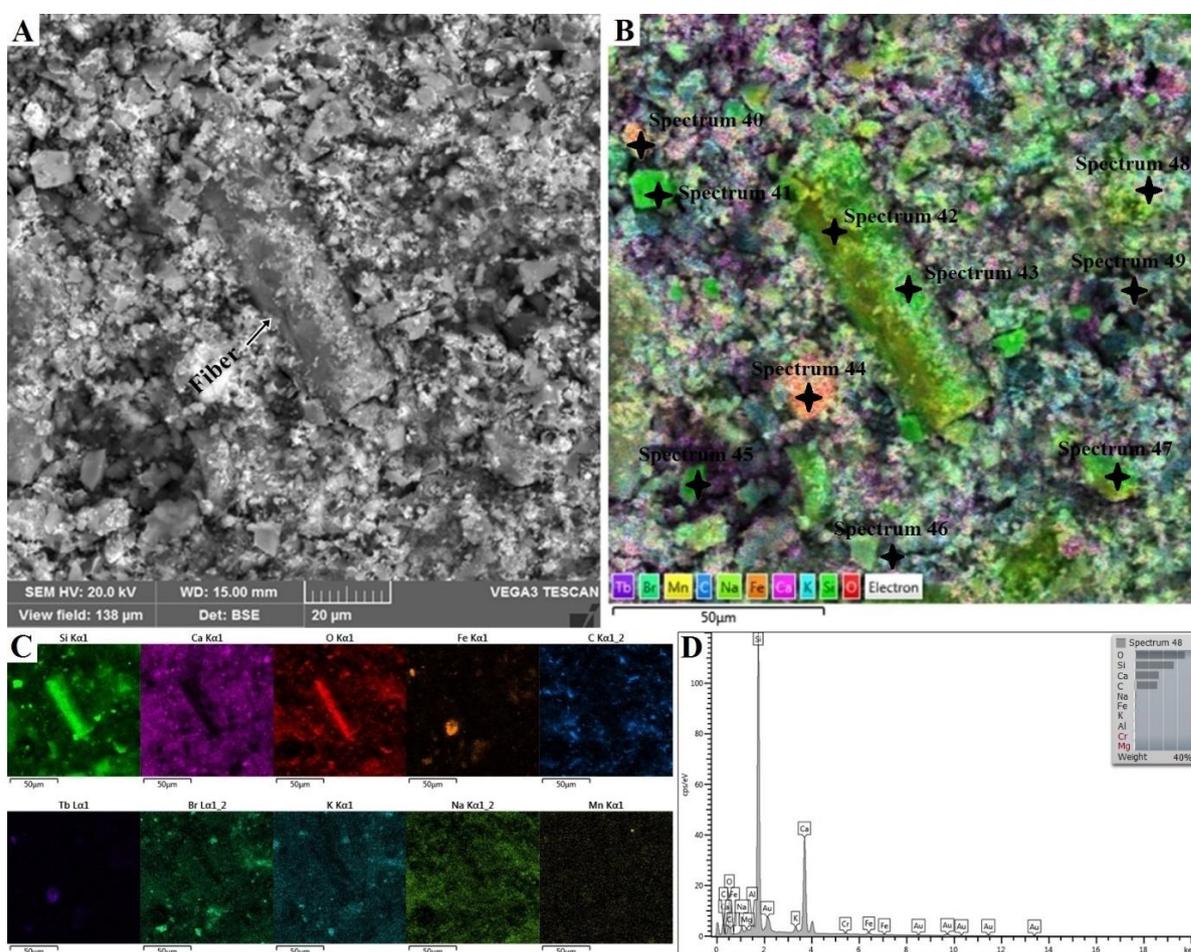


Figura 42 – Imagens de MEV da pasta álcali-ativada: (a) 1,5kx de magnificação, (b) imagem de EDS, (c) distribuição de elementos e (d) mapa químico.

Ainda, a Figura 42c mostra uma distribuição homogênea de Ca e Na, oriundos da fonte de cálcio (CCOH) e do ativador (NaOH) respectivamente. O mapa químico do ponto denominado “espectro 48” (Figura 42d) indica principalmente a presença de Si e Ca, e conseqüentemente

de gel semelhante ao C-S-H. A Tabela 49 apresenta a composição química dos pontos avaliados por EDS na Figura 42b. As razões médias de Ca/Si e Na/Ca são 0,28 e 0,15 respectivamente. Para misturas de areia-30% vidro moído-7% cal de carbureto ativado por solução de NaOH, Consoli *et al.* (2021a) encontraram razões médias de Na/Ca de 0,06 para gel C-S-H formado no processo de ativação alcalina de resíduos industriais, e uma razão Ca/Si de 0,49 para gel (C,N)-S-H. Tais razões são semelhantes as encontradas nesta pesquisa (Na/Ca = 0,15 e Ca/Si = 0,28), indicando a presença de géis na pasta álcali-ativada.

Tabela 49 – Composição elementar da pasta álcali-ativada por EDS com base nos pontos indicados na Figura 41.

Pontos	Si	Al	Ca	Na	Ca/Si	Na/Al	Na/Si	Na/Ca
	% em massa							
40	3,86	2,46	1,05	0	0,27	0	0	0
41	52,02	0	0	0	0	-	0	0
42	27,88	0	0,33	0,16	0,01	-	0,01	0,48
43	37,93	0,30	2,07	0,44	0,05	1,47	0,01	0,21
44	9,45	0,55	4,55	2,00	0,48	3,64	0,21	0,44
45	60,55	0	2,20	0,17	0,04	-	0	0,08
46	7,51	0,39	5,73	1,19	0,76	3,05	0,16	0,21
47	43,58	0,46	4,89	0,31	0,11	0,67	0,01	0,06
48	27,40	0,44	16,70	0,59	0,61	1,34	0,02	0,04
49	15,04	0	6,78	0	0,45	0	0	0
Média	28,35	0,3	4	0,25	0,28	1,02	0,04	0,15

Para uma melhor compreensão da microestrutura do material, imagens de MEV (Figura 43) da pasta álcali-ativada (0,8 A/L, 1M, 4 CBCA/CCOH) e uma pasta não álcali-ativada (0,8 A/L, 0M, 4 CBCA/CCOH) foram comparadas após 7 dias de cura. É possível observar que a pasta álcali-ativada (Figura 43-a) apresenta uma matriz mais homogênea e menos porosa (interpretada pela menor presença de vazios, ou seja, regiões pretas), e os agregados possuem uma estrutura e textura mais regular. Tais características estão associadas a maior precipitação de géis cimentantes. Já a pasta não álcali-ativada contém apenas água e, portanto, as reações desenvolvem-se em períodos de tempo mais longos. Assim, pode-se observar apenas hidratos (i.e. substância que contém água) em formas de agulhas na pasta não álcali-ativada (Figura 43b). As diferenças microestruturais identificadas entre as pastas estão em consonância e justificam os maiores resultados de RCS da pasta álcali-ativada (Figura 39).

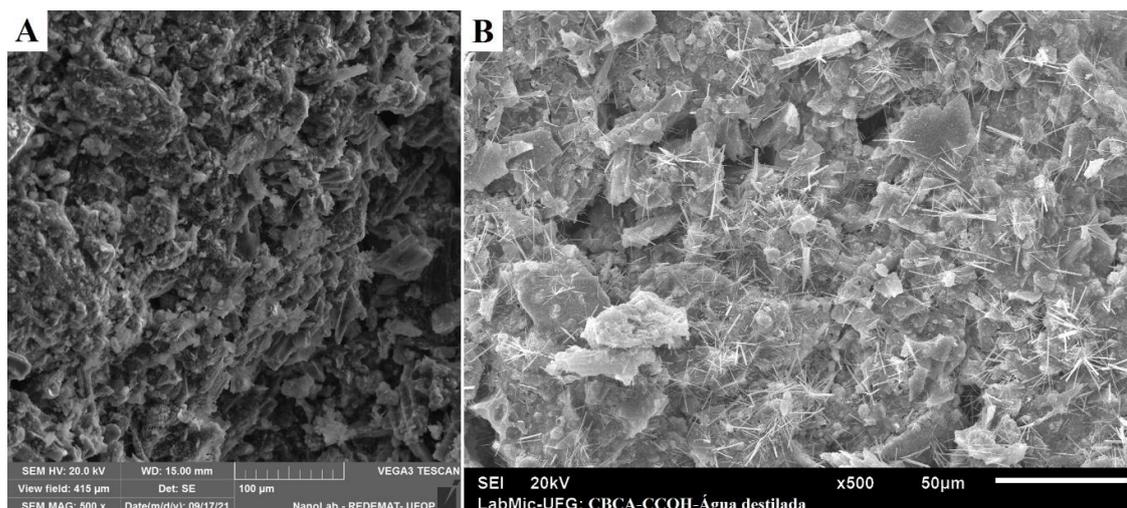


Figura 43 – Imagens de MEV de (a) pasta álcali-ativada e (b) pasta não álcali-ativada.

O espectro FTIR da pasta álcali-ativada está apresentada na Figura 44. A banda de menor valor (450 cm^{-1}) está associada a vibrações de flexão O-Si-O (PUERTAS; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; BLANCO-VARELA, 2004). Vibrações de flexão dos grupos hidroxila na água adsorvida estão associadas a banda em 3500 cm^{-1} . Em torno de $961\text{-}969\text{ cm}^{-1}$ (neste estudo, 967 cm^{-1}), a banda está associada com vibrações assimétricas de estiramento de Si-O no tetraedro de SiO_4 e corresponde a formação do gel C-A-S-H (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2011; PUERTAS *et al.*, 2011). Sinais em 1020 cm^{-1} (vibração T-O, sendo T igual a Si ou Al) são típicos da banda de gel N-A-S-H (DE VARGAS *et al.*, 2014; GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2011).

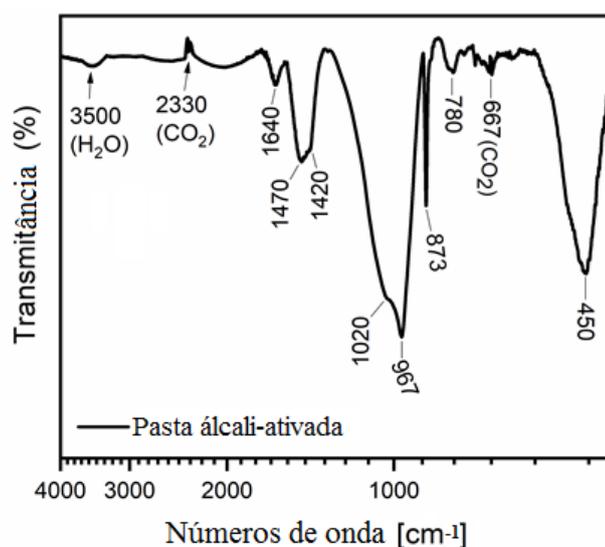


Figura 44 – Espectro FTIR para a pasta álcali-ativada.

4.2 DESEMPENHO MECÂNICO DE RAF-LAA E RAF-CPV

4.2.1 Resistência à compressão simples

Na Figura 45 são apresentados os resultados médios de RCS para RAF-ligante álcali-ativado (RAF-LAA) e RAF-cimento Portland de alta resistência inicial (RAF-CPV). De forma geral é possível observar que nos níveis superiores dos fatores controláveis tem-se os maiores valores de RCS para RAF-LAA, ou seja, maiores teores de ligante e de umidade, peso específico e tempo e temperatura de cura resultaram em maiores resistências (Figura 45a). Além disso, os tratamentos RAF-LAA de 7 dias a 40°C apresentaram resistências médias superiores aos 7 dias a 23°C, bem como similares ou superiores aos de 28 dias a 23°C. Em 28 dias a 40°C, o melhor tratamento de RAF-LAA (25% LAA, 17,4% w e 15,2kN.m⁻³ y_d) atingiu uma RCS média de 9,85 MPa, enquanto que, o de RAF-CPV (25% CPV, 13% w e 15,2kN.m⁻³ y_d) alcançou 5,68 MPa. Cabe destacar que, as menores resistências atingidas pelas misturas RAF-CPV estão associadas as elevadas porosidades dos corpos de prova contendo o cimento tradicional.

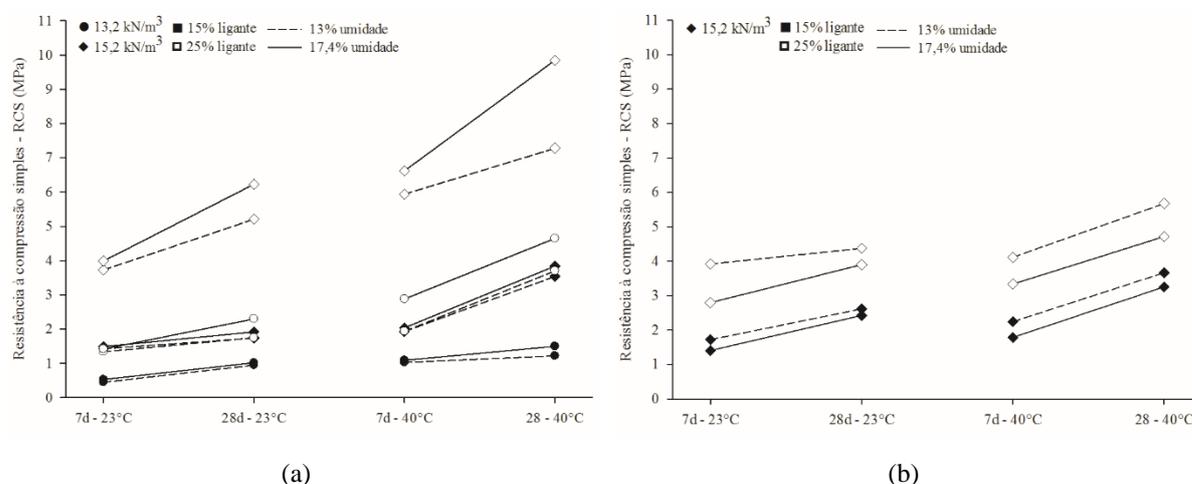


Figura 45 – Resultados médios de RCS para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

Para RAF-CPV (Figura 45b), nota-se que os maiores valores médios de RCS resultaram de tratamentos com menor teor de umidade inicial e maiores teor de cimento, tempo e temperatura de cura. Observa-se que aos 7 dias de cura, as misturas de RAF-CPV atingiram resistência média de 71%, em relação a resistência atingida em 28 dias. Este valor médio vai ao encontro com o ganho de resistência em 7 dias para argamassas de cimento de alta resistência inicial,

que pode variar entre 70-90% em relação aos 28 dias de cura (CEMENT AUSTRALIA, 2011). Nota-se ainda que, a variação de tempo e temperatura gera maiores incrementos de resistência quando o teor de umidade inicial do sistema é maior (17,4%). Acredita-se este comportamento seja resultante da ação conjunta entre a influência negativamente significativa do teor de umidade, e a influência positivamente significativa de tempo de cura, temperatura de cura e interação temperatura-tempo de cura, conforme Figuras 46-48.

No gráfico de Pareto da Figura 46a observa-se que a RCS de RAF-LAA é influenciada significativamente por todos os fatores controláveis do sistema e por uma série de interações de segunda ordem, bem como por algumas interações de ordens superiores. Estas últimas sugerem que os fatores controláveis, em seus níveis de avaliação, apresentam estreitas relações. Teor de ligante (C) e peso específico aparente seco (B) são os fatores que exercem influência de maior magnitude sob a RCS. Na sequência, consta a temperatura de cura (D), tempo de cura (E), interação peso específico aparente seco e teor de ligante (BC), interação teor de ligante-temperatura de cura (CD) e teor de umidade (A), dentre outras. A RCS de RAF-CPV (Figura 46b) é influenciada significativamente por todos fatores controláveis e duas interações de segunda ordem. O fator que exerce influência de maior magnitude é teor de cimento (B), seguido de tempo de cura (D), temperatura de cura (C), teor de umidade (A); interação temperatura-tempo de cura (CD) e interação teor de umidade-teor de cimento (AB).

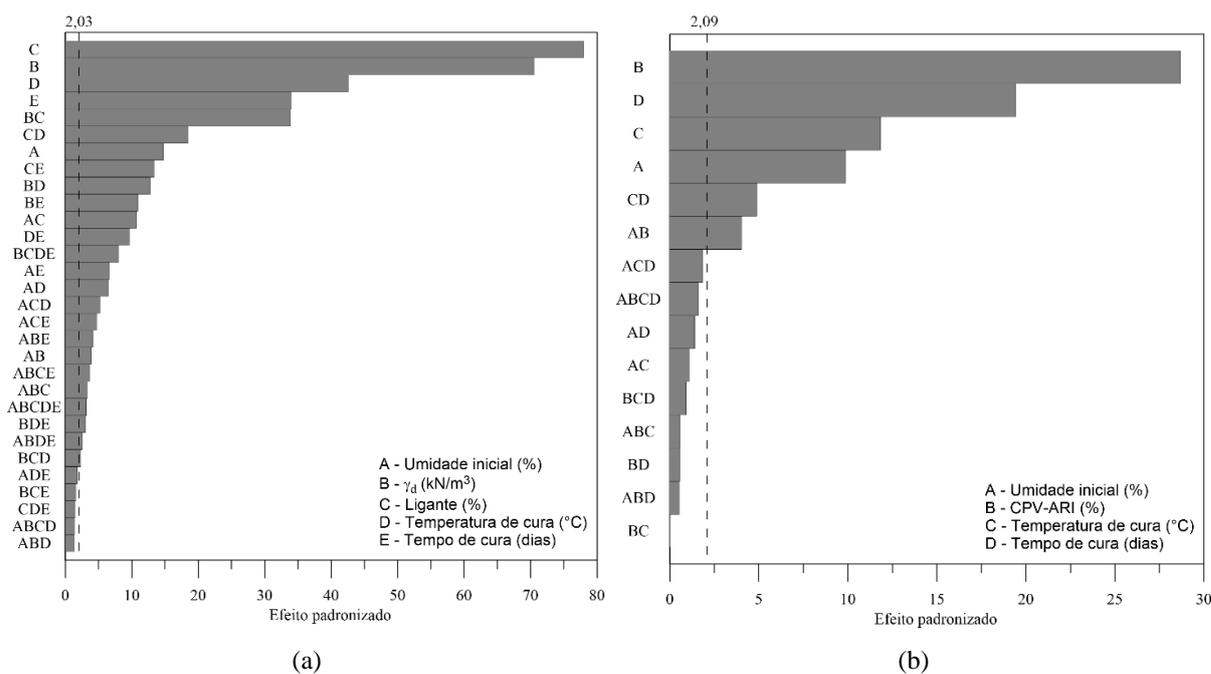


Figura 46 – Gráficos de Pareto para RCS de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

Na Figura 47 é apresentado o gráfico dos efeitos principais, possibilitando visualizar se o efeito dos fatores controláveis é positivo ou negativo, ou seja, se o aumento do nível de determinado fator resulta no aumento ou na redução da RCS respectivamente. Para RAF-LAA (Figura 47a), o aumento do nível de todos os fatores controláveis maximiza a RCS. Para RAF-CPV (Figura 47b), no nível superior dos fatores teor de cimento, temperatura e tempo de cura tem-se o aumento da RCS, entretanto, o aumento do teor de umidade inicial resulta na redução da RCS, como observado na Figura 45. Os pontos centrais (pontos vermelhos) na Figura 45a-b e o efeito significativo da curvatura na tabela ANOVA (Apêndice B) para RAF-LAA e RAF-CPV evidenciam um comportamento não-linear dos fatores principais sob a RCS em ambos sistemas.

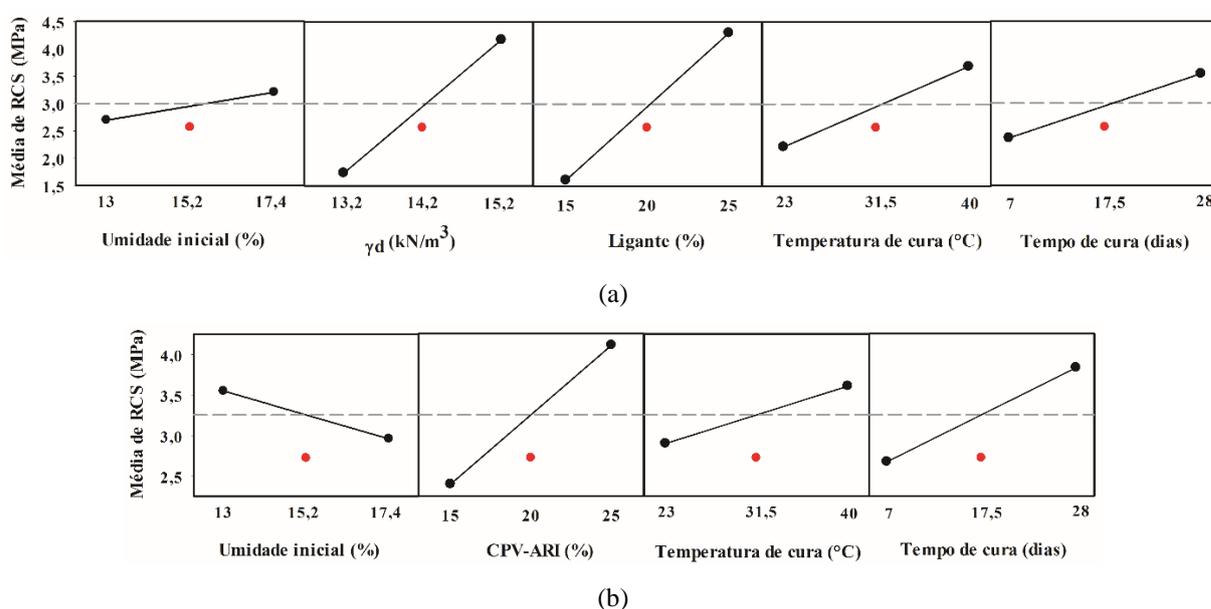


Figura 47 – Efeitos principais sob a RCS de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

A influência positivamente significativa do teor de umidade inicial (A) sob a RCS para RAF-LAA justifica-se pelo papel da água em sistemas álcali-ativados. A água atua como um meio para que ocorra as reações de polimerização por condensação (DUXSON *et al.*, 2007; PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). A água é utilizada durante a dissolução dos aluminossilicatos por hidrólise alcalina e posteriormente liberada na etapa de condensação (DUXSON *et al.*, 2007). Oposto ao que é observado nos produtos da hidratação do cimento Portland, nos cimentos alcalinos, as moléculas de água não estão ligadas quimicamente aos produtos reacionais, mas encontram-se nos poros dos produtos formados (DUXSON *et al.*, 2007; GARCIA-LODEIRO;

PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). Contudo, da mesma forma que no cimento tradicional, nos cimentos alcalinos é necessária uma quantidade de água mínima para a formação dos produtos cimentantes, variando de acordo com as propriedades dos materiais precursores e ativadores (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). Nesta pesquisa, a cinza de bagaço de cana-açúcar é um material que apresenta elevada área superficial específica e consequentemente elevada capacidade de absorção de água. Assim, a variação do teor de 13 a 17,4% foi importante para o processo de ativação alcalina. De forma qualitativamente similar, Acosta (2021) verificou influência positivamente significativa do teor de umidade no comportamento de solo arenoso estabilizado com ligante álcali-ativado.

Enquanto que 13% de umidade foi adequada para o processo de hidratação do cimento Portland, acredita-se que o teor de 17,4% representou um conteúdo de água excessivo para as matrizes de RAF-CPV, reduzindo o número de contato entre as partículas e a mobilização de atrito, além de causar o enfraquecimento das ligações cimentantes. Nota-se na Figura 48, que este efeito é superior para misturas RAF-CPV com 25% de cimento. Isto possivelmente ocorre em função de haver uma maior parcela de água frente a massa de RAF, nas matrizes contendo 25% de CPV-ARI, alterando a consistência da mistura, e consequentemente afetando a RCS.

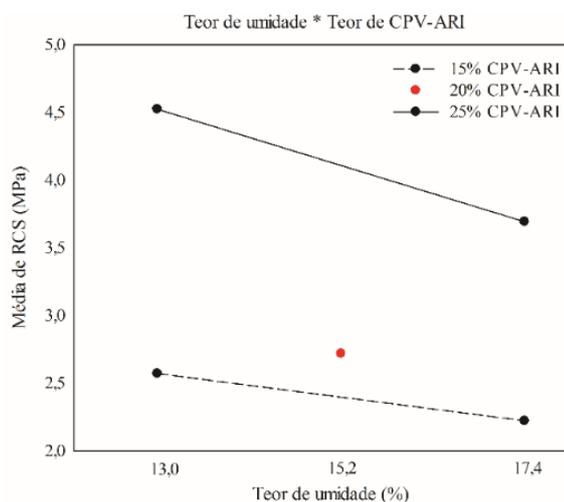


Figura 48 – Interação dos fatores teor de umidade e teor de cimento de RAF-CPV.

A influência positiva do peso específico aparente seco (B) ocorre ao promover maiores pontos de contato entre as partículas da mistura, em função da menor porosidade, potencializando um maior intertravamento e mobilização de atrito entre as partículas, e consequente aumento de resistência. Por sua vez, a maior influência do teor de ligante (C) na mistura RAF-LAA pode

ser compreendida em função de promover a precipitação de produtos cimentantes na mistura, contribuindo diretamente para o ganho de resistência. Neste sistema, o desenvolvimento das reações cimentantes são intensificadas, permitindo presumir que devido ao processo de ativação alcalina, o teor de ligante exerce maior influência quando comparado ao peso específico aparente seco. Tal observação é corroborada por resultados de trabalhos em estabilização de solos com ligantes álcali-ativados (BRUSCHI *et al.*, 2021a; PEREIRA DOS SANTOS, 2021).

O acréscimo de temperatura (D) resultou em maiores resistências, o que demonstra a ação deste fator sob a cinética das reações, de forma a acelerar a dissolução dos aluminossilicatos amorfos e o início da formação dos produtos reacionais, consequentemente reduzindo o tempo para atingir uma resistência alvo. Observações semelhantes foram feitas por Caicedo (2020), o qual também verificou a formação de maiores quantidades de géis e o desenvolvimento de estrutura mais homogênea e densa, em função do incremento de 10°C na temperatura ambiente, resultando em materiais álcali-ativados com maiores resistências.

O fator tempo de cura (E) exerce influência significativamente positiva sobre a RCS de RAF-LAA. A técnica de ativação alcalina busca acelerar as reações químicas, otimizando tempo para atingir uma determinada resistência. Neste sistema, produtos reacionais continuam a se desenvolver ao longo do tempo. Para o tratamento de RAF-LAA com melhor comportamento mecânico (25% LAA, 17,4% *w* e 15,2 kN.m⁻³ γ_d), a variação de 7 para 28 dias resultou em incremento de resistência de 53%. Estudos anteriores de estabilização de solos com ligantes álcali-ativados também observaram influência significativa do tempo de cura sobre a resistência mecânica (BRUSCHI *et al.*, 2021a; CAICEDO, 2020; PEREIRA DOS SANTOS, 2021).

Nas misturas RAF-CPV, o teor de CPV-ARI (B) exerceu a influência de maior magnitude na RCS, o que era esperado, visto que o peso específico aparente seco e o teor de agente cimentante são os fatores que mais influenciam o comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados (CONSOLI *et al.*, 2007, 2020b; CONSOLI; LOPES; HEINECK, 2009; CONSOLI; SAMANIEGO; VILLALBA, 2016), e peso específico aparente seco foi um fator fixado neste sistema. Os fatores temperatura (C) e tempo de cura (D) exerceram influencia positivamente significativa sobre a RCS das misturas RAF-CPV, tendo sido o fator tempo de cura, o mais influente dentre eles. Ao longo dos 7 aos 28 dias, produtos cimentantes continuaram se formando, contribuindo para incrementos de resistência, bem como a temperatura atuou acelerando as reações de hidratação, e consequente precipitação desses produtos.

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Na Figura 49 são apresentados os resultados de RCD para RAF-LAA e RAF-CPV, com base em médias simples das amostras de cada tratamento. Nota-se que nos níveis superiores dos fatores controláveis tem-se os maiores valores médios de RCD para RAF-LAA. Enquanto que, maiores valores médios de RCD para RAF-CPV resultaram de tratamentos com menor teor de umidade inicial e maiores teor de cimento, tempo e temperatura de cura. Em 28 dias a 40°C, o melhor tratamento de RAF-LAA (25% LAA, 17,4% w e 15,2kN.m⁻³ y_d) atingiu uma RCD média de 1,14 MPa, e para RAF-CPV (25% CPV, 13% w e 15,2kN.m⁻³ y_d), 0,91 MPa. Tais resultados de RCD fazem alusão direta aos observados na RCS.

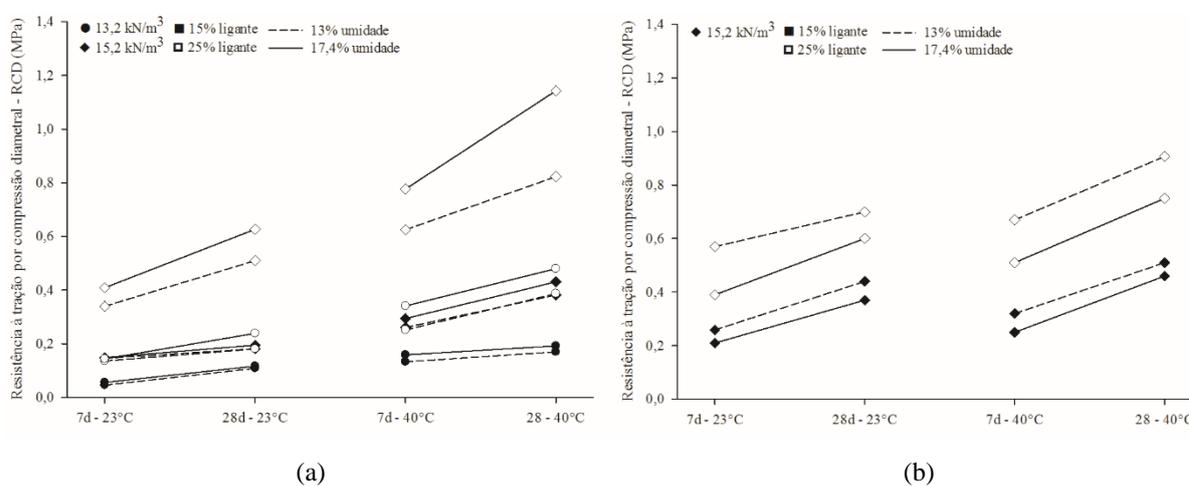


Figura 49 – Resultados médios de RCD para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

A partir dos resultados acima expostos, avaliou-se quais fatores controláveis e interações entre eles exercem influência significativa sobre a RCD para RAF-LAA e RAF-CPV. Os resultados desta avaliação estão expostos no gráfico de Pareto (Figura 50). Nota-se um comportamento similar da RCD ao identificado na RCS em ambos sistemas. A RCD de RAF-LAA (Figura 50a) é influenciada de forma significativa por todos os fatores controláveis do sistema e por diversas de interações. Teor de ligante (C) e peso específico aparente seco (B) são os fatores que exercem influência de maior magnitude sob a RCD. Na sequência, consta a temperatura de cura (D), interação peso específico aparente seco e teor de ligante (BC), tempo de cura (E), interação teor de ligante e temperatura de cura (CD) e teor de umidade (A), dentre outras interações. Por sua vez, a RCD do sistema RAF-CPV (Figura 50b) é influenciada significativamente por todos fatores controláveis avaliados e três interações de segunda ordem. O fator que exerce influência

de maior magnitude é teor de cimento (B), seguido de tempo de cura (D), temperatura de cura (C), teor de umidade (A); interação teor de umidade e teor de cimento (AB), interação teor de cimento e temperatura de cura (BC) e interação temperatura e tempo de cura (CD).

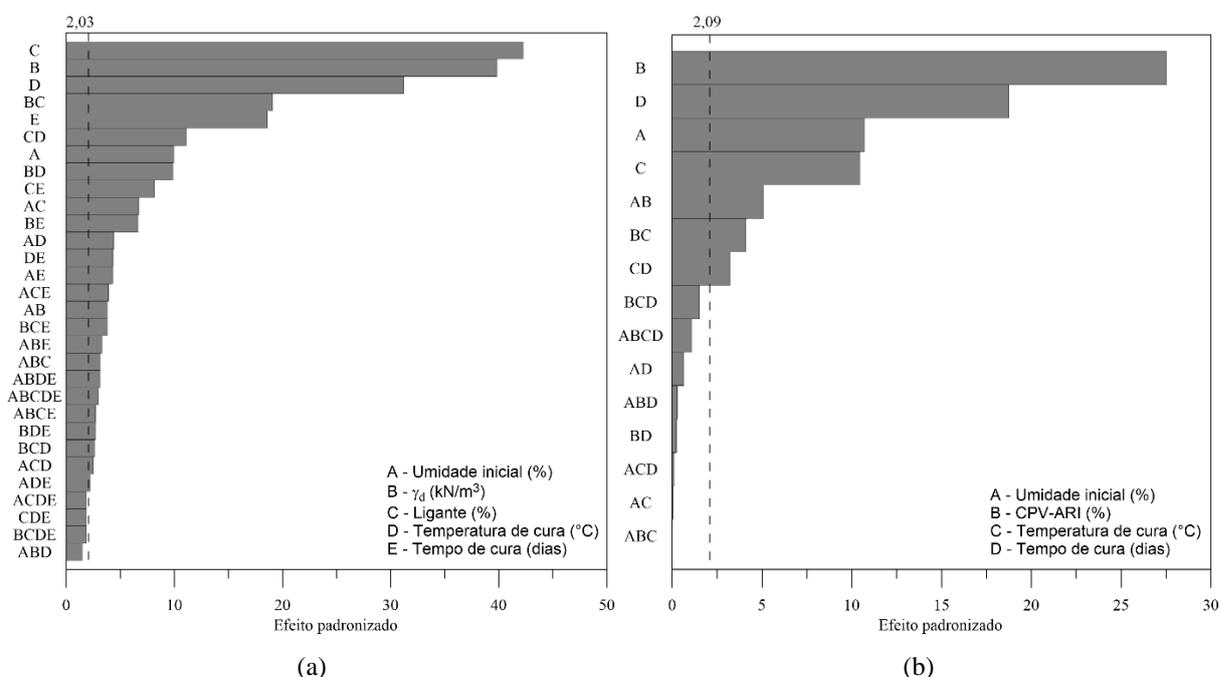


Figura 50 – Gráficos de Pareto para RCD de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

No gráfico dos efeitos principais da Figura 51 pode-se notar o efeito dos fatores controláveis é positivo ou negativo sobre a RCD. Para RAF-LAA, o aumento do nível de todos os fatores controláveis maximiza a RCD. Para RAF-CPV, no nível superior dos fatores teor de cimento, temperatura e tempo de cura tem-se o aumento da RCD, entretanto, o aumento do teor de umidade inicial resulta na redução da RCD. A magnitude e sentido (positivo ou negativo) dos fatores e interações que exercem influência significativa sobre a RCD de RAF-LAA e RAF-CPV têm como base as justificativas apresentadas no item 4.2.1. Ainda, os pontos centrais (Figura 51a-b) e o efeito significativo da curvatura na tabela ANOVA (Apêndice B) evidenciam um comportamento não-linear dos fatores principais sob a RCD de RAF-LAA e RAF-CPV.

A influência de distintos fatores na RCD das misturas RAF-LAA e RAF-CPV mostra uma tendência como a discutida anteriormente para RCS. Esta afirmação é corroborada pelos resultados apresentados na Figura 52, onde foram obtidas relações lineares entre RCS e RCD, com valores de R^2 iguais a 0,99. A relação para RAF-LAA e RAF-CPV é 0,11 e 0,15

respectivamente, ou seja, a RCD é 11% e 15% equivalente a RCS. Tais resultados vão encontro da literatura, cujas relações para solos artificialmente cimentados são em torno de 11-16% (CONSOLI; SAMANIEGO; VILLALBA, 2016; KLEINERT, 2016; SAMANIEGO, 2015).

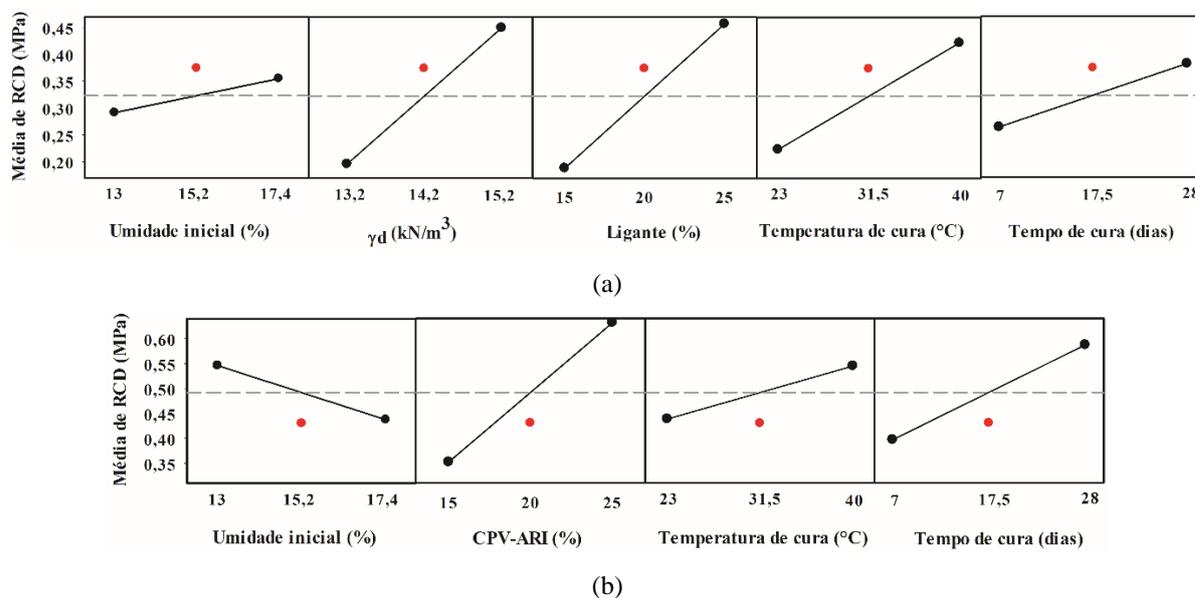


Figura 51 – Efeitos principais sob a RCD de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

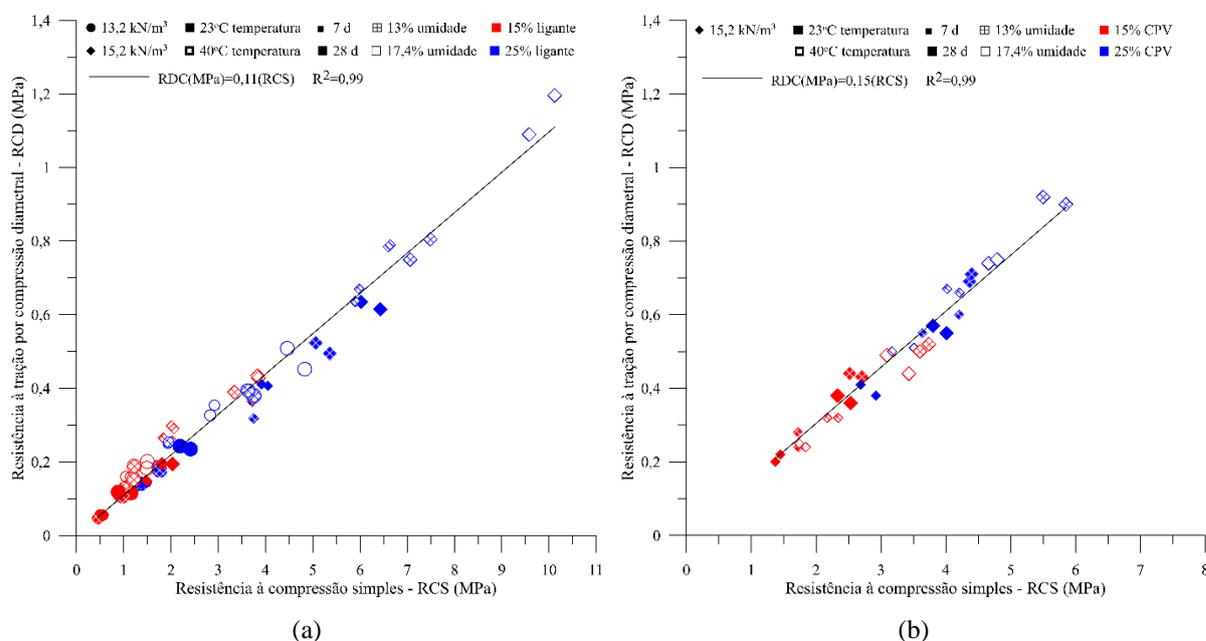


Figura 52 – Relação RCS versus RCD de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

4.2.3 Módulo cisalhante inicial

Na Figura 53 são apresentados os resultados médios de G_0 para RAF-LAA e RAF. Nota-se que o aumento do nível dos fatores controláveis conduziu ao aumento dos valores de G_0 para RAF-LAA. Para RAF-CPV, maiores valores médios de G_0 são observados em maior teor de cimento, tempo e temperatura de cura, e menor teor de umidade. Em 28 dias a 40°C, o melhor tratamento de RAF-LAA (25% LAA, 17,4% w e 15,2kN.m⁻³ y_d) atingiu um G_0 médio de 9059 MPa, o que é 23,7% superior ao G_0 médio apresentado pela mistura RAF-CPV (7326 MPa) sob as mesmas condições. Tais resultados de G_0 fazem alusão direta aos observados nas RCS e RCD.

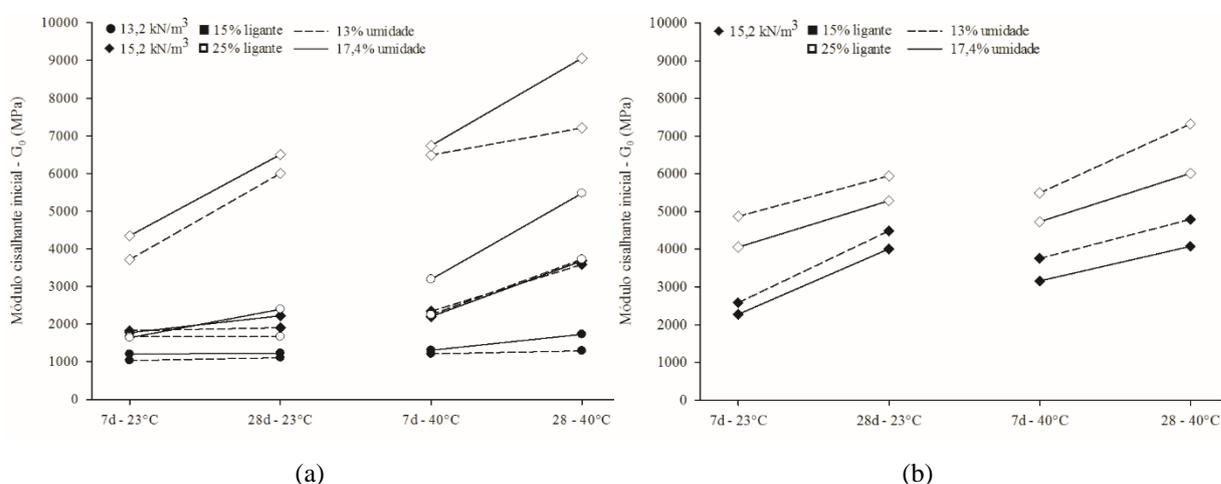


Figura 53 – Resultados médios de G_0 para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

No gráfico de Pareto (Figura 54) nota-se um comportamento similar ao observado na RCS e RCD. A rigidez de RAF-LAA (Figura 54a) é influenciada de forma significativa por todos os fatores controláveis do sistema e por diversas interações de segunda ordem, bem como por algumas interações de ordens superiores. Teor de ligante (C) e peso específico aparente seco (B) são os fatores que exercem influência de maior magnitude sob G_0 . Na sequência, consta a temperatura de cura (D), interação peso específico aparente seco e teor de ligante (BC), tempo de cura (E), interação teor de ligante e temperatura de cura (CD), interação teor de ligante e tempo de cura (CE), e teor de umidade (A), dentre outras interações de menor magnitude.

Tanto para RCS e RCD quanto para G_0 , todos os fatores controláveis exerceram influência significativa. Entre as três respostas mecânicas, algumas variações na magnitude das interações significativas eram esperadas, visto que, trata-se de um sistema cujo material estabilizado e

precursor são resíduos (RAF e CBCA) e com 5 fatores controláveis. A rigidez de RAF-CPV (Figura 54b) é influenciada significativamente por todos fatores controláveis e duas interações. O fator que exerce influência de maior magnitude é teor de cimento (B), seguido de: tempo de cura (D); teor de umidade (A) e temperatura de cura (C); interação teor de cimento-temperatura-tempo de cura (BCD), e interação teor de umidade-teor de cimento (AB).

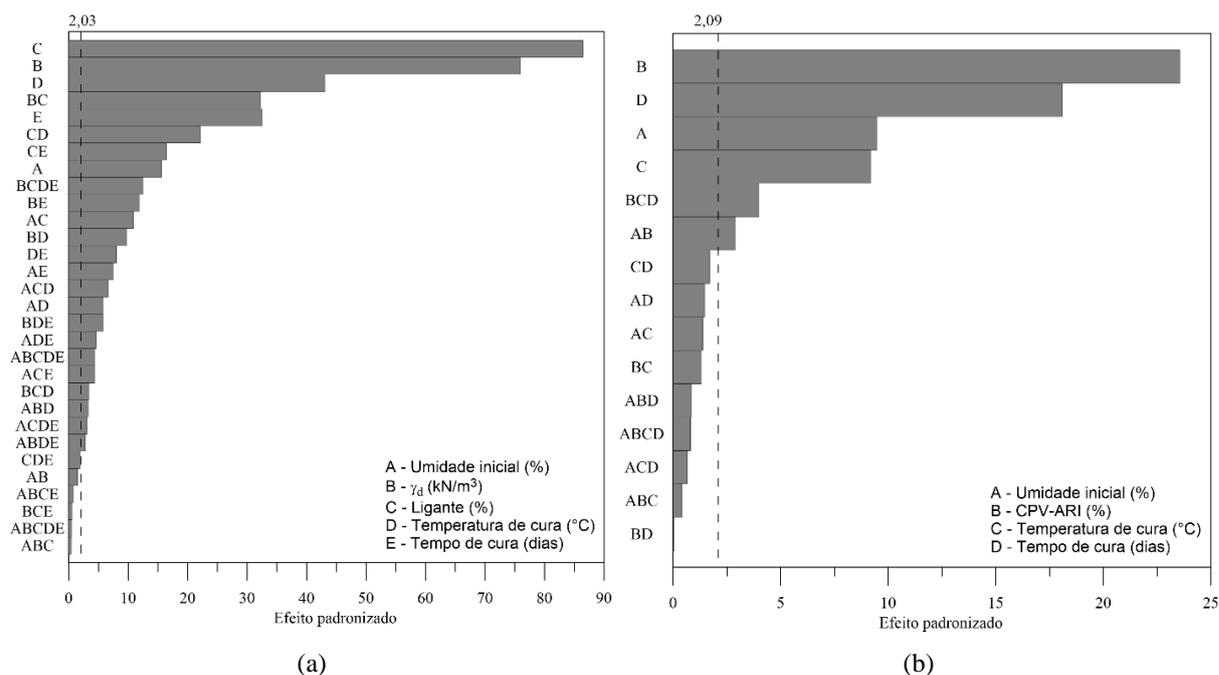


Figura 54 – Gráficos de Pareto para G_0 de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

A Figura 55 expõe o gráfico dos efeitos principais, possibilitando visualizar se o efeito dos fatores controláveis é positivo ou negativo sobre a rigidez inicial. Para RAF-LAA, o aumento no nível de todos os fatores controláveis maximiza o G_0 . Para RAF-CPV, no nível superior dos fatores teor de cimento, temperatura e tempo de cura tem-se o aumento da G_0 , enquanto que, o aumento do teor de umidade inicial resulta na redução do G_0 . A magnitude e sentido (positivo ou negativo) dos fatores e interações que exercem influência significativa sobre a G_0 de RAF-LAA e RAF-CPV têm como base as justificativas apresentadas no item 4.2.1. Ainda, os pontos centrais (pontos vermelhos) na Figura 55a e o efeito significativo da curvatura na tabela ANOVA (Apêndice B) para RAF-LAA evidenciam um comportamento não-linear dos fatores principais sob G_0 . Para RAF-CPV o efeito da curvatura não foi significativo, sugerindo um comportamento linear dos fatores sob a rigidez inicial neste sistema (Figura 55b, Apêndice B).

A influência dos fatores controláveis na rigidez (G_0) de RAF-LAA e RAF-CPV mostra uma tendência como a discutida anteriormente para RCS. Esta observação é corroborada pelos resultados na Figura 56, nos quais foram obtidas relações lineares entre RCS e G_0 , com valores de R^2 iguais a 0,99. Assim, espera-se que maiores resistências sejam obtidas em corpos de prova inicialmente mais rígidos, com influência qualitativamente similar dos fatores controláveis.

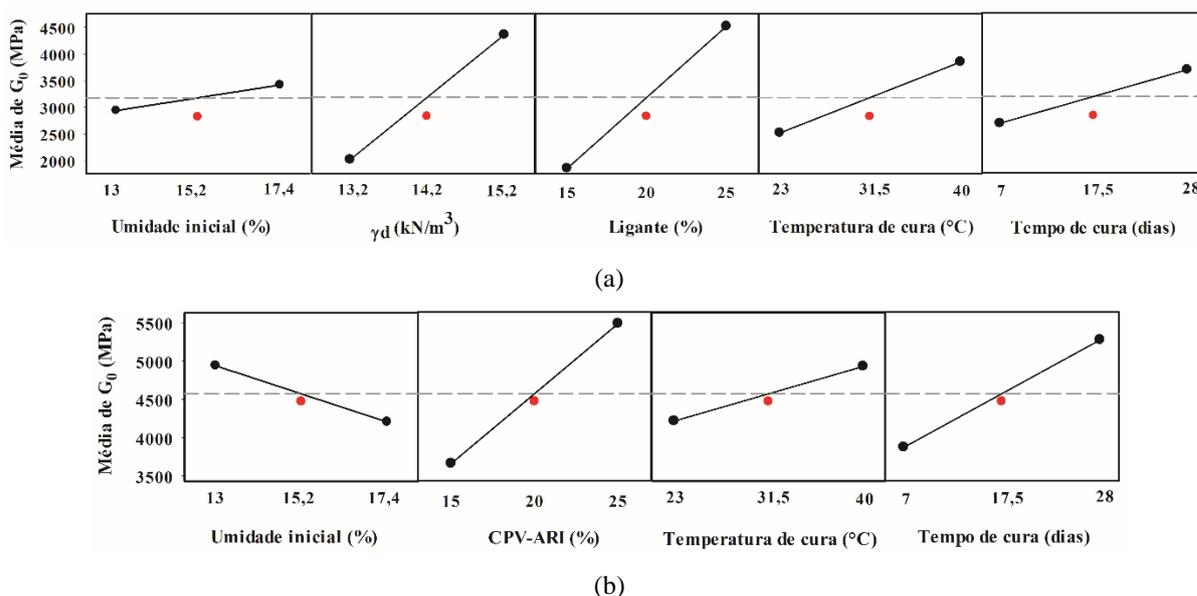


Figura 55 – Efeitos principais sob G_0 de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

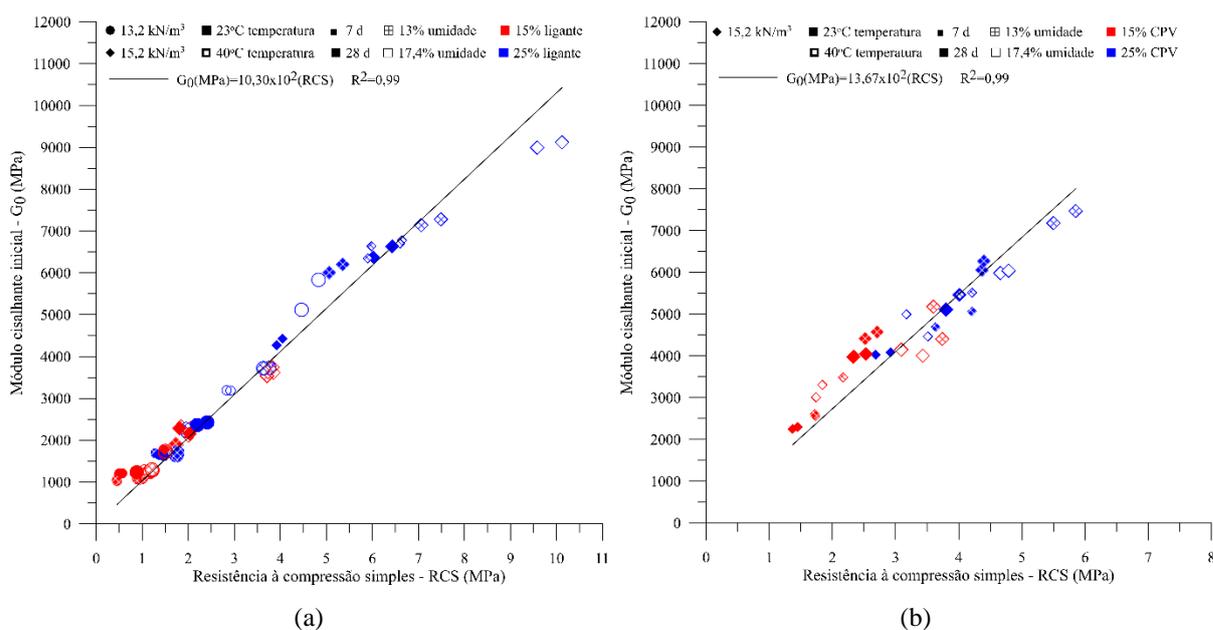


Figura 56 – Relação RCS versus G_0 de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

4.2.4 Durabilidade

Os resultados do ensaio de durabilidade das misturas RAF-LAA e RAF-CPV estão apresentados em termos de perda de massa individual por ciclo (PMI) e perda de massa acumulada ao longo dos ciclos (PMA). Na Figura 57 está exposta a PMI das misturas de ambos sistemas. Nota-se que nas misturas RAF-LAA (Figura 57a) com menor teor de ligante (15%) há uma maior PMI e de forma mais irregular, principalmente até a metade dos ciclos (ciclo 6). Já nas misturas RAF-LAA com 25% de ligante, a PMI é menor e ocorre de forma mais acentuada nos dois primeiros ciclos, tornando-se regular nos ciclos subsequentes. Em relação as misturas de RAF-CPV (Figura 57b), é notório uma PMI inferior e mais regular à das misturas RAF-LAA, até mesmo aquelas contendo 15% de cimento.

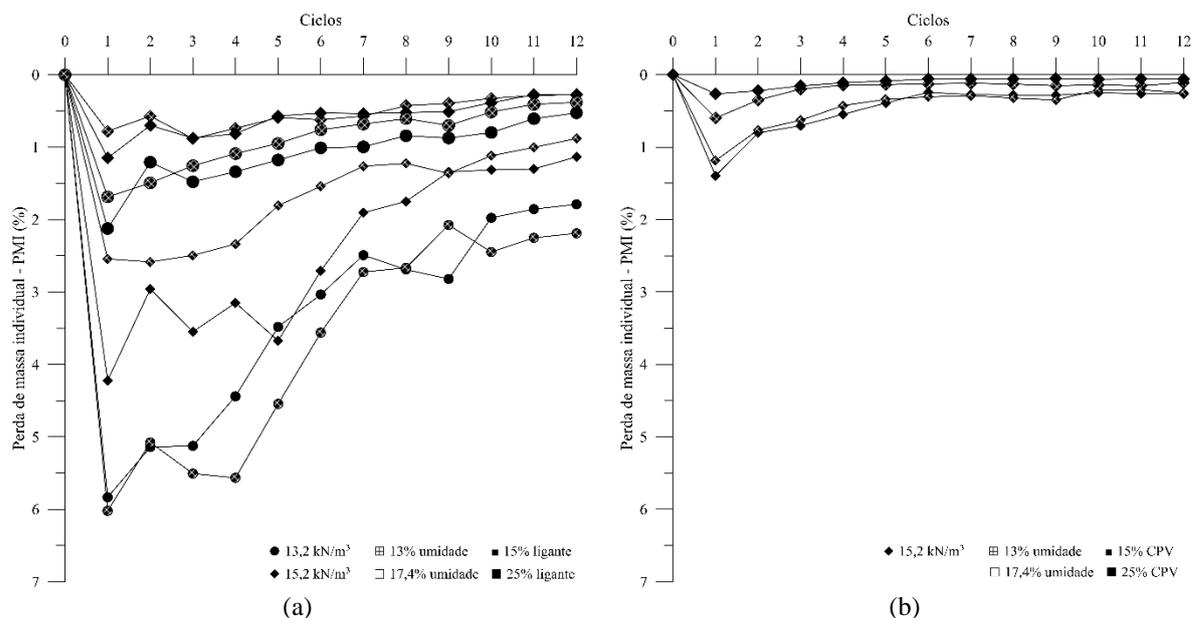


Figura 57 – Perda de massa individual (PMI) das misturas (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

Para melhor visualização das diferenças de PMI entre os dois sistemas, na Tabela 50 são apresentadas as PMI média de todos tratamentos. O comportamento acima mencionado é contrário ao observado nos resultados de RCS e RCD, onde as misturas RAF-LAA apresentaram desempenho superior as de RAF-CPV. Discussões acerca deste comportamento são abordadas juntamente com os resultados de PMA, apresentados na sequência.

Tabela 50 – Perda de massa individual média das misturas RAF-ligante.

Tipo de ligante	Tratamento	γ_d (kN/m ³)	Ligante (%)	Umidade (%)	PMI (%)
Ligante álcali-ativado	1	15,2	15	17,4	2,42
	2	13,2	25	17,4	1,08
	3	15,2	25	13	0,54
	4	15,2	15	13	1,68
	5	13,2	15	17,4	3,39
	6	15,2	25	17,4	0,60
	7	13,2	25	13	0,88
	8	13,2	15	13	3,72
Cimento Portland (CPV)	1	15,2	15	17,4	0,47
	2	15,2	25	17,4	0,10
	3	15,2	15	13	0,44
	4	15,2	25	13	0,20

Na Figura 58 está exposta a PMA das misturas de ambos sistemas. Observa-se uma expressiva influência do teor de ligante e peso específico aparente seco na PMA das misturas RAF-LAA (Figura 58a). Analogamente ao desempenho mecânico em termos de resistência (RCS e RCD) e rigidez inicial, as misturas RAF-LAA com maior durabilidade são aquelas com 25% de ligante e maior peso específico aparente seco (15,2 kN/m³). Maior teor de ligante conduziu a precipitação de maiores quantidades de produtos cimentantes, e maior γ_d potencializou o contato entre partículas e intertravamento; ambos fatores contribuíram diretamente para menor PMA do material perante ciclos de molhagem e secagem.

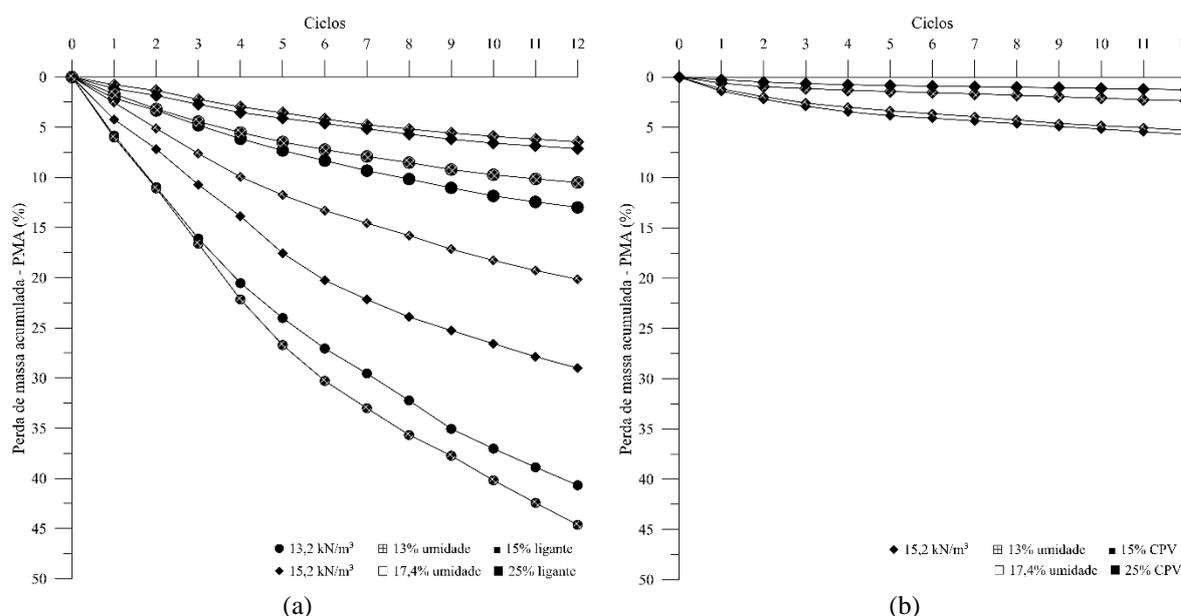


Figura 58 – Perda de massa acumulada (PMA) das misturas (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

As misturas RAF-CPV (Figura 58b) apresentaram PMA inferiores as de RAF-LAA: no sistema RAF-LAA, a menor e maior PMA foram de 6,47% (25% LAA, 15,2 kN/m³ γ_d e 13% w) e 44,63% (15% LAA, 13,2 kN/m³ γ_d e 13% w) respectivamente. Enquanto que, no sistema RAF-CPV, a menor e maior PMA foram de 1,23% (25% CPV, 15,2 kN/m³ γ_d e 17,4% w) e 5,70% (15% CPV, 15,2 kN/m³ γ_d e 17,4% w) respectivamente, conforme exposto na Tabela 51.

Tabela 51 – Perda de massa acumulada das misturas RAF-ligante.

Tipo de ligante	Tratamento	γ_d (kN/m ³)	Ligante (%)	Umidade (%)	PMA (%)
Ligante álcali-ativado	1	15,2	15	17,4	29,01
	2	13,2	25	17,4	12,98
	3	15,2	25	13	6,47
	4	15,2	15	13	20,16
	5	13,2	15	17,4	40,68
	6	15,2	25	17,4	7,14
	7	13,2	25	13	10,52
	8	13,2	15	13	44,63
Cimento Portland (CPV)	1	15,2	15	17,4	5,70
	2	15,2	25	17,4	1,23
	3	15,2	15	13	5,28
	4	15,2	25	13	2,35

Acredita-se que o comportamento observado tenha ocorrido devido a microfissuras formadas nas misturas RAF-LAA, visto que, em termos de durabilidade de “caráter físico”, materiais álcali-ativados podem apresentar a desvantagem de maior formação de microfissuras do que os materiais com cimento Portland (TORRES-CARRASCO, 2015). Estas microfissuras possivelmente estão associadas à contração e retração durante os ciclos secagem, onde ocorreu perda parcial de conteúdo líquido das misturas RAF-LAA. Segundo Torres-Carrasco (2015), sistemas álcali-ativados podem apresentar microfissuras relacionadas principalmente à retração, devido a fatores como gel cimentante com elevado conteúdo de água livre (i.e. água não combinada quimicamente com outras substâncias e eliminada facilmente) e estrutura com porosidade muito baixa. Possivelmente conteúdos de água livre e porosidades baixas tenham contribuído para maiores valores de PMA das misturas RAF-LAA.

As diferenças de PMA entre os dois sistemas (RAF-LAA e RAF-CPV) podem ser melhor visualizadas na Figura 59, onde estão expostos os corpos de prova correspondentes aos maiores e menores PMA nos ciclos 0 e 12. Nas imagens deste Figura 59 é possível notar redução volumétrica e formação microfissuras e/ou trincas decorrentes da exposição a molhagem, secagem e abrasão por escova de aço.

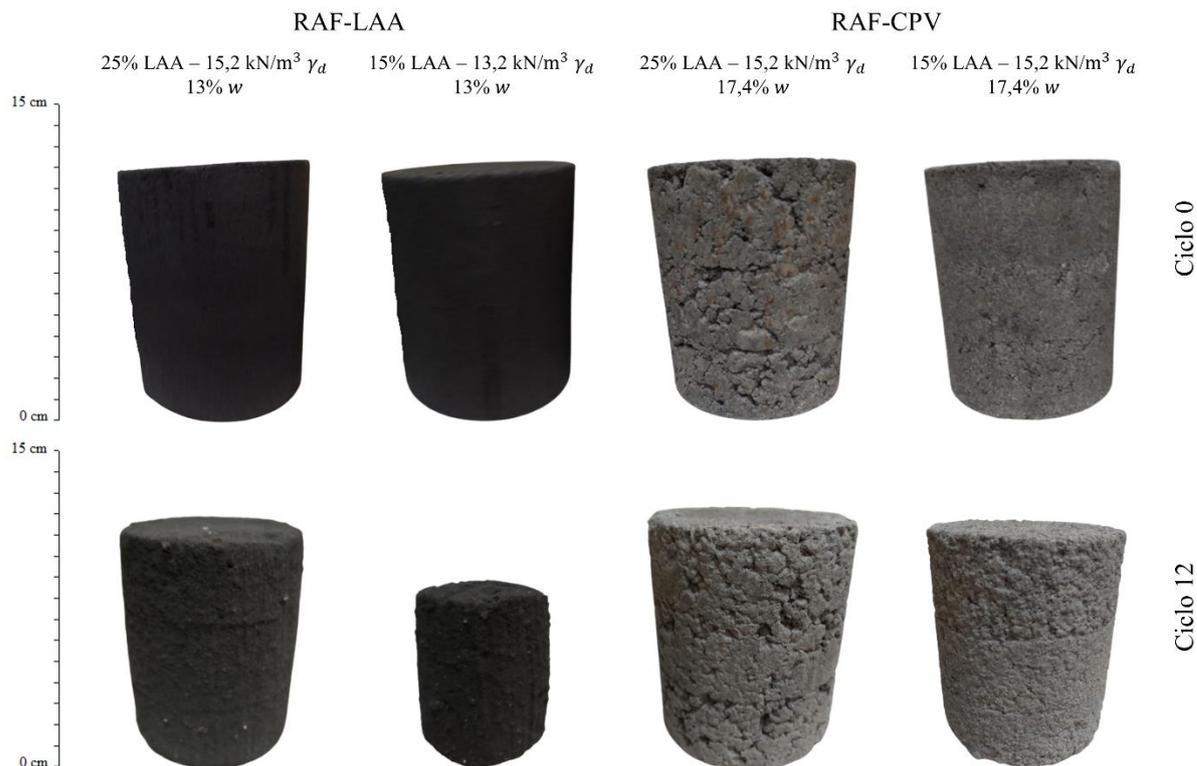


Figura 59 – Corpos de prova dos ciclos 0 e 12 para os resultados extremos de RAF-LAA e RAF-CPV.

4.3 RELAÇÕES COM OS ÍNDICES η/B_{iv} E η/C_{iv}

Nesta seção, a metodologia de dosagem racional por meio do índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante (anteriormente exposto no item 3.5.5), é discutida e validada para os resultados dos ensaios de: resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e pulso ultrassônico. Assim, tais variáveis respostas foram relacionadas com o índice porosidade/teor volumétrico de ligante (η/B_{iv}) e índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) para RAF-LAA e RAF-CPV respectivamente.

Para compatibilizar as taxas de mudança na VR de comportamento mecânico com a porosidade e inverso do teor de agente cimentante, um expoente de 0,28 foi aplicado aos parâmetros B_{iv} e C_{iv} . Este expoente foi escolhido por possibilitar o melhor ajuste aos resultados de RCS, RCD e G_0 obtidos, indo ao encontro de estudos de estabilização de areias com ligantes álcali-ativados (ACOSTA, 2021; CAICEDO, 2020; CONSOLI *et al.*, 2021a, 2022). O ajuste obtido com o expoente 0,28, para ambos sistemas RAF-LAA e RAF-CPV, justifica-se devido ao uso de altos teores de agente cimentante (15 e 25% de cimento alcalino ou cimento Portland) em um

material de granulometria uniforme. Assim, a granulometria uniforme é alterada, onde o teor de finos passa a exercer expressiva influência.

4.3.1 Resistência à compressão simples

Na Figura 60 estão expostos os resultados da relação entre RCS e os índices η/B_{iv} e η/C_{iv} para RAF-LAA e RAF-CPV respectivamente. De forma geral, é possível observar que a redução da relação entre a porosidade e o agente cimentante conduz a um aumento da RCS. Tal comportamento está associado a maior área de contato entre as partículas da mistura, promovendo maior mobilização de atrito, e conseqüentemente maior intertravamento e resistência. Ainda, o aumento do conteúdo de ligante gera uma maior precipitação dos produtos cimentantes, contribuindo diretamente para o ganho de resistência. Com isso em mente, o projetista pode escolher entre utilizar mistura RAF-ligante com menor porosidade (interpretada como aumento da compactação da mistura cimentada) ou com maior conteúdo de agente cimentante. Cabe destacar que, avaliações ambientais do ciclo de vida mostraram que a maximização da densidade e a redução do teor de cimento contribuem para dosagens mais sustentáveis na estabilização de solos (DA ROCHA *et al.*, 2016).

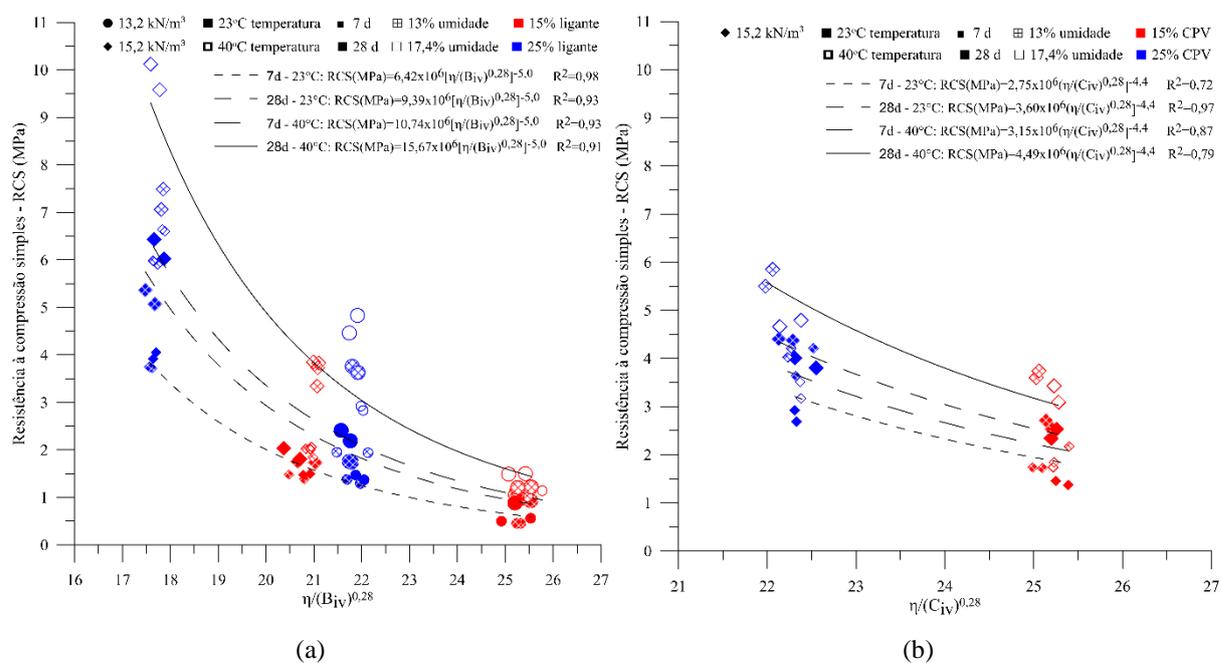


Figura 60 – Relação entre a RCS e η/B_{iv} e η/C_{iv} para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

Ainda na Figura 60, o maior teor de umidade inicial favoreceu as maiores resistências em misturas RAF-LAA, e afetou o comportamento das misturas RAF-CPV, como anteriormente discutido no item 4.2.1. Comparando as curvas de 7 e 28 dias de cura de RAF-LAA (Figura 60a), pode-se presumir que produtos reacionais continuaram a se desenvolver nessas misturas, ao longo do tempo, promovendo ganhos de resistência. Além disso, pode-se notar que as curvas de 28 dias-23°C e 7 dias-40°C estão próximas, indicando que o aumento temperatura de cura potencializou ganhos de resistência em menor período de tempo. Por sua vez, para RAF-CPV (Figura 60b), em função do cimento CPV-ARI desenvolver a maior parcela de resistência nos primeiros dias, a temperatura exerceu menor influência quando comparado a RAF-LAA.

As relações entre os dados experimentais e os índices η/B_{iv} e η/C_{iv} apresentaram bons valores de R^2 para os sistemas avaliados. Para RAF-LAA, os valores dos R^2 variaram de 0,91 a 0,98, e 0,72 a 0,97 para RAF-CPV. Tais coeficientes sugerem a viabilidade dos índices para a previsão da RCS das misturas avaliadas. As Equações 23-26 apresentam as relações encontradas para RAF-LAA e as Equações 27-30 para RAF-CPV. Considerando que norma DNIT 143 (DNIT, 2010) exige uma RCS mínima de 2,1 MPa em 7 dias para aplicação de solo-cimento em base de pavimentos, seriam necessários um $\eta/B_{iv}^{0,28}$ de 19,8 para RAF-LAA (Equação 23) e $\eta/C_{iv}^{0,28}$ de 24,6 para RAF-CPV (Equação 27) para cumprir este requisito.

$$RCS (MPa)_{7\text{dias},23^\circ\text{C}} = 6,42 \times 10^6 \left[\left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-5,0} \quad \text{Eq. 23}$$

$$RCS (MPa)_{28\text{dias},23^\circ\text{C}} = 9,39 \times 10^6 \left[\left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-5,0} \quad \text{Eq. 24}$$

$$RCS (MPa)_{7\text{dias},40^\circ\text{C}} = 10,74 \times 10^6 \left[\left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-5,0} \quad \text{Eq. 25}$$

$$RCS (MPa)_{28\text{dias},40^\circ\text{C}} = 15,67 \times 10^6 \left[\left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-5,0} \quad \text{Eq. 26}$$

$$RCS (MPa)_{7\text{dias},23^\circ\text{C}} = 2,75 \times 10^6 \left[\left(\eta / C_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 27}$$

$$RCS (MPa)_{28\text{dias},23^\circ\text{C}} = 3,60 \times 10^6 \left[\left(\eta / C_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 28}$$

$$RCS (MPa)_{7\text{dias},40^\circ\text{C}} = 3,15 \times 10^6 \left[\left(\eta / C_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 29}$$

$$RCS \text{ (MPa)}_{28\text{dias},40^{\circ}\text{C}} = 4,49 \times 10^6 \left[\left(\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 30}$$

Nota-se nas Equações 23-26 para RAF-LAA que os expoentes externos são iguais, entretanto, as constantes iniciais apresentam valores distintos. O mesmo ocorre nas Equações 27-30 para RAF-CPV. Consoli *et al.* (2018d) e Consoli *et al.* (2019b) propuseram que o comportamento mecânico de misturas solo-cimento, utilizando o mesmo agente cimentante, pode ser normalizado frente à diversos fatores pré-estabelecidos (e.g. temperatura e tempo de cura). Sendo assim, faz-se possível gerar uma única correlação matemática para a previsão do comportamento mecânico do material estabilizado para cada um dos cimentos estudados.

A Figura 61 apresenta a normalização dos valores de RCS para cada temperatura e tempo de cura avaliados. Para RAF-LAA, a normalização foi concebida por meio da divisão dos resultados por um valor fixo de resistência, $\eta/B_{iv}^{0,28}=21$, escolhido por ser um valor central comum as quatro curvas. Já para RAF-CPV, os resultados foram divididos por $\eta/C_{iv}^{0,28}=23,5$, pelo mesmo motivo supracitado. Desta forma, obteve-se uma relação única entre a RCS normalizada e o índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante para ambos tipos de cimentos, independentemente da temperatura e do tempo de cura. As Equação 31 e 32 representam a RCS normalizada para RAF-LAA e RAF-CPV respectivamente.

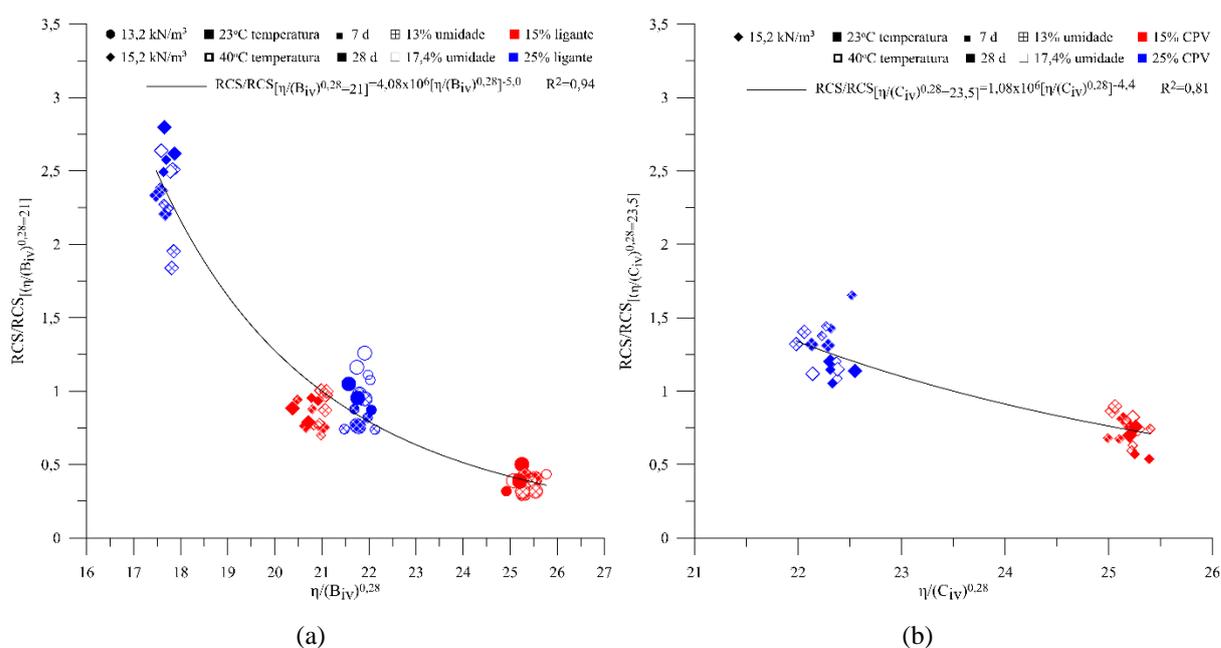


Figura 61 – RCS normalizada para ambos tempos e temperaturas de cura de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

Os valores de R^2 encontrados nas Equações 31 e 32 foi de 0,94 e 0,81, respectivamente, o que demonstra a possibilidade de normalização dos resultados de ambos sistemas (RAF-LAA e RAF-CPV) para os fatores pré-definidos (temperatura e tempo de cura), bem como indicam uma representatividade satisfatória das equações para a previsão da RCS das misturas avaliadas.

$$RCS/RCS_{\left(\frac{\eta}{B_{iv}}=21\right)} = 4,08 \times 10^6 \left[\left(\frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{-5,0} \quad \text{Eq. 31}$$

$$RCS/RCS_{\left(\frac{\eta}{C_{iv}}=23,5\right)} = 1,08 \times 10^6 \left[\left(\frac{\eta}{C_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 32}$$

4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Na Figura 62 estão expostos os resultados da relação entre RCD e os índices η/B_{iv} e η/C_{iv} para RAF-LAA e RAF-CPV, respectivamente. O comportamento da RCD foi muito semelhante ao encontrado para RCS, onde a redução da relação entre porosidade e ligante conduziram ao aumento na resistência. Tal comportamento está relacionado a maior mobilização de atrito, em função da maior área de contato entre as partículas da mistura. Já o teor de cimento resulta em uma maior formação de produtos cimentantes, o que contribui para o aumento da resistência.

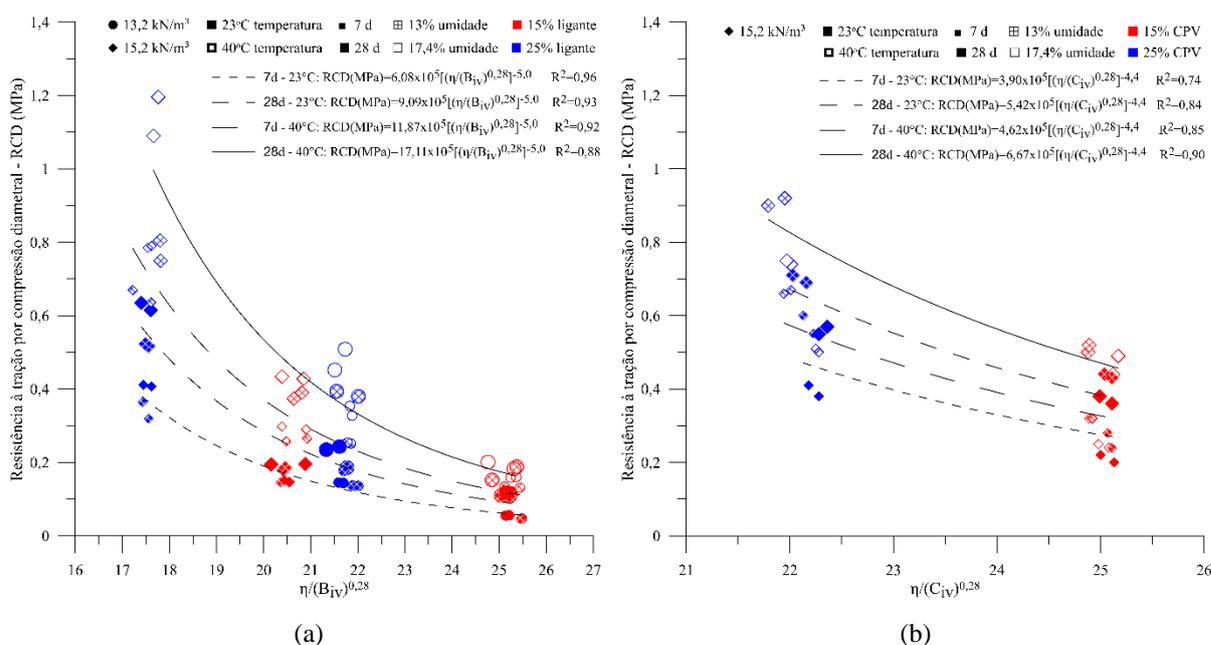


Figura 62 – Relação entre a RCD e η/B_{iv} e η/C_{iv} para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

Ainda, maior teor de umidade, temperatura e tempo de cura resultam em maiores RCD das misturas RAF-LAA (Figura 62). Já as maiores RCD para RAF-CPV são identificadas no menor teor de umidade e maiores temperatura e tempo de cura. Em ambos sistemas, as curvas para distintos tempos e temperaturas de cura são similares as observadas para RCS, com base nas justificativas mencionadas no item 4.3.1.

Referente as equações de previsão de RCD, correlacionando dados experimentais com índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante, foram obtidos coeficientes de determinação satisfatórios para os sistemas avaliados. Para RAF-LAA, os valores dos R^2 variaram de 0,88 a 0,96, e 0,74 a 0,90 para RAF-CPV. Estes coeficientes apontam para a viabilidade dos índices para a previsão da RCD das misturas avaliadas. As Equações 33-36 apresentam as relações encontradas para RAF-LAA e as Equações 37-40 para RAF-CPV.

$$\text{RCD (MPa)}_{7\text{dias},23^\circ\text{C}} = 6,08 \times 10^5 \left[\left(\eta / B_{iv} \right)_{0,28} \right]^{-5,0} \quad \text{Eq. 33}$$

$$\text{RCD (MPa)}_{28\text{dias},23^\circ\text{C}} = 9,09 \times 10^5 \left[\left(\eta / B_{iv} \right)_{0,28} \right]^{-5,0} \quad \text{Eq. 34}$$

$$\text{RCD (MPa)}_{7\text{dias},40^\circ\text{C}} = 11,87 \times 10^5 \left[\left(\eta / B_{iv} \right)_{0,28} \right]^{-5,0} \quad \text{Eq. 35}$$

$$\text{RCD (MPa)}_{28\text{dias},40^\circ\text{C}} = 17,11 \times 10^5 \left[\left(\eta / B_{iv} \right)_{0,28} \right]^{-5,0} \quad \text{Eq. 36}$$

$$\text{RCD (MPa)}_{7\text{dias},23^\circ\text{C}} = 3,90 \times 10^5 \left[\left(\eta / C_{iv} \right)_{0,28} \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 37}$$

$$\text{RCD (MPa)}_{28\text{dias},23^\circ\text{C}} = 5,42 \times 10^5 \left[\left(\eta / C_{iv} \right)_{0,28} \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 38}$$

$$\text{RCD (MPa)}_{7\text{dias},40^\circ\text{C}} = 4,62 \times 10^5 \left[\left(\eta / C_{iv} \right)_{0,28} \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 39}$$

$$\text{RCD (MPa)}_{28\text{dias},40^\circ\text{C}} = 6,67 \times 10^5 \left[\left(\eta / C_{iv} \right)_{0,28} \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 40}$$

Nota-se nas Equações 33-36 (RAF-LAA) que os expoentes externos são iguais, entretanto, as constantes iniciais apresentam valores distintos. O mesmo ocorreu nas Equações 37-40 para RAF-CPV. Como existiam distintas equações para distintos temperatura e tempo de cura, foi proposta a normalização dos resultados, gerando uma única correlação matemática para a previsão da RCD do material estabilizado com cada um dos cimentos.

Na Figura 63 é apresentada a normalização dos valores de RCD para cada temperatura e tempo de cura avaliados. A normalização foi realizada por meio da divisão dos resultados por um valor fixo de resistência, $\eta/B_{iv}^{0,28}=21$ para RAF-LAA e $\eta/C_{iv}^{0,28}=23,5$ para RAF-CPV, escolhido por ser um valor central comum as quatro curvas. Desta forma, obteve-se uma relação única entre a RCD normalizada e o índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante para ambos tipos de cimentos, independentemente da temperatura e tempo de cura.

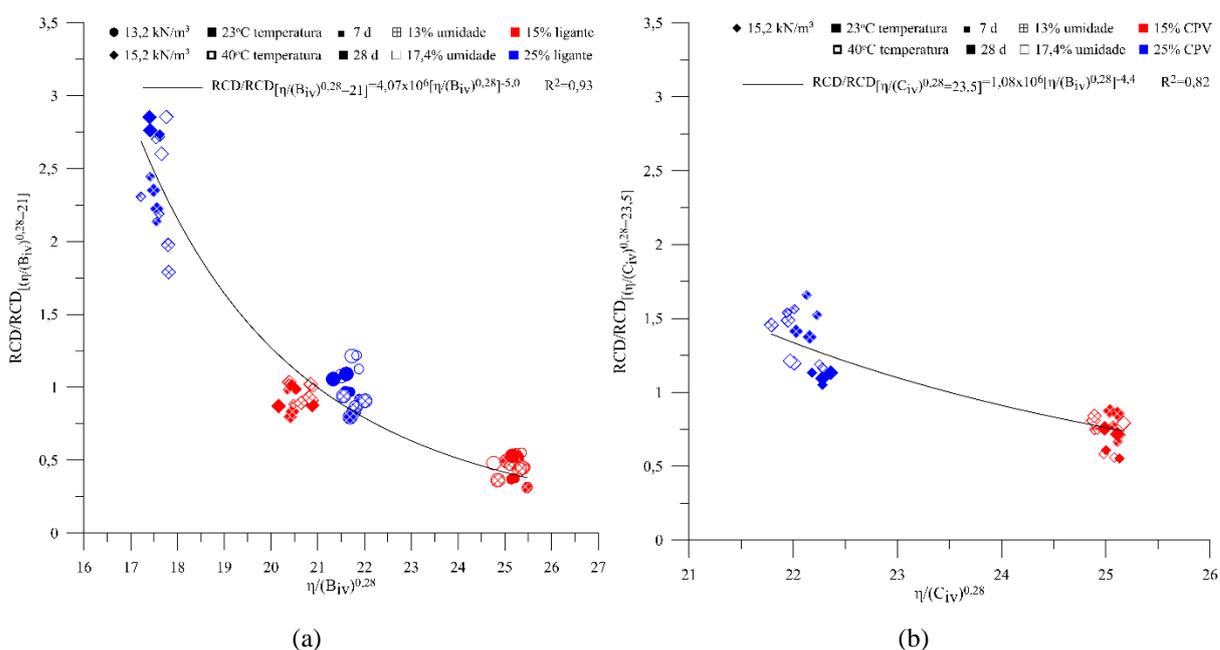


Figura 63 – RCD normalizada para ambos tempos e temperaturas de cura de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

As Equações 41 e 42 representam a RCD normalizada para RAF-LAA e RAF-CPV respectivamente. O coeficiente de determinação encontrado nas Equações 41 e 42 foi de 0,93 e 0,82, respectivamente, o que demonstra a possibilidade de normalização dos resultados de ambos sistemas (RAF-LAA e RAF-CPV), referente a temperatura e tempo de cura, bem como indicam uma representatividade satisfatória das equações para a previsão da RCD das misturas.

$$RCD/RCD_{\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}}=21\right)} = 4,07 \times 10^6 \left[\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-5,0} \quad \text{Eq. 41}$$

$$RCD/RCD_{\left(\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}}=23,5\right)} = 1,08 \times 10^6 \left[\left(\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 42}$$

4.3.3 Módulo cisalhante inicial

Os resultados do ensaio de pulso ultrassônico foram correlacionados com o índice $\eta/B_{iv}^{0,28}$, analogamente ao exposto nos resultados de RCS e RCD, conforme Figura 64. Nota-se que o comportamento da rigidez inicial fez alusão direta ao evidenciado nos resultados de resistência, onde a redução da relação entre a porosidade e o agente cimentante conduziu a um aumento na VR, em função das justificativas supracitadas no item 4.2.1. De forma geral, o maior teor de umidade inicial resultou em maiores valores de G_0 para RAF-LAA, oposto ao que ocorreu nas misturas RAF-CPV. Em ambos sistemas, o comportamento das curvas, para distintos tempos e temperaturas de cura, são similares as observadas na RCS e RCD.

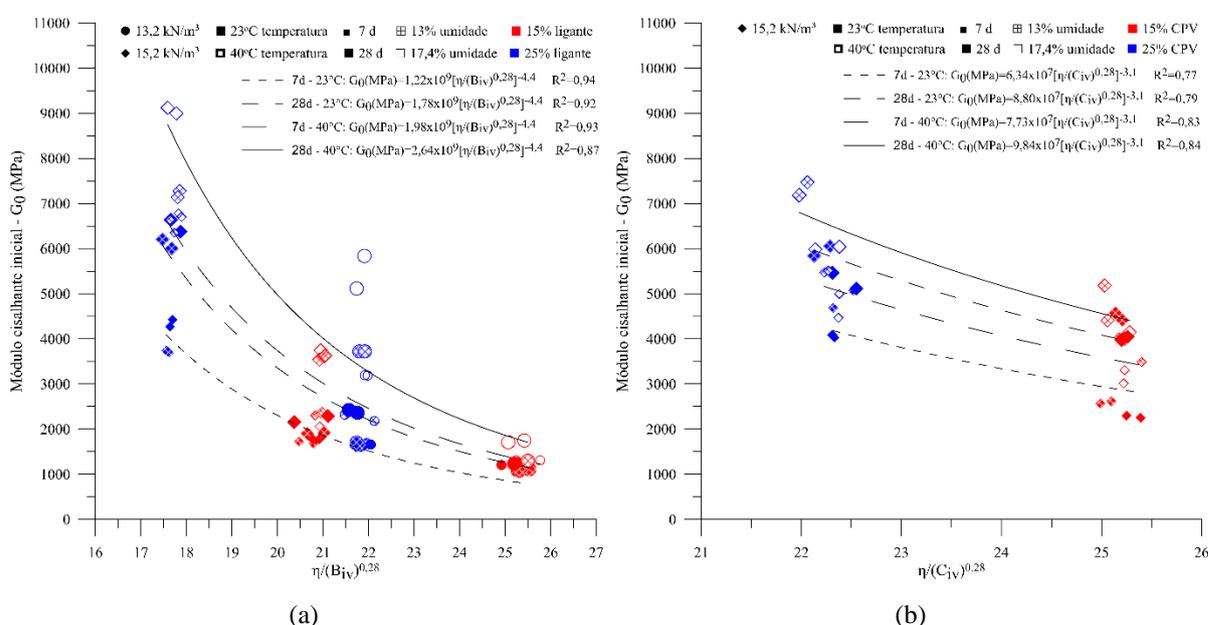


Figura 64 – Relação entre a G_0 e η/B_{iv} e η/C_{iv} para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

Referente as equações de previsão da rigidez inicial, correlacionando dados experimentais com índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante, foram obtidos coeficientes de determinação satisfatórios para os sistemas avaliados. Para RAF-LAA, os valores dos R^2 variaram de 0,87 a 0,94, e 0,77 a 0,84 para RAF-CPV. Estes coeficientes apontam para a viabilidade dos índices para a previsão da rigidez das misturas avaliadas. Nas Equações 43-46 (RAF-LAA) nota-se que os expoentes externos de todas as equações são iguais e as constantes iniciais apresentam valores distintos. O mesmo ocorreu nas Equações 47-50 para RAF-CPV.

Assim, a rigidez inicial das misturas avaliadas pode ser normalizada, referente a temperatura e tempo de cura, gerando uma única correlação matemática.

$$G_0 \text{ (MPa)}_{7\text{dias},23^\circ\text{C}} = 1,22 \times 10^9 \left[\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 43}$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{28\text{dias},23^\circ\text{C}} = 1,78 \times 10^9 \left[\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 44}$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{7\text{dias},40^\circ\text{C}} = 1,98 \times 10^9 \left[\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 45}$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{28\text{dias},40^\circ\text{C}} = 2,64 \times 10^9 \left[\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 46}$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{7\text{dias},23^\circ\text{C}} = 6,34 \times 10^7 \left[\left(\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-3,1} \quad \text{Eq. 47}$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{28\text{dias},23^\circ\text{C}} = 8,80 \times 10^7 \left[\left(\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-3,1} \quad \text{Eq. 48}$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{7\text{dias},40^\circ\text{C}} = 7,73 \times 10^7 \left[\left(\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-3,1} \quad \text{Eq. 49}$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{28\text{dias},40^\circ\text{C}} = 9,84 \times 10^7 \left[\left(\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-3,1} \quad \text{Eq. 50}$$

Na Figura 65 é apresentada a normalização dos valores de rigidez inicial para cada temperatura e tempo de cura avaliados. A normalização foi realizada por meio da divisão dos resultados por um valor fixo de resistência, $\eta/B_{iv}^{0,28}=21$ para RAF-LAA e $\eta/C_{iv}^{0,28}=23,5$ para RAF-CPV, escolhido por ser um valor central comum as quatro curvas. Sendo assim, obteve-se uma relação única entre os resultados de rigidez inicial e o índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante para ambos tipos de cimentos, independentemente da temperatura e tempo de cura.

As Equações 51 e 52 representam a VR normalizada para RAF-LAA e RAF-CPV respectivamente. As Equações 51 e 52 apresentam R^2 de 0,92 e 0,80 respectivamente, o que demonstra a possibilidade de normalização dos resultados de ambos sistemas (RAF-LAA e

RAF-CPV), referente a temperatura e tempo de cura, bem como indicam uma representatividade satisfatória das equações para a previsão da rigidez inicial das misturas.

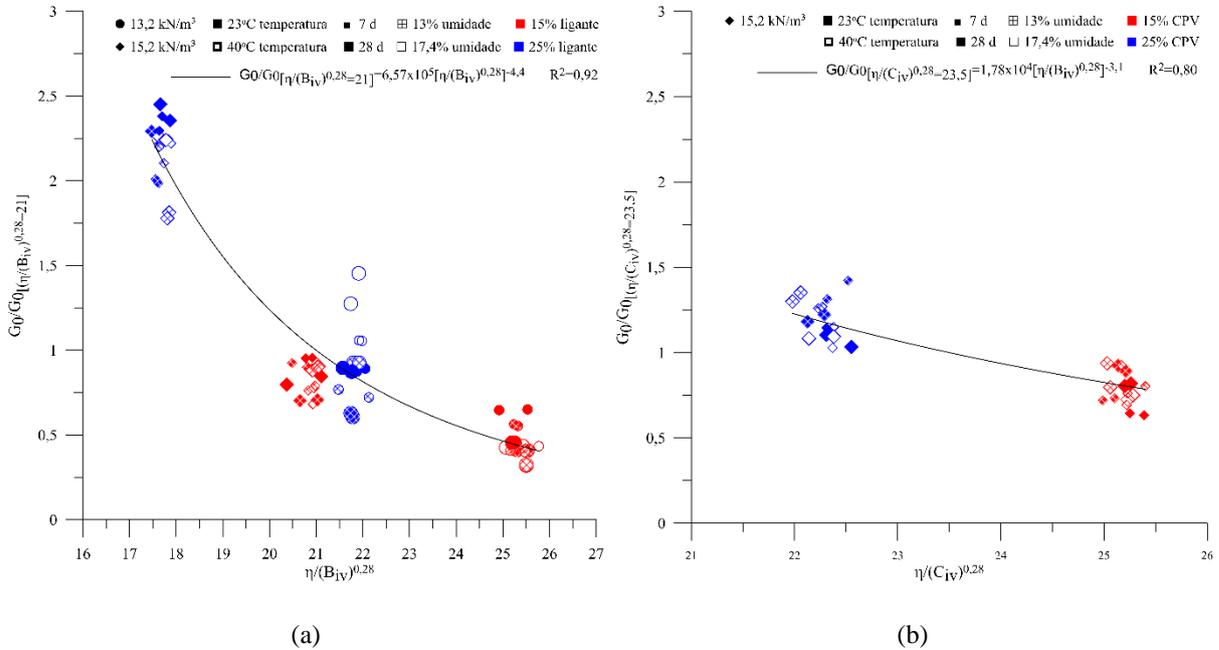


Figura 65 – G_0 normalizado para ambos tempos e temperaturas de cura de (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

$$G_0/G_0\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}}=21\right) = 6,57 \times 10^5 \left[\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-4,4} \quad \text{Eq. 51}$$

$$G_0/G_0\left(\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}}=23,5\right) = 1,78 \times 10^4 \left[\left(\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-3,1} \quad \text{Eq. 52}$$

4.3.4 Durabilidade

Os resultados de PMA das misturas RAF-ligante (LAA ou CPV) nos ciclos 1, 3, 6, 9 e 12 foram correlacionados com o índice $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ou $\eta/C_{iv}^{0,28}$, conforme apresentado na Figura 66. Em consonância ao observados nos resultados de resistência e rigidez, uma menor relação entre porosidade e teor de agente cimentante conduz à redução da PMA. A redução da porosidade maximiza os contatos entre partículas, a mobilização de atrito e o intertravamento, contribuindo diretamente para a resistência mecânica contra a abrasão pela escova metálica.

As relações entre os índices $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ou $\eta/C_{iv}^{0,28}$ e PMA para RAF-LAA e RAF-CPV estão apresentadas na Equações 53-57 e Equações 58-62 respectivamente. Nota-se que estas relações apresentaram R^2 satisfatórios correspondendo a 0,79-0,83 para RAF-LAA e 0,98-0,99 para RAF-CPV. Possivelmente os menores valores de R^2 para PMA nos ciclos de RAF-LAA seja em função da maior variabilidade na PMA apresentada pelas misturas avaliadas neste sistema.

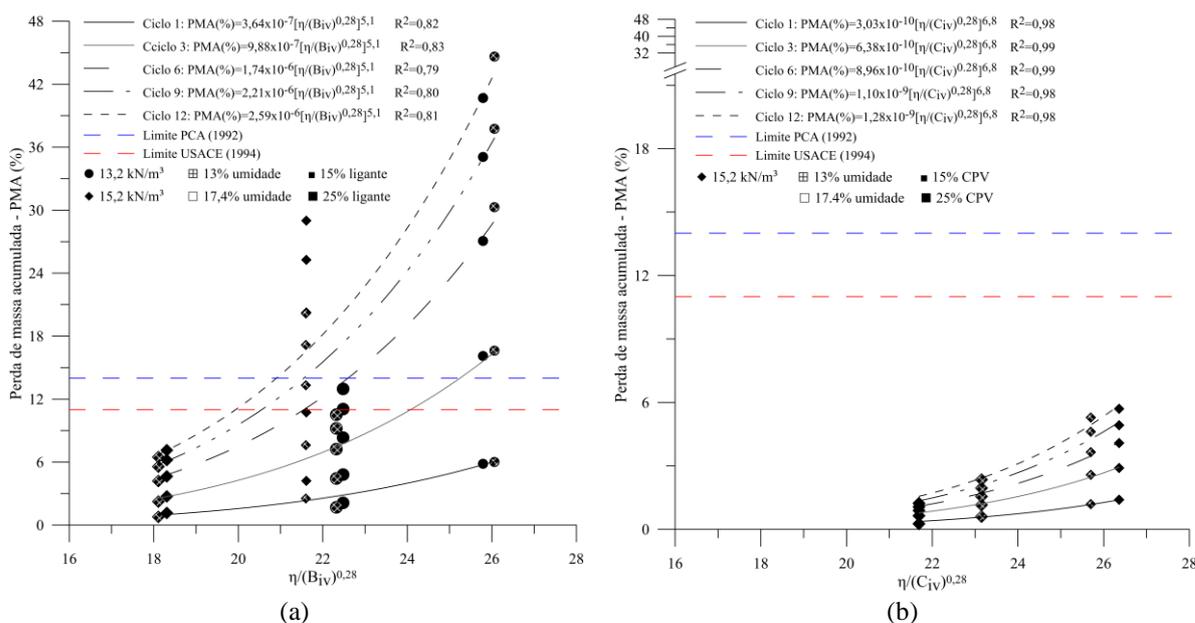


Figura 66 – Relação entre PMA ao longo dos ciclos e η/B_{iv} e η/C_{iv} para (a) RAF-LAA e (b) RAF-CPV.

$$PMA_{\text{ciclo 1}}(\%) = 3,64 \times 10^{-7} \left[\left(\frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{5,1} \quad \text{Eq. 53}$$

$$PMA_{\text{ciclo 3}}(\%) = 9,88 \times 10^{-7} \left[\left(\frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{5,1} \quad \text{Eq. 54}$$

$$PMA_{\text{ciclo 6}}(\%) = 1,74 \times 10^{-6} \left[\left(\frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{5,1} \quad \text{Eq. 55}$$

$$PMA_{\text{ciclo 9}}(\%) = 2,21 \times 10^{-6} \left[\left(\frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{5,1} \quad \text{Eq. 56}$$

$$PMA_{\text{ciclo 12}}(\%) = 2,59 \times 10^{-6} \left[\left(\frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{5,1} \quad \text{Eq. 57}$$

$$\text{PMA}_{\text{ciclo } 1}(\%) = 3,03 \times 10^{-10} \left[\left(\eta / C_{\text{iv } 0,28} \right) \right]^{6,8} \quad \text{Eq. 58}$$

$$\text{PMA}_{\text{ciclo } 3}(\%) = 6,38 \times 10^{-10} \left[\left(\eta / C_{\text{iv } 0,28} \right) \right]^{6,8} \quad \text{Eq. 59}$$

$$\text{PMA}_{\text{ciclo } 6}(\%) = 8,96 \times 10^{-10} \left[\left(\eta / C_{\text{iv } 0,28} \right) \right]^{6,8} \quad \text{Eq. 60}$$

$$\text{PMA}_{\text{ciclo } 9}(\%) = 1,10 \times 10^{-9} \left[\left(\eta / C_{\text{iv } 0,28} \right) \right]^{6,8} \quad \text{Eq. 61}$$

$$\text{PMA}_{\text{ciclo } 12}(\%) = 1,28 \times 10^{-9} \left[\left(\eta / C_{\text{iv } 0,28} \right) \right]^{6,8} \quad \text{Eq. 62}$$

Conforme requisitos mínimos de durabilidade estabelecidos pela Associação de cimento Portland (PCA, 1992), a PMA máxima após 12 ciclos de molhagem e secagem é de 14% para areia finas não plásticas, como RAF. Ao considerar os dados da Tabela 37 e da Figura 66, verifica-se que todas as misturas de RAF-CPV cumprem o requisito, bem como todas as misturas de RAF-LAA contendo 25% de ligante, demonstrando a possibilidade de uma estabilização eficiente de RAF com ambos tipos de ligante. Se a durabilidade das misturas de RAF com ambos cimentos fosse avaliada para uso em base e sub-base de pavimentos, todas as misturas RAF-CPV e as RAF-LAA com $15,2 \text{ kN/m}^3 \gamma_d$ e 25% LAA atenderiam ao limite de 11% PMA estabelecido para solo tratado com agentes químicos (USACE, 1994).

4.4 MINERALOGIA, COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MICROESTRUTURA

A Figura 67 apresenta os difratogramas de misturas RAF-LAA com melhor comportamento mecânico (25% ligante, 17,4% w e $15,2 \text{ kN.m}^{-3} \gamma_d$) em 7 e 28 dias, a 23 e 40°C. É possível observar que a mineralogia destas amostras compartilham a presença de quartzo (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3) (oriundos do RAF e CBCA), calcita (CaCO_3) e portlandita (Ca(OH)_2) (oriundas da CCOH). A presença de faialite (Fe_2SiO_4) foi identificada na amostra de 28 dias, a 23°C. Este mineral cristalino é formado quando íons de ferro (Fe^+) são atribuídos ao sistema álcali-ativado. Possivelmente os íons Fe^+ são oriundos de uma dissolução parcial da hematita da CBCA, na presença do ativador alcalino (solução de NaOH). Segundo Zailani *et al.* (2020),

quando os íons Fe^+ são liberados no sistema álcali-ativado, eles compartilham átomos de oxigênio com Si^{+4} , dando origem a cristais de Fe_2SiO_4 .

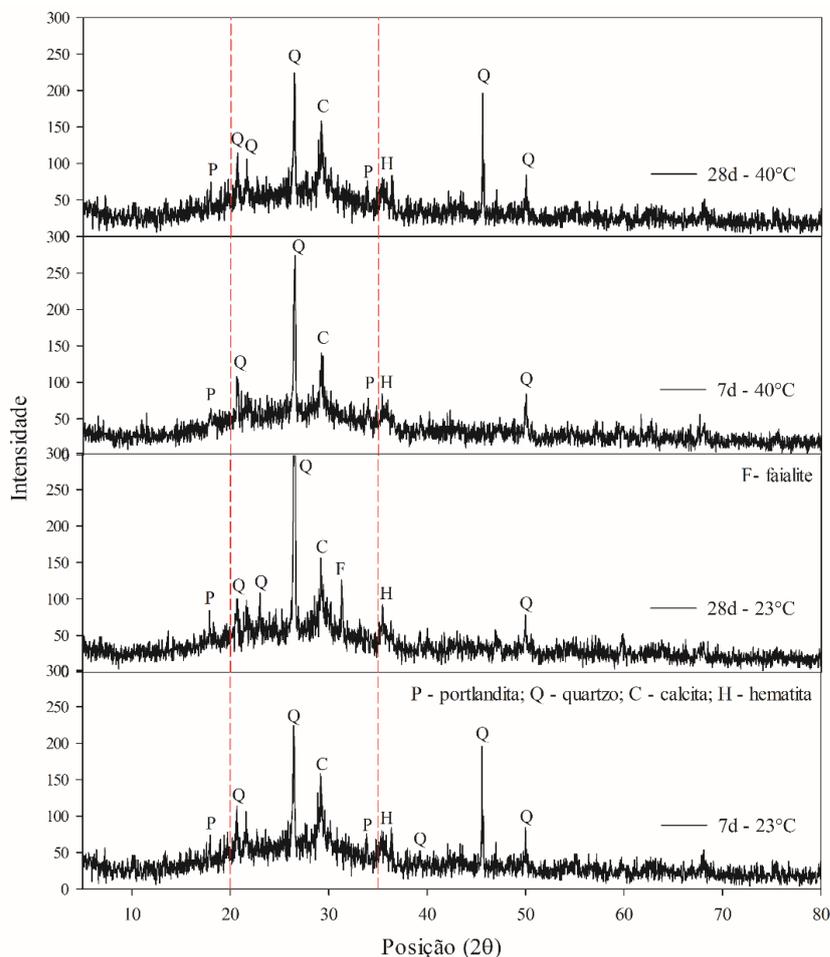


Figura 67 – Difratomogramas de RAF-25% LAA para 7 e 28 dias, a 23 e 40°C.

Ao observar os difratogramas das distintas misturas (Figura 67), nota-se que a portlandita foi sendo consumida em função das interações com os aluminossilicatos amorfos ao longo do tempo (7 para 28 dias), formando produtos cimentantes. A presença de tobermorita (mineral com estrutura semelhante ao gel C-S-H) em materiais cimentados pode ser utilizado como indicativo de formação de gel cimentante. Entretanto, o pico de tobermorita não foi identificado nos difratogramas da Figura 66, visto que este pico coincide com o da calcita.

Em todas as amostras observa-se a presença de fases amorfas compreendidas na faixa angular em 2θ de $20-35^\circ$ (Figura 67). Amplos picos de difração em 2θ de $28-30^\circ$ e $34-35^\circ$ (ZHOU *et al.*, 2021) indicam que fases amorfas do gel C-(A)-S-H podem estar presentes nas misturas

RAF-LAA. Além disso, fases amorfas dentro da faixa angular característica em 2θ de $20-35^\circ$ (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2011) sugerem a presença de gel N-A-S-H nas misturas. Os géis cimentantes formados preenchem os vazios das estruturas de RAF-LAA, resultando no melhor comportamento mecânico apresentado por essas misturas.

A análise de DRX forneceu informações qualitativas sobre os produtos formados em RAF-LAA. Assim, os compostos químicos presentes nas misturas foram avaliados por FTIR para apoiar os resultados mineralógicos. Na Figura 68, as bandas próximas a 3450 cm^{-1} (3432 cm^{-1} , 3425 cm^{-1} , 3438 cm^{-1} e 3441 cm^{-1}) estão associadas a vibrações de estiramento de moléculas de água (ligação H-O-H). As bandas em torno de 1600 cm^{-1} (1622 cm^{-1} , 1620 cm^{-1} e 1614 cm^{-1}) correspondem a vibrações de deformação angular de grupos O-H (BAKHAREV, 2005; ROBAYO *et al.*, 2016). As bandas em 2924 cm^{-1} e 2852 cm^{-1} representam vibrações de estiramento assimétrico e simétrico de grupos metileno (CH_2) (VICENT; CRIADO; GARCÍA-TEN, 2019). As regiões próximas a 778 cm^{-1} , 694 cm^{-1} (691 cm^{-1}) (ROBAYO *et al.*, 2016) e 460 cm^{-1} (462 cm^{-1} , 459 cm^{-1} , 456 cm^{-1} e 462 cm^{-1}) referem-se a vibrações de deformação de Si-O-Si/Si-O-Al, relacionadas a presença de quartzo (BAKHAREV, 2005; GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2010a).

A região compreendida entre 1458 cm^{-1} a 1470 cm^{-1} corresponde a vibrações de estiramento assimétricas de ligações C-O (ROBAYO *et al.*, 2016), bem como entre 873 cm^{-1} a 876 cm^{-1} indicam a presença de carbonatos inorgânicos (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2010b). Bandas em torno de $2868-2973\text{ cm}^{-1}$ (2868 cm^{-1} , 2930 cm^{-1} e 2969 cm^{-1}) correspondem a vibrações de carbonato de cálcio (VICENT; CRIADO; GARCÍA-TEN, 2019). Tal resultado corrobora com a identificação de calcita (CaCO_3 , oriunda da CCOH) nos difratogramas das misturas RAF-LAA (Figura 67). Apesar da presença de portlandita na mineralogia de RAF-LAA (Figura 67), não observou-se banda de vibração correspondente a Ca(OH)_2 (3635 cm^{-1}), o mesmo foi verificado por Caicedo, Moncaleano e Consoli (2023) na investigação do cimento álcali-ativado (a base de resíduo cerâmico e cal de carbureto). A portlandita pode ter precipitado no gel cimentante, onde possivelmente a superfície do gel forneceu locais para adsorção dos cátions (Ca^{2+}) (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2009).

A região em torno de 1020 a 1060 cm^{-1} compreende vibrações de estiramento assimétrico (T-O-T, sendo T: Si ou Al) características de gel N-A-S-H (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2010a, 2011). Considerando a região em torno da linha delimitada em 1036 cm^{-1} , na Figura 66, nota-se um estreitamento do espectro nessa região (d_1) e um aumento da distância vertical entre esta

região e o ombro em 1036 cm^{-1} (d_2) nos espectros das misturas RAF-LAA curadas a 40°C , comparativamente a aquelas expostas a 23°C . Isto demonstra que as reações de policondensação de aluminossilicatos e consequente formação e precipitação de géis cimentantes estão ocorrendo ao longo do tempo (DE VARGAS *et al.*, 2014), e sendo catalisadas pelo aumento da temperatura. Esta observação corrobora o melhor desempenho mecânico apresentado pelas misturas curadas sob 40°C .

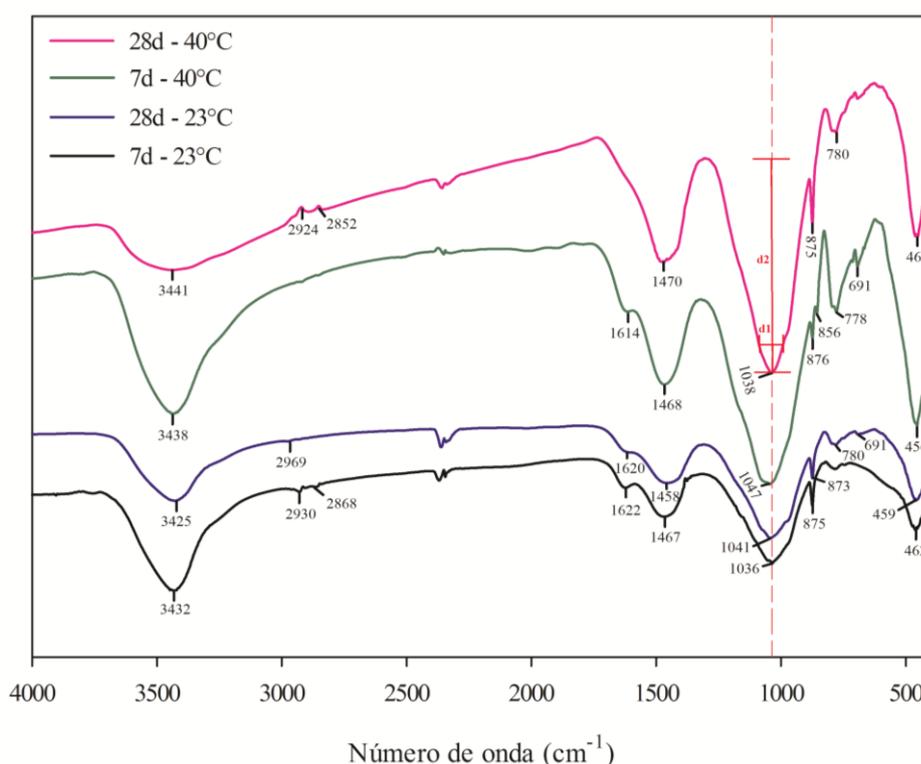


Figura 68 – Espectros de FTIR de RAF-25% LAA para 7 e 28 dias, a 23 e 40°C .

A banda de vibração de estiramento assimétrico Si-O típica de gel C-(A)-S-H (959 cm^{-1}) (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2011) não foi identificada nos espectros de RAF-LAA, o que pode representar a presença deste composto em baixas concentrações nas misturas, como também observado por De Vargas *et al.* (2014). Havendo disponibilidade de cálcio no meio, Ca^{2+} deslocam Na^+ por troca iônica na superfície do gel N-A-S-H, gerando géis (N,C)-A-S-H. Ao longo do tempo, o Ca é preferencialmente adsorvido e conduz à existência do gel majoritariamente de caráter C-(A)-S-H. Íons de Na só serão retidos no gel se houver disponibilidade insuficiente de Ca^{2+} (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2010a, 2011).

Na Figura 69 pode-se observar a microestrutura das misturas RAF-LAA fornecidas por imagens de MEV. Nota-se que RAF-LAA curada sob menor temperatura e período de tempo (7 dias a 23°C) caracteriza-se por uma microestrutura mais heterogênea e com maior presença de vazios (interpretados como regiões pretas), bem como apresenta partículas de RAF parcialmente envolvidas por produtos cimentantes (Figura 69a). Curadas sob maiores temperaturas e tempos de cura, misturas RAF-LAA desenvolveram maiores quantidades de géis que foram preenchendo os vazios e envolvendo as partículas de RAF, o que resultou em microestruturas mais homogêneas e densas (Figuras 69b-d), justificando as melhores respostas mecânicas verificadas nestes materiais. As misturas RAF-LAA curadas por 28 dias a 23°C e por 7 dias a 40°C (Figuras 69b-c) apresentam microestruturas densas, sendo possível visualizar uma partícula de RAF parcialmente envolta na primeira (Figura 69b), enquanto que na segunda, as partículas de RAF parecem estar totalmente envolvidas por géis cimentantes (Figura 69c). Ainda, ambas misturas (Figuras 69b-c) apresentam vazios em suas matrizes, porém em menor presença do que os observados em RAF-LAA a 23°C por 7 dias (Figura 69a). RAF-LAA curada por 28 dias a 40°C apresenta uma matriz mais homogênea, densa e compacta (Figura 69d), corroborando o melhor comportamento mecânico apresentado por esta mistura.

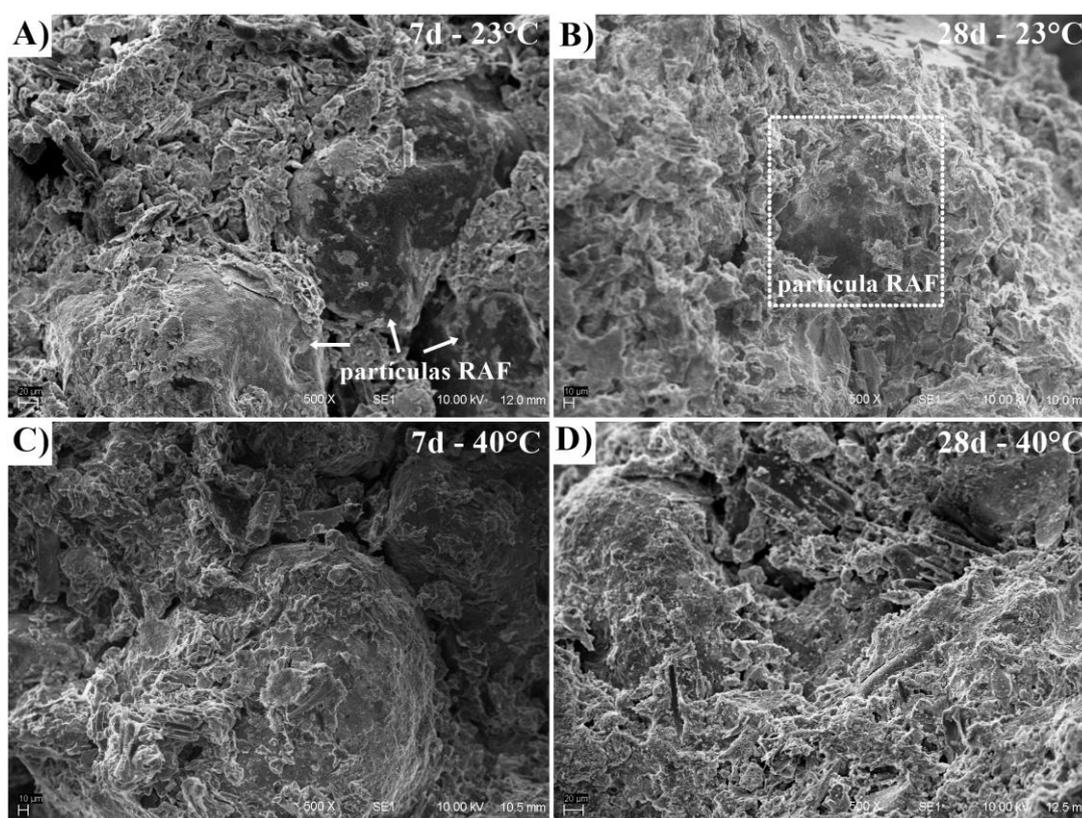


Figura 69 – Imagens de MEV de RAF-25% LAA para 7 e 28 dias, a 23 e 40°C.

Após as avaliações das propriedades mecânicas e microestruturais, verificou-se a viabilidade técnica da estabilização de RAF com LAA em termos de comportamento mecânico. Espera-se que este material estabilizado também apresente desempenho ambiental satisfatório. Assim, fez-se necessário investigar a lixiviação de metais das misturas RAF-LAA, sendo esta avaliação apresentada na sequência.

4.5 LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO DE METAIS

4.5.1 Lixiviação de metais - NBR 10005

A Tabela 52 apresenta as concentrações de metais nos extratos lixiviados de misturas RAF-LAA e RAF-CPV com 7 dias de cura, e distintos pesos específicos, teores de ligante e de umidade inicial. Estas concentrações foram comparadas com aquelas presentes nos resíduos *in natura* e no CPV-ARI e com os limites máximos estabelecidos pelas normativas NBR 10004 – anexo F (ABNT, 2004a), EPA (USEPA, 2004), CONAMA 460 (CONAMA, 2013), Lista Holandesa (VROM, 2000) e EPA (USEPA, 2022a).

Metal presente nos extratos lixiviados dos resíduos (RAF e CBCA) e do CPV, o bário (Ba) sofreu lixiviação de misturas RAF-LAA e RAF-CPV em concentrações superiores ao limite da Lista Holandesa (norma mais restritiva para qualidade de águas), mas não superiores aos limites relativos a toxicidade (Figura 70). Todas as concentrações de Ba lixiviadas de RAF-LAA e algumas de RAF-CPV foram inferiores ao limite estabelecidos pela CONAMA 460. Todos os extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV apresentaram concentrações de Ba inferiores aos limites de qualidade de água da EPA (USEPA, 2022a) e aos limites de toxicidade [anexo F - NBR 10004 e EPA (USEPA, 2004)]. O Ba lixiviado das misturas RAF-CPV é proveniente do agente cimentante utilizado (CPV-ARI), além do RAF. Presente em quantidades variáveis em calcários e argilas, o Ba é incorporado nas fases do clínquer do cimento Portland (SATO, 2004; VOLLPRACHT; BRAMESHUBER, 2015), como também verificado na composição química do CPV usado nesta pesquisa (Tabela 20). Óxido de bário pode reagir com CO₂ presente em água, formando hidróxido de bário ou carbonato de bário, sendo este último, um composto solúvel em solução de ácido acético (ATSDR, 2007), a qual foi utilizada como solução extratora neste estudo. Ainda, é importante lembrar que lixiviação do Ba apresenta um comportamento

anfotérico, i.e., capacidade de reagir em condições ácidas ou básicas (KOMONWEERAKET *et al.*, 2015a; MAHEDI; CETIN; DAYIOGLU, 2020). Resultado similar ao desta pesquisa foi observado por Mahedi, Cetin e Dayioglu (2020), em que o aumento do teor de cimento Portland em misturas solo-cinza/escória-cimento resultou na lixiviação de maiores concentrações de Ba.

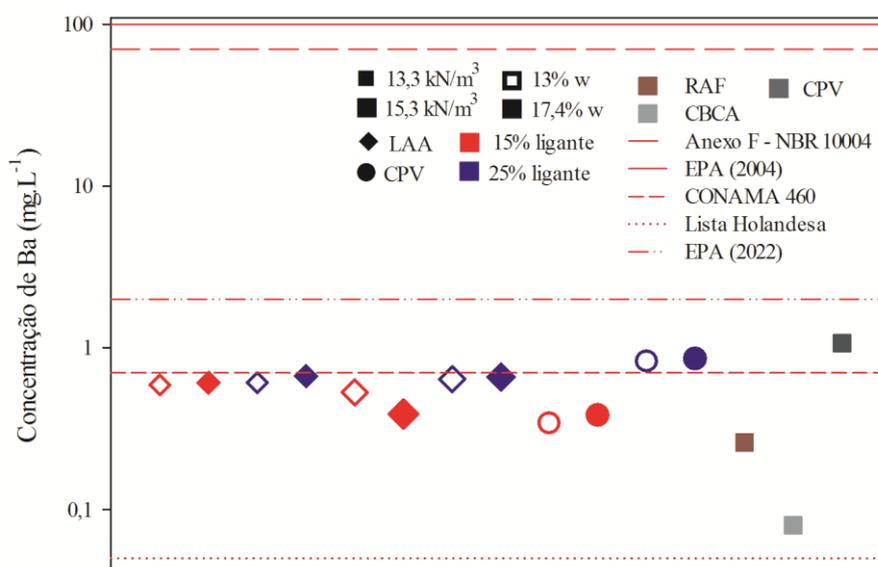


Figura 70 – Concentração de Ba nos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV.

O cromo (Cr) também é um elemento com comportamento de lixiviação anfotérico, i.e., apresenta aumento da concentração lixiviada em pH ácido ou alcalino (KOMONWEERAKET *et al.*, 2015b). Misturas RAF-CPV apresentaram lixiviação de Cr total em concentrações superiores as normativas mais restritivas para qualidade de água (Lista Holandesa e CONAMA 460), porém, elas são inferiores aos limites de toxicidade [NBR 10004 (anexo F) e EPA (USEPA, 2004)] e de qualidade de águas da EPA (USEPA, 2022a) (Figura 71). A lixiviação de Cr é oriunda do CPV, visto que as matérias-primas do cimento Portland apresentam Cr em suas composições químicas (e.g. argila, fonte de ferro e calcário) (ECKBO; OKKENHAUG; HALE, 2022; ROSKOVIC *et al.*, 2011), sendo incorporado principalmente nas fases de silicato durante a queima do clínquer (ESTOKOVA; PALASCAKOVA; KANUCHOVA, 2018; VOLLPRACHT; BRAMESHUBER, 2015). As concentrações de Cr lixiviadas das misturas RAF-CPV são inferiores ao do extrato lixiviado do CPV-ARI, demonstrando que a matriz de RAF cimentada encapsulou parcialmente este metal pesado. O Cr pode ser imobilizado em matrizes cimentadas como um substituto do silício no gel C-S-H, em função da compatibilidade dos raios iônicos de Si(OH)₄ e Cr(OH)₄⁻ (KOMONWEERAKET *et al.*, 2015a, 2015b). Além

disso, houve o encapsulamento de Cr (oriundo de RAF) nas misturas RAF-LAA, como pode ser melhor observado na Tabela 52. Nas misturas RAF-LAA, o Cr pode ter precipitado com o Ca (oriundo da CCOH) formando uma solução sólida (i.e. mistura em estado sólido de dois ou mais componentes, constituindo uma fase única) de Cr-Ca, e reduzindo as concentrações de Cr nos extratos lixiviados, como também verificado por outros autores (CORNELIS *et al.*, 2008; MAHEDI; CETIN; DAYIOGLU, 2020). Giels *et al.* (2019) acreditam que Cr pode precipitar como um componente estrutural dos géis formados em materiais álcali-ativados.

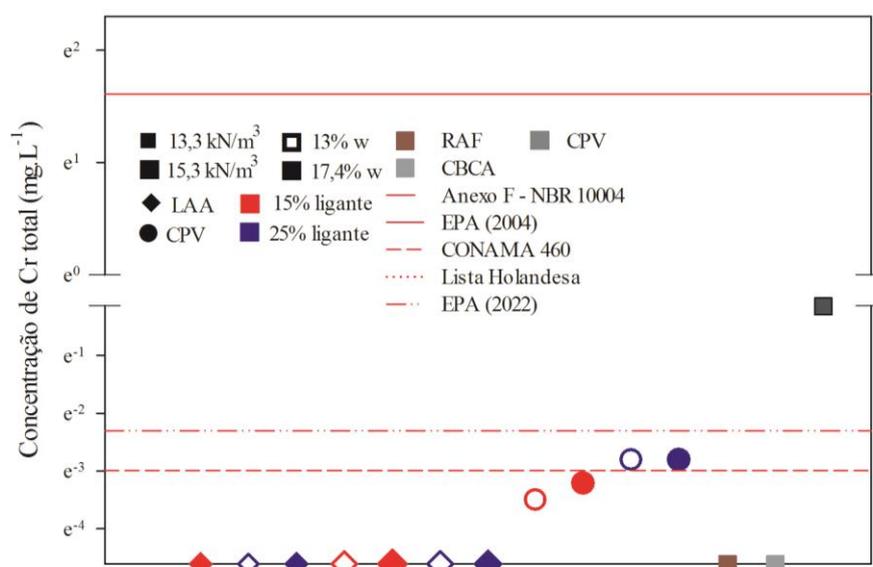


Figura 71 – Concentração de Cr total nos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV.

Todas as misturas RAF-LAA lixiviaram manganês (Mn) em concentrações superiores ao limite estabelecido pela CONAMA 460 (única norma que estabelece limite para Mn), bem como superiores as observadas nos extratos lixiviados de CPCA e RAF (Figura 72). O Mn é um metal de comportamento de lixiviação catiônico, ou seja, a concentração de Mn lixiviada reduz a medida que aumenta o pH (KOMONWEERAKET *et al.*, 2015b). Em condições ácidas, os cátions Mn²⁺ estão livres no meio e, portanto, presentes em maiores concentrações nos extratos líquidos (MAHEDI; CETIN; DAYIOGLU, 2020). Conforme Tabela 53, os extratos lixiviados das misturas RAF-LAA apresentaram valores de pH correspondentes a condições ácidas (pH<7), o que justifica o comportamento de lixiviação observado para Mn. Ainda, a sorção dos íons catiônicos Mn²⁺ na CPCA (e em menor parcela no RAF) tende a diminuir com a redução

do pH devido à competição com os íons H^+ (da solução de ácido acético) pelos sítios de adsorção, como também reconhecido por Mahedi, Cetin e Dayioglu (2020).

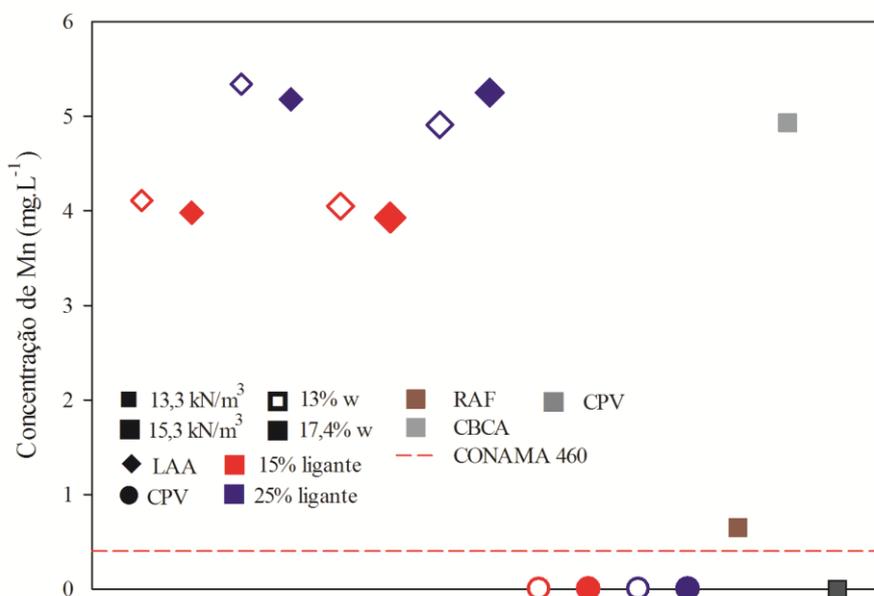


Figura 72 – Concentração de Mn nos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV.

Algumas misturas de RAF-LAA, especialmente aquelas contendo 15% LAA apresentaram lixiviação de Zinco (Zn) em concentrações superiores ao limite máximo estabelecido pela norma mais restritiva de qualidade de água (Lista Holandesa) (Figura 73). Pelo fato do Zn apresentar comportamento de lixiviação anfotérico, ocorre aumento da sua concentração em líquido em meios ácido e básicos (KOMONWEERAKET *et al.*, 2015b). As maiores concentrações de Zn nos extratos lixiviados das misturas RAF-LAA são provenientes de RAF e CBCA, em meios básicos e ácidos. Menores concentrações de Zn foram observadas nos efluentes com maiores valores de pH, os quais são oriundos das misturas contendo maior teor de CBCA (i.e. 25% LAA) (Tabela 53). Acredita-se que inicialmente, os íons de Ca elevaram o pH do meio e, conseqüentemente aumentaram a taxa de liberação de Zn para o meio aquoso. A medida em que os íons de Ca livres foram neutralizando os prótons livres (H^+) da solução ácida, ocorreu a diminuição do pH do meio que era altamente alcalino e, conseqüentemente a redução da lixiviação de Zn. Portanto, a lixiviação de Zn das misturas RAF-LAA ocorreu em função do teor de Ca livre, teor de cinza e do pH. Em geral, misturas RAF-LAA contendo 25% de LAA foram eficientes para encapsular Zn presente em RAF e CBCA. No sistema RAF-CPV, todas as misturas encapsularam Zn. Géis cimentantes tipo C-S-H ou os formandos em materiais

álcali-ativados são capazes de encapsular fisicamente metais como Zn (FENG *et al.*, 2020; GIELS *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2020b).

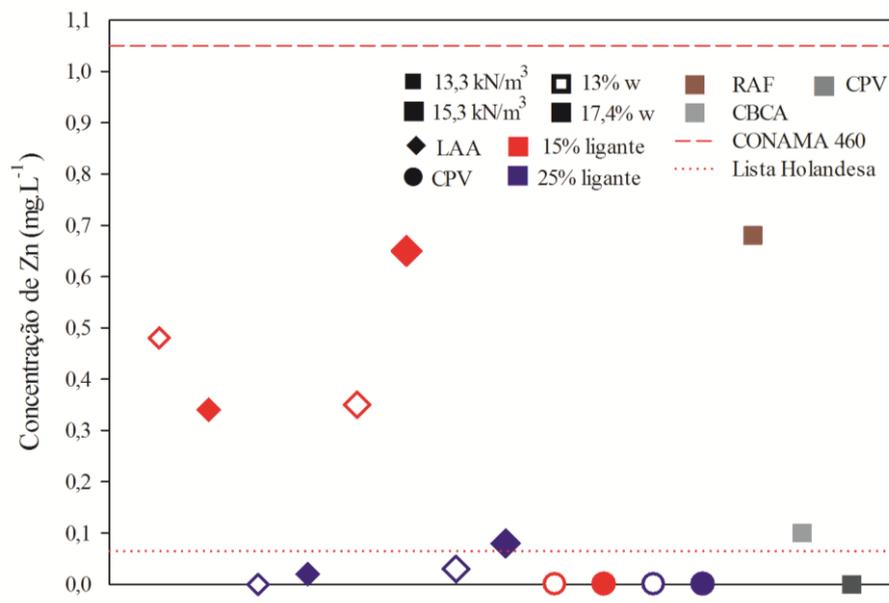


Figura 73 – Concentração de Zn nos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV.

Possivelmente um menor teor de Ca nas misturas e uma menor taxa de dissolução de minerais contendo Ca (da CCOH) tenham sido responsáveis pelos menores valores de pH dos extratos lixiviados das misturas RAF-LAA (Tabela 53). Portanto, o teor de Ca nas misturas RAF-LAA não foi capaz de neutralizar os prótons livres (H^+) da solução de ácido acético (solução extratora do ensaio de lixiviação). Já os extratos lixiviados de RAF-CPV apresentaram maiores valores de pH, principalmente os oriundos de misturas contendo 25% de CPV-ARI. Segundo diversos autores (MAHEDI; CETIN; DAYIOGLU, 2019, 2020), o acréscimo de cimento Portland em misturas solo-cimento reflete em rápida liberação de CaO e portlandita do agente cimentante, resultando no aumento das concentrações de Ca lixiviadas e, conseqüentemente elevação do pH do efluente (i.e. extrato lixiviado).

O peso específico aparente seco e o teor de umidade inicial parecem não serem fatores que exerceram grande influência na lixiviação de metais das misturas RAF-LAA, conforme Tabela 52. Diferenças notáveis são observadas nas concentrações de metais lixiviadas entre os distintos teores de LAA. Misturas contendo maior teor de ligante (25%) apresentaram menores concentrações de Alumínio (Al) e Zn, entretanto, houve maior lixiviação de Ba e Mn,

comparativamente as misturas contendo 15% de LAA, devido a maior presença de CBCA. Para RAF-CPV, misturas com 25% de cimento Portland lixiviaram maiores concentrações de Ba e Cr do que aquelas com 15%.

As concentrações de todos os metais nos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV são inferiores aos limites máximos de toxicidade da NBR 10004 e da EPA (USEPA, 2004). Assim, todas as misturas avaliadas correspondem a materiais que não apresentam toxicidade por metais (Tabela 52). Isto é uma verificação muito importante e salienta o encapsulamento promovido tanto pelas matrizes cimentadas com LAA, quanto com CPV.

Perante a CONAMA 460, os extratos lixiviados das misturas RAF-LAA apenas ultrapassaram o limite para Mn, enquanto que, algumas misturas de RAF-CPV não atenderam aos requisitos para Ba e Cr. Em relação a Lista Holandesa, todos lixiviados de RAF-LAA não atenderam os limites de Ba, e algumas delas (com 15% LAA) ultrapassaram os limites para Zn. Todos lixiviados de RAF-CPV ultrapassaram as concentrações de Ba e Cr estabelecidas pela Lista Holandesa. Por fim, todas as misturas de RAF-LAA e RAF-CPV atenderam aos limites de concentrações de metais para qualidade de água estabelecida pela EPA (USEPA, 2022).

Cabe destacar que as misturas RAF-LAA não apresentaram lixiviação do metal pesado chumbo (Pb), elemento químico presente no extrato lixiviado da CBCA, e em menor concentração no RAF. Isto demonstra que a matriz cimentada com LAA imobilizou Pb dos resíduos. Acredita-se que isso ocorreu em função da precipitação do Pb e posterior encapsulamento nas fases dos géis cimentantes. Materiais álcali-ativados são capazes de imobilizar metais pesados como Pb, os quais podem estar ligados a estrutura dos géis para equilíbrio de carga (PALACIOS; PALOMO, 2004; VU; GOWRIPALAN, 2018). Além disso, ambas misturas RAF-LAA e RAF-CPV (presente em RAF e CPV) foram capazes de encapsular cádmio (Cd) em suas matrizes cimentadas. Metais pesados como Cd podem ser imobilizados devido a formação de géis cimentantes do tipo C-S-H ou os formados em sistemas álcali-ativados (FENG *et al.*, 2020).

De forma geral, ambas misturas RAF-LAA e RAF-CPV apresentaram comportamento de lixiviação de metais satisfatório, não apresentando toxicidade, e atendendo parcialmente aos padrões de qualidade de águas da CONAMA 460 e da Lista Holandesa, e de forma integral a normativa da EPA (USEPA, 2022a).

Tabela 52 – Composição química dos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV com 7 dias (mg.L⁻¹).

Metal	RAF-LAA								RAF-CPV				Resíduos		Cimento	Normativas				
	13,2 kN.m ⁻³				15,2 kN.m ⁻³				15,2 kN.m ⁻³				RAF	CBCA	CPV	NBR 10004 Anexo F*	EPA*	CONAMA 460 ¹	Lista Holandesa ²	EPA ³
	15%		25%		15%		25%		15%		25%									
	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%								
Ag	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,004	0,014	0,002	0,01	0,01	0,002	0,000	0,028	5	5	0,05	-	-
Al	2,52	1,76	0,50	0,75	1,54	2,39	0,14	0,41	0,02	0,04	0,000	0,000	1,12	0,000	0,000	-	-	3,5	-	-
As	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1	5	0,01	0,01	0,01
Ba	0,59	0,61	0,61	0,67	0,53	0,39	0,64	0,66	0,34	0,38	0,82	0,85	0,26	0,08	1,07	70	100	0,7	0,05	2
Cd	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,002	0,5	1	0,005	0,0004	0,005
Cr total	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,03	0,04	0,06	0,06	0,006	0,000	0,86	5	5	0,05	0,001	0,1
Cu	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	2	0,015	1,3
Fe	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,04	0,000	0,000	-	-	2,45	-	-
Hg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,1	0,2	0,001	0,00005	0,002
Mn	4,11	3,98	5,34	5,18	4,05	3,93	4,91	5,25	0,000	0,000	0,000	0,000	0,65	4,93	0,000	-	-	0,4	-	-
Pb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,06	0,000	1	5	0,01	0,015	0,015
Se	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1	1	0,01	-	0,05
Zn	0,48	0,34	0,000	0,02	0,35	0,65	0,03	0,08	0,000	0,000	0,000	0,000	0,68	0,10	0,000	-	-	1,05	0,065	-

* Concentrações máximas de metais para característica de toxicidade; ¹Valores orientadores para água subterrânea; ²Valores referenciais para água subterrânea; ³Regulamentos nacionais de água potável.

Tabela 53 – Valores de pH dos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV com 7 dias.

Amostras	RAF-LAA								RAF-CPV			
	13,2 kN.m ⁻³				15,2 kN.m ⁻³				15,2 kN.m ⁻³			
	15%		25%		15%		25%		15%		25%	
	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%
pH	4,70	4,69	5,46	5,45	4,72	4,68	5,53	5,46	8,55	8,60	11,33	11,62

Resíduo de areia de fundição estabilizado com ligante álcali-ativado de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo: Desempenho mecânico, microestrutura, lixiviação e sustentabilidade

A Tabela 54 apresenta as concentrações de metais nos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV (15,2 kN.m⁻³, 17,4% w) a 28 dias, comparativamente as concentrações presentes nos resíduos e CPV, e com os limites estabelecidos por NBR 10004 (ABNT, 2004a), EPA (USEPA, 2004), CONAMA 460 (CONAMA, 2013), Lista Holandesa (VROM, 2000) e EPA (USEPA, 2022a).

Nota-se que as misturas RAF-LAA lixiviaram Ba em concentrações superiores as verificadas nos extratos lixiviados dos resíduos (RAF e CBCA) (Tabela 54). Nas misturas RAF-CPV, o Ba lixiviado é oriundo de RAF e CPV-ARI, visto que o Ba é incorporado nas fases do clínquer do cimento Portland (SATO, 2004; VOLLPRACHT; BRAMESHUBER, 2015). Ambientes altamente alcalinos condicionados pela presença de ativador alcalino/CCOH ou CPV, e também da solução extratora (ácido acético + solução de NaOH) resultaram em extratos lixiviados com valores de pH entre 9,1 a 12,3 (Tabela 54). Devido ao comportamento de lixiviação anfotérico do Ba, i.e. capacidade de reagir em meios ácidos ou básicos (KOMONWEERAKET *et al.*, 2015a; MAHEDI; CETIN; DAYIOGLU, 2020), as condições altamente alcalinas proporcionadas favoreceram a liberação de maiores concentrações do metal. Em geral, as concentrações de Ba lixiviadas estão acima dos limites de qualidade de águas, contudo, não representam toxicidade conforme NBR 10004 e EPA (USEPA, 2004).

Tabela 54 – Composição química e pH dos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV a 28 dias (mg.L⁻¹).

Metal	RAF-LAA		RAF-CPV		Resíduos		Cimento	Normativas				
	15%	25%	15%	25%	RAF	CBCA	CPV	NBR 10004 – Anexo F*	EPA*	CONAMA 460 ¹	Lista Holandesa ²	EPA ³
Ag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,002	0,00	0,028	5	5	0,05	-	-
Al	0,00	0,00	0,00	0,00	1,12	0,00	0,00	-	-	3,5	-	-
As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1	5	0,01	0,01	0,01
Ba	2,56	2,51	2,47	2,85	0,26	0,08	1,07	70	100	0,7	0,05	2
Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,006	0,00	0,002	0,5	1	0,005	0,0004	0,005
Cr total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,006	0,00	0,86	5	5	0,05	0,001	0,1
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	2	0,015	1,3
Fe	0,36	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	-	-	2,45	-	-
Hg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,1	0,2	0,001	0,00005	0,002
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	4,93	0,00	-	-	0,4	-	-
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,001	0,06	0,00	1	5	0,01	0,015	0,015
Se	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1	1	0,01	-	0,05
Zn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,68	0,10	0,00	-	-	1,05	0,065	-
pH	9,14	10,91	12,04	12,34								

*Concentrações máximas de metais para característica de toxicidade; ¹Valores orientadores para água subterrânea; ²Valores referenciais para água subterrânea; ³Regulamentos nacionais de água potável.

As misturas RAF-LAA não apresentaram lixiviação de Cd, Cr e Pb, elementos presentes nos extratos lixiviados de RAF e CBCA, demonstrando que a matriz cimentada com o cimento

alternativo (LAA) encapsulou os metais pesados dos resíduos (Tabela 54). Tal comportamento foi observado anteriormente nas misturas RAF-LAA curadas a 7 dias, i.e, o encapsulamento de Cd, Cr e Pb ocorreu no início da formação de géis cimentantes. Ainda, Mn e Zn presentes nos extratos lixiviados de RAF-LAA e Cr nos de RAF-CPV, curadas a 7 dias (Tabela 52), não sofreram lixiviação nas misturas a 28 dias (Tabela 54), indicando que Mn, Zn (em RAF-LAA) e Cr (em RAF-CPV) foram encapsulados pelos géis formados nas matrizes ao longo do tempo.

4.5.2 Lixiviação de metais em equipamento de coluna - ASTM D4874

A Tabela 55 apresenta as concentrações de metais nos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV (15,2 kN.m⁻³ γ_d , 17,4% w , 7 dias) oriundos do ensaio de lixiviação em equipamento de coluna, comparativamente aos limites máximos estabelecidos pelas normativas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), Lista Holandesa (VROM, 2000) e EPA (USEPA, 2022a).

Em RAF-LAA é notório uma maior lixiviação de Al na mistura com maior teor de LAA (25%), comparativamente aquela com 15% (Tabela 55), bem como há um aumento da concentração de Al de 1 V_v para 5 V_v . As condições altamente alcalinas nas misturas RAF-LAA (sugeridas pelos valores de pH, Tabela 56) favoreceram a dissolução de Al, visto que este processo inicia em pH superior a 8. Além disso, acredita-se que os géis cimentantes formados aos 7 dias não foram capazes de reter Al nas matrizes de RAF-LAA. Ainda em RAF-LAA, 25% de LAA resultou em maior concentração de Ba lixiviada, em relação a mistura com 15%. Enquanto que RAF-CPV, a lixiviação de Ba foi menor na mistura contendo 25%. Em ambos sistemas (RAF-LAA e RAF-CPV), a lixiviação de Ba reduziu com o aumento de volume de vazios coletados (1 V_v para 5 V_v), sugerindo que a concentração de Ba dissolvida no meio extrator diminuiu com o passar do tempo. Possivelmente o Ba pode ter precipitado na forma de sulfato de bário, sendo fixado nas matrizes cimentadas ao longo do tempo.

Nas misturas RAF-LAA, as concentrações de Al não cumpriram o limite de qualidade de águas da CONAMA 460 e as concentrações de Ba excederam os valores recomendados pelas três normativas (CONAMA 460, Lista Holandesa e EPA). Ainda, uma mistura RAF-LAA não atendeu ao requisito de Zn da CONAMA 460 e Lista Holandesa. Os resultados de lixiviação de RAF-CPV com 15% CPV não atendeu ao limite de Ba da CONAMA 460 e Lista Holandesa, entretanto, a mistura com 25% CPV atendeu a CONAMA 460 e EPA. As concentrações de metais lixiviadas de RAF-CPV cumpriram integralmente os requisitos da EPA.

Tabela 55 – Composição química dos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV provenientes de ensaio em equipamento de coluna (mg.L⁻¹).

Metal	RAF-LAA						RAF-CPV						Normativas		
	15%			25%			15%			25%			CONAMA	Lista	EPA ³
	1 V _p	5 V _p	Média	1 V _p	5 V _p	Média	1 V _p	5 V _p	Média	1 V _p	5 V _p	Média	460 ¹	Holandesa ²	
Ag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
Al	2,92	51,17	27,04	491,67	554,18	522,92	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,16	3,5	-	-
As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Ba	5,12	1,48	3,30	7,08	3,32	5,20	1,06	0,91	0,98	1,07	0,18	0,62	0,7	0,05	2
Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,005	0,0004	0,005
Cr total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,001	0,1
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2	0,015	1,3
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,45	-	-
Hg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,001	0,00005	0,002
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,4	-	-
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,015	0,015
Se	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	-	0,05
Zn	0,00	0,00	0,00	2,92	0,00	1,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,05	0,065	-

¹Valores orientadores para água subterrânea; ²Valores referenciais para água subterrânea; ³Regulamentos nacionais de água potável.

Tabela 56 – Valores de pH dos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV provenientes de ensaio em equipamento de coluna.

Amostras	RAF-LAA				RAF-CPV			
	15%		25%		15%		25%	
Nº vazios	1 Vv	5 Vv	1 Vv	5 Vv	1 Vv	5 Vv	1 Vv	5 Vv
pH	13,29	12,86	13,29	12,77	12,83	12,69	12,45	12,39

4.5.3 Comparativo entre os métodos NBR 10005 e ASTM D4874

A Tabela 57 apresenta as concentrações de metais nos extratos lixiviados de misturas RAF-LAA e RAF-CPV, com os mesmos fatores e condições de moldagem (15 e 25% ligante, 17,4% w, 15,2 kN.m⁻³ γ_d e 7 dias de cura), oriundos de distintos métodos de lixiviação: batelada (NBR 10005) e em equipamento de coluna (D4874). As concentrações de metais foram comparadas com os limites máximos estabelecidos pelas normativas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), Lista Holandesa (VROM, 2000) e EPA (USEPA, 2022a).

Tabela 57 – Comparativo da composição química dos extratos lixiviados de RAF-LAA e RAF-CPV proveniente de distintos métodos de ensaio de lixiviação (mg.L⁻¹).

Ensaio	NBR 10005 (ABNT, 2004b)				D4874 (ASTM, 2014)				Normativas		
	RAF-LAA		RAF-CPV		RAF-LAA		RAF-CPV		CONAMA 460 ¹	Lista Holandesa ²	EPA ³
	15%	25%	15%	25%	15%	25%	15%	25%			
Ag	0,00	0,004	0,002	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
Al	2,39	0,41	0,04	0,00	27,04	522,92	0,00	0,16	3,5	-	-
As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Ba	0,39	0,66	0,38	0,85	3,30	5,20	0,98	0,62	0,7	0,05	2
Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,005	0,0004	0,005
Cr total	0,00	0,00	0,04	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,001	0,1
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2	0,015	1,3
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,45	-	-
Hg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,001	0,00005	0,002
Mn	3,93	5,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,4	-	-
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,015	0,015
Se	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	-	0,05
Zn	0,65	0,08	0,00	0,00	0,00	1,46	0,00	0,00	1,05	0,065	-

¹Valores orientadores para água subterrânea; ²Valores referenciais para água subterrânea; ³Regulamentos nacionais de água potável.

Nas misturas RAF-LAA, nota-se que maiores concentrações de Al e Ba foram lixiviadas pelo método de ensaio em equipamento de coluna (método 2), comparativamente ao ensaio de batelada da NBR 10005 (método 1). Diferentemente do método 2, os extratos do ensaio de batelada (NBR 10005) apresentaram lixiviação de Mn. Em geral, as concentrações de Ba lixiviadas de RAF-CPV pelo ensaio em equipamento de coluna (método 2) foram superiores ao do método de batelada. Enquanto que, a lixiviação de Cr foi observada somente nos extratos oriundos do método 1.

As diferenças supracitadas possivelmente ocorreram função das soluções extratoras utilizadas e a forma de exposição das misturas. No método 1, o corpo de prova é segregado em pedaços

inferiores a 9,5mm, posteriormente imersos em uma solução ácida, sob agitação por 18h. Neste método, a solução extratora reduz o pH do meio, diminuindo a dissolução de metais que reagem em condições alcalinas (e.g. Al e Ba). Já no método 2, água destilada é percolada em fluxo ascendente, o que condiciona um meio altamente alcalino durante um maior período de tempo, favorecendo a dissolução de metais que reagem em meios alcalinos (e.g. Al e Ba) e reduzindo a concentração de metais que têm comportamento de lixiviação catiônico (e.g. Mn). Ainda, no método da NBR 10005 (método 1), o volume de solução extratora (solução ácida) em que ocorre a transferência de metais é mantido constante ao longo do ensaio. Enquanto que, no método da D4874 (método 2), o volume do lixiviado é variável no decorrer do ensaio (renovação da entrada de água destilada), o que pode evitar a saturação de metais no meio aquoso e conseqüentemente reduzir a precipitação de metais na superfície do material.

Cabe lembrar que metais como Cr e Zn apresentam comportamento anfotérico, ou seja, são capazes de reagir em condições ácidas ou alcalinas, as quais podem ser condicionadas pelo método de lixiviação 1 ou 2. Ainda, o Cr pode ser retido no gel C-S-H de misturas RAF-CPV, resultando na redução das concentrações do metal nos extratos lixiviados. Contudo, pode ocorrer o aumento da lixiviação de Cr de materiais cimentados quando estão em tamanho de partículas menores devido ao aumento da área superficial específica (ECKBO; OKKENHAUG; HALE, 2022), como foi observado nas misturas RAF-CPV pelo método da NBR 10005.

Pelo ensaio de batelada da NBR 10005 (método 1), os resultados de lixiviação das misturas RAF-LAA e RAF-CPV não atenderam a todos os limites estabelecidos pela CONAMA 460 e Lista Holandesa, mas cumpriram integralmente os requisitos de qualidade de águas da EPA (Tabela 57). Pelo método de ensaio em equipamento de coluna (método 2), os lixiviados das misturas RAF-LAA não atenderam a todos valores limites de qualidade de águas das três normativas. Já os extratos lixiviados de RAF-CPV excederam alguns limites da CONAMA 460 e da Lista Holandesa, porém, estão de acordo com os requisitos da EPA (USEPA, 2022a).

De forma geral, os resultados de lixiviação de metais pelo método da NBR 10005 são mais favoráveis por estarem mais próximos do cumprimento de requisitos de qualidade de águas. Além disso, o ensaio de lixiviação descrito pela NBR 10005 é um método experimental que forneceu resultados rápidos para verificar se as concentrações de metais lixiviadas representam toxicidade, enquanto que o ensaio de lixiviação em coluna não apresenta esta resposta. Palacios e Palomo (2004) fazem essa mesma observação para resultados de lixiviação de cinzas volantes álcali-ativadas fornecidos pelo método TCLP, o qual é muito similar ao da normativa brasileira.

4.5.4 Solubilização de metais - NBR 10006

A Tabela 58 apresenta as concentrações de metais nos extratos solubilizados de misturas RAF-LAA e RAF-CPV com 7 dias de cura, e distintos pesos específicos, teores de ligante e teores de umidade inicial. Estas concentrações foram comparadas com aquelas presentes nos resíduos *in natura* e no CPV, e os limites máximos estabelecidos pelas normativas NBR 10004 (anexo G - limites para extrato solubilizado) (ABNT, 2004a), CONAMA 460 (CONAMA, 2013), Lista Holandesa (VROM, 2000) e EPA (USEPA, 2022a).

Alumínio (Al) excedeu o limite para extrato solubilizado em água do anexo G da NBR 10004 em todas as misturas RAF-LAA e RAF-CPV (Figura 74). A solubilidade de Al em água é dependente do pH, ocorrendo abaixo de pH 5 e acima de pH 8, intensificando na faixa $4 > \text{pH} > 9$ (MITCHELL; SOGA, 2005), o que é corroborado pelos valores de pH acima de 12 em todos os extratos solubilizados (Tabela 59). Contudo, Al na presença de Si podem formar fases sólidas complexas, reduzindo a concentração de Al solúvel (KVECH; EDWARDS, 2002). Por fim, todas as concentrações de Al solubilizadas das misturas atendem ao requisito da CONAMA 460, única norma de qualidade de águas que estabelece valor limite para este metal.

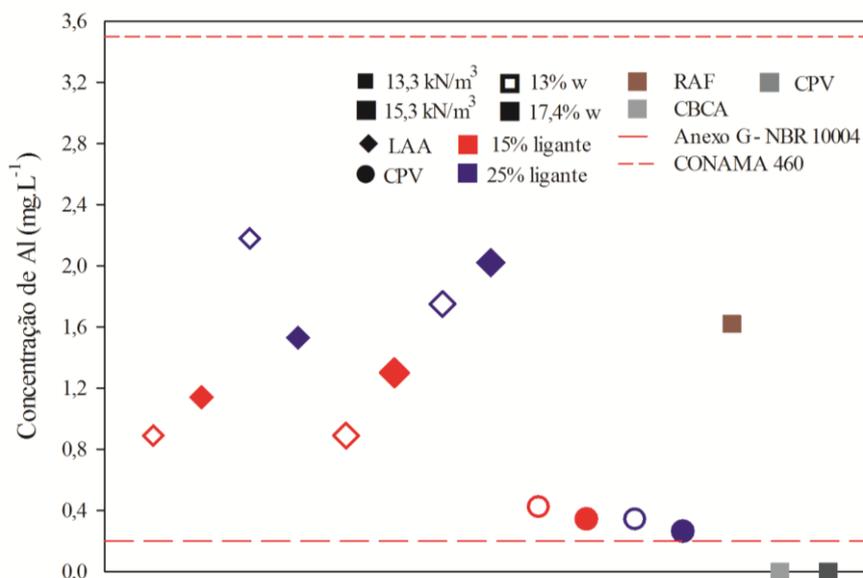


Figura 74 – Concentração de Al nos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV.

Bário (Ba) foi solubilizado em baixas concentrações das misturas RAF-LAA, estando abaixo dos limites das três normativas (anexo G – NBR 10004, CONAMA 460, Lista Holandesa e

EPA) (Figura 75). É notável a solubilização de Ba de todas misturas de RAF-CPV. Óxido de bário pode ter reagido com moléculas de água ($\text{BaO}+9\text{H}_2\text{O}$), formando hidróxido de bário ($\text{Ba}(\text{OH})_2$), que é um sal solúvel em água (ROPP, 2013). As concentrações de Ba excederam o limite para extrato solubilizado em água do anexo G da NBR 10004 nas misturas RAF-CPV. O Ba solubilizado de RAF-CPV também excedeu os limites estabelecidos por CONAMA 460 (igual a NBR 10004) e Lista Holandesa, porém, as concentrações cumpriram o limite de qualidade de água da EPA (USEPA, 2022a).

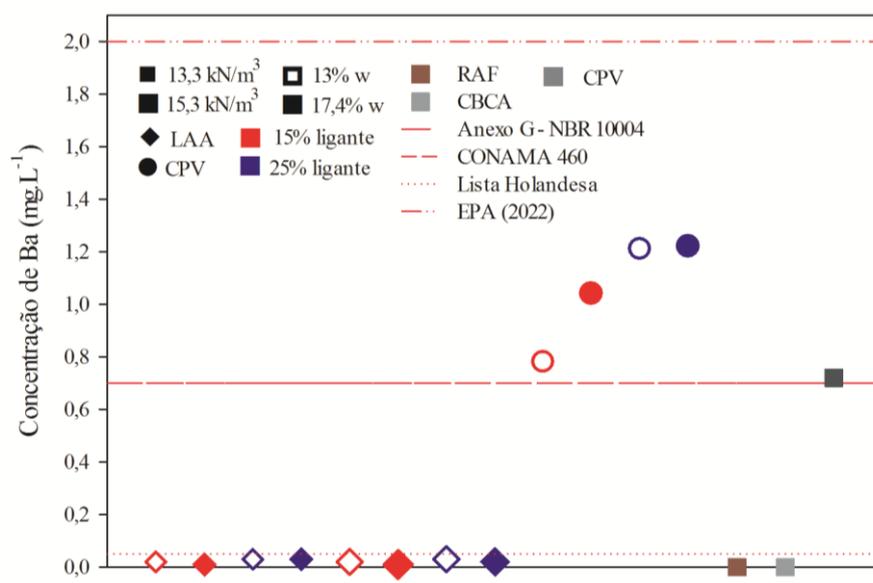


Figura 75 – Concentração de Ba nos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV.

Ferro (Fe) excedeu o limite para extrato solubilizado em água do anexo G da NBR 10004 para o CPV, porém, este metal foi encapsulado nas matrizes cimentantes de RAF-CPV (Tabela 58). Em meios altamente alcalinos, o íon ferroso (Fe^{2+}) tende a oxidar a íon férrico (Fe^{3+}), sendo Fe^{3+} muito menos solúvel que Fe^{2+} (STEFANONI *et al.*, 2018). Além disso, a formação de géis cimentantes contribuíram para a redução da solubilidade de Fe, pois o gel C-S-H é capaz de incorporar Fe^{2+} na camada intermediária ou superfície da sua estrutura (PEYS *et al.*, 2022). Isto tende a reduzir a concentração de Fe solúvel em água, ou seja, minimiza a concentração de do metal nos extratos solubilizados de RAF-CPV.

Apesar do Cromo hexavalente – Cr(VI) ser uma espécie solúvel em água, não foram observadas concentrações que excederam o limite para extrato solubilizado de Cr (cromo total) das misturas RAF-CPV, o que o pode ser explicado em função dos elevados valores de pH verificados nos

extratos solubilizados: $12,55 < \text{pH} > 12,66$ (Tabela 59). Em meios alcalinos ($\text{pH} > 8,8$), ocorre uma maior redução de Cr(VI) a cromo trivalente – Cr(III), e conseqüente precipitação de $\text{Cr}(\text{OH})_3$ (HALIM *et al.*, 2004). Ainda, na presença de cimento Portland, fases de gel C-S-H podem atuar na redução da solubilidade de Cr através da substituição de silicato por CrO_4^{2-} em sua estrutura (MULUGETA *et al.*, 2011).

Devido as misturas avaliadas apresentarem sódio (Na) nas suas composições químicas, bem como do Na ser solúvel em água (família 1A da tabela periódica – metais alcalinos solúveis em água), era esperado que os extratos solubilizados apresentassem expressivas concentrações do elemento (Tabela 58). Contudo, estas concentrações são inferiores ao limite máximo para extrato solubilizado do anexo G da NBR 10004, além de que o Na não é um elemento químico avaliado pelas normativas de qualidade de águas.

Cd não foi verificado nos extratos solubilizados das misturas RAF-LAA e RAF-CPV, contrariamente ao identificado nos extratos de RAF e de CPV, indicando que as matrizes cimentadas foram capazes de encapsular este metal pesado. A diluição de Cd nos meios aquosos foi evitada provavelmente devido a capacidade de géis (de cimentos alcalinos ou cimento Portland) em imobilizar este metal (FENG *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020b). Tal resultado corrobora o observado por Deja (2002), em que pastas álcali-ativadas a base de escória apresentaram concentrações muito baixas de Cd em água. Cd^{2+} pode ser imobilizado por meio da incorporação física do íon no gel C-S-H ou por adsorção (WANG *et al.*, 2020b).

Os fatores peso específico aparente seco e teor de umidade inicial parecem não exercerem expressiva influência nas concentrações de metais dos extratos solubilizados das misturas RAF-LAA, conforme Tabela 58. Nota-se maior teor de LAA favoreceu maiores concentrações de Al nos extratos solubilizados de RAF-LAA, enquanto que, RAF-CPV com 25% de cimento Portland apresentaram maiores concentrações de Ba em relação a 15%.

As concentrações de metais dos extratos solubilizados de RAF-LAA atenderam aos limites estabelecidos pelas três normativas de qualidade de águas (CONAMA 460, Lista Holandesa e EPA). Os extratos solubilizados de RAF-CPV não cumpriram todos os limites de qualidade de água da CONAMA 460 e Lista Holandesa, mas de forma integral, atenderam os requisitos da EPA (USEPA, 2022a).

Tabela 58 – Composição química dos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV a 7 dias (mg.L⁻¹).

Metal	RAF-LAA								RAF-CPV				Resíduos		Cimento	Normativas			
	13,2 kN.m ⁻³				15,2 kN.m ⁻³				15,2 kN.m ⁻³				RAF	CBCA	CPV	NBR 10004 Anexo G	CONAMA 460 ¹	Lista Holandesa ²	EPA ³
	15%		25%		15%		25%		15%		25%								
	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%							
Ag	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,004	0,000	0,000	0,003	0,000	0,013	0,05	0,05	-	-
Al	0,89	1,04	2,18	1,53	0,89	1,30	1,75	2,02	0,42	0,34	0,34	0,26	0,000	0,000	0,000	0,2	3,5	-	-
As	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,01	0,01	0,01	0,01
Ba	0,02	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02	0,78	1,04	1,21	1,22	0,000	0,000	0,72	0,7	0,7	0,05	2
Cd	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,001	0,005	0,005	0,0004	0,005
Cr total	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,19	0,05	0,05	0,001	0,1
Cu	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	0,015	1,3
Fe	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,25	0,3	2,45	-	-
Hg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,00005	0,002
Mn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,09	0,68	0,000	0,1	0,4	-	-
Na	69,8	68,4	113,6	104,5	73,4	68,4	108,1	111,9	11,5	12,5	19,0	16,3	42,9	1,79	255	200	-	-	-
Pb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,04	0,000	0,01	0,01	0,015	0,015
Se	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,01	0,01	-	0,05
Zn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5	1,05	0,065	-

¹Valores orientadores para água subterrânea; ²Valores referenciais para água subterrânea; ³Regulamentos nacionais de água potável.

Tabela 59 – Valores de pH dos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV com 7 dias.

Amostras	RAF-LAA								RAF-CPV			
	13,2 kN.m ⁻³				15,2 kN.m ⁻³				15,2 kN.m ⁻³			
	15%		25%		15%		25%		15%		25%	
	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%	13%	17,4%
pH	12,56	12,56	12,78	12,74	12,50	12,54	12,74	12,74	12,55	12,55	12,66	12,62

A Tabela 60 apresenta as concentrações de metais nos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV (15,2 kN.m⁻³, 17,4% w) a 28 dias, comparativamente as concentrações presentes nos resíduos e CPV, e aos limites da NBR 10004 (ABNT, 2004a), EPA (USEPA, 2004), CONAMA 460 (CONAMA, 2013), Lista Holandesa (VROM, 2000) e EPA (USEPA, 2022a).

Tabela 60 – Composição química e pH dos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV a 28 dias (mg.L⁻¹).

Metal	RAF-LAA		RAF-CPV		Resíduos		Cimento	Normativas			
	15%	25%	15%	25%	RAF	CBCA	CPV	NBR 10004 – Anexo G	CONAMA 460 ¹	Lista Holandesa ²	EPA ³
Ag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,003	0,00	0,013	0,05	0,05	-	-
Al	4,67	3,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,2	3,5	-	-
As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Ba	0,82	1,13	0,90	0,82	0,00	0,00	0,72	0,7	0,7	0,05	2
Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,002	0,00	0,001	0,005	0,005	0,0004	0,005
Cr total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,001	0,00	0,19	0,05	0,05	0,001	0,1
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2	2	0,015	1,3
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,25	0,3	2,45	-	-
Hg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,001	0,001	0,00005	0,002
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,68	0,00	0,1	0,4	-	-
Na	56,04	98,40	17,64	20,46	42,9	1,79	255	200	-	-	-
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,01	0,015	0,015
Se	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	-	0,05
Zn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5	1,05	0,065	-
pH	12,36	12,67	12,69	12,66							

¹Valores orientadores para água subterrânea; ²Valores referenciais para água subterrânea; ³Regulamentos nacionais de água potável.

Na Tabela 60 observa-se que Al excedeu o limite para extrato solubilizado em água de RAF-LAA, e de Ba das misturas RAF-LAA e RAF-CPV. Isto foi favorecido pelas condições altamente alcalinas condicionadas nas misturas, contudo, as concentrações de metais em meio aquoso podem ser reduzidas pelo seu encapsulamento nas matrizes. De 7 para 28 dias, nota-se que nas misturas RAF-LAA houve um incremento das concentrações de Al e Ba nos extratos solubilizados, enquanto que, as concentrações solubilizadas de Al e Ba diminuíram nos extratos de RAF-CPV (Figura 76). Acredita-se que o meio altamente alcalino condicionado nas misturas RAF-LAA (Tabela 60) continuaram a favorecer a solubilização de Al e Ba ao longo dos 28 dias, os quais não foram eficientemente fixados nas matrizes cimentadas. Em RAF-CPV a 28 dias, os produtos reacionais formados foram capazes de reter Al nas matrizes. Ainda, no início da hidratação do cimento Portland há uma maior liberação de metais devido a velocidade superior das reações de dissolução, comparativamente a cristalização de fases minerais como gesso e etringita. No caso do Ba, aos 28 dias pode ter ocorrido a precipitação deste metal na

forma de sulfato de bário e sua fixação na matriz cimentada, como relatado em outros estudos com cimentos Portland (UTTON *et al.*, 2011; VOLLPRACHT; BRAMESHUBER, 2015).

Ainda na Tabela 60, as concentrações de Fe do CPV, e Mn e Pb da CBCA excederam os limites para extrato solubilizado do anexo G - NBR 10004 do CPV, porém, não foram constatadas nos extratos solubilizados das misturas RAF-LAA a 28 dias. Isto indica que as matrizes de RAF com LAA/CPV foram capazes de encapsular estes metais. Este comportamento também foi identificado nas misturas RAF-LAA a 7 dias, sugerindo que os géis cimentantes formados no período de cura inicial foram suficientes para o encapsulamento de Fe ou Mn e Pb.

As misturas RAF-LAA a 28 dias apresentaram concentrações de Al acima do limite para extrato solubilizado do anexo G da NBR 10004 e pela CONAMA 460 para qualidade de águas. Foram observadas concentrações de Ba superiores aos limites da NBR 10004 – anexo G, CONAMA 460 e Lista Holandesa. Nas misturas de RAF-CPV, Ba está em concentrações superiores as normativas mais restritivas de qualidade de água (CONAMA 460 e Lista Holandesa). Todos extratos solubilizados das misturas RAF-LAA e RAF-CPV (28 dias) atenderam as concentrações limites de metais para qualidade de águas da norma USEPA (2022) (Tabela 60).

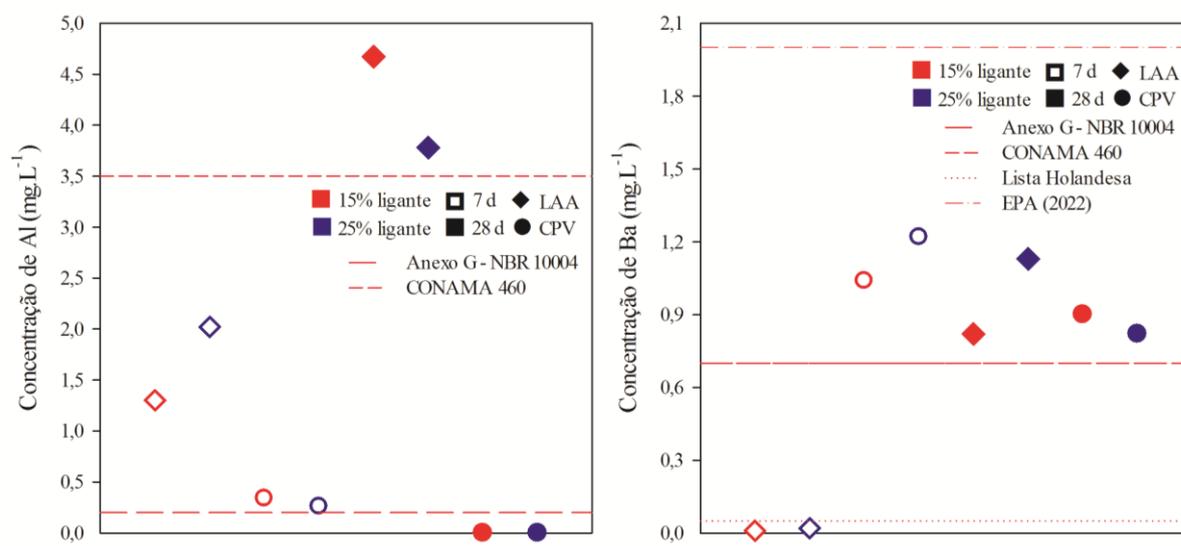


Figura 76 – Concentrações de Al e Ba nos extratos solubilizados de RAF-LAA e RAF-CPV em 7 e 28 dias.

Além do comportamento mecânico satisfatório, verificou-se que RAF estabilizado com LAA não apresenta toxicidade por metais. Contudo, ainda é necessário investigar a sustentabilidade da estabilização de RAF com este ligante alternativo ao cimento Portland.

4.6 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA

Para uma melhor compreensão dos resultados de impactos ambientais, atribuiu-se o valor 1 à dosagem com maior impacto ambiental em uma determinada categoria e valores proporcionais aos menores impactos. Na Figura 77 estão expostos os impactos ambientais das diferentes estratégias de estabilização de RAF. A dosagem LAA-BDAL apresentou os maiores impactos em todas as categorias, com exceção da “ecotoxicidade terrestre”, a qual teve o maior impacto oriundo da dosagem CPV-ADBL. Resultados similares foram observados por Zahmak *et al.* (2021) na AACV de ligantes álcali-ativados (a base de cinzas volantes e escória de alto forno) e cimento Portland. Três entre os quatro ligantes álcali-ativados causaram os maiores impactos nas dez categorias avaliadas devido principalmente aos ativadores alcalinos. Fontes de energia sustentável para produção de ativadores alcalinos, menores dosagens de ativador, e fontes de ativador alcalino sustentáveis são estratégias importantes para aumentar o desempenho ambiental da aplicação destes ligantes no melhoramento de solos (ZAHMAK *et al.*, 2021).

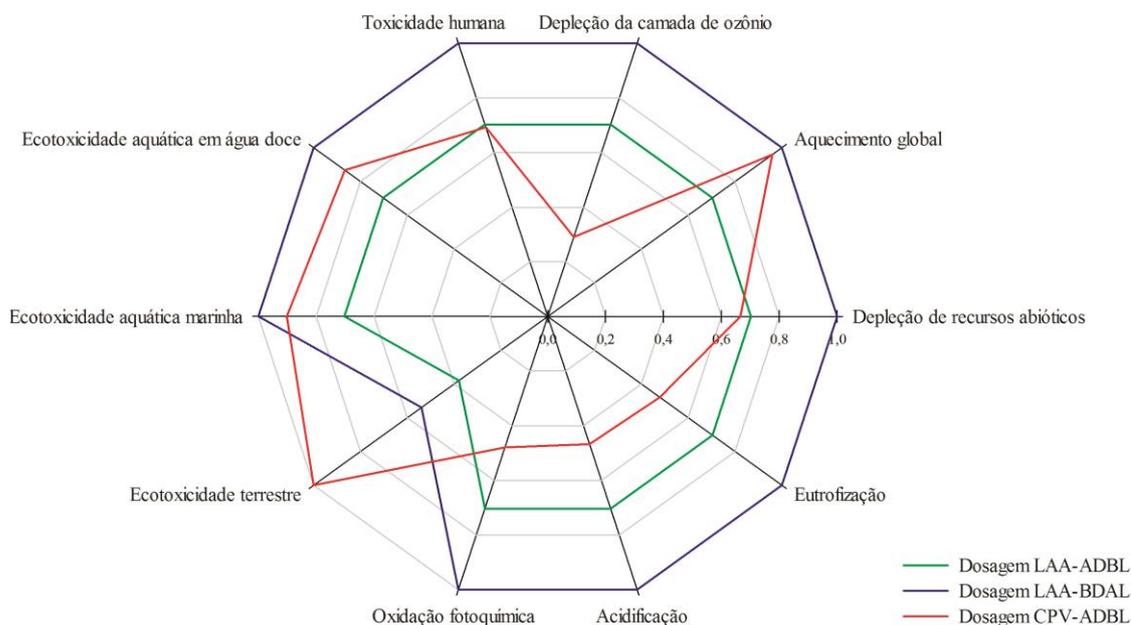


Figura 77 – Impactos ambientais das estratégias de estabilização de RAF com distintos ligantes e dosagens.

A “ecotoxicidade terrestre” reflete o impacto da liberação de substâncias (e.g. metais pesados, hidrocarbonetos) que causam danos a fauna e flora. Já o “aquecimento global” compreende o impacto na temperatura terrestre e nas mudanças climáticas resultantes de emissões de GEE. O

maior impacto da dosagem CPV-ADBL na “ecotoxicidade terrestre” (dentre as três dosagens) e o maior impacto sob “aquecimento global” (comparativamente a LAA-ADBL) ocorreram devido as emissões de poluentes da produção do cimento Portland. A cadeia produtiva do cimento tradicional é responsável por emissões de CO₂, NO_x (óxido de nitrogênio), SO₂ (dióxido de enxofre) e material particulado, oriundas da produção de clínquer e consumo de combustíveis (fonte de energia e transporte) (IGE *et al.*, 2022), correspondendo a 7-8% da emissão global de GEE (MILLER; MYERS, 2020). A queima de combustíveis na produção do cimento Portland também causa impactos ambientais pela liberação de metais pesados como Pb, Cr, Cd, Cu e Zn (no pó do cimento e na fumaça de chaminés), que são depositados no solo pela ação do vento (HUNTZINGER; EATMON, 2009; OGUNKUNLE; FATOBA, 2014).

A “depleção da camada de ozônio” corresponde ao impacto de substâncias capazes de danificar a ozonfera. As dosagens com LAA causaram os maiores impactos à “depleção da camada de ozônio” principalmente em função do processo produtivo do NaOH. Subproduto da produção de NaOH pelo método de célula em membrana (ZAHMAK *et al.*, 2021), cloro gasoso (Cl₂) é capaz de destruir moléculas de ozônio na estratosfera (1 molécula de Cl para 100.000 moléculas de O₃) (USEPA, 2023). Em LAA-ADBL e LAA-BDAL, a produção de cal e o consumo de diesel foram os principais responsáveis pelos impactos em “aquecimento global” e “depleção da camada de ozônio”. A produção de cal contribuiu para os impactos na “depleção da camada de ozônio” devido a calcinação das cascas de ovos (ARAÚJO *et al.*, 2021b). O processo de calcinação (CaCO₃ em CaO) emite CO₂: 0,78 kg CO₂/kg CaO (LAVEGLIA *et al.*, 2022). Já a exaustão de motores a diesel gera emissões de CO₂ e NO_x (ZIÓŁKOWSKI *et al.*, 2022).

A “toxicidade humana” reflete os danos à saúde causados por compostos químicos liberados no meio ambiente, considerando a toxicidade destes produtos e suas concentrações (HERTWICH *et al.*, 2001). A toxicidade a organismos humanos foi impactada principalmente pela dosagem LAA-BDAL, enquanto que, as dosagens LAA-ADBL e CPV-ADBL resultaram em impactos semelhantes. Toxicidade do NaOH, bem como produção e transporte de NaOH, cal e cimento Portland, e transporte da CBCA foram os fatores que contribuíram para os impactos nesta categoria. A toxicidade humana pela exposição ao NaOH está associada ao potencial corrosivo aos tecidos do corpo e irritação nos olhos e no sistema respiratório por inalação de vapores concentrados da substância (NATIONAL RESEARCH COUNCIL COMMITTEE ON TOXICOLOGY, 1984). Já o uso de combustíveis fósseis libera poluentes tóxicos para a saúde humana, como os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (YILMAZ *et*

al., 2022) e material particulado (ZHANG *et al.*, 2022). A exposição a emissões oriundas da queima de diesel pode causar doenças respiratórias, cardíacas e pulmonares (USEPA, 2022b).

As categorias “ecotoxicidade aquática em água doce” e “ecotoxicidade aquática marinha” refletem os impactos nos ecossistemas aquáticos em água doce e do mar, respectivamente, causados por substâncias químicas. Estas duas categorias foram mais impactadas pela dosagem LAA-BDAL, seguida pela dosagem CPV-ADBL. Segundo Komkova e Habert (2023), os impactos nas categorias de ecotoxicidade aquática são decorrentes da liberação de substâncias químicas de processos como produção de energia (e.g. Cu, Ni, Be e V na água). Os processos de produção de cimento Portland e NaOH são atividades de intenso consumo energético: 3,5 GJ/ton de clínquer (IEA; WBCSD, 2018) e $2,18 \times 10^3$ kWh/t NaOH (HONG *et al.*, 2014). No LAA, ainda tem-se a contribuição da produção de cal, onde a calcinação corresponde ao processo de maior consumo de energia: 3,9 MJ/kg CaO (LAVEGLIA *et al.*, 2022).

A “oxidação fotoquímica” corresponde aos danos à saúde humana e ecossistemas causados por reações de NO_x e compostos orgânicos voláteis na presença de radiação ultravioleta. Já a “acidificação” reflete o impacto nos ecossistemas terrestres decorrentes direta ou indiretamente de chuva ácida, nitrogênio combinado e deposição de enxofre, sendo oriundos de fontes como a queima de combustíveis (ZAHMAK *et al.*, 2021). Por sua vez, a “eutrofização” compreende o impacto causado ao meio ambiente pelo excesso de macro nutrientes (e.g. fósforo e nitrogênio). Os maiores impactos das dosagens com LAA em “oxidação fotoquímica”, “acidificação” e “eutrofização” ocorreram em função do NO_x, que é liberado durante a produção de NaOH (ZAHMAK *et al.*, 2021). O NO_x é um poluente atmosférico que contribui para a formação de “smog” fotoquímico (DURKEE, 2008). Os impactos nas três categorias supracitadas também estão associados a queima de combustíveis fósseis (e.g. diesel), que contribui para a maior ocorrência de chuva ácida e poluição fotoquímica (DURKEE, 2008).

A “depleção de recursos abióticos (kg Sb-eq)” corresponde ao impacto de atividades no esgotamento de recursos não-fósseis (e.g. minerais). Os ativadores alcalinos são os principais responsáveis pelo impacto da produção de geopolímeros na categoria supracitada (OUELLET-PLAMONDON; HABERT, 2015). O maior impacto em “depleção de recursos abióticos não-fósseis” resultante da LAA-BDAL ocorreu em função da maior quantidade de NaOH nesta dosagem. O NaOH é produzido pela hidrólise de uma solução de cloreto de sódio, o qual é obtido por extração de água marinha (processo de evaporação) ou é encontrado na forma de

cristais minerais em minas de sal (1,72 ton sal/1 ton NaOH) (HONG *et al.*, 2014). Já a produção de 1 kg de cimento Portland demanda a extração de 1,5 ton de matérias-primas (STAFFORD *et al.*, 2016), como calcário, argila, areia, minério de ferro e gesso.

A Figura 78 expõe a contribuição de cada processo das distintas dosagens nas categorias de impactos ambientais. É notório que o processo de construção apresenta pouca contribuição nas categorias de impactos ambientais: 0,5-1,0% (LAA-ADBL), 0,4-0,7% (LAA-BDAL) e 0,3-1,7% (CPV-ADBL). O transporte de materiais foi o segundo processo que mais contribuiu para os impactos ambientais: 31,9-61,6% (LAA-ADBL); 25,5-49,2% (LAA-BDAL) e 9,3-59,3% (CPV-ADBL). Produção de matérias-primas foi o processo que mais influenciou nas categorias de impactos ambientais: 37,4%-67,5% (LAA-ADBL), 50,1-74,2% (LAA-BDAL) e 39-90,4% (CPV-ADBL). A grande contribuição do consumo de matérias-primas nos impactos ambientais das dosagens com LAA ocorreu devido a produção de NaOH e de cal, e na dosagem CPV-ADBL está relacionado ao processo produtivo do cimento Portland.

A Figura 79 apresenta a análise de sensibilidade compreendendo o impacto das distintas distâncias de transporte de CBCA nas categorias “acidificação” e “eutrofização”, escolhidas por serem as mais impactadas pelo transporte de materiais nas dosagens com LAA (Figura 78). Em ambas categorias, nota-se uma minimização progressiva dos impactos conforme reduz-se a distância de transporte da CBCA. De 550 km para 30 km de distância, as reduções de impactos foram próximas a 29% e 28% nas categorias “acidificação” e eutrofização” respectivamente, indicando a expressiva influência do transporte da CBCA nos impactos ambientais da estabilização de RAF com LAA. Assim, recomenda-se buscar fontes de precursor próximas ao local de aplicação para minimizar os impactos ambientais oriundos do processo de transporte.

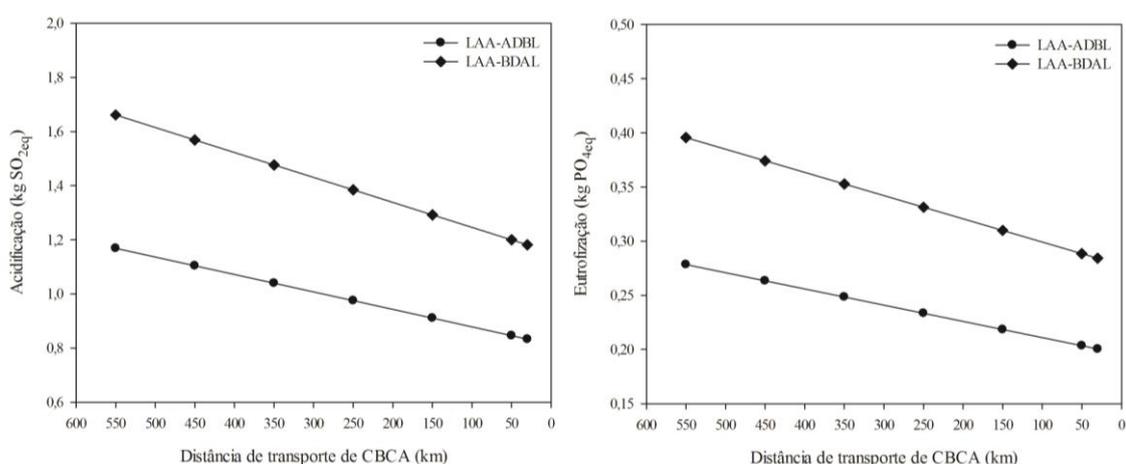


Figura 78 – Impacto das distâncias de transporte da CBCA nas categorias acidificação e eutrofização.

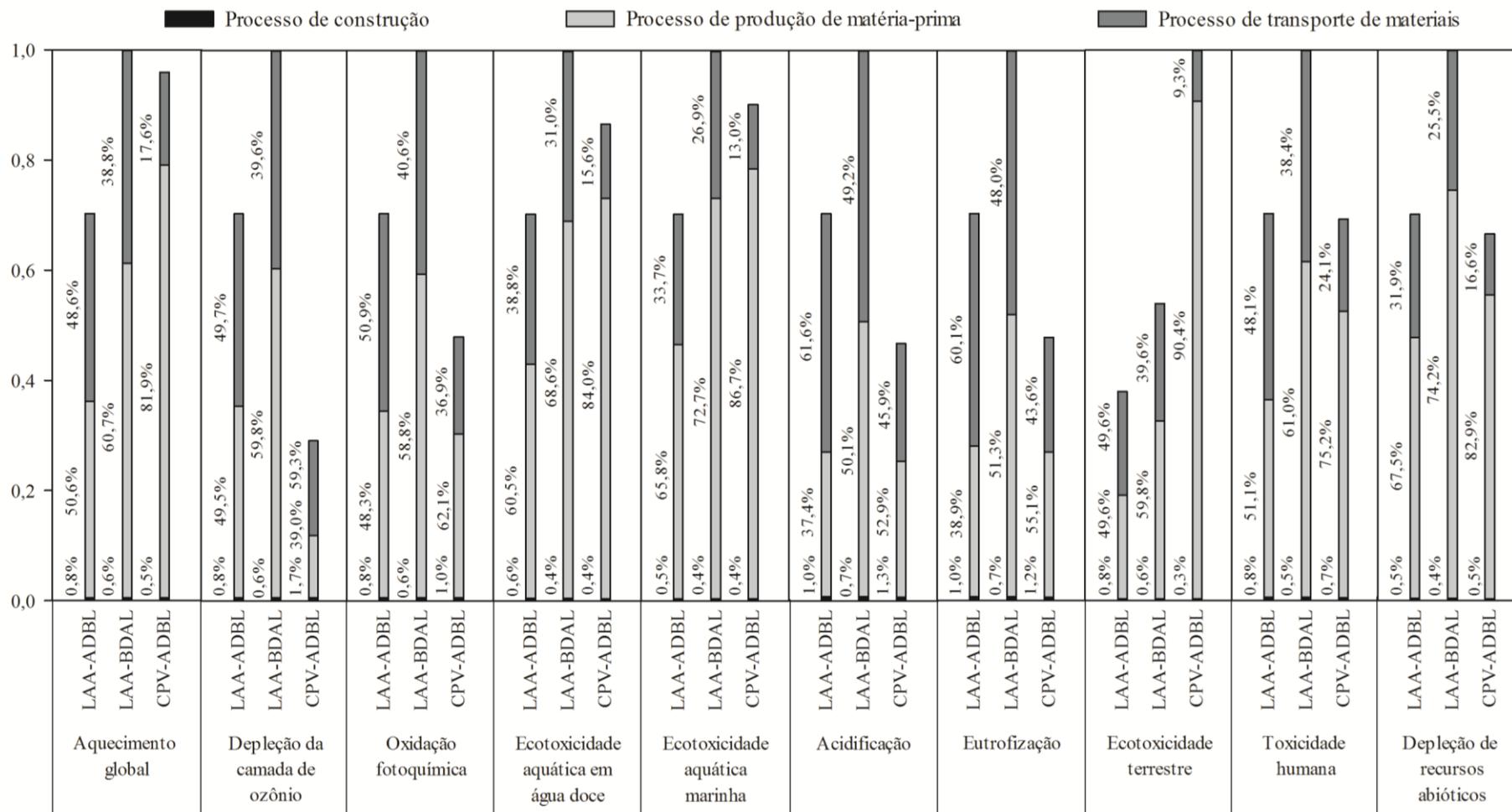


Figura 79 – Contribuições dos processos do ciclo de vida da estabilização de RAF nas categorias de impactos ambientais.

4.7 AVALIAÇÃO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA

A Figura 80 apresenta o custo de cada componente e o custo total da estabilização de RAF com distintos ligantes e dosagens. É notório que o custo total da estabilização de RAF com LAA é superior ao uso do cimento Portland, sendo do maior ao menor custo total: LAA-BDAL (285,30 \$.m⁻³), LAA-ADBL (226,17 \$.m⁻³) e CPV-ADBL (115,17 \$.m⁻³). Em termos de custos indiretos (custo social do CO₂), a dosagem com LAA-BDAL apresentou o maior custo (14,26 \$.m⁻³), seguida por CPV-ADBL (13,68 \$.m⁻³), enquanto que, a LAA-ADBL resultou no menor custo social de CO₂ (10,02 \$.m⁻³). Tais verificações ocorreram devido a maior geração de CO₂ na dosagem com maior quantidade de LAA e na dosagem com cimento tradicional: 279,5 kg (LAA-BDAL); 268,2 kg (CPV-ADBL) e 196,5 kg (LAA-ADBL).

Ligantes álcali-ativados são mais competitivos perante o cimento Portland quando considerado a emissão e custo do CO₂, sendo que este efeito é ainda mais expressivo para menores distâncias de transporte de materiais (MCLELLAN *et al.*, 2011; SANDANAYAKE *et al.*, 2018). O modal de transporte de materiais é considerado um fator de influência na emissão de CO₂, sendo recomendado meios alternativos ao transporte rodoviário de cargas (meio de transporte dos materiais desta pesquisa). Os modais aquaviário e ferroviário devem ser escolhidos sempre que for possível, pois resultam em menores emissões de CO₂ (SANDANAYAKE *et al.*, 2018).

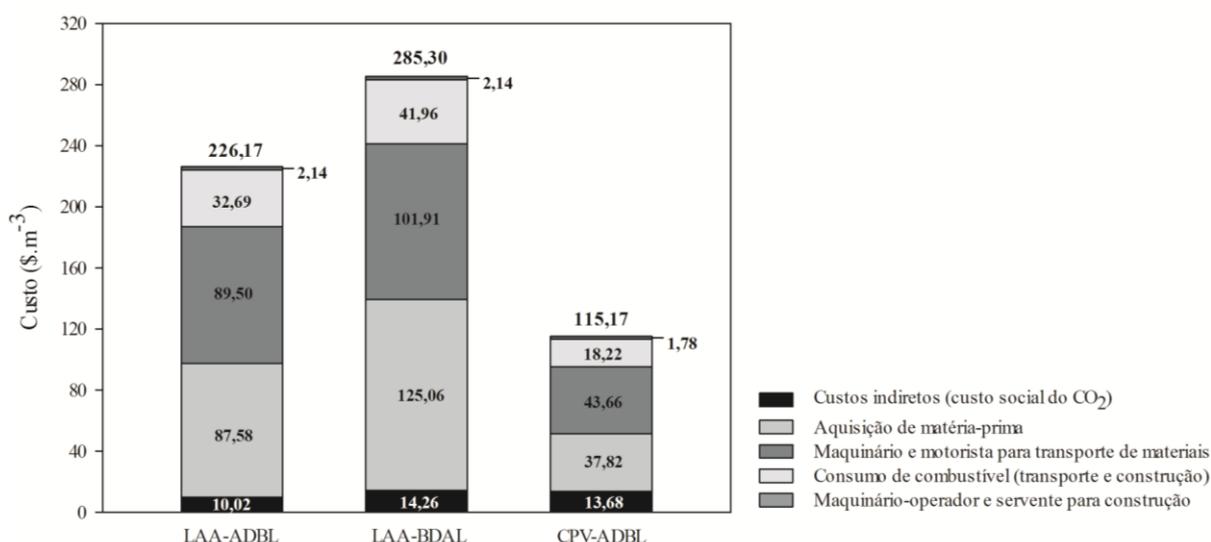


Figura 80 – Custos da estabilização de RAF com distintos ligantes e dosagens.

Nos métodos de estabilização, os componentes que mais contribuíram para os custos diretos foram: (i) aquisição de matéria-prima; (ii) maquinário e motorista para transporte de materiais e (iii) consumo de combustível (no transporte de materiais e na construção). A influência dos componentes supracitados nos maiores custos diretos para as dosagens com LAA é explicada principalmente pelo custo do NaOH e pelo transporte da CBCA. O custo do NaOH corresponde a 37,3% e 42,5% dos custos diretos e 35,7% e 40,3% dos custos totais para LAA-ADBL e LAA-BDAL respectivamente. Os custos do transporte da CBCA (incluindo maquinário, motorista e consumo de diesel) representam 29,5% e 33,6% dos custos diretos e 28,2% e 31,9% dos custos totais para LAA-ADBL e LAA-BDAL respectivamente.

A expressiva contribuição do ativador alcalino sob os custos de materiais álcali-ativados foi também identificada por outros trabalhos da literatura. Similar aos resultados desta pesquisa, Zahmak *et al.* (2021) verificaram que o NaOH é responsável por até 45% do custo total da estabilização de solo com ligantes álcali-ativados de escória de alto forno e cinzas volantes. Fernando *et al.* (2021) identificaram que 74% do custo total do geopolímero de cinzas volantes correspondeu ao custo do ativador NaOH+Na₂SiO₃. O elevado custo dos ativadores alcalinos está intimamente associado ao processo produtivo (FERNANDO *et al.*, 2021; MEDINA-MARTOS *et al.*, 2022). Isto porque as tecnologias de produção de cloro e álcalis por eletrólise demandam elevados custos de investimento inicial, custos operacionais e consumo de eletricidade (ROSALES-HUAMANI *et al.*, 2021). Dentre as três tecnologias (membrana, diafragma e mercúrio), a célula em membrana apresenta os menores custos (ROSALES-HUAMANI *et al.*, 2021), sendo esta a empregada na produção do NaOH deste estudo.

Ativadores alcalinos produzidos a partir de resíduos podem ser alternativas interessantes aos tradicionais, reduzindo a quantidade de energia e matéria-prima virgem para produção dos ativadores e, conseqüentemente os custos da produção de materiais álcali-ativados (ADESANYA *et al.*, 2021). Resíduo de soda da produção de Na₂CO₃ (LIN; XU; ZHAO, 2020), pó da dessulfuração de aço (ADESANYA *et al.*, 2020), resíduo de vidro (ABDULKAREEM *et al.*, 2021), cinza de biomassa de azeitona, cinza de casca de amêndoa (SORIANO *et al.*, 2022) e cinza de casca de arroz (TREVIZAN *et al.*, 2023) são exemplos de resíduos utilizados em novos ativadores alcalinos. Além disso, águas residuais com alta alcalinidade são opções de ativadores alcalinos atrativas em termos de custos e impactos ambientais, pois tratam-se de efluentes líquidos que não requerem processamento para uso na ativação alcalina. Alguns exemplos destes ativadores são: licor Bayer da extração da alumina da bauxita, no processo

Bayer (JAMIESON *et al.*, 2015); água residual da extrusão de alumínio (CRISTELO *et al.*, 2021) e água residual da indústria de papel e celulose (NOVO *et al.*, 2022).

O transporte de materiais (principalmente de CBCA) foi outro componente que impactou no custo total da estabilização de RAF com LAA. Devido ao transporte de materiais ser um fator que influencia expressivamente no custo total de materiais álcali-ativados, reduzir as distâncias de transporte das matérias-primas tornará estes materiais mais competitivos, visto que os fornecedores de cimento Portland encontram-se próximos aos consumidores (MCLELLAN *et al.*, 2011; REVATHI *et al.*, 2022). Assim, recomenda-se aos tomadores de decisões realizar o levantamento dos locais de produção das matérias-primas, neste caso, identificar as indústrias geradores de CBCA que estejam localizadas a menores distâncias do local de produção do ligante álcali-ativado. No Brasil, a distribuição geográfica das unidades sucroalcooleiras está disponibilizada no site da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2022b).

As três dosagens propostas (LAA-ADBL, LAA-BDAL e CPV-ADBL) apresentam o desempenho mecânico desejável para esta pesquisa (RCS de 2,1 MPa em 7 dias), diferenciando-se entre si pelo tipo de ligante (LAA ou CPV), densidade (alta ou baixa densidade) e teor de ligante (alto ou baixo teor). A dosagem que incorpora maior teor de ligante (BDAL) não somente resulta em maiores impactos ambientais, como também em maiores custos (diretos e indiretos). A redução destes impactos pode ser obtida pela escolha de uma dosagem com maior densidade (maior grau de compactação da mistura RAF-ligante) e menor teor de ligante. Em termos de custos, ainda é importante avaliar a localização dos fornecedores de materiais para definir o tipo de ligante a ser utilizado na estabilização. Se o fornecedor de cimento Portland, bem como os das matérias-primas do LAA (CBCA, CCOH e NaOH) estão localizados próximos ao local da estabilização (em campo), a dosagem LAA-ADBL corresponde a melhor opção. Se o fornecedor de cimento Portland está localizado próximo ao local da estabilização, mas o fornecedor de material precursor do LAA (CBCA) está distante (>550 km), a dosagem CPV-ADBL configura a escolha mais adequada. A primeira opção apresenta maiores custos diretos associados a aquisição de matérias-primas para produção do LAA, porém, implica em custos indiretos inferiores devido as menores emissões de CO₂ (i.e. menor custo social do CO₂). Independentemente do método ou dosagem escolhido para estabilização de RAF, também é importante destacar a possibilidade de reduzir impactos econômicos associados ao transporte de RAF. Isto pode ser viabilizado por meio do uso de RAF gerado em regiões próximas ao local onde será aplicado. Recomenda-se aos tomadores de decisões identificar as indústrias de

fundição de metais que estão localizadas a menores distâncias do local da aplicação. No Brasil, este levantamento pode ser facilitado buscando informações no site da Associação Brasileira de Fundição (ABIFA, 2023), a qual fornece subsídios (e.g. contatos, palestras, experimentos, pesquisas) aos interessados em desenvolver meios sustentáveis de uso do RAF.

Em síntese, a redução das distâncias de transporte de materiais (e.g. CBCA e RAF) e ativadores alcalinos de baixo custo podem ser estratégias importantes para reduzir impactos econômicos (além dos impactos ambientais), aumentando a sustentabilidade da produção de ligantes álcali-ativados e da estabilização de solos (neste caso, RAF) com estes cimentos alcalinos.

4.8 AVALIAÇÃO SOCIAL DO CICLO DE VIDA

Os resultados dos questionários aplicados a cada um dos cinco setores/processos foram inicialmente avaliados pela determinação do coeficiente alfa de *Cronbach* (α) (Tabela 61). O α de 0,78 para o questionário do setor de “construção de estradas” está dentro da faixa 0,7-0,8 considerada satisfatória, sugerindo uma boa correlação entre as questões. O valor α superior a 0,8 para “produção de hidróxido de sódio” ($\alpha=0,85$) indica uma forte consistência interna do questionário deste setor. Em geral, considera-se satisfatório um valor α superior a 0,70, porém, valores inferiores a este limite podem ser aceitáveis em função de determinados fatores envolvidos. O resultado do questionário da “produção de cal” apresentou um α de 0,62, o que pode ser considerado aceitável devido ao número limitado de questões (10) e a ampla gama de conhecimentos avaliados, como também reconhecido por Berger e Hänze (2015).

Tabela 61 – Valores do coeficiente alfa de *Cronbach* (α) para cada setor.

Setor	Transporte rodoviário	Construção de estradas	Produção de cimento Portland	Produção de cal	Produção de hidróxido de sódio
Valor α	0,38	0,78	0,11	0,62	0,85

Os setores “transporte rodoviário” e “produção de cimento Portland” apresentaram baixos valores α : 0,38 e 0,11 respectivamente. Acredita-se que a consistência interna dos questionários destes setores tenha sido afetada pelas respostas fornecidas por participantes especialistas, os quais tiveram opiniões muito semelhantes sobre o tema, reduzindo a variabilidade total do

questionário e conseqüentemente o valor α . Para aumentar o α , recomenda-se adicionar mais itens (mensurando distintos elementos) aos questionários e aplicá-los a um maior número de pessoas com diferentes graus de instrução e experiência profissional. Os valores do coeficiente alfa de *Cronbach* obtidos nesta pesquisa aplicam-se a amostras específicas, que responderam em uma ocasião específica, e não são considerados uma característica fixa do instrumento de avaliação proposto (questionários).

Na Tabela 62 estão discretizados a pontuação de cada indicador e *stakeholder*, bem como o score social total da estabilização de RAF com LAA ou CPV. As representações visuais destes resultados estão expostas em diagramas de *Sunburst* nas Figuras 81 e 82. Nos diagramas, os módulos em “verde” representam os impactos sociais “positivos”, e os em “vermelho”, impactos sociais “negativos”. Na Figura 81 comparativamente a Figura 82, nota-se um aumento de módulos verdes, ou seja, há mais impactos positivos em RAF-LAA em relação a RAF-CPV, refletindo diretamente no score social total de cada sistema: 5,9 para RAF-LAA e 3,8 para RAF-CPV. Portanto, a estabilização de RAF com LAA apresenta maior impacto social positivo.

Tabela 62 – Pontuação de *stakeholders*, indicadores e score social total de RAF-LAA e RAF-CPV.

<i>Stakeholder</i> (STK)	Indicadores (IND)	RAF-LAA		RAF-CPV	
		IND	STK	IND	STK
Trabalhadores	Acidentes de trabalho	+0,66		+0,99	
	Salário médio	+2,87		+1,37	
	Participação feminina	-1,72	+2,60	-0,68	+2,54
	Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores	+0,79		+0,86	
Comunidade local	Riscos à saúde e segurança	+0,49		+0,46	
	Empresa/indústria informa, consulta e envolve a comunidade local	+0,05	+0,29	+0,52	+0,40
	Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades	-0,25		-0,58	
Sociedade	Contribuição do serviço/produto com o progresso econômico	+1,84		+1,11	
	Compromisso com pautas de sustentabilidade	+0,78	+3,01	+0,12	+0,91
	Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico	+0,38		-0,32	
	Score social total		+5,9		+3,8

Na estabilização de RAF com LAA, o maior impacto social foi identificado no *stakeholder* “Sociedade”, seguido de “Trabalhadores” e “Comunidade local” respectivamente. O maior impacto social positivo sob “Sociedade” deve-se principalmente ao indicador “Contribuição do serviço/produto com o progresso econômico”, justificado em função das avaliações positivas pelos participantes, principalmente dos processos de produção de cal e de hidróxido de sódio,

além de construção de estradas. O impacto social positivo sob “Trabalhadores” deve-se majoritariamente ao “Salário médio”, o que é explicado pela avaliação positiva e alta importância atribuída ao indicador pelos participantes, principalmente os dos processos produção de cal e de hidróxido de sódio. Já o impacto social positivo na “Comunidade local” ocorreu essencialmente em função do indicador “Riscos à saúde e segurança”. A pontuação deste indicador deve-se a avaliação positiva feita principalmente pelos participantes dos processos de produção de cal e de hidróxido de sódio.

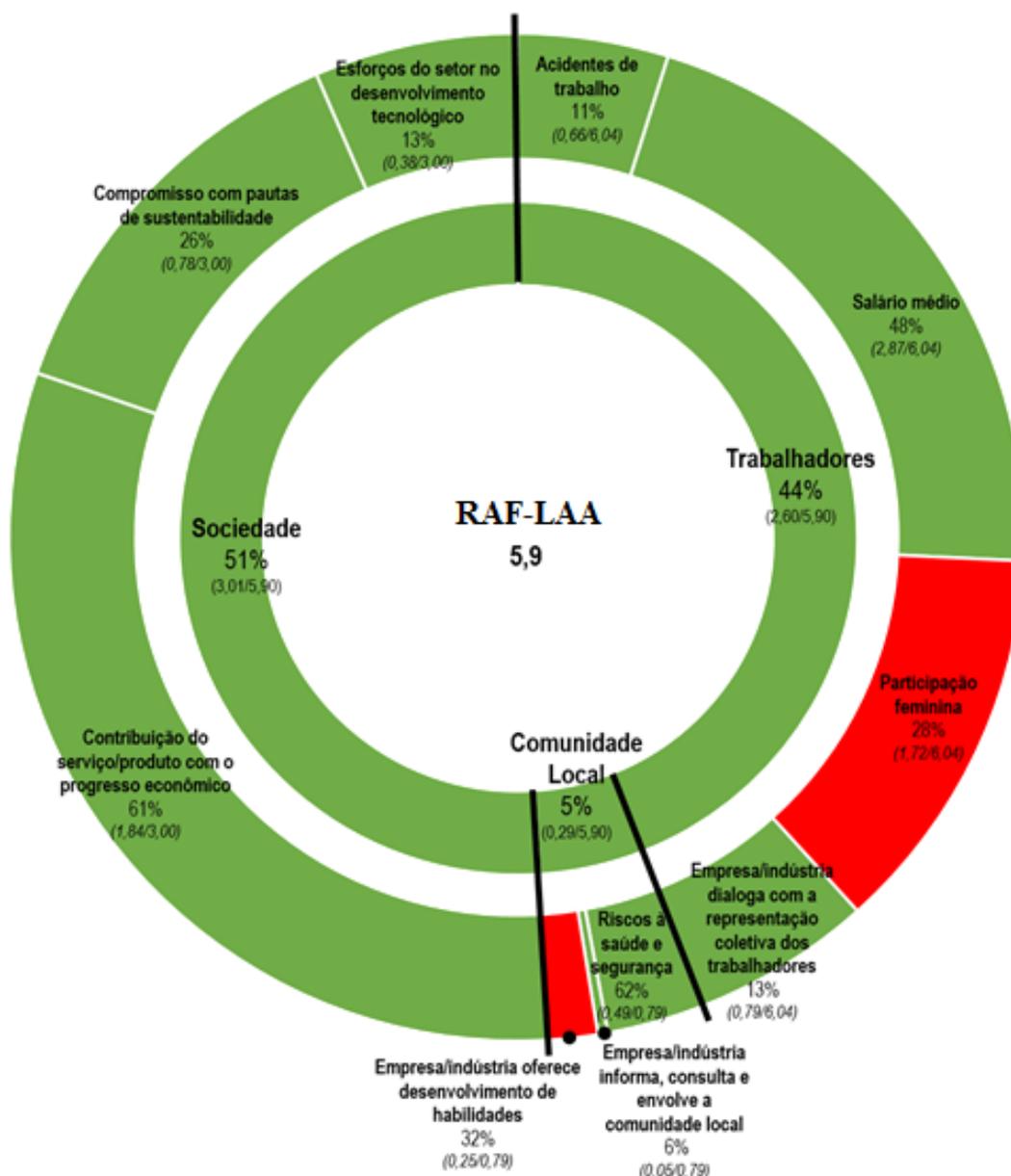


Figura 81 – Diagrama *Sunburst* para estabilização com ligante álcali-ativado.

Na estabilização de RAF com cimento Portland (RAF-CPV), o maior impacto social foi identificado no *stakeholder* “Trabalhadores”, seguido de “Sociedade” e “Comunidade local” respectivamente. O maior impacto social positivo sob “Trabalhadores” deve-se principalmente a avaliação positiva e a maior importância atribuída ao indicador “Salário médio” pelos participantes dos processos de produção de cimento Portland e transporte rodoviário. O impacto social positivo sob “Sociedade” ocorreu em função da avaliação positiva do indicador “Contribuição do serviço/produto com o progresso econômico” principalmente pelos participantes dos processos de construção de estradas e produção de cimento Portland. Por sua vez, o impacto social positivo em “Comunidade local” deve-se aos indicadores “Riscos à saúde e segurança” e “Empresa/indústria informa, consulta e envolve a comunidade local”. A contribuição destes indicadores justifica-se pela avaliação positiva e importância atribuída pelos participantes do processo de produção de cimento Portland.

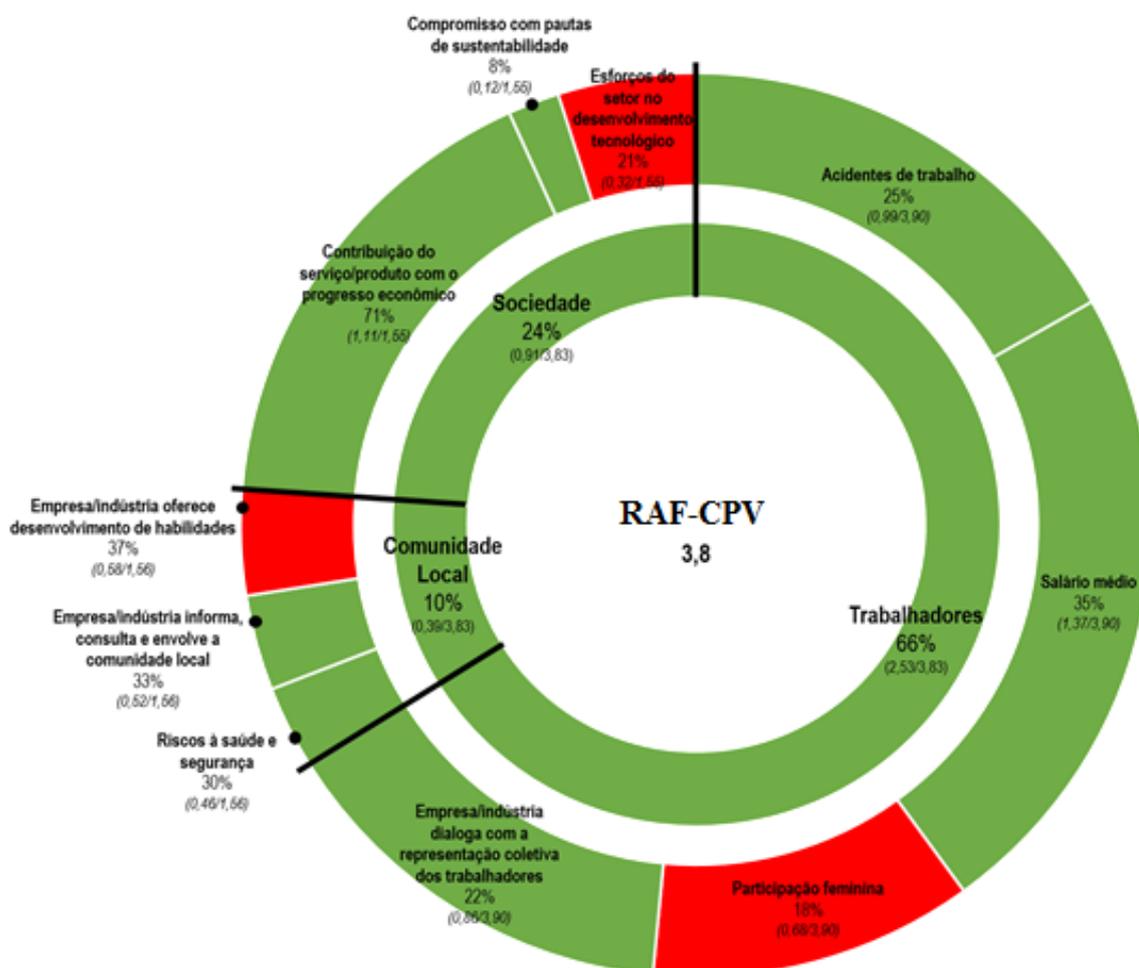


Figura 82 – Diagrama Sunburst para estabilização com cimento Portland.

Em ambos sistemas RAF-LAA e RAF-CPV (Figuras 81 e 82), nota-se os impactos sociais negativos dos indicadores “Participação feminina” e “Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades” nos *stakeholders* “Trabalhadores” e “Comunidade local” respectivamente. Os impactos sociais negativos destes dois indicadores devem-se a pequena participação feminina e falta ou baixa ocorrência de treinamentos/cursos aos colaboradores nos processos de construção de estradas e transporte rodoviário. Nesse contexto, observa-se que os processos/setores supracitados tem a oportunidade de aumentar os impactos sociais positivos sob “Trabalhadores” e “Comunidade local” por meio do engajamento de mulheres na força de trabalho, bem como dos seus colaboradores em treinamentos para desenvolvimento de habilidades. Cabe ressaltar que a “Participação feminina/Participação de mulheres na força de trabalho” vem sendo um dos indicadores de impactos sociais e socioeconômicos sob “Trabalhadores” mais discutidos em estudos atuais de diversas áreas, tais como: produção de algas (RAFIAANI *et al.*, 2020), transportes e mineração (BOUILLASS; BLANC; PEREZ, 2021), remediação de áreas contaminadas (VISENTIN *et al.*, 2022), etc.

Em RAF-CPV ainda há o impacto social negativo do indicador “Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico” sob a “Sociedade” devido a avaliação negativa dos participantes do processo de transporte rodoviário. Entretanto, em RAF-LAA este mesmo indicador impactou positivamente sob “Sociedade” em função da avaliação positiva feita pelos participantes, principalmente os do processo de produção de hidróxido de sódio. A “Contribuição para o desenvolvimento tecnológico” vem sendo percebido como um dos indicadores mais relevantes para avaliação de impactos sociais do setor de transportes sob a sociedade (BOUILLASS; BLANC; PEREZ, 2021). Assim, observa-se que o setor de “transporte rodoviário de materiais/equipamentos para construção de rodovias” necessita concentrar mais investimentos em ações voltadas ao aprimoramento ou criação de produtos/serviços para o desenvolvimento tecnológico da sociedade.

4.9 ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE

A Figura 83 expõe o índice de sustentabilidade de cada estratégia para estabilização de RAF. A dosagem LAA-ADBL é a estratégia mais sustentável entre as três avaliadas e respectivos limites dos sistemas. LAA-ADBL apresentou o maior índice de sustentabilidade (0,59), seguida

por CPV-ADBL (0,49) e LAA-BDAL (0,23). A dosagem ADBL apresentou maior índice de sustentabilidade perante a BDAL em função dos menores impactos ambientais e econômicos. LAA-ADBL possui pontuações nos pilares ambiental (0,21) e econômico (0,17) iguais a CPV-ADBL, diferenciando pela pontuação superior no pilar social (0,21) perante a dosagem com cimento Portland (0,12).

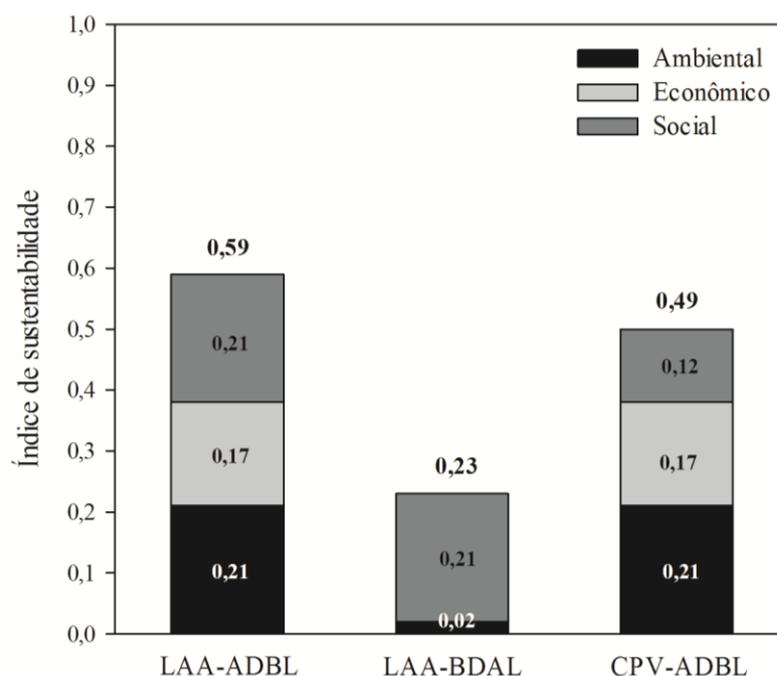


Figura 83 – Índice de sustentabilidade da estabilização de RAF com distintas estratégias.

As dosagens LAA-ADBL e CPV-ADBL apresentaram impactos ambientais semelhantes em algumas categorias, e outros muito distintos em categorias como ecotoxicidade terrestre e depleção da camada de ozônio (Figura 77). Após a função valor (V_i) homogeneizar distintos valores de categorias ambientais, as dosagens LAA-ADBL e CPV-ADBL resultaram em pontuação idêntica no pilar ambiental (0,21). Devido aos grandes impactos ambientais causados por LAA-BDAL (maior impacto em nove das dez categorias), esta dosagem apresentou um baixo desempenho no pilar ambiental.

Segundo Zahmak et al. (2021), os impactos negativos causados por ligantes álcali-ativados (reduzindo a pontuação do pilar ambiental) devem ser interpretados cautelosamente devido aos materiais utilizados na produção destes cimentos tratarem-se de resíduos destinados à aterros. Sendo assim, a reciclagem destes resíduos em matérias álcali-ativados conduziria à grandes

benefícios ambientais. Nesta pesquisa, RAF e CBCA são destinados à aterros industriais e as cascas de ovos são dispostas em aterros sanitários. Recomenda-se assim, avaliar os impactos gerados por evitar a disposição destes resíduos em aterros. Pode-se ainda, explorar os impactos ambientais de evitar a extração de areia natural em função do uso de RAF.

A LAA-ADBL apresentou maiores custos diretos e menores custos indiretos comparativamente a CPV-ADBL (Figura 80). Após a função valor (V_i) homogeneizar distintos valores de critérios econômicos, as dosagens LAA-ADBL e CPV-ADBL resultaram em uma pontuação idêntica no pilar econômico (0,17). A dosagem LAA-BDAL apresentou maiores custos diretos e indiretos dentre as três dosagens, refletindo em uma pontuação igual a zero no pilar econômico. Isto significa que a estabilização com LAA-BDAL resulta em satisfação mínima sob o ponto de vista econômico. Cabe destacar que, os custos de evitar a disposição final dos resíduos (RAF, CBCA e cascas de ovos) em aterros não foram incluídas na ACCV desta pesquisa. Sugere-se incluir tais custos na ACCV de ligantes álcali-ativados que incorporam resíduos, visando avaliar como os custos totais e, conseqüentemente o pilar econômico e o índice de sustentabilidade são impactados por esta atividade.

As dosagens com LAA (LAA-ADBL e LAA-BDAL) apresentaram pontuação superior (0,21) a CPV-ADBL (0,12) no pilar social. Isto é explicado pela superioridade do score social total do LAA (5,9) em relação ao CPV (0,38) (Tabela 62). A estabilização de RAF com LAA apresentou maiores impactos positivos em cinco dos dez indicadores sociais, enquanto que, a estabilização com cimento Portland resultou em maiores impactos positivos em três indicadores. Em termos de impactos sociais negativos, LAA e CPV impactaram de forma negativa em dois e três indicadores sociais respectivamente. A avaliação do pilar social fornece informações sobre a “utilidade” de um produto/serviço para as partes interessadas, neste caso, de RAF estabilizado com distintos ligantes para trabalhadores, comunidade local e sociedade. Assim, os tomadores de decisões poderão escolher a opção que traz maiores benefícios (i.e. conseqüências sociais mais favoráveis) para os *stakeholders* envolvidos no ciclo de vida do produto.

As contribuições das avaliações de ciclo de vida desta pesquisa traduzem-se em uma importante ferramenta para análise de sustentabilidade de aplicações na engenharia, que pode ser utilizada por tomadores de decisões para definirem a estratégia mais adequada sob o respaldo não somente técnico (comportamento mecânico e lixiviação), como também contemplando os impactos ambientais, econômicos e sociais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Este estudo propôs a valorização de um subproduto industrial e de dois resíduos agroindustriais. A estabilização de RAF com um LAA oriundo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal casca de ovo foi avaliada comparativamente a RAF-cimento Portland. Propriedades mecânicas e microestruturais, lixiviação e solubilização de metais, e avaliações do ciclo de vida de RAF-LAA foram investigadas para determinar desempenho mecânico-ambiental e sustentabilidade. Com base nos resultados encontrados, foram obtidas as seguintes conclusões:

- a) Considerando maior RCS das pastas álcali-ativadas e menor consumo de CCOH, o LAA desenvolvido é composto por uma relação CBCA/CCOH de 80/20, relação água-ligante de 0,8 e solução de NaOH (2,61% Na₂O). A pasta álcali-ativada apresentou a formação de géis N-A-S-H e C-A-S-H em fases amorfas aos 7 dias. Imagens de MEV revelaram que sua microestrutura é mais homogênea e compacta, comparativamente a pasta sem álcali-ativação. Áreas ricas em Ca, Si, Na e Al foram observadas na matriz álcali-ativada, indicando a presença de géis cimentantes;
- b) Misturas RAF-LAA apresentaram resultados mecânicos similares ou superiores a RAF-CPV. Ambos sistemas RAF-LAA e RAF-CPV alcançaram uma RCS de 2,1 MPa, em 7 dias a 23°C, correspondendo a resistência aceitável para sub-bases de solo-cimento. Os tratamentos RAF-LAA de 7 dias a 40°C apresentaram resistência médias superiores aos 7 dias-23°C, bem como similares ou superiores aos de 28 dias-23°C. RAF-LAA atingiu uma resistência média de 9,8 MPa após 28 dias a 40°C;
- c) Corpos de prova com maiores RCS e RCD apresentaram elevados valores de rigidez inicial. A mistura RAF-LAA com maiores resistências atingiu um G₀ médio de 9059 MPa em 28 dias a 40°C, o que é 23,7% superior ao G₀ médio apresentado pela mistura RAF-CPV (7326 MPa) sob as mesmas condições;
- d) Teor de ligante e peso específico aparente seco são os fatores que exerceram maior influência significativa no comportamento mecânico (RCS, RCD e G₀) de RAF com ambos tipos de ligantes (LAA e CPV). Temperatura de cura, tempo de cura e teor de

- umidade e algumas interações entre fatores também influenciaram significativamente as variáveis de resposta mecânica, porém, com menor magnitude;
- e) Misturas com alto teor de LAA e peso específico tiveram perdas de PMA em torno de 7%, enquanto que, RAF-CPV apresentaram PMA próximo a 2% considerando os mesmos fatores. Ambos sistemas RAF-LAA e RAF-CPV com maiores teores de ligante e peso específico aparente seco mostraram PMA inferiores a 14% e 11%, i.e., limites máximos estabelecidos para areias finas não-plásticas após doze ciclos de molhagem-secagem e para camadas de bases e sub-bases respectivamente;
 - f) O índice $\eta/B_{iv}^{0.28}$ mostrou-se um parâmetro adequado para previsão do desempenho mecânico de RAF com distintos ligantes (LAA ou CPV). Menor porosidade e maior teor de ligante (menores valores de $\eta/B_{iv}^{0.28}$) resultaram em maiores resistências (RCS e RCD), rigidez inicial e durabilidade (menor PMA). As correlações matemáticas obtidas entre $\eta/B_{iv}^{0.28}$ e as variáveis resposta de comportamento mecânico possibilitam definir a quantidade de agente cimentante e esforço de compactação de RAF-LAA ou RAF-CPV adequados para aplicações geotécnicas de interesse;
 - g) A mineralogia de misturas RAF-LAA sugeriu a possível presença de fases amorfas características de géis N-A-S-H e C-(A)-S-H. Já a análise de grupos funcionais e ligações confirmou a formação do gel de caráter predominantemente N-A-S-H. Reações de policondensação de aluminossilicatos e consequente formação de géis cimentantes ocorreram ao longo do tempo e foram catalisadas pelo aumento da temperatura (23°C para 40°C). Ainda, maiores temperatura e tempo de cura resultaram em matrizes cimentadas mais homogêneas e densas. As observações supracitadas justificaram a evolução das resistências e rigidez em diferentes temperaturas e períodos de tempo;
 - h) Ambas misturas RAF-LAA e RAF-CPV de 7 dias apresentaram comportamento de lixiviação de metais satisfatório, não apresentando toxicidade, e atendendo parcialmente aos padrões de qualidade de águas da CONAMA 460 e da Lista Holandesa, e de forma integral a normativa da EPA. Os extratos lixiviados das misturas RAF-LAA excederam as concentrações limites para Ba, Mn e Zn de ao menos uma normativa de qualidade de águas, e Ba e Cr lixiviam em concentrações excessivas de RAF-CPV;
 - i) O comparativo entre os extratos lixiviados de misturas curadas a 7 dias e aquelas a 28 dias revelou que matrizes RAF-LAA encapsularam Cd, Cr e Pb já no tempo de cura

inicial. Mn e Zn sofreram lixiviação de RAF-LAA e Cr de RAF-CPV curadas a 7 dias, porém, tais metais não lixiviaram das misturas de 28 dias. Isto indica que Mn, Zn e Cr foram encapsulados nos géis cimentantes formados ao longo do tempo;

- j) Os métodos de ensaio de lixiviação da NBR 10005 (método 1) e em equipamento de coluna da D4874 (método 2) resultaram em distintas concentrações de metais lixiviadas de RAF-LAA e RAF-CPV. Nas misturas RAF-LAA, maiores concentrações de Al e Ba foram lixiviadas pelo método 2, e somente pelo método 1 ocorreu lixiviação de Mn. Nas misturas RAF-CPV, as concentrações de Ba lixiviadas pelo método 2 foram superiores as resultantes do método 1, enquanto que, concentrações de Cr foram observadas somente nos extratos oriundos do método 1. Os resultados de lixiviação de metais pelo método da NBR 10005 são mais favoráveis por estarem mais próximos do cumprimento dos requisitos de qualidade de águas (CONAMA 460, Lista Holandesa e EPA);
- k) As concentrações de metais nos extratos solubilizados de RAF-LAA com 7 dias de cura atenderam aos limites estabelecidos por todas normativas de qualidade de águas consideradas. Já os extratos solubilizados de RAF-CPV não cumpriram todos os limites de qualidade de águas da CONAMA 460 e Lista Holandesa, mas atenderam integralmente os requisitos da EPA. Misturas RAF-LAA e RAF-CPV em ambos períodos de cura encapsularam Fe (do CPV) ou Mn e Pb (de RAF e CBCA), indicando o encapsulamento destes metais já no início da formação dos géis cimentantes;
- l) A dosagem LAA-BDAL resultou nos maiores impactos em nove das dez categorias avaliadas. A dosagem ADBL apresentou menores impactos ambientais comparativamente a BDAL. LAA-ADBL e CPV-ADBL apresentaram impactos semelhantes em algumas categorias, e impactos muito distintos em categorias como “ecotoxicidade terrestre” e “depleção da camada de ozônio”. Em geral, a produção de matérias-primas foi o processo que mais contribui para os impactos ambientais das três dosagens, seguida pelo transporte de materiais. O processo de construção (mistura, homogeneização e compactação de RAF-ligante) exerceu pouca influência sob as categorias de impactos ambientais;
- m) Os processos produtivos de NaOH e de cal (principalmente do ativador alcalino) são os principais responsáveis pelos impactos ambientais em dosagens com LAA em função dos recursos consumidos (matérias-primas e eletricidade) e liberação de poluentes. Na dosagem CPV-ADBL, a produção do cimento Portland demanda intenso consumo de

recursos não-renováveis e eletricidade, liberando poluentes para o meio ambiente. LAA-ADBL, LAA-BDAL e CPV-ADBL também causaram impactos ambientais pelo consumo de diesel (transporte de materiais e construção), principalmente as dosagens contendo LAA devido ao transporte de CBCA. A queima do combustível gera emissões de poluentes que causam danos à saúde humana, ecossistemas, dentre outros;

- n) A dosagem ADBL apresentou menores custos diretos e indiretos e, conseqüentemente menor custo total em relação a BDAL. A dosagem LAA-ADBL resultou em maiores custos diretos (\$ 216,14) comparativamente a CPV-ADBL (\$ 101,49). Por outro lado, LAA-ADBL apresentou menor custo indireto (custo social do CO₂) (\$ 10,02) em relação a CPV-ADBL (\$ 13,68) devido as diferenças em emissões de CO₂ (196,5 kg e 268,2 kg para LAA-ADBL e CPV-ADBL respectivamente). O custo total da estabilização de RAF com LAA-ADBL (\$ 226,17) é superior ao uso de CPV-ADBL (\$ 115,17) em função do consumo de matérias-primas (principalmente de NaOH) e do transporte de materiais. Utilizar matérias-primas mais próximas do local de aplicação pode ser uma alternativa para redução de custos do uso de LAA;
- o) O ciclo de vida da estabilização de RAF com LAA apresentou mais impactos sociais positivos em relação a RAF-CPV, refletindo no score social total de 5,9 para RAF-LAA e 3,8 para RAF-CPV. “Salário médio” e “Contribuição do serviço/produto com o progresso econômico” foram os indicadores sociais que mais impactaram positivamente em ambos sistemas. “Participação feminina” foi o indicador social que mais impactou negativamente nos dois sistemas, além de “Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades”. Em RAF-CPV também houve o impactado negativo do indicador “Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico”. “Produção de cal” e “produção de hidróxido de sódio” foram os processos que mais contribuíram para os impactos sociais positivos em RAF-LAA, enquanto que, em RAF-CPV, a contribuição principal resultou da “produção de cimento Portland”. “Transporte rodoviário” e “construção de estradas” necessitam realizar avanços em força de trabalho feminina, treinamentos para colaboradores e produtos/serviços para desenvolvimento tecnológico da sociedade, pois foram os setores que mais contribuíram para os impactos sociais negativos nos sistemas;
- p) A dosagem ADBL apresentou maior índice de sustentabilidade comparativamente a BDAL. A estratégia de estabilização de RAF com LAA-ADBL é a mais sustentável

dentre as três avaliadas, com um índice de sustentabilidade de 0,59 perante a 0,49 (CPV-ADBL) e 0,23 (LAA-BDAL). A LAA-ADBL apresentou pontuações nos pilares ambiental e econômico iguais a CPV-ADBL, diferenciando-se pela pontuação superior no pilar social: 0,21 para LAA-ADBL e 0,12 para CPV-ADBL.

As contribuições deste trabalho acerca de comportamento mecânico, lixiviação de metais e sustentabilidade de RAF com distintos ligantes apresentam-se no sentido de horizontalidade, ou seja, elas se complementam e possuem grau de importância igualitário. O LAA oriundo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo possibilitou estabilizar RAF, obtendo-se resistência, rigidez, durabilidade e encapsulamento de metais satisfatórios. RAF estabilizado com LAA-ADBL é mais sustentável perante o uso de cimento Portland, dentro dos limites dos sistemas avaliados. O LAA pode substituir o cimento tradicional na estabilização de RAF, garantindo desempenho mecânico-ambiental e sustentabilidade para aplicações de engenharia.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para avançar na investigação do desempenho mecânico, lixiviação e sustentabilidade de RAF com LAA, apresentam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) Comportamento mecânico e microestrutural de misturas RAF-LAA curadas a baixas temperaturas (e.g. 10°C) por distintos períodos de tempo, para avaliar como dias frios influenciam no desenvolvimento das reações de álcali-ativação e na resposta mecânica;
- b) Comportamento mecânico e microestrutural de misturas a longo prazo: avaliar o desenvolvimento de propriedades como resistência, rigidez e durabilidade ao longo do tempo (e.g. 60, 90, 120, 180 e 365 dias), bem como mineralogia, composição química e microestrutura para auxiliar na compreensão do comportamento mecânico;
- c) Mineralogia e microestrutura de misturas RAF-LAA submetidas a lixiviação de metais para avaliar possíveis alterações causadas por este processo;
- d) Lixiviação de metais em equipamento de coluna de RAF, CBCA e CCOH, de forma individual, para rastrear a origem dos metais lixiviados nas misturas RAF-LAA submetidas a este mesmo ensaio;
- e) Lixiviação de metais de misturas RAF-LAA a longo prazo (60, 90, 120 dias, etc.);

- f) Avaliar os impactos ambientais por meio de outros métodos (e.g. ILCD, *Impact* 2002+);
- g) Adição de outros indicadores de impactos sociais no questionário da avaliação social do ciclo de vida, bem como aplicação a um maior número de pessoas para avaliar os impactos sociais da estabilização de RAF com distintos ligantes;
- h) Avaliação dos custos de evitar a disposição final de RAF, CBCA e cascas de ovos em aterros industriais e sanitários;
- i) Avaliação ambiental, econômica e social do ciclo de vida da estabilização de areia natural com o LAA, comparando seu índice de sustentabilidade com os resultantes do ciclo de vida de RAF-LAA e RAF-CPV.

REFERÊNCIAS

- ABDELJOUAD, L.; ASADI, A.; NAHAZANAN, H.; HUAT, B. B. K.; DHEYAB, W.; ELKHEBU, A. G. Effect of clay content on soil stabilization with alkaline activation. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 5, n. 4, 2019.
- ABDOLLAHNEJAD, Z.; MASTALI, M.; LUUKKONEN, T.; KINNUNEN, P.; ILLIKAINEN, M. Fiber-reinforced one-part alkali-activated slag/ceramic binders. **Ceramics International**, v. 44, n. 8, p. 8963–8976, 2018.
- ABDOLLAHNEJAD, Z.; LUUKKONEN, T.; MASTALI, M.; KINNUNEN, P.; ILLIKAINEN, M. Development of one-part alkali-activated ceramic/clag binders containing recycled ceramic aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 2, p. 04018386, 2019.
- ABDULKAREEM, M.; HAVUKAINEN, J.; NUORTILA-JOKINEN, J.; HORTTANAINEN, M. Environmental and economic perspective of waste-derived activators on alkali-activated mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124651, 2021.
- ABICLOR. **Relatório anual - 2014**. Disponível em: <<http://abiclor.com.br/relatorio2014/en-soda-caustica.html>>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- ABIFA. **Soluções ADF**. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/solucoes-adf/>>. Acesso em: 10 jan. 2023.
- ABNT. NBR10004: Resíduos sólidos - Classificação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–71, 2004a.
- ABNT. NBR10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–16, 2004b.
- ABNT. NBR10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–3, 2004c.
- ABNT. NBR15702: Areia descartada de fundição — Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–8, 2009a.

ABNT. NBR ISO14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, v. 2, p. 21, 2009b.

ABNT. NBR ISO14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 45, 2009c.

ABNT. NBR15895: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chappelle modificado. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–6, 2010.

ABNT. NBR7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–5, 2011.

ABNT. NBR12025: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método do ensaio. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–2, 2012.

ABNT. NBR7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–3, 2016.

ABNT. NBR6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–5, 2017a.

ABNT. NBR6458: Grão de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação de massa específica aparente e da absorção de água. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–10, 2017b.

ABNT. NBR16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–4, 2017c.

ABNT. NBR7181: Solo - Análise granulométrica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–12, 2018a.

ABNT. Cimento Portland - Requisitos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, v. 1, p. 1–12, 2018b.

ACOSTA, C. J. M. **Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos**

de vidro e cal de casca de ovo. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

ADEDIRAN, A.; YLINIEMI, J.; ILLIKAINEN, M. Mineralogy and glass content of Fe-rich fayalite slag size fractions and their effect on alkali activation and leaching of heavy metals. **Ceramic Engineering & Science**, p. 1–14, 2021.

ADESANYA, E.; OHENOJA, K.; DI, A.; KINNUNEN, P.; ILLIKAINEN, M. Alternative alkali-activator from steel-making waste for one-part alkali-activated slag. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123020, 2020.

ADESANYA, E.; PERUMAL, P.; LUUKKONEN, T.; YLINIEMI, J.; OHENOJA, K.; KINNUNEN, P.; ILLIKAINEN, M. Opportunities to improve sustainability of alkali-activated materials: A review of side-stream based activators. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125558, 2021.

AFNOR. NFP 18-513: Métakaolin, addition pouzzolanique pour bétons – Addition pour béton hydraulique – Métakaolin – Spécifications et critères de conformité. **Association Française de Normalization**, 2012.

AFS. **About metalcasting**. Disponível em: <<https://www.afsinc.org/about-metalcasting>>. Acesso em: 1 ago. 2020.

AKRAM, T.; MEMON, S. A.; OBAID, H. Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 703–712, 2009.

AL-AGHBARI, M. Y.; MOHAMEDZEIN, Y. E. A.; TAHA, R. Stabilisation of desert sands using cement and cement dust. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering**, v. 162, n. 13, p. 145–151, 2009.

AL-MASHHADANI, M. M.; CANPOLAT, O. Effect of various NaOH molarities and various filling materials on the behavior of fly ash based geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120560, 2020.

AL-TABBAA, A.; EVANS, C. W. Pilot in situ auger mixing treatment of a contaminated site – Part 1: Treatability study. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering**, v. 131, n. 1, p. 52–59, 1998.

AL-TABBAA, A.; EVANS, C. W. Laboratory-scale soil mixing of a contaminated site. **Ground Improvement**, v. 3, p. 119–134, 1999.

ALARCON, B.; AGUADO, A.; MANGA, R.; JOSA, A. A Value function for assessing sustainability: Application to industrial buildings. **Sustainability**, v. 3, p. 35–50, 2011.

ALMALKAWI, A. T.; BALCHANDRA, A.; SOROUSHIAN, P. Potential of using industrial wastes for production of geopolymer binder as green construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 220, p. 516–524, 2019.

ALMEIDA, F.; CRISTELO, N.; MIRANDA, T.; VIEIRA, C. S.; LOPES, M. DE L.; CASTRO, F. Alkali-activated fly ashes: Influence of curing conditions on mechanical strength. **U. Porto Journal of Engineering**, v. 3, n. 2, p. 57–67, 2017.

ALONSO-SANTURDE, R.; COZ, A.; VIGURI, J. R.; ANDRÉS, A. Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 27, p. 97–106, 2012.

ALONSO, M. M.; PASKO, A.; GASCÓ, C.; SUAREZ, J. A.; KOVALCHUK, O.; KRIVENKO, P.; PUERTAS, F. Radioactivity and Pb and Ni immobilization in SCM-bearing alkali-activated matrices. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 745–754, 2018.

ALOTAIBI, E.; ARAB, M. G.; ABDALLAH, M.; NASSIF, N.; OMAR, M. Life cycle assessment of biocemented sands using enzyme induced carbonate precipitation (EICP) for soil stabilization applications. **Scientific Reports**, v. 12, p. 6032, 2022.

ALTOÉ, S. P. S.; SALES, A.; MARTINS, C. H. Waste tires and the burning of sugarcane bagasse in the manufacture of concrete pavers (pavers). **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 12, n. 3, p. 608–622, 2019.

AMIN, M.; ATTIA, M. M.; SAAD, I.; ELSAKHAWY, Y.; EL-HASSAN, K. A.; ABDELSALAM, B. Effects of sugarcane bagasse ash and nano eggshell powder on high-strength concrete properties. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01528, 2022.

ANOOP, S. P.; BEEGOM, H.; JOHNSON, J. P.; MIDHULA, J.; T, T. M.; PRASANTH, S.

Potential of Egg shell powder as replacement of Lime in soil stabilization. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 4, n. 8, p. 8–11, 2017.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington: DC. USA, 2017.

APITHANYASAI, S.; SUPAKATA, N.; PAPONG, S. The potential of industrial waste: using foundry sand with fly ash and electric arc furnace slag for geopolymer brick production. **Heliyon**, v. 6, p. e03697, 2020.

ARAÚJO, M. T. DE; TONATTO FERRAZZO, S.; JORDI BRUSCHI, G.; CESAR CONSOLI, N. Mechanical and Environmental Performance of Eggshell Lime for Expansive Soils Improvement. **Transportation Geotechnics**, v. 31, p. 100681, 2021a.

ARAÚJO, M. T. DE; FERRAZZO, S. T.; BRUSCHI, G. J.; CONSOLI, N. C. Mechanical and Environmental Performance of Eggshell Lime for Expansive Soils Improvement. **Transportation Geotechnics**, v. 31, p. 100681, 2021b.

ARAÚJO, N.; CORRÊA-SILVA, M.; MIRANDA, T.; GOMES, A. T.; CASTRO, F.; TEIXEIRA, T.; CRISTELO, N. Unsaturated response of clayey soils stabilised with alkaline aements. **Molecules**, v. 25, p. 2533, 2020.

ARULRAJAH, A.; YAGHOUBI, E.; IMTEAZ, M.; HORPIBULSUK, S. Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and pipe-bedding construction material : Engineering and environmental evaluation. **Sustainable Cities and Society**, v. 28, p. 343–349, 2017.

ASTM. D1557: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))¹. **American Society for Testing and Materials**, p. 1–14, 2012.

ASTM. D4874: Standard Test Method for Leaching Solid Material in a Column Apparatus. **American Society for Testing and Materials**, p. 1–8, 2014.

ASTM. D559/D559M-15: Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. **American Society for Testing and Materials**, p. 1–6, 2015.

ASTM. D5084: Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. **American Society for Testing and Materials**, p. 1–24, 2016.

ASTM. D2487-17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). **American Society for Testing and Materials**, p. 1–10, 2017.

ASTM. D7481: Standard test methods for determining loose and tapped bulk densities of powders using a graduated cylinder. **American Society for Testing and Materials**, p. 1–4, 2018.

ASTM. C618-19: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. **American Society for Testing and Materials**, p. 1–5, 2019a.

ASTM. C511: Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes. **American Society for Testing and Materials**, p. 1–3, 2019b.

ASTM. D2434: Standard test method for permeability of granular soils (Constant Head). **American Society for Testing and Materials**, p. 1–6, 2019c.

ASTM. C39/C39M: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens 1. **American Society for Testing and Materials**, p. 1–8, 2020a.

ASTM. D6739: Standard Test Method for Silica — pH Value. **American Society for Testing and Materials**, p. 1–3, 2020b.

ATSDR. **TOXICOLOGICAL PROFILE FOR BARIUM AND BARIUM COMPOUNDS**. 2. ed. Atlanta, Georgia: U.S Department of Health and Human Services, 2007.

AWOYERA, P.; ADESINA, A. A critical review on application of alkali activated slag as a sustainable composite binder. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, p. e00268, 2019.

- BAHURUDEEN, A.; SANTHANAM, M. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. **Cement & Concrete Composites**, v. 56, p. 32–45, 2015.
- BAKHAREV, T. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1233–1246, 2005.
- BAKIS, R.; KOYUNCU, H.; DEMIRBAS, A. An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures. **Waste Management & Research**, v. 24, p. 269–274, 2006.
- BARROS, F. J. S.; MORENO-TOST, R.; CECILIA, J. A.; LEDESMA-MUNÓZ, A. L.; OLIVEIRA, L. C. C. DE; LUNA, F. M. T.; VIEIRA, R. S. Glycerol oligomers production by etherification using calcined eggshell as catalyst. **Molecular Catalysis**, v. 433, p. 282–290, 2017.
- BASAR, H. M.; AKSOY, N. D. The effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the mechanical, leaching and micro-structural characteristics of ready-mixed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 508–515, 2012.
- BASAR, H. M.; AKSOY, N. D. Pre-treatment of Waste Foundry Sand Via Solidification/Stabilization. **Clean- Soil, Air, Water**, v. 41, n. 1, p. 94–101, 2013.
- BASU, D.; MISRA, A.; PUPPALA, A. J. Sustainability and geotechnical engineering: perspectives and review. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 113, p. 96–113, 2015.
- BECK, K.; BRUNETAUD, X.; MERTZ, J.; AL-MUKHTAR, M. On the use of eggshell lime and tuffeau powder to formulate an appropriate mortar for restoration purposes. **Geological Society**, v. 331, p. 137–145, 2010.
- BENSAIFI, E.; BOUTELDJA, F.; NOUAOURIA, M. S.; BREUL, P. Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl. **Transportation Geotechnics**, v. 20, p. 100244, 2019.
- BERENGUER, R. A.; CAPRARO, A. P. B.; MEDEIROS, M. H. F. DE; CARNEIRO, A. M. P.; OLIVEIRA, R. A. DE. Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 103655, 2020.

- BERGER, R.; HÄNZE, M. Impact of expert teaching quality on novice academic performance in the Jigsaw Cooperative Learning Method. **International Journal of Science Education**, v. 37, n. 2, p. 37–41, 2015.
- BERTOLI, R. F.; CAPUTO, N.; SGORLON, J. G.; GOMES, M. C. S.; MENEZES, M. L. **Estudo da solidificação/estabilização de um resíduo sólido industrial em matrizes de cimento: Avaliação da lixiviabilidade e solubilidade de contaminantes**. XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. **Anais...**Campinas - SP: UNICAMP, 2015
- BHARDWAJ, A.; SHARMA, R. K. Effect of industrial wastes and lime on strength characteristics of clayey soil. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 18, n. 6, p. 1–25, 2020.
- BHARDWAJ, A.; SHARMA, R. K.; SHARMA, A. Stabilization of clayey soil using waste foundry sand and molasses. In: **Sustainable Development Through Engineering Innovations**. [s.l.] Springer Singapore, 2021. p. 641–649.
- BHARDWAJ, B.; KUMAR, P. Waste foundry sand in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 661–674, 2017.
- BHARDWAJ, B.; KUMAR, P. Comparative study of geopolymer and alkali activated slag concrete comprising waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 555–565, 2019.
- BILONDI, M. P.; MOHSEN, M.; TOUFIGH, V. Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass powder – clay geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 417–428, 2018.
- BJØRN, A.; OWSIANIAK, M.; MOLIN, C.; HAUSCHILD, M. Z. LCA history. In: HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. (Eds.). . **Life cycle assessment: Theory and practice**. 1. ed. Switzerland: Springer Nature, 2018. p. 17–30.
- BLAND, J. M.; ALTAMAN, D. G. Statistics notes - Cronbach's alpha. **BMJ**, v. 314, p. 572, 1997.

BOUILLASS, G.; BLANC, I.; PEREZ, P. Step-by-step social life cycle assessment framework: a participatory approach for the identification and prioritization of impact subcategories applied to mobility scenarios. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, p. 2408–2435, 2021.

BRAGAGNOLO, L.; FERRAZZO, S. T.; MUSCOPE, F. P.; KORF, E. P.; LEAL, G. D.; ROSA, C. D. Caracterização de resíduos da fundição de ferro e avaliação de possíveis aplicações na construção civil. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**, v. 50, p. 61–77, 2018.

BRE. **Product Category Rules for Type III environmental product declaration of construction products to EN 15804:2012**. [s.l.] Watford, UK, 2013.

BRUSCHI, G. J.; SANTOS, C. P. DOS; ARAÚJO, M. T. DE; FERRAZZO, S. T.; MARQUES, S.; CONSOLI, N. C. Green stabilization of bauxite tailings: A mechanical study on alkali-activated materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 11, p. 06021007, 2021a.

BRUSCHI, G. J.; SANTOS, C. P.; ARAÚJO, M. T.; CONSOLI, N. C. Green stabilization of bauxite tailings: A mechanical study on alkali-activated materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. In Press, n. April, jan. 2021b.

BRUSCHI, G. J.; SANTOS, C. P. DOS; FERRAZZO, S. T.; ARAÚJO, M. T. DE; CONSOLI, N. C. Parameters controlling loss of mass and stiffness degradation of green stabilized bauxite tailings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, p. 1–21, set. 2021c.

BRUSCHI, G. J.; DOS SANTOS, C. P.; LEVANDOSKI, W. M. K.; FERRAZZO, S. T.; KORF, E. P.; SALDANHA, R. B.; CONSOLI, N. C. Leaching assessment of cemented bauxite tailings through wetting and drying cycles of durability test. **Environmental Science and Pollution Research**, 2022.

BUCHWALD, A.; DOMBROWSKI, K.; WEIL, M. **The influence of calcium content on the performance of geopolymeric binder especially the resistance against acids**. Proceedings of the World Congress Geopolymer. **Anais...**Saint Quentin, France: 2005

CAICEDO, L. A. M.; MONCALEANO, C. J.; CONSOLI, N. C. Alkali-activated red ceramic wastes-carbide lime blend : An alternative alkaline cement manufactured at room temperature room temperature curing. **Journal of Building Engineering**, v. 65, p. 105663, 2023.

CAICEDO, M. A. L. **Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de cerâmica vermelha e cal de carbureto**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

CAIXA. **SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**. Disponível em: <<https://www.caixa.gov.br/site/paginas/downloads.aspx>>. Acesso em: 10 maio. 2022.

CARDOSO, R.; RIBEIRO, D.; NÉRI, R. Bonding effect on the evolution with curing time of compressive and tensile strength of sand-cement mixtures. **Soils and Foundations**, v. 57, n. 4, p. 655–668, 2017.

CASTALDELLI, V. N.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; SORIANO, L.; BARRACHERO, M. V; PAYÁ, J. Use of Slag/Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) Blends in the Production of Alkali-Activated Materials. **Materials**, v. 6, p. 3108–3127, 2013.

CASTALDELLI, V. N.; MORAES, J. C. B.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V; SORIANO, L.; PAYÁ, J.; TASHIMA, M. M. Study of the binary system fly ash/sugarcane bagasse ash (FA/SCBA) in SiO₂/K₂O alkali-activated binders. **Fuel**, v. 174, p. 307–316, 2016.

CATERPILLAR. **Caterpillar Performance Handbook**. 1. ed. Illinois - USA: CATERPILLAR, 2018.

CEMENT AUSTRALIA. **High early strength cement**, 2011.

CETESB. Decisão de Diretoria Nº 152/2007/C/E, de 08 de agosto de 2007. **Companhia de Tecnologia de Saniamento Ambiental**, p. 1–16, 2007.

CHEN, T.; CHEN, J.; HUANG, J. Effects of activator and aging process on the compressive strengths of alkali-activated glass inorganic binders. **Cement and Concrete Composites**, v.

76, p. 1–12, 2017.

CHEREMISINOFF, N. Elemental and structural characterization tests. In: **Polymer Characterization: Laboratory Techniques and Analysis**. 1. ed. [s.l.] Elsevier Science, 1996. p. 43–81.

CML. **CML-IA Characterisation Factors**. Disponível em:

<<https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>>. Acesso em: 10 nov. 2022.

CONAB. Perfil do setor do açúcar e do etanol no Brasil: Safra 2015/16. **Companhia Nacional de Abastecimento**, p. 65, 2019.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: Cana de açúcar - safra 2022/2023. **Companhia Nacional de Abastecimento**, v. 9, n. 2, p. 58, 2022a.

CONAB. **Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar**. Disponível em:

<<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana>>. Acesso em: 10 nov. 2022b.

CONAMA. Resolução N° 460, de 30 de dezembro de 2013. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**, p. 1–2, 2013.

CONSEMA-SC. Resolução Consema N°. 011, de 26 de agosto de 2008. **Conselho Estadual do Meio Ambiente**, p. 1–14, 2008.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; CARRARO, J. A. H.; HEINECK, K. S. Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 9, p. 774–782, 2001.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, p. 197–205, 2007.

CONSOLI, N. C.; VIANA, A.; CRUZ, R. C.; HEINECK, K. S. Fundamental Parameters for the Stiffness and Strength Control of Artificially Cemented Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 9, p. 1347–1353, 2009a.

CONSOLI, N. C.; DA FONSECA, A. V.; CRUZ, R. C.; HEINECK, K. S. Fundamental

Parameters for the Stiffness and Strength Control of Artificially Cemented Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, p. 1347–1353, 2009b.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Artificially Cemented Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 5, p. 759–763, 2010.

CONSOLI, N. C.; VIANA, A.; CRUZ, R. C.; SILVA, S. R. Voids/cement ratio controlling tensile strength of cement-treated soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 11, p. 1126–1131, 2011.

CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V.; SILVA, S. R.; CRUZ, R. C.; FONINI, A. Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. **Géotechnique**, v. 62, n. 2, p. 177–183, 2012.

CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; DA ROCHA, C. G.; CRUZ, R. C. Key parameters for strength control of rammed sand – cement mixtures: Influence of types of portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 591–597, 2013.

CONSOLI, N. C.; WINTER, D.; LEON, H. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C. Durability, Strength, and Stiffness of Green Stabilized Sand. v. 144, n. 9, p. 1–10, 2018a.

CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; GONZÁLEZ, L. E.; BITTAR, E. J.; CUISINIER, O. Impact of severe climate conditions on loss of mass, strength, and stiffness of compacted fine-grained soils – Portland cement blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 8, p. 04018174, 2018b.

CONSOLI, N. C.; MARIN, E. J. B.; SAMANIEGO, R. A. Q.; HEINECK, K. S.; JOHANN, A. D. R. Use of Sustainable Binders in Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 2, p. 06018023, 2019a.

CONSOLI, N. C.; LEON, H. B.; CARRETTA, M. DA S.; DARONCO, J. V. L.; LOURENÇO, D. E. The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends. **Soils and Foundations**, v. 59, p. 1428–1439, 2019b.

CONSOLI, N. C.; CAICEDO, A. M. L.; SALDANHA, R. B.; ILHO SCHEUERMANN, C. H.; ACOSTA, C. J. M. Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 11, p. 06020018–7, 2020a.

CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; CARLOS, H.; FILHO, S.; MIGUEL, G. D.; NETO, A. T.; ANDREGHETTO, D. Durability assessment of soil-pozzolan-lime blends through ultrasonic-pulse velocity test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 8, p. 04020223, 2020b.

CONSOLI, N. C.; DAASSI-GLI, C. A. P.; RUVIER, C. A.; LOTERO, A.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MONCALEANO, C. J.; LOURENÇO, D. E. Lime-ground glass-sodium hydroxide as a enhanced sustainable binder stabilizing silica sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 147, n. 10, p. 06021011, 2021a.

CONSOLI, N. C.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; LEON, H. B.; CARRETTA, M. DA S.; CORTE, M. B.; CORDEIRO, R. E.; CABALLERO, R. D.; LOURENÇO, D. E. General relationships controlling loss of mass , stiffness and strength of sustainable binders amended sand. **Transportation Geotechnics**, v. 27, p. 100473, 2021b.

CONSOLI, N. C.; CARRETTA, M. DA S.; FESTUGATO, L.; LEON, H. B.; TOMASI, L. F.; HEINECK, K. S. Ground waste glass – carbide lime as a sustainable binder stabilising three different silica sands. **Géotechnique**, v. 71, n. 6, p. 480–493, 2021c.

CONSOLI, N. C.; SILVANO, L. W.; LOTERO, A.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MONCALEANO, C. J.; CRISTELO, N. Key parameters establishing alkali activation effects on stabilized rammed earth. **Construction and Building Materials**, v. 345, p. 128299, 2022.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA, R. B. Variables Governing Strength of Compacted Soil – Fly Ash – Lime Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 4, p. 432–440, 2011.

CONSOLI, N. C.; LOPES, S.; HEINECK, K. S. Key Parameters for the Strength Control of Lime Stabilized Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, p. 210–216, 2009.

CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; VILLALBA, N. M. K. Durability, strength , and stiffness of dispersive clay – lime blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p.

04016124, 2016.

COPPIO, G. J. L.; LIMA, M. G. DE; LENCIONI, J. W.; CIVIDANES, L. S.; DYER, P. P. O. L.; SILVA, S. A. Surface electrical resistivity and compressive strength of concrete with the use of waste foundry sand as aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 514–521, 2019.

CORNELIS, G.; JOHNSON, C. A.; GERVEN, T. VAN; VANDECASTEELE, C. Leaching mechanisms of oxyanionic metalloid and metal species in alkaline solid wastes: A review. **Applied Geochemistry**, v. 23, p. 955–976, 2008.

CORRÊA-SILVA, M.; MIRANDA, T.; ROUAINIA, M.; ARAÚJO, N.; GLENDINNING, S.; CRISTELO, N. Geomechanical behaviour of a soft soil stabilised with alkali-activated blast-furnace slags. **Journal of Cleaner Production**, v. 267, n. 10, p. 122017, 2020.

COSTA, L. M.; ALMEIDA, N. G. S.; HOUMARD, M.; CETLIN, P. R.; SILVA, G. J. B.; AGUILAR, M. T. P. Influence of the addition of amorphous and crystalline silica on the structural properties of metakaolin-based geopolymers. **Applied Clay Science**, v. 215, p. 106312, 2021.

COUDERT, E.; PARIS, M.; DENELEE, D.; RUSSO, G.; TARANTINO, A. Use of alkali activated high-calcium fly ash binder for kaolin clay soil stabilisation: Physicochemical evolution. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 539–552, 2019.

COUNCIL, E. Council Decision 2003/33/EC of 19 December 2002. **Official Journal of the European Communities**, v. 16, n. 11, p. 27–49, 2003.

CRIADO, M.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; DE LA TORRE, A. G.; ARANDA, M. A. G.; PALOMO, A. An XRD study of the effect of the SiO₂/Na₂O ratio on the alkali activation of fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 671–679, 2007.

CRIADO, M.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; SOBRADOS, I.; PALOMO, A.; SANZ, J. Effect of relative humidity on the reaction products of alkali activated fly ash. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 32, p. 2799–2807, 2012.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkali activation of fly ashes.

- Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. **Fuel**, v. 84, p. 2048–2054, 2005.
- CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; FERNANDES, L.; PINTO, A. T. Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 167–174, 2012a.
- CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; MIRANDA, T.; OLIVEIRA, D.; SILVA, R. Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 727–735, 2012b.
- CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; FERNANDES, L.; PINTO, A. T. Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation. **Acta Geotechnica**, v. 8, p. 395–405, 2013.
- CRISTELO, N.; RIVERA, J.; MIRANDA, T.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Stabilisation of a plastic soil with alkali activated cements developed from industrial wastes. **Sustainability**, v. 13, p. 4501, 2021.
- CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; PINTO, A. T. Deep soft soil improvement by alkaline activation. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, v. 164, n. 2, p. 73–82, 2011.
- CRONBACK, L. J. Coefficient alpha and the internal structure of tests*. **Psychometrika**, v. 16, n. 3, p. 1–38, 1951.
- DA COSTA, T. P.; QUINTEIRO, P.; TARELHO, L. A. C.; ARROJA, L.; DIAS, A. C. Life cycle assessment of woody biomass ash for soil amelioration. **Waste Management**, v. 101, p. 126–140, 2020.
- DA FONSECA, A. V.; CRUZ, R. C.; CONSOLI, N. C. Strength Properties of Sandy Soil – Cement Admixtures. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 27, p. 681–686, 2009.
- DA ROCHA, C. G.; PASSUELLO, A.; CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; KANAZAWA, N. M. Life cycle assessment for soil stabilization dosages: A study for the Paraguayan Chaco. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 309–318, 2016.

DA ROCHA, C. G.; SALDANHA, R. B.; TONINI DE ARAÚJO, M.; CONSOLI, N. C.

Social and environmental assessments of Eco-friendly Pavement alternatives. **Construction and Building Materials**, v. 325, p. 126736, 2022.

DAMIANS, I. P.; BATHURST, R. J.; ADROGUER, E. G.; JOSA, A.; LLORET, A.

Environmental assessment of earth retaining wall structures. **Environmental Geotechnics**, v. 4, n. 6, p. 415–431, 2015.

DAS, B. M.; YEN, S. C.; DASS, R. N. Brazilian tensile strength test of lightly cemented sand. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 32, p. 166–171, 1995.

DAVIDOVITS, J. Mineral polymers and methods of making them. **U.S. Patent**, v. 349, n. 4, 1982.

DAVIDOVITS, J. Why Alkali-Activated Materials (AAM) are NOT Geopolymers? **Geopolymer Institute Library**, p. 1–10, 2018.

DE VARGAS, A. S.; DAL MOLIN, D. C.; MASUERO, Â. B.; VILELA, A. C.; CASTRO-GOMES, J.; DE GUTIERREZ, R. M. Strength development of alkali-activated fly ash produced with combined NaOH and $Ca(OH)_2$ activators. **Cement & Concrete Composites**, v. 53, p. 341–349, 2014.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicações e preparação de amostras: Materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. CEMM ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DEJA, J. Immobilization of Cr^{6+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} and Pb^{2+} in alkali-activated slag binders. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1971–1979, 2002.

DNIT. DNIT 143: Pavimentação – Base de solo-cimento - Especificação de serviço. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**, p. 1–10, 2010.

DOMBROWSKI, K.; BUCHWALD, A.; WEIL, M. The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers. **Advances in Geopolymer Science & Technology**, v. 42, p. 3033–3043, 2007.

DONG, Y. H.; NG, S. T. A social life cycle assessment model for building construction in Hong Kong. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, p. 1166–1180, 2015.

DU, Y.; BO, Y.; JIN, F.; LIU, C. Durability of reactive magnesia- activated slag-stabilized low plasticity clay subjected to drying – wetting cycle. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 20, n. 2, p. 215–230, 2015.

DU, Y.; YU, B.; LIU, K.; JIANG, N.; ASCE, S. M.; LIU, M. D. Physical, hydraulic, and mechanical properties of clayey soil stabilized by lightweight alkali-activated slag geopolymer. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 2, p. 04016217, 2017.

DURKEE, J. B. Cleaning with Solvents. In: KOHLI, R.; MITTAL, K. L. (Eds.). . **Developments in Surface Contamination and Cleaning**. [s.l.] William Andrew, 2008. v. 1p. 479–577.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; DEVENTER, J. S. J. VAN. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 2917–2933, 2007.

DYER, P. P. O. L.; GEIMBA, M.; LIMA, D.; MIGUEL, L.; KLINSKY, G.; SILVA, S. A.; COPPIO, G. J. L.; COPPIO, G. J. L. Environmental characterization of Foundry Waste Sand (WFS) in hot mix asphalt (HMA) mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 474–484, 2018.

ECKBO, C.; OKKENHAUG, G.; HALE, S. E. The effects of soil organic matter on leaching of hexavalent chromium from concrete waste: Batch and column experiments. **Journal of Environmental Management**, v. 309, p. 114708, 2022.

ES. CEN/TS 14429: Characterization of waste. Leaching behaviour test. Influence of pH on leaching with initial acid/base addition. **European Standards**, 2015a.

ES. EN 14997: Characterization of waste. Leaching behaviour test. Influence of pH on leaching with continuous pH control. **European Standards**, v. 1, 2015b.

ESTOKOVA, A.; PALASCAKOVA, L.; KANUCHOVA, M. Study on Cr (VI) Leaching from Cement and Cement Composites. **International Journal of Environmental Research**

and **Public Health**, v. 15, p. 824, 2018.

ETXEBERRIA, M.; PACHECO, C.; MENESES, J. M.; BERRIDI, I. Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1594–1600, 2010.

FAOSTAT. **Leading egg producing countries worldwide in 2018**. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/263971/top-10-countries-worldwide-in-egg-production>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

FAOSTAT. **Countries by commodity: Sugar cane**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity>. Acesso em: 29 maio. 2021.

FARIA, K. C. P.; GURGEL, R. F.; HOLANDA, J. N. F. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. **Journal of Environmental Management**, v. 101, p. 7–12, 2012.

FASIHNIKOUTALAB, M. H.; POURAKBAR, S.; BALL, R. J.; UNLUER, C.; CRISTELO, N. Sustainable soil stabilisation with ground granulated blast-furnace slag activated by olivine and sodium hydroxide. **Acta Geotechnica**, v. 15, n. 7, p. 1981–1991, 2020.

FATHOLLAHI, A.; COUPE, S. J. Life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) of road drainage systems for sustainability evaluation: Quantifying the contribution of different life cycle phases. **Science of the Total Environment**, v. 776, p. 145937, 2021.

FEAM. **Inventário de resíduos sólidos industriais: ano base 2017**. Belo Horizonte: FEAM, 2018.

FENG, Y.-S.; ZHOU, S.-J.; XIA, W.-Y.; DU, Y.-J. Solidify/stabilise a heavy metal-contaminated soil using a novel steel slag-based binder. **Environmental Geotechnics**, p. 1–16, 2020.

FEPAM. Caracterização de solos, potencial erosivo e capacidade de uso agrícola. **Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler**, p. 33, 2003.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. M. **Cementos de escorias activadas alcalinamente:**

Influencia de las variables y modelización del proceso. [s.l.] Universidad Autónoma de Madrid, 2000.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; CRIADO, M. Alkali activated fly ash binders. A comparative study between sodium and potassium activators. **Materiales de Construcción**, v. 56, n. 281, p. 51–65, 2006.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F. Setting of alkali-activated slag cement. Influence of activator nature. **Advances in Cement Research**, v. 13, n. 3, p. 115–121, 2001.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F. Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: Influence of the type of alkaline activator. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 86, n. 8, p. 1389–1394, 2003.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F.; FERNÁNDEZ-CARRASCO, L. Alkaline-sulphate activation process of a spanish blast furnace slag. **Materiales de Construcción**, v. 46, n. 241, p. 23–37, 1996.

FERNANDO, S.; GUNASEKARA, C.; LAW, D. W.; NASVI, M. C. M.; SETUNGE, S.; DISSANAYAKE, R. Life cycle assessment and cost analysis of fly ash – rice husk ash blended alkali-activated concrete. **Journal of Environmental Management**, v. 295, p. 113140, 2021.

FERRAZ, E.; GAMELAS, J. A. F.; COROADO, J.; MONTEIRO, C.; ROCHA, F. Eggshell waste to produce building lime: calcium oxide reactivity, industrial, environmental and economic implications. **Materials and Structures**, v. 51, n. 115, p. 1–14, 2018.

FERREIRA, F. A.; DESIR, J. M.; DE LIMA, G. E. S.; PEDROTI, L. G.; DE CARVALHO, J. M. F.; LOTERO, A.; CONSOLI, N. C. Evaluation of mechanical and microstructural properties of eggshell lime/rice husk ash alkali-activated cement. **Construction and Building Materials**, v. 364, p. 129931, 2023.

FINLEX. 843: Government Decree on the Recovery of Certain Wastes in Earth Construction. **Finlex**, p. 1–14, 2017.

FIROOZI, A. A.; OLGUN, C. G.; FIROOZI, A. A.; BAGHINI, M. S. Fundamentals of soil

stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, p. 8–26, 2017.

FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 490–496, 2011.

GAO, Y.; XU, C. Synthesis of dimethyl carbonate over waste eggshell catalyst. **Catalysis Today**, v. 190, p. 107–111, 2012.

GARCIA-LODEIRO, I.; MACPHEE, D. E.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Effect of alkalis on fresh C – S – H gels. FTIR analysis. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 147–153, 2009.

GARCIA-LODEIRO, I.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; MACPHEE, D. E. Effect of calcium additions on N–A–S–H cementitious gels. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 93, n. 7, p. 1934–1940, 2010a.

GARCIA-LODEIRO, I.; FERNÁNDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, A.; MACPHEE, D. E. Effect on fresh C-S-H gels of the simultaneous addition of alkali and aluminium. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 27–32, 2010b.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; MACPHEE, D. E. Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 923–931, 2011.

GARCIA-LODEIRO, I.; CARCELEN-TABOADA, V.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Manufacture of hybrid cements with fly ash and bottom ash from a municipal solid waste incinerator. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 218–226, 2016.

GARCIA-LODEIRO, I.; TABOADA, V. C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, Á. Recycling industrial by-products in hybrid cements: Mechanical and microstructure characterization. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, p. 1433–1440, 2017.

GARCIA-LODEIRO, I.; CRISTELO, N.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Use of industrial by-products as alkaline cement activators. **Construction and Building Materials**, v. 253, p. 119000, 2020.

GARCIA-LODEIRO, I.; GORACCI, G.; DOLADO, J. S.; BLANCO-VARELA, M. T. Mineralogical and microstructural alterations in a portland cement paste after an accelerated decalcification process. **Cement and Concrete Research**, v. 140, p. 106312, 2021.

GARCÍA-LODEIRO, I.; MALTSEVA, O.; PALOMO, Á.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Hybrid alkaline cements. Part I: Fundamentals. **Romanian Journal of Materials**, v. 42, n. 4, p. 330–335, 2012.

GARCÍA-LODEIRO, I.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash – portland cement blends. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 112–122, 2013.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. In: **Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2015. p. 19–47.

GARCIA, J. C. C.; SPERLING, E. VON. Greenhouse gas emissions from sugar cane ethanol: Estimate considering current different production scenarios in Minas Gerais, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1033–1049, 2017.

GARRIDO, S. R. Social Life-Cycle Assessment: An introduction. In: ABRAHAM, M. A. (Ed.). **Encyclopedia of Sustainable Technologies**. 1. ed. [s.l.] Elsevier, 2017. v. 1p. 253–265.

GAUTAM, P. K.; KALLA, P.; JETHOO, A. S.; AGRAWAL, R. Sustainable use of waste in flexible pavement: A review. **Construction and Building Materials**, v. 180, p. 239–253, 2018.

GHADIR, P.; RANJBAR, N. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 361–371, 2018.

GIELS, M.; IACOBESCU, R. I.; CAPPUYNS, V.; PONTIKES, Y.; ELSEN, J. Understanding the leaching behavior of inorganic polymers made of iron rich slags. **Journal of Cleaner Production journal**, v. 238, p. 117736, 2019.

GIRI, R. K.; REDDY, K. R. **Sustainability assessment of two alternate earth-retaining structures**. (M. Iskander et al., Eds.) International Foundations Congress and Equipment.

Anais...Texas: ASCE, 2015

GLUKHOVSKY, V. **Ancient, modern and future concretes**. First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. **Anais...**Kiev, Ukraine: 1994

GOEDKOOP, M.; OELE, M.; VIEIRA, M.; LEIJTING, J.; PONSIOEN, T.; MEIJER, E. **SimaPro Tutorial**. 5.3 ed. San Francisco, USA: Creative Commons, 2016.

GOEDKOOP, M. J.; DE BEER, I. .; HARMENS, R.; SALING, P.; FLOREA, A.; HETTINGER, A. L.; INDRANE, D.; VISSER, D.; MORAO, A.; MUSOKE-FLORES, E. ALVARADO, C.; RAWAT, I.; SCHENKER, U.; HEAD, M.; COLLOTTA, M.; ANDRO, T.; VIOT, J.-F.; WHATELET, A. **Handbook for Product Social Impact Assessment**. 5. ed. Amersfoort: [s.n.].

GOPINATH, A.; BAHURUDEEN, A.; APPARI, S.; NANTHAGOPALAN, P. A circular framework for the valorisation of sugar industry wastes: Review on the industrial symbiosis between sugar, construction and energy industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 89–108, 2018.

GOVINDARAJU, K. Compilation of working values and sample description for 272 geostandards. **Geostandards and Geoanalytical Research**, v. 13, p. 1–113, 1989.

GRI. G3 Sustainability reporting guidelines. **Global Reporting Initiative**, 2006.

GUNEY, Y.; DURSUN, Y.; YALCIN, M.; TUNCAN, A.; DONMEZ, S. Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 8–9, p. 1705–1713, 2010.

GUNEY, Y.; AYDILEK, A. H.; DEMIRKAN, M. M. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. **Waste Management**, v. 26, p. 932–945, 2006.

HALIM, C. E.; SCOTT, J. A.; NATAWARDAYA, H.; AMAL, R.; BEYDOUN, D.; LOW, G. Comparison between acetic acid and Landfill Leachates for the Leaching of Pb (II), Cd (II), As (V), and Cr (VI) from cementitious wastes. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 3, p. 3977–3983, 2004.

HASAN, H.; DANG, L.; KHABBAZ, H.; FATAHI, B.; TERZAGHI, S. Remediation of Expansive Soils Using Agricultural Waste Bagasse Ash. **Procedia Engineering**, v. 143, p. 1368–1375, 2016.

HERTWICH, E. G.; MATELES, S. F.; PEASE, W. S.; MCKONE, T. E. Human toxicity potentials for life-cycle assessment and toxics release inventory risk screening. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 20, n. 4, p. 928–939, 2001.

HJ. HJ/T299: Solid waste-Extraction procedure for leaching toxicity-Sulphuric acid & nitric acid method. **Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China**, p. 1–6, 2007a.

HJ. HJ/T300: Solid Waste-Extraction Procedure for Leaching Toxicity—Acetic Acid Buffer Solution Method. **Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China**, 2007b.

HONG, J.; CHEN, W.; WANG, Y.; XU, C.; XU, X. Life cycle assessment of caustic soda production: a case study in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 113–120, 2014.

HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; SUDDEEPPONG, A. Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1521–1531, 2011.

HOSSAIN, M. M.; KARIM, M. R.; ELAHI, M. M. A.; ISLAM, M. N.; ZAIN, M. F. M. Long-term durability properties of alkali-activated binders containing slag, fly ash, palm oil fuel ash and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 119094, 2020.

HOSSAIN, M. U.; POON, C. S.; DONG, Y. H.; LO, I. M. C.; CHENG, J. C. P. Development of social sustainability assessment method and a comparative case study on assessing recycled construction materials. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, p. 1654–1674, 2018.

HOY, M.; HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; CHINKULKIJNIWAT, A.; ARULRAJAH, A. Recycled asphalt pavement – fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic leaching investigations. **Science of the Total Environment**, v. 573, p. 19–26, 2016.

- HUANG, T. C. X-Ray Fluorescence. In: BRUNDLE, R.; EVANS JR., C.; WILSON, S. (Eds.). . **Encyclopedia of Materials Characterization**. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 1992. p. 338–348.
- HUGHES, P.; GLENDINNING, S. Deep dry mix ground improvement of a soft peaty clay using blast furnace slag and red gypsum Paul. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 37, p. 205–216, 2004.
- HUGHES, P. N.; GLENDINNING, S.; MANNING, D. A. C.; WHITE, M. L. Use of red gypsum in soil mixing engineering applications. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering**, v. 164, p. 223–234, 2011.
- HUNKELER, D. D.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G.; CIROTH, A. **Environmental life cycle costing**. 1. ed. Pensacola: CRC Press, 2008.
- HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 7, p. 668–675, 2009.
- IEA; WBCSD. **Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. 1. ed. Paris: International Energy Agency, 2018.
- IGE, O. E.; OLANREWaju, O. A.; DUFFY, K. J.; COLLINS, O. C. Environmental impact analysis of Portland cement (CEM1) using the midpoint method. **Energies**, v. 15, p. 2708, 2022.
- IQBAL, M. F.; LIU, Q.; AZIM, I.; ZHU, X.; YANG, J.; JAVED, M. F.; RAUF, M. Prediction of mechanical properties of green concrete incorporating waste foundry sand based on gene expression programming. **Journal of Hazardous Materials**, v. 384, p. 121322, 2020.
- ISO. ISO 14040: Environmental management - life cycle assessment - principles and frameworks. **International Organization for Standardization**, p. 30, 2006a.
- ISO. ISO 14044: Environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines. **International Organization for Standardization**, p. 56, 2006b.

ISO. ISO 26000: Guidelines for Social Responsibility. **International Organization for Standardization**, v. 1, p. 106, 2010.

IWG. **Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990**. [s.l.] Interagency Working Group, 2021.

JABER, H. A.; MAHDI, R. S.; HASSAN, A. K. Influence of eggshell powder on the Portland cement mortar properties. **Materials Today: Proceedings**, v. 20, p. 391–396, 2020.

JAGADESH, P.; MURTHY, A. R.; MURUGESAN, R. Effect of processed sugar cane bagasse ash on mechanical and fracture properties of blended mortar. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120846, 2020.

JAMIESON, E.; MCLELLAN, B.; RIESSEN, A. VAN; NIKRAZ, H. Comparison of embodied energies of Ordinary Portland Cement with Bayer-derived geopolymer products. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 112–118, 2015.

JANSSENS, M. Fundamental measurement techniques. In: APTE, V. B. (Ed.). . **Flammability Testing of Materials Used in Construction, Transport and Mining**. [s.l.] Woodhead Publishing, 2006. p. 22–62.

JOLLIET, O.; MÜLLER-WENK, R.; BARE, J.; BRENT, A.; GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; ITSUBO, N.; PEÑA, C.; PENNINGTON, D.; POTTING, J.; REBITZER, G.; STEWART, M. The LCIA Midpoint-damage Framework of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 9, n. 6, p. 394–404, 2004.

KAMSEU, E.; MOUNGAM, L. M. B.; CANNIO, M.; BILLONG, N.; CHAYSUWAN, D.; MELO, U. C.; LEONELLI, C. Substitution of sodium silicate with rice husk ash-NaOH solution in metakaolin based geopolymer cement concerning reduction in global warming. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3050–3060, 2017.

KEULEN, A.; ZOMEREN, A. VAN; DIJKSTRA, J. J. Leaching of monolithic and granular alkali activated slag-fly ash material , as a function of the mixture design. **Waste Management**, v. 78, p. 497–508, 2018.

KEWAL. Development of foundry sand based geopolymer concrete. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 5, n. 11, p. 1–7, 2017.

KHATIB, J. M.; HERKI, B. A.; KENAI, S. Capillarity of concrete incorporating waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 867–871, 2013.

KLEINERT, T. R. **Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: Contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

KLOEPFFER, W. State-of-the-art in life cycle sustainability assessment (LCSA): Life cycle sustainability assessment of products. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 2, p. 89–95, 2008.

KOMKOVA, A.; HABERT, G. Environmental impact assessment of alkali-activated materials: Examining impacts of variability in constituent production processes and transportation. **Construction and Building Materials**, v. 363, p. 129032, 2023.

KOMONWEERAKET, K.; CETIN, B.; BENSON, C. H.; AYDILEK, A. H.; EDIL, T. B. Leaching characteristics of toxic constituents from coal fly ash mixed soils under the influence of pH. **Waste Management**, v. 38, p. 174–184, 2015a.

KOMONWEERAKET, K.; CETIN, B.; AYDILEK, A. H.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Effects of pH on the leaching mechanisms of elements from fly ash mixed soils. **Fuel**, v. 140, p. 788–802, 2015b.

KOVALCHUCK, G.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development – Part II. **Fuel**, v. 86, p. 315–322, 2007.

KRIVENKO, P. Why Alkaline Activation – 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. **Journal of Ceramic Science and Technology**, v. 334, p. 323–334, 2017.

KRIVENKO, P.; KOVALCHUK, O.; PASKO, A.; CROYMANS, T.; HULT, M.; LUTTER, G.; VANDEVENNE, N.; SCHREURS, S.; SCHROEYERS, W. Development of alkali activated cements and concrete mixture design with high volumes of red mud. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 819–826, 2017.

KRIVENKO, P. V.; KOVALCHUK, G. Y. Directed synthesis of alkaline aluminosilicate

minerals in a geocement matrix. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 2944–2952, 2007.

KUMAR, P.; PALIWAL, M. C.; JAIN, A. K. Stabilization of sub grade soil by using foundry sand waste. **International Journal of Engineering Sciences & Research Technology**, v. 5, n. 9, p. 300–308, 2016.

KUMAR, R.; MURTY, H. R.; GUPTA, S. K.; DIKSHIT, A. K. An overview of sustainability assessment methodologies. **Ecological Indicators**, v. 15, n. 1, p. 281–299, 2012.

KVECH, S.; EDWARDS, M. Solubility controls on aluminum in drinking water at relatively low and high pH. **Water Research**, v. 36, p. 4356–4368, 2002.

LANGDON, D. **Life cycle costing (LCC) as a contribution to sustainable construction: a common methodology, Final Report European Commission**, Brussels, 2007.

LAVEGLIA, A.; SAMBATARO, L.; UKRAINCZYK, N.; BELIE, N. DE; KOENDERS, E. Hydrated lime life-cycle assessment: Current and future scenarios in four EU countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 369, p. 133224, 2022.

LEAL, D.; WINTER, M. G.; SEDDON, R.; NETTLETON, I. M. A Comparative life cycle assessment of innovative highway slope repair techniques. **Transportation Geotechnics**, v. 22, p. 100322, 2020.

LEI, J.; LAW, W. W.; YANG, E. Effect of calcium hydroxide on the alkali-silica reaction of alkali-activated slag mortars activated by sodium hydroxide. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121868, 2021.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 1341–1349, 2010.

LI, X.; ZHENG, Y. Using LCA to research carbon footprint for precast concrete piles during the building construction stage: A China study. **Journal of Cleaner Production**, v. 245, p. 118754, 2019.

LIN, D.-F.; LUO, H.-L.; LIN, J.-D.; ZHUANG, M.-L. Characterizations of temperature effects on sintered ceramics manufactured with waste foundry sand and clay. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, p. 127–136, 2018.

- LIN, Y.; XU, D.; ZHAO, X. Effect of soda residue addition and its chemical composition on physical properties and hydration products of soda residue-activated slag. **Materials**, v. 13, p. 1789, 2020.
- LOGANAYAGAN, S.; MOHAN, N. C.; DHIVYABHARATHI, S. Sugarcane bagasse ash as alternate supplementary cementitious material in concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 1004–1007, 2021.
- LOTERO, A.; CONSOLI, N. C.; MONCALEANO, C. J.; NETO, A. T.; KOESTER, E. Mechanical properties of alkali-activated ground waste glass-carbide lime blends for geotechnical uses. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 10, p. 04021284, 2021.
- MACIEL, M. H.; SOARES, G. S.; ROMANO, R. C. DE O.; CINCOTTO, M. A. Monitoring of Portland cement chemical reaction and quantification of the hydrated products by XRD and TG in function of the stoppage hydration technique. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 136, p. 1269–1284, 2019.
- MAHEDI, M.; CETIN, B.; DAYIOGLU, A. Y. Leaching behavior of aluminum, copper, iron and zinc from cement activated fly ash and slag stabilized soils. **Waste Management**, v. 95, p. 334–355, 2019.
- MAHEDI, M.; CETIN, B.; DAYIOGLU, A. Y. Effect of cement incorporation on the leaching characteristics of elements from fly ash and slag treated soils. **Journal of Environmental Management**, n. 253, p. 109720, 2020.
- MARTAUZ, P.; JANOTKA, I.; STRIGÁC, J.; BACUVCÍK, M. Fundamental properties of industrial hybrid cement: utilization in ready-mixed concretes and shrinkage-reducing applications. **Materiales de Construcción**, v. 66, n. 322, p. e084, 2016.
- MARTINEZ-LOPEZ, R.; ESCALANTE-GARCIA, J. I. Alkali activated composite binders of waste silica soda lime glass and blast furnace slag: Strength as a function of the composition. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 119–129, 2016.
- MASTELLA, M. A.; GISLON, E. S.; PELISSER, F.; RICKEN, C.; DA SILVA, L.; ANGIOLETTO, E.; MONTEDO, O. R. K. Mechanical and toxicological evaluation of

concrete artifacts containing waste foundry sand. **Waste Management**, v. 34, n. 8, p. 1495–1500, 2014.

MATOS, P. R. DE; MARCON, F. M.; SCHANKOSKI, R. A.; PRUDÊNCIO JR, L. R. Novel applications of waste foundry sand in conventional and dry-mix concretes. **Journal of Environmental Management**, v. 244, p. 294–303, 2019.

MATOS, P. R. DE; PILAR, R.; BROMERCHENKEL, L. H.; SCHANKOSKI, R. A.; GLEIZE, P. J. P.; BRITO, J. DE. Self-compacting mortars produced with fine fraction of calcined waste foundry sand (WFS) as alternative filler: Fresh-state, hydration and hardened-state properties. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119871, 2020.

MAZA-IGNACIO, O. T.; JIMÉNEZ-QUERO, V. G.; GUERRERO-PAZ, J.; MONTES-GARCÍA, P. Recycling untreated sugarcane bagasse ash and industrial wastes for the preparation of resistant, lightweight and ecological fired bricks. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117314, 2020.

MAZHAR, S.; GUHARAY, A.; KAR, A. Stabilization of expansive clayey soil with alkali activated binders. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, p. 6657–6677, 2020.

MCLELLAN, B. C.; WILLIAMS, R. P.; LAY, J.; RIESSEN, A. VAN; CORDER, G. D. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 1080–1090, 2011.

MEDINA-MARTOS, E.; GÁLVEZ-MARTOS, J.-L.; ALMARZA, J.; LIRIO, C.; IRIBARREN, D.; VALENTE, A.; DUFOUR, J. Environmental and economic performance of carbon capture with sodium hydroxide. **Journal of CO2 Utilization**, v. 60, p. 101991, 2022.

MELLADO, A.; PÉREZ-RAMOS, M. I.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; PAYÁ, J. Resistance to acid attack of alkali-activated binders: Simple new techniques to measure susceptibility. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 355–366, 2017.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, R. A. Avaliação de impacto do ciclo de vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160–175, 2016.

MIAO, S.; SHEN, Z.; WANG, X.; LUO, F.; HUANG, X.; WEI, C. Stabilization of highly expansive black cotton soils by means of geopolymerization. **Journal of Materials in Civil**

Engineering, v. 29, n. 10, p. 04017170, 2017.

MILLÁN-CORRALES, G.; GONZÁLEZ-LÓPEZ, J. R.; PALOMO, A.; FERNANDEZ-JIMÉNEZ, A. Replacing fly ash with limestone dust in hybrid cements. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118169, 2020.

MILLER, S. A.; MYERS, R. J. Environmental Impacts of Alternative Cement Binders. **Environmental Science & Technology**, v. 54, p. 677–686, 2020.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. 2. ed. Hoboken, New Jersey: Prentice Hall, 2002.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017.

MORETTI, J. P.; NUNES, S.; SALES, A. Self-compacting concrete incorporating sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 635–649, 2018.

MULUGETA, M.; ENGELSEN, C. J.; WIBETOE, G.; LUND, W. Charge-based fractionation of oxyanion-forming metals and metalloids leached from recycled concrete aggregates of different degrees of carbonation: A comparison of laboratory and field leaching tests. **Waste Management**, v. 31, n. 2, p. 253–258, 2011.

MURILLO, L. M.; DELVASTO, S.; GORDILLO, M. A study of a hybrid binder based on alkali-activated ceramic tile wastes and portland cement. In: SAVASTANO JUNIO, H.; FIORELLI, J.; SANTOS, S. F. DOS (Eds.). . **Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites**. 1. ed. [s.l.] Elsevier Ltd, 2017. p. 291–312.

NAGARAJU, T. V; SUNIL, B. M.; CHAUDHARY, B. Swell-compressibility behavior of geopolymer blended expansive clays. In: HAZARIKA, H. et al. (Eds.). . **Advances in sustainable construction and resource management**. 1. ed. Singapore: Springer, 2021. p. 495–500.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N.; RAMME, B. W.; CANPOLAT, F. Effects of fly ash and foundry sand on performance of architectural precast concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 7, p. 851–859, 2012.

NASEM. **Valuing Climate Damages: Updating Estimation of the Social Cost of Carbon Dioxide**. 1. ed. Washington: The National Academies Press, 2017.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL COMMITTEE ON TOXICOLOGY. **Emergency and continuous exposure limits for selected airborne contaminants**. 2. ed. Washington, USA: National Academies Press, 1984.

NAVARRO-BLASCO, I.; FERNÁNDEZ, J. M.; DURAN, A.; SIRERA, R.; ÁLVAREZ, J. I. A novel use of calcium aluminate cements for recycling waste foundry sand (WFS). **Construction and Building Materials journal**, v. 48, p. 218–228, 2013.

NEIKOV, O. D.; YEFIMOV, N. A. Powder Characterization and Testing. In: **Handbook of Non-Ferrous Metal Powders**. 2. ed. [s.l.] Elsevier Ltd., 2019. p. 3–62.

NEN. 12457-2: Characterisation of waste. Leaching. Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges. One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction). **Comite European de Normalisation**, v. 2, 2002.

NEN. 7375: Leaching characteristics - Determination of the leaching of inorganic components from moulded or monolithic materials with a diffusion test - Solid earthy and stony materials. **Netherlands Standards**, 2004.

NESS, B.; URBEL-PIRSALU, E.; ANDERBERG, S.; OLSSON, L. Categorising tools for sustainability assessment. **Ecological Economics**, v. 60, p. 498 – 508, 2007.

NOVO, C. C.; SENFF, L.; SEABRA, M. P.; NOVAIS, R. M.; LABRINCHA, J. A. The role of an industrial alkaline wastewater in the alkali activation of biomass fly Ash. **Applied Sciences**, v. 12, p. 3612, 2022.

OBENAU-EMLER, R.; FALAH, M.; ILLIKAINEN, M. Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications. **Construction and Building Materials**, v. 246, p. 118470, 2020.

OGUNKUNLE, C. O.; FATOBA, P. O. Contamination and spatial distribution of heavy metals in topsoil surrounding a mega cement factory. **Atmospheric Pollution Research**, v. 5, n. 2, p. 270–282, 2014.

OLIVEIRA, D. A.; BENELLI, P.; AMANTE, E. R. A literature review on adding value to solid residues: egg shells. **Journal of Cleaner Production**, v. 46, p. 42–47, 2013.

OUELLET-PLAMONDON, C.; HABERT, G. Life cycle assessment (LCA) of alkali-activated cements and concretes. In: PACHECO-TORGAL, F.; CHINDAPRASIRT, P. (Eds.). . **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**. [s.l.] Woodhead Publishing, 2015. p. 663–686.

PACHECO-TORGAL, F.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; CAMÕES, A. F.; JAMSHIDI, M.; DING, Y. Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue? **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 400–405, 2012.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review Part 1 . Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1305–1314, 2008.

PALACIOS, M.; PALOMO, A. Alkali-activated fly ash matrices for lead immobilisation: a comparison of different leaching tests. **Advances in Cement Research**, v. 16, n. 4, p. 137–144, 2004.

PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; KOVALCHUCK, G.; ORDOÑEZ, L. M.; NARANJO, M. C. Opc-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration alkaline hydration. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 2958–2966, 2007.

PALOMO, A.; KRIVENKO, P.; GARCIA-LODEIRO, I.; KAVALEROVA, E.; MALTSEVA, O.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. A review on alkaline activation: new analytical perspectives. **Materiales de Construcción**, v. 64, n. 315, p. e022, 2014.

PALOMO, Á.; ALONSO, S.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkaline activation of fly ashes: NMR study of the reaction products. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 1145, p. 1141–1145, 2004.

PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMENEZ, A.; KOVALCHUCK, G. **Some key factors affecting the alkali activation of fly ash**. II International Symposium of Non-Traditional Cement and Concrete. **Anais...**Brno, Czech Republic: 2005

PARASHAR, A.; AGGARWAL, P.; SAINI, B.; AGGARWAL, Y.; BISHNOI, S. Study on performance enhancement of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118875, 2020.

PAREDES, R. S. C. **Tecnologia e Processos de Fundição**CuritibaUniversidade Federal do Paraná, , 2017.

PATEL, M. D.; CHAUHAN, A. R. Stabilization of soil by foundry sand waste. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 7, n. 5, p. 5675–5680, 2020.

PAUL, P.; APEDO, K. L.; BELHAJ, E.; FEUGEAS, F. Effect of waste chemical foundry sand on mechanical properties and damage process of cementitious materials using digital image correlation technology. **Journal of Cleaner Production**, v. 368, p. 133103, 2022.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; AKASAKI, J. L.; TASHIMA, M. M.; POLITE, U. New inorganic binders containing ashes from agricultural wastes. In: **Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2017. p. 127–164.

PCA. **Soil-Cement Laboratory Handbook**. 1. ed. Illinois: Portland Cement Association, 1992.

PENKAITIS, G.; SÍGOLO, J. B. Waste foundry sand: Environmental implication and characterization. **Geologia USP. Série Científica**, v. 12, n. 3, p. 57–70, 2012.

PEREIRA, A.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. **Ceramics International**, v. 41, p. 13012–13024, 2015.

PEREIRA DOS SANTOS, C. **Estabilização de rejeito de mineração de ouro por meio da álcali-ativação de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

- PEREIRA DOS SANTOS, C.; BRUSCHI, G. J.; MATTOS, J. R. G.; CONSOLI, N. C. Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane bagasse ash. **Transportation Geotechnics**, v. 32, p. 100704, 2022.
- PERUMAL, P.; NIU, H.; KIVENTERÄ, J.; KINNUNEN, P.; ILLIKAINEN, M. Upcycling of mechanically treated silicate mine tailings as alkali activated binders. **Minerals Engineering**, v. 158, p. 106587, 2020.
- PEYS, A.; ISTERI, V.; YLINIEMI, J.; YORKSHIRE, A. S.; LEMOUGNA, P. N.; UTTON, C.; PROVIS, J. L.; SNELLINGS, R.; HANEIN, T. Sustainable iron-rich cements: Raw material sources and binder types. **Cement and Concrete Research**, v. 157, p. 106834, 2022.
- PHAIR, J. W.; VAN DEVENTER, J. S. J. Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganica polymers. **Minerals Engineering**, v. 14, n. 3, p. 289–304, 2001.
- PIEKARSKI, C. M.; FRANCISCO, A. C. DE; LUZ, L. M. DA; BASTIANI, J. A. DE; ZOCHE, L. Aplicação da ACV na matriz elétrica Brasileira: Uma análise multi cenários em termos de mudança climática, qualidade de ecossistema, saúde humana e recursos. **Espacios**, v. 34, n. 4, p. 1–8, 2013.
- PINI. **TCPO - Tabelas de composições de preços para orçamentos**. Disponível em: <https://tcpoweb.pini.com.br/home/tcpo_web.html>. Acesso em: 10 maio. 2022.
- PLATI, C. Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 539–555, 2019.
- PLIYA, P.; CREE, D. Limestone derived eggshell powder as a replacement in Portland cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 1–9, 2015.
- PONS, O.; DE LA FUENTE, A.; AGUADO, A. The use of MIVES as a sustainability assessment MCDM method for architecture and civil engineering applications. **Sustainability**, v. 8, n. 5, p. 460, 2016.
- PORTO XAVIER, P. M. DE. **Plano Municipal de Saneamento Básico: Porto Xavier - RS**. Porto Xavier. Prefeitura Municipal de Porto Xavier, 2013.

POURAKBAR, S.; ASADI, A.; HUAT, B. B. K.; CRISTELO, N.; FASIHNIKOUTALAB, M. H. Application of Alkali-Activated Agro-Waste Reinforced with Wollastonite Fibers in Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 2, p. 04016206, 2017.

PRASAD, K.; MATHACHAN, N.; JAMES, P.; JUSTINE, T. L. Effect of Curing on Soil Stabilized with Egg Shell. **International Journal of Science Technology & Engineering**, v. 2, n. 12, p. 259–264, 2016.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 40–48, 2018.

PROVIS, J. L.; DEVENTER, J. S. J. VAN. Geopolymers and Other Alkali-Activated Materials. In: HEWLETT, P. C. (Ed.). **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 5. ed. [s.l.] Elsevier Ltd., 2019. p. 779–805.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers, structure, processing, properties and industrial applications**. 1. ed. Great Abington: Woodhead Publishing Limited, 2009.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report**. New Jersey: Springer, 2014.

PUERTAS, F.; PALACIOS, M.; MANZANO, H.; DOLADO, J. S.; RICO, A.; RODRÍGUEZ, J. A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, p. 2043–2056, 2011.

PUERTAS, F.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; BLANCO-VARELA, M. T. Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 139–148, 2004.

PURDY, C. M.; RAYMOND, A. J.; DEJONG, J. T.; KENDALL, A.; KRAGE, C.; SHARP, J. Life-cycle sustainability assessment of geotechnical site investigation. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 59, p. 863–877, 2022.

QU, B.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; MARTIN, A.; PASTOR, J. Y. Effect of high temperatures on the mechanical behaviour of hybrid cement. **Materiales de Construcción**, v. 70, n. 337, p. e213, 2020.

QUEDOU, P. G.; WIRQUIN, E.; BOKHOREE, C. Sustainable concrete: Potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. e00545, 2021.

RAFIAANI, P.; KUPPENS, T.; THOMASSEN, G.; DAEL, M. VAN; AZADI, H.; LEBAILLY, P.; PASSEL, S. VAN. A critical view on social performance assessment at company level: social life cycle analysis of an algae case. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 363–381, 2020.

RAWLE, A. The importance of particle sizing to the coatings industry Part 1: Particle size measurement. **Advances in Colour Science and Technology**, v. 5, n. 1, p. 1–12, 2002.

RAYMOND, A. J.; DEJONG, J. T.; KENDALL, A.; BLACKBURN, J. T.; DESCHAMPSR. Life cycle sustainability assessment of geotechnical ground improvement methods. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 147, n. 12, 2021.

REBITZER, G.; EKVALL, T.; FRISCHKNECHT, R.; HUNKELER, D.; NORRIS, G.; RYDBERG, T.; SCHMIDT, W.-P.; SUH, S.; WEIDEMA, B. P.; PENNINGTON, D. W. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v. 30, p. 701–720, 2004.

REVATHI, T.; VANITHA, N.; JEYALAKSHMI, R.; SUNDARARAJ, B.; JEGAN, M.; RAJKUMAR, P. R. K. Adoption of alkali-activated cement-based binders (geopolymers) from industrial by-products for sustainable construction of utility buildings-A field demonstration. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104450, 2022.

RICHARDSON, I. G.; BROUGH, A. R.; GROVES, G. W.; DOBSON, C. M. The characterization of hardened alkali-activated blast-furnace slag pastes and the nature of calcium silicate hydrate (C-S-H) phase. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 5, p. 813–829, 1994.

RICHARDSON, I. G.; CABRERA, J. G. The nature of C-S-H in model slag-cements. **Cement & Concrete Composites**, v. 22, p. 259–266, 2000.

RICHARDSON, I. G.; GROVES, G. W. The structure of the calcium silicate hydrate phases present in hardened pastes of white Portland cement/blast-furnace slag blends. **Journal of**

Materials Science, v. 2, p. 4793–4802, 1997.

RIJKSWATERSTAAT ENVIRONMENT. Soil Quality Decree (SQD). **Rijkswaterstaat Ministry of Infrastructure and Water Management**, v. 1, p. 1–34, 2007.

RIOS, S.; CRISTELO, N.; DA FONSECA, A. V.; FERREIRA, C. Stiffness behavior of soil stabilized with alkali-activated fly ash from small to large strains. **International Journal of Geomechanics**, v. 17, n. 3, p. 04016087, 2017.

RIVERA, J. F.; OROBIO, A.; GUTIÉRREZ, R. M. DE; CRISTELO, N. Clayey soil stabilization using alkali-activated cementitious materials. **Materiales de Construcción**, v. 70, n. 337, p. e-211, 2020.

ROBAYO, R. A.; MULFORD, A.; MUNERA, J.; GUTIÉRREZ, R. M. DE. Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 163–169, 2016.

RÖDGER, J.-M.; KJÆR, L. L.; PAGOROPOULOS, A. Life cycle costing: An introduction. In: HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. (Eds.). . **Life cycle assessment: Theory and practice**. 1. ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. p. 373–399.

ROPP, R. C. Group 16 (O, S, Se,Te) Alkaline Earth Compounds. In: **Encyclopedia of the Alkaline Earth Compounds**. 1. ed. [s.l.] Elsevier B.V, 2013. v. 16p. 105–197.

ROSALES-HUAMANI, J. A.; MEDINA-COLLANA, J. T.; DIAZ-CORDOVA, Z. M.; MONTAÑO-PISFI, J. A. Factors influencing the formation of sodium hydroxide by an ion exchange membrane cell. **Batteries**, v. 7, n. 34, p. 1–11, 2021.

ROSKOVIC, R.; OSLAKOVIC, I. S.; RADIC, J.; SERDAR, M. Effects of chromium (VI) reducing agents in cement on corrosion of reinforcing steel. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 10, p. 1020–1025, 2011.

SAHMARAM, M.; LACHEMI, M.; ERDEM, T. K.; YU, H. E. Use of spent foundry sand and fly ash for the development of green self-consolidating concrete. **Materials and Structures (2011)**, v. 44, p. 1193–1204, 2011.

SALDANHA, R. B.; DA ROCHA, C. G.; CAICEDO, A. M. L.; CONSOLI, N. C. Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 298, p. 123648, 2021.

SALDANHA, R. B.; CAICEDO, A. M. L.; DE ARAÚJO, M. T.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MONCALEANO, C. J.; SILVIA, J. P. S.; CONSOLI, C. Potential use of iron ore tailings for binder production: A life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 1–12, 2023.

SALES, A.; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, v. 30, p. 1114–1122, 2010.

SAMANIEGO, R. A. Q. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

SAMARAKOON, M. H.; RANJITH, P. G.; SILVA, V. R. S. DE. Effect of soda-lime glass powder on alkali-activated binders: Rheology, strength and microstructure characterization. **Construction and Building Materials**, v. 241, p. 118013, 2020.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. DE. Calcário e Dolomito. In: **Rochas e Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. p. 327–350.

SAMPAIO, J. P.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SAMUEL, R.; PUPPALA, A. J.; RADOVIC, M. Sustainability benefits assessment of metakaolin-based geopolymer treatment of high plasticity clay. **Sustainability**, v. 12, p. 10495, 2020.

SANDANAYAKE, M.; GUNASEKARA, C.; LAW, D.; ZHANG, G.; SETUNGE, S. Greenhouse gas emissions of different fly ash based geopolymer concretes in building construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 204, p. 399–408, 2018.

SANTA CATARINA. Lei N° 17.479, de 15 de janeiro de 2018. **Governo de Santa Catarina**, p. 1–6, 2018.

SARGENT, P.; HUGHES, P. N.; ROUAINIA, M.; WHITE, M. L. The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils.

Engineering Geology, v. 152, n. 1, p. 96–108, jan. 2013.

SARGENT, P. The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation. In:

PALOMO, A. et al. (Eds.). . **Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2015. p. 555–604.

SATO, P. E. S. **Distribuição de elementos menores no processo de fabricação de clínquer Portland**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2004.

SCHETTINO, M. A. S.; HOLANDA, J. N. F. Characterization of sugarcane bagasse ash waste for its use in ceramic floor tile. **Procedia Materials Science**, v. 8, p. 190–196, 2015.

SCHILLING, P. J.; BUTLER, L. G.; ROY, A.; EATON, H. C. Si and Al MAS-NMR of NaOH-activated blast-furnace slag. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 77, n. 9, p. 2363–2368, 1994.

SEBASTIN, S.; PRIYA, A. K.; KARTHICK, A.; SATHYAMURTHY, R. Agro waste sugarcane bagasse as a cementitious material for reactive powder concrete. **Clean Technologies**, v. 2, p. 476–491, 2020.

SEPLAG. Clima, temperatura e precipitação - Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. **Secretária de Planejamento, Orçamento e Gestão**, p. 1–5, 2021.

SERVI, S.; LOTERO, A.; SILVA, J. P. S.; BASTOS, C.; CONSOLI, N. C. Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking. **Construction and Building Materials**, v. 349, p. 128770, 2022.

SHAGÑAY, S.; GARCIA-LODEIRO, I.; VELASCO, F.; BAUTISTA, A.; TORRES-CARRASCO, M. Mineralogical and microstructural changes in alkali-activated and hybrid materials exposed to accelerated leaching. **Journal of Building Engineering**, v. 64, p. 105733, 2023.

SHEKHAWAT, P.; SHARMA, G.; MARTAND, R. Strength behavior of alkaline activated eggshell powder and flyash geopolymer cured at ambient temperature. **Construction and**

Building Materials, v. 223, p. 1112–1122, 2019.

SHEKHAWAT, P.; SHARMA, G.; MARTAND, R. Potential Application of Heat Cured Eggshell Powder and Flyash - Based Geopolymer in Pavement Construction. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 6, n. 28, p. 1–17, 2020.

SHERWOOD, P. **Soil stabilization with cement and lime**. 1. ed. London: Her Majesty Stationary Office, 1993.

SHOOSHPASHA, I.; SHIRVANI, R. A. Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils. **Geomechanics and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 17–31, 2015.

SIDDIQUE, R.; KAUR, G.; RAJOR, A. Waste foundry sand and its leachate characteristics. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 54, p. 1027–1036, 2010.

SIDDIQUE, R.; NOUMOWE, A. Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, p. 27–35, 2008.

SIDDIQUE, R.; SCHUTTER, G. DE; NOUMOWE, A. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 976–980, 2009.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 55, n. 11, p. 885–892, 2011.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G.; SINGH, M. Recycle option for metallurgical by-product (Spent Foundry Sand) in green concrete for sustainable construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1111–1120, 2018.

SINAPI. **Aterros, bases, sub bases e imprimações** Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, , 2022.

SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength , ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 416–422, 2012.

SINGHI, B.; LASKAR, A. I.; AHMED, M. A. Investigation on soil – Geopolymer with slag,

fly ash and their blending. **Arabian Journal for Science and Engineering** volume, v. 41, p. 393–400, 2016.

SINHA, P.; DATAR, A.; JEONG, C.; DENG, X.; CHUNG, Y. G.; LIN, L. Surface Area Determination of Porous Materials Using the Brunauer – Emmett – Teller (BET) Method: Limitations and Improvements. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 123, p. 20195–20209, 2019.

SITHOLE, N. T.; TSOTETSI, N. T.; MASHIFANA, T.; SILLANPÄÄ, M. Alternative cleaner production of sustainable concrete from waste foundry sand and slag. **Journal of Cleaner Production**, v. 336, p. 130399, 2022.

SOARES, M. M. N. S.; POGGIALI, F. S. J.; BEZERRA, A. C. S.; FIGUEIREDO, R. B.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. The effect of calcination conditions on the physical and chemical characteristics of sugar cane bagasse ash. **REM - Revista Escola de Minas**, v. 67, n. 1, p. 33–39, 2014.

SORIANO, L.; FONT, A.; BORRACHERO, M. V; MONZÓ, J. M.; PAYÁ, J.; TASHIMA, M. M. Biomass ashes to produce an alternative alkaline activator for alkali-activated cements. **Materials Letters**, v. 308, p. 131198, 2022.

SOUZA, A. E.; TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; COSTA, F. B.; LONGO, E. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 2774–2780, 2011.

SOUZA, F. DE; BRAGANA, S. R. Caracterização tecnológica de um calcário dolomítico in natura, calcinado e sulfatado como meio dessulfurante. **Cerâmica**, v. 59, p. 331–337, 2013.

STAFFORD, F. N.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; HOTZA, D. Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1293–1299, 2016.

STATISTA. **Volume of the global casting production in 2019, by country**. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/237526/casting-production-worldwide-by-country/>>. Acesso em: 21 ago. 2020.

STEFANONI, M.; ZHANG, Z.; ANGST, U.; ELSENER, B. The kinetic competition between

transport and oxidation of ferrous ions governs precipitation of corrosion products in carbonated concrete. **RILEM Technical Letters**, v. 3, p. 8–16, 2018.

STREINER, D. L. Being Inconsistent About Consistency: When Coefficient Alpha Does and Doesn't Matter. **Journal of Personality assessment**, v. 80, n. 3, p. 217–222, 2003.

SUHENDRO, B. Toward green concrete for better sustainable environment. **Procedia Engineering**, v. 95, p. 305–320, 2014.

SULTANA, M. S.; RAHMAN, A. **Characterization of Calcined Sugarcane Bagasse Ash and Sugarcane Waste Ash for Industrial Use**. International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering. **Anais...Rajshahi**, Bangladesh: RUET, 2013

TABER, K. S. The use of Cronbach ' s Alpha when developing and reporting research instruments in science sducation. **Research in Science Education**, v. 48, p. 1273–1296, 2018.

TEMUJIN, J.; WILLIAMS, R. P.; RIESSEN, A. VAN. Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5276–5280, 2009.

THAARRINI, J.; RAMASAMY, V. Properties of foundry sand , ground granulated blast furnace slag and bottom ash based geopolymers under ambient aonditions. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 60, n. 2, p. 159–168, 2016.

TITTARELLI, F. Waste foundry sand. In: **Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete**. 1. ed. [s.l.] Elsevier Ltd, 2018. p. 121–147.

TONEY, M. X-Ray Diffraction. In: BRUNDLE, R. C.; EVANS JR, C. A.; WILSON, S. (Eds.). . **Encyclopedia of Materials Characterization**. Boston: Butterworth-Heinemann, 1992. p. 198–213.

TONINI DE ARAÚJO, M. **Comportamento de solo expansivo estabilizado por ligante álcali-ativado oriundo de resíduos: sustentabilidade, propriedades mecânicas e microestruturais**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2022.

TONINI DE ARAÚJO, M.; FERRAZZO, S. T.; CHAVES, H. M.; DA ROCHA, C. G.; CONSOLI, N. C. Mechanical behavior, mineralogy and microstructure of alkali-activated wastes-based binder for a clayey soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 362, p. 129757, 2023.

TORRES-CARRASCO, M. **Reutilización de residuos vítreos urbanos e industriales en la fabricación de cementos alcalinos. Activación, comportamiento y durabilidad.** [s.l.] Universidad Autónoma de Madrid, 2015.

TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 397–408, 2015.

TORRES, A.; BARTLETT, L.; PILGRIM, C. Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 674–681, 2017.

TREVIZAN, D.; JORDI, G.; PAVAN, E.; DALLA ROSA, F. Rice husk ash as an alternative soluble silica source for alkali-activated metakaolin systems applied to recycled asphalt pavement stabilization. **Transportation Geotechnics**, v. 39, p. 100940, 2023.

UNDAVALLI, V. K.; LING, H.; KHANDELWAL, B. Impact of alternative fuels and properties on elastomer compatibility. In: KHANDELWAL, B. (Ed.). **Aviation Fuels.** [s.l.] Academic Press, 2021. p. 113–132.

UNEP-SETAC. **Guidelines for social life cycle assessment of products.** 1. ed. Paris: United Nations Environment Programme, 2009.

UNEP-SETAC. **Towards a life cycle sustainability assessment: Making informed choices on products.** 1. ed. [s.l.] United Nations Environment Programme, 2011.

UNEP. **Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA) 2021.** [s.l.] United Nations Environment Programme, 2021.

USACE. **Soil stabilization for pavements.** 1. ed. Washington: United States Army Corps of Engineers, 1994.

USEPA. Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure. In: **Hazardous Waste Test Methods/SW-846**. 1. ed. [s.l.] United States Environmental Protection Agency, 1992. p. 1–35.

USEPA. Method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure. In: **SW-846: Hazardous Waste Test Methods**. 1. ed. [s.l.] United States Environmental Protection Agency, 1994. p. 1–30.

USEPA. EPA-F-94-001E: National Primary Drinking Water Standards. **United States Environmental Protection Agency**, 1999.

USEPA. Characteristics - Introduction and regulatory definitions. In: **Hazardous Waste Test Methods/SW-846**. 4. ed. Washington, USA: United States Environmental Protection Agency, 2004. p. 1–7.

USEPA. State toolkit for developing beneficial reuse programs for foundry sands. **United States Environmental Protection Agency**, p. 60, 2006.

USEPA. Solid Industrial Waste Hazard Categorization and Management, Industrial Waste Resource Guidelines. **United States Environmental Protection Agency**, p. 1–10, 2009.

USEPA. **Ground Water and Drinking Water: National Primary Drinking Water Regulations**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations#Inorganic>>. Acesso em: 11 jan. 2022a.

USEPA. **Learn About Impacts of Diesel Exhaust and the Diesel Emissions Reduction Act (DERA)**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/dera/learn-about-impacts-diesel-exhaust-and-diesel-emissions-reduction-act-dera>>. Acesso em: 13 jan. 2023b.

USEPA. **Basic ozone layer science**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ozone-layer-protection/basic-ozone-layer-science>>. Acesso em: 3 jan. 2023.

UTTON, C. A.; GALLUCCI, E.; HILL, J.; MILESTONE, N. B. Cement and Concrete Research Interaction between BaCO₃ and OPC/BFS composite cements at 20 °C and 60 °C. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 236–243, 2011.

VICENT, M.; CRIADO, M.; GARCÍA-TEN, J. Alkali-activated materials obtained from asphalt fillers and fluorescent lamps wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 343–353, 2019.

VICHAN, S.; RACHAN, R. Chemical stabilization of soft Bangkok clay using the blend of calcium carbide residue and biomass ash. **Soils and Foundations**, v. 53, n. 2, p. 272–281, 2013.

VISENTIN, C.; TRENTIN, A. W.; BRAUN, A. B.; THOMÉ, A. Social life cycle assessment of the nanoscale zero - valent iron synthesis process for application in contaminated site remediation. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 21603–21620, 2022.

VOLLPRACHT, A.; BRAMESHUBER, W. Binding and leaching of trace elements in Portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 79, p. 76–92, 2015.

VROM. Dutch Target and Intervention Values. **Ministerie van Volksuisveting Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer**, p. 1–51, 2000.

VU, T. H.; GOWRIPALAN, N. Mechanisms of heavy metal immobilisation using geopolymerisation techniques – A review. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 16, p. 124–135, 2018.

WAHEED, M.; BUTT, M. S.; SHEHZAD, A.; ADZAHAN, N. M.; ASIM, M.; SULERIA, R.; MUHAMMAD, R. Eggshell calcium: A cheap alternative to expensive supplements. **Trends in Food Science & Technology**, v. 91, p. 219–230, 2019.

WANG, A.; ZHENG, Y.; ZHANG, Z.; LIU, K.; LI, Y.; SHI, L.; SUN, D. The Durability of Alkali-Activated Materials in Comparison with Ordinary Portland Cements and Concretes: A Review. **Engineering**, v. 6, p. 695–706, 2020a.

WANG, D.; WANG, Q.; ZHUANG, S.; YANG, J. Evaluation of alkali-activated blast furnace ferronickel slag as a cementitious material: Reaction mechanism, engineering properties and leaching behaviors. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 860–873, 2018.

WANG, Y.; NI, W.; ZHANG, S.; LI, J.; SURANENI, P. Optimal mixture designs for heavy metal encapsulation in municipal solid waste. **Applied Sciences**, v. 10, p. 6948, 2020b.

WCED. Our Common Future. **World Commission on Environment and Development**, 1987.

WEIDEMA, B. P. Using the budget constraint to monetarise impact assessment results. **Ecological Economics**, v. 68, p. 1591–1598, 2009.

WILKINSON, A.; HAQUE, A.; KODIKARA, J. Stabilisation of clayey soils with industrial by-products: part A. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, v. 163, n. 3, p. 149–163, ago. 2010.

WONG, Y. C.; ANG, R. X. Study of calcined eggshell as potential catalyst for biodiesel formation using used cooking oil. **Open Chemistry**, v. 16, n. 1, p. 1166–1175, 2018.

XU, P.; ZHAO, Q.; QIU, W.; XUE, Y. The Evaluation of the Heavy Metal Leaching Behavior of MSWI-FA Added Alkali-Activated Materials Bricks by Using Different Leaching Test Methods. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, p. 1151, 2019a.

XU, Q.; JI, T.; GAO, S.; YANG, Z.; WU, N. Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials. **Materials**, v. 12, n. 39, p. 1–19, 2019b.

YADAV, V. K.; YADAV, K. K.; TIRTH, V.; GNANAMOORTHY, G.; GUPTA, N.; ALGAHTANI, A.; ISLAM, S.; CHOUDHARY, N.; MODI, S.; JEON, B.-H. Extraction of value-added minerals from various agricultural, industrial and domestic wastes. **Materials**, v. 14, p. 6333, 2021.

YAGHOUBI, M.; ARULRAJAH, A.; DISFANI, M. M.; HORPIBULSUK, S.; BO, M. W.; DARMAWAN, S. Effects of industrial by-product based geopolymers on the strength development of a soft soil. **Soils and Foundations**, v. 58, n. 3, p. 716–728, 2018.

YAZOGHLI-MARZOUK, O.; VULCANO-GREULLET, N.; CANTEGRIT, L.; FRITEYRE, L.; JULLIEN, A. Recycling foundry sand in road construction – field assessment. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 69–78, 2014.

YI, Y.; LI, C.; LIU, S. Alkali-activated ground-granulated blast furnace slag for stabilization of marine soft clay. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 4, p. 04014146,

2015.

YILMAZ, N.; ATMANLI, A.; VIGIL, F. M.; DONALDSON, B. Comparative assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and toxicity in a diesel engine powered by diesel and biodiesel blends with high concentrations of alcohols. **Energies**, v. 15, p. 8523, 2022.

YIP, C. K.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1688–1697, 2005.

ZAHMAK, A.; ABDALLAH, M.; JARAH, B.; ARAB, M. G. Environmental performance of alkali-activated binders for ground improvement. **Transportation Geotechnics**, v. 31, p. 100631, 2021.

ZAILANI, W. W. A.; BOUAISSI, A.; ABDULLAH, M. M. A. B.; RAZAK, R. A.; YORIYA, S.; SALLEH, M. A. A. M.; ROZAINY, M. R.; FANSURI, H. Bonding strength characteristics of FA-based geopolymer paste as a repair material when applied on OPC substrate. **Applied Sciences**, v. 10, p. 3321, 2020.

ZAMAN, T.; MOSTARI, S.; AL MAHMOOD, S.; RAHMAN, S. Evolution and characterization of eggshell as a potential candidate of raw material. **Cerâmica**, v. 64, p. 236–241, 2018.

ZHANG, J.; LI, X.; CHENG, W.; LI, Y.; SHI, T.; JIANG, Y.; WANG, T.; WANG, T.; WANG, H.; WANG, H.; REN, D.; ZHANG, R.; ZHENG, Y.; TANG, J.; REN, D.; ZHANG, R.; ZHENG, Y.; TANG, J. Chronic carbon black nanoparticles exposure increases lung cancer risk by affecting the cell cycle via circulatory inflammation. **Environmental Pollution**, v. 305, p. 119293, 2022.

ZHANG, M.; GUO, H.; EL-KORCHI, T.; ZHANG, G.; TAO, M. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1468–1478, out. 2013.

ZHOU, H.; WANG, X.; WU, Y.; ZHANG, X. Mechanical properties and micro-mechanisms of marine soft soil stabilized by different calcium content precursors based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 305, p. 124722, 2021.

ZIÓŁKOWSKI, A.; FUC, P.; LIJEWSKI, P.; JAGIELSKI, A.; BEDNAREK, M.; KUSIAK, W. Analysis of exhaust emissions from heavy-duty vehicles on different applications. **Energies**, v. 15, p. 7886, 2022.

APÊNDICE A

Na sequência estão apresentados os seguintes documentos:

- Projeto de Pesquisa para ASCV;
- Questionário de pesquisa;
- Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Escola de Engenharia

Projeto de pesquisa:

**ANÁLISE DE CICLO DE VIDA SOCIAL DE MISTURAS SOLO-LIGANTE ÁLCALI-
ATIVADO E SOLO-CIMENTO PORTLAND**

Pesquisador responsável:

Nilo Cesar Consoli

Pesquisadores envolvidos:

Mariana Tonini de Araújo

Suéllen Tonatto Ferrazzo

Cecilia Gravina da Rocha

Porto Alegre, RS

2022

Sumário

1. Introdução	4
2. Método de pesquisa	6
3. Aspectos éticos	9
4. Orçamento	11
5. Equipe	13
6. Resultados esperados	13
8. Cronograma	14
Referências	14

Resumo

A Análise de ciclo de vida (ACV), considerando as esferas ambiental, econômica e social, é uma via de crescente interesse na geotecnia, permitindo avaliar a sustentabilidade de um produto alternativo. A implementação de ferramentas de ACV no melhoramento de solos está associada a pesquisas que exploraram o uso de agentes estabilizadores, como cal hidratada e cimento Portland. Ainda, há estudos que aplicaram ACV em solos estabilizados com geopolímero. Contudo, o uso de ACV em estabilização de solos com ligantes álcali-ativados representa um vasto campo de pesquisa ainda a ser explorado. Neste sentido, esta pesquisa objetiva avaliar os impactos sociais envolvidos na estabilização de solo para base e sub-base de pavimentos, utilizando ligante álcali-ativado (a base de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo), comparativamente ao uso de cimento Portland. Para tanto, será realizada uma análise de ciclo de vida social (ACVS) com estrutura hierárquica composta por trabalhadores, comunidade local e sociedade, e dez indicadores sociais baseados na *Methodological Sheets* da UNEP (*United Nations Environment Programme*) e no livro *Handbook for Product Social Impact Assessment*. Os indicadores sociais serão medidos por meio de entrevistas com especialistas e outros trabalhadores em áreas de interesse, para cada processo (ou seja, produção de matérias-primas, transporte de materiais e processos de construção) relacionado às dosagens de solo-ligante estudadas.

Palavras-chave: Cinza de bagaço de cana-de-açúcar; Cal de casca de ovo; Ligantes álcali-ativados; Estabilização de solos; Análise de ciclo de vida; Impactos sociais.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e justificativa

A análise de ciclo de vida social (ACVS) desenvolveu-se nas últimas duas décadas como um mecanismo para prática de Responsabilidade Social Corporativa (i.e. implementação de princípios de desenvolvimento sustentável no âmbito de negócios), oriunda no contexto da normativa ISO 26000 para Responsabilidade social (ISO, 2010) e Diretrizes G3 para Relatórios de sustentabilidade (GRI, 2006). A ACVS apresenta-se como uma ferramenta holística e sistêmica para compreender aspectos sociais envolvidos na cadeia de valor de produtos ou serviços da sociedade (GARRIDO, 2017).

A ACVS consiste em uma série de métodos com o objetivo de avaliar potencial positivo e negativo social ou os potenciais “impactos sociais e socioeconômicos” (UNEP-SETAC, 2009). Nesta análise, considera-se como potenciais impactos aqueles que podem ser vivenciados pelas principais partes interessadas (*stakeholders*) (GARRIDO, 2017). A ACVS pode ser realizada em conjunto com a ACV ambiental ou separadamente (GARRIDO, 2017). Derivadas da ISO 14044, as fases da ACVS são: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impacto, e interpretação dos resultados (UNEP-SETAC, 2009).

No cenário atual existem duas abordagens de ACVS, ACVS tipo I e ACVS tipo II. O tipo I é conhecido por “ACVS de desempenho social”, e o tipo II por “ACVS do caminho do impacto”. A diferenciação entre estes tipos se dá pela forma de abordagem dos potenciais impactos sociais. No tipo I, a avaliação visa fornecer uma aproximação de potenciais impactos presumidos. Por exemplo, a avaliação das práticas (desempenho social) das organizações envolvidas no ciclo de vida do produto, observando se elas atendem ou não às expectativas da sociedade referentes a aspectos de responsabilidade social. Tais aspectos envolvem: “condições de trabalho, saúde e segurança, e relações com a comunidade local” (GARRIDO, 2017).

No tipo II (ACVS menos usual) os potenciais impactos sociais são modelados considerando-se a relação entre a fonte do impacto e o impacto exercido sob o bem-estar humano: tal relação/ligação é denominada “via de impacto”. As vias de impacto são cadeias ou relações pontuais, cujas atividades são passíveis de serem rastreadas aos seus resultados sociais finais (GARRIDO, 2017). Garrido (2017) cita exemplos como: os impactos da renda na expectativa de vida das pessoas ou os impactos da distribuição de renda sob a taxa de mortalidade de crianças. O tipo II foca um único caminho de impacto por estudo, usualmente avaliado em nível setorial ou nacional, e não em nível empresarial (GARRIDO, 2017).

Os avanços em ACVS têm sido relativamente recentes, não havendo uma metodologia consolidada e padronizada (GARRIDO, 2017; KLOEPFFER, 2008). Enquanto isso, abordagens qualitativas e semi quantitativas são utilizadas em substituição a uma ACVS quantitativa (KLOEPFFER, 2008). Contudo, estas abordagens são orientadas por diretrizes reconhecidas internacionalmente, mais especificamente, pelo “Guia de análise de ciclo de vida social de produtos” do Programa das Nações Unidas para o meio ambiente (UNEP-SETAC, 2009). Este guia propõe um quadro metodológico geral abordando uma série de etapas para avaliação de impactos socioeconômicos do ciclo de vida do produto (UNEP-SETAC, 2009). Este “mapa” estabelece uma linha de base para definição de como a ACVS será realizada, provendo flexibilidade de experimentação para o praticante e reconhecimento de que a ACVS ainda está em desenvolvimento (GARRIDO, 2017).

Em cada etapa do ciclo de vida do produto pode-se avaliar uma gama de potenciais impactos sociais. Os indicadores utilizados para avaliar cada impacto não são padronizados. Assim, cada estudo especifica os indicadores que serão usados em função do contexto da avaliação e da disponibilidade de dados (GARRIDO, 2017). A coleta de dados específicos pode ser realizada por meio de: auditoria de documentação empresarial; auditoria de documentação de instituições de autoridades ou organizações não governamentais; metodologias participativas; entrevistas dirigidas e semi dirigidas, e questionários e pesquisas (UNEP-SETAC, 2009). De acordo com Santos *et al.* (2020), o banco de dados “*Social Hotspots Database*” foi desenvolvido para fornecer suporte a ACVS. Tal banco dispõem de dados sociais genéricos para 160 indicadores em nível setorial e nacional, fundamentados em estatísticas e informações fornecidas por governos e organizações internacionais (e.g. Organização Mundial da Saúde). Entretanto o acesso a este banco não é gratuito.

No trabalho de Garrido (2017) são apresentados exemplos onde a ACVS vêm sendo aplicada em diferentes produtos como: *notebooks*; alimentos (leite, carne e vinho); fertilizantes; garrafas PET); pneus e reciclagem de peças automotivas, dentre outros. Contudo, a ACVS apresenta algumas limitações, por exemplo: novidade da ferramenta; dificuldades de acesso de dados; dificuldades com uso de dados qualitativos, metodologias e indicadores; pouco conhecimento acerca das relações de cadeias causais; pouca habilidade do praticante de ACVS, e limitada comunicação de resultados, dentre outros (UNEP-SETAC, 2009).

No contexto da engenharia geotécnica, análises de ciclo de vida - ACV (ambiental, econômica e social) são uma via de crescente interesse por avaliar em a sustentabilidade de um produto alternativo (DA ROCHA *et al.*, 2016; SALDANHA *et al.*, 2021). Somente a partir da realização

de uma ACV é possível afirmar que o produto ou técnica alternativa é mais sustentável que produtos ou técnicas usuais. No tópico melhoramento de solos, a implementação de ferramentas de ACV foi realizada em pesquisas envolvendo o uso de agentes estabilizantes: cal hidratada (DA ROCHA *et al.*, 2016; SAMANIEGO, 2015), cinza de biomassa lenhosa (DA COSTA *et al.*, 2020) e cal de casca de ovo (SALDANHA *et al.*, 2021). Mais recentemente, foram avaliados os impactos ambientais e socioeconômicos de um solo estabilizado com geopolímero (SAMUEL; PUPPALA; RADOVIC, 2020). Entretanto, uma ACVS referente a estabilização de solos com ligantes álcali-ativados representa um campo de pesquisa ainda inexplorado pela literatura.

1.2 Objetivo

O objetivo primário desta pesquisa é avaliar os impactos sociais envolvidos na estabilização de solo para base e sub-base de pavimentos, utilizando um ligante álcali-ativado (a base de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo), comparativamente ao uso de cimento Portland.

1.3 Hipótese

O solo estabilizado com ligante álcali-ativado causa menor impacto social do que o solo estabilizado com cimento Portland.

2. MÉTODO DE PESQUISA

O estudo de análise de ciclo de vida compreenderá uma análise do “berço ao portão”. Para a análise de ciclo de vida social (ACVS), os limites do sistema incluem a produção e transporte de matérias-primas (cal, cimento Portland, hidróxido de sódio e cinza de bagaço de cana-de-açúcar) e processos construtivos (mistura, homogeneização e compactação das misturas solo-ligante). Os impactos sociais da produção de diesel não serão contabilizados, pois apenas fornecedores e processos intimamente relacionados ao produto final devem ser avaliados sob o ponto de vista social (DREYER, 2006; METHOT, 2005).

2.1 Estruturação e coleta de dados

2.1.1. Estrutura hierárquica

A estrutura hierárquica da ACVS é composta por três partes interessadas ou “*stakeholders*” (trabalhadores, comunidade local e sociedade) e dez (10) indicadores sociais baseados nas “*Methodological Sheets*” da UNEP/SETAC (2013) e no livro “*Handbook for Product Social Impact Assessment*” (GOEDKOOOP et al., 2020). Os indicadores sociais serão mensurados por meio de entrevistas com especialistas e outros trabalhadores das áreas de interesse, para cada processo (ou seja, produção de matérias-primas, transporte de materiais e processos construtivos) relacionado aos ligantes estudados (Tabela 1).

Tabela 1: Processos relacionados ao ligante estudado

Processo	Ligante	
	Álcali ativado	Cimento Portland
Produção de cal	x	
Produção de hidróxido de sódio	x	
Produção de cimento Portland		x
Transporte dos materiais	x	x
Mistura, homogeneização e compactação das amostras de solo-ligante	x	x

O indicador social “Acidentes de trabalho” é calculado a partir de relatórios do *Ministério Brasileiro do Trabalho e Previdência: Número de acidentes de trabalho de acordo com a classificação nacional de atividades econômicas (CNAE) no estado do Rio Grande do Sul – 2018/2020* (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2022). Estes relatórios abrangem a produção de cal, produção de cimento Portland, transporte terrestre de carga e construção de rodovias. Entrevistas com especialistas e outros trabalhadores em áreas de interesse (e.g. trabalhadores envolvidos na construção de estradas) serão realizadas para avaliação dos demais indicadores sociais. Na Tabela 2 são apresentados os *stakeholders* e indicadores sociais utilizados para os ligantes avaliados, com a respectiva fonte.

Uma pesquisa por questionário foi elaborada para (i) avaliar estes indicadores e (ii) investigar a importância de cada indicador social. Para o primeiro (i), os entrevistados serão instruídos a selecionar a opção que mais reflete a situação da empresa em relação ao indicador. Para o segundo (ii), os entrevistados serão instruídos a ordenar a importância de cada indicador para cada *stakeholder*, e ao final selecionar o indicador mais importante entre todos os avaliados. Posteriormente as respostas serão convertidas em uma escala numérica (-2 a +2 para i e 1 a 5 para ii). A pontuação do indicador social para o processo avaliado resultará da multiplicação

do valor do indicador (-2 a +2) pelo seu peso (1 a 5). A soma do valor do indicador em cada um dos três processos analisados (produção de matéria-prima, transporte de materiais, e processos de construção) resultará na sua pontuação final.

Tabela 2: *Stakeholders* e indicadores sociais

<i>Stakeholder</i>	Indicador Social	Fonte
Trabalhadores	Acidentes de trabalho	Ministério do trabalho e previdência Entrevistas
	Salário médio	
	Participação feminina	
Comunidade local	Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores	Entrevistas
	Riscos à saúde e segurança	
Sociedade	Empresa/indústria informa, consulta e envolve a comunidade local	Entrevistas
	Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades	
	Contribuição do serviço/produto com o progresso econômicos	
	Compromisso com pautas de sustentabilidade	
	Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico	

2.1.2. Plano de recrutamento dos potenciais participantes de pesquisa

Os potenciais participantes da pesquisa serão colegas de trabalho das pesquisadoras (caso 1) e pessoas localizadas por meio da mídia social profissional “LinkedIn” (caso 2). Todos os participantes serão maiores de idade (acima de 18 anos). Para o primeiro caso, o convite individual para participação será enviado de forma individual por e-mail com um remetente e um destinatário. Neste e-mail será esclarecido ao candidato a participante de pesquisa que antes da entrevista em ambiente virtual será apresentado o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido para sua anuência. Também será enviado o Questionário para avaliação do candidato anteriormente a sua anuência. Será enfatizada a importância de o candidato salvar este Termo e que o mesmo pode se retirar da pesquisa a qualquer momento e não responder qualquer questão. Para o segundo caso, o convite individual para participação será enviado via *chat* do LinkedIn. Todos demais procedimentos descritos para o caso 1 serão utilizados no caso 2. Os procedimentos de recrutamento seguirão o item 2 do OFÍCIO CIRCULAR Nº2/2021/CONEP/SECNS/MS(http://conselho.saude.gov.br/images/Oficio_Circular_2_24fev2021.pdf).

Ainda, não será delimitada uma população de estudo em relação a faixa etária, sexo, local de origem, etc., visto que isto não é relevante para a aquisição de dados para esta pesquisa. O foco deste trabalho é o conhecimento do entrevistado na área de interesse da pesquisa (por exemplo, transporte rodoviário), independentemente de gênero, idade, raça, cor, dentre outros. Entretanto, destaca-se novamente que somente pessoas acima de 18 anos serão entrevistada, já que menores de idade não possuem a experiência profissional necessária ao preenchimento do questionário proposto pelas pesquisadoras.

2.2 Compilação e análise de dados

Para avaliação da consistência interna do questionário e da confiabilidade das respostas coletadas, calculou-se o coeficiente Alpha Cronbach (DONG AND NG, 2015; Visentin et al., 2021). O coeficiente está descrito na Equação 1 (BLAND AND ALTMAN, 1997).

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum s_i^2}{s_T^2} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde k é o número de itens (questões), s_i^2 é a variância de cada um dos itens, e s_T^2 é a variância do total (soma de cada item para cada respondente).

A variância do somatório de um grupo de variáveis independentes é a soma de suas variâncias. Assim, se os itens são idênticos e perfeitamente correlacionados todo s_i^2 será igual e $s_T^2 = k^2 s_i^2$, ou seja, $\frac{\sum s_i^2}{s_T^2} = \frac{1}{k}$ e $\alpha = 1$. Se os itens são independentes $s_T^2 = \sum s_i^2$ e $\alpha = 0$. Como consequência, ao comparar os grupos, valores de α entre 0,7 e 0,8 são satisfatórios (BLAND AND ALTMAN, 1997).

Após avaliar a confiabilidade das respostas obtidas para ambas classificações, os dados serão compilados para cálculo da pontuação final dos *stakeholders*. Os cálculos seguintes são baseados em Dong and Ng (2015), Hossain et al. (2018) and Visentin et al. (2021). Primeiramente, para cada processo, a pontuação de cada indicador social resultará da média da soma dos resultados obtidos após a multiplicação das respostas dos entrevistados sobre a importância e avaliação de cada indicador, conforme Equação 2.

$$S_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (I_{ji} \times W_{ji}) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde S_i é a pontuação do indicador “i”, n é o número de respondentes, j é a ordem do respondente, I_{ji} é o valor do indicador “i” (-2 a +2) para cada respondente “j”, e W_{ji} é o peso do indicador “i” (1 a 5) para cada respondente “j”.

Assim, a soma da pontuação do indicador “i” para cada processo do ligante avaliado (Tabela 1) resultará na pontuação final do indicador (Equação 3).

$$S_{Fi} = \sum_{k=1}^p S_{ik} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde S_{Fi} é a pontuação final do indicador “i”, p é o número de processos, k é ordem do processo, e S_{ik} é a pontuação do indicador “i” para o processo “k”.

Após o cálculo da pontuação final para cada indicador social, a pontuação do *stakeholder* é calculada conforme Equação 4.

$$SS_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{Fi} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde SS_i é a pontuação do *stakeholder* “i”, m é o número de indicadores para cada *stakeholder* “i” e S_{Fi} é a pontuação final do indicador “i”.

3. ASPECTOS ÉTICOS

3.1 Termo de consentimento livre e esclarecido

Os participantes da pesquisa, por meio de questionário, estarão assegurados do direito ao anonimato e direito à confidencialidade. Informações de identificação serão utilizadas apenas para o controle dos pesquisadores, se mencionados no trabalho será de forma numérica, como Participante 1, 2, etc. Todas as informações coletadas serão preservadas e o modelo de termo de consentimento para o questionário é apresentado no apêndice B deste projeto. A coleta de dados será inicializada exclusivamente após aceite do participante ao Termo de Consentimento Livre e Esclarecido apresentado nos Apêndices B. Os participantes têm a liberdade para participar da pesquisa e de recusar ou interromper a participação a qualquer momento, sem que ocorra qualquer tipo de constrangimento ou prejuízo para si.

3.2 Riscos

Não há qualquer possibilidade de danos à dimensão física, psíquica, moral, intelectual, social, cultural ou espiritual do ser humano, isto é, qualquer dano direto/indireto, bem como tardio/imediato, ao participante de pesquisa. O potencial risco seria em despendendo tempo - aproximadamente 20 minutos - para responder ao questionário.

3.3 Benefícios

Os benefícios para o participante da pesquisa e/ou sua comunidade serão de forma indireta. Ao participar da pesquisa o participante estará auxiliando no desenvolvimento de um novo produto, mais sustentável, e que no futuro pode ser comercializado e utilizado em obras de engenharia. Este novo produto reduzirá impactos ambientais (por exemplo, emissão de CO₂) e terá impactos sociais (por exemplo, geração de empregos devido a uma nova tecnologia) que se relacionam diretamente aos participantes da pesquisa.

4. ORÇAMENTO

O Quadro 1 apresenta o orçamento financeiro para execução desta pesquisa com detalhamento de recurso, fonte, destinação e valor para cada etapa do estudo. Os custos concentram-se na etapa de aplicação do questionário de pesquisa. Espera-se realizar a entrevista a especialistas e trabalhadores de cada um dos cinco setores por meio virtual. Este meio será a plataforma de videoconferências do Google (Google Meet), a qual permite a realização de reunião entre dois usuários (um entrevistador e um participante) por tempo ilimitado gratuitamente. Contudo, se houver algum participante que por determinado motivo (ex: sem acesso à computador, internet ou não uso de dispositivos eletrônicos e/ou plataforma de videoconferências, etc) optar por não responder ao questionário de forma virtual, serão realizados os seguintes procedimentos: (i) impressão do questionário e do TCLE, e (ii) posterior envio destes dois documentos ao participante, via Correios.

Considerando a possibilidade de 30% da amostra de participantes, isto é, 5 dos 15 participantes optarem por responder o questionário de forma presencial, será necessário a impressão de 5 cópias do questionário e 5 cópias do TCLE. Sendo que, o questionário de um setor é composto por 12 folhas e o TCLE por 2 folhas, e considerando o custo médio de impressão de 1 folha igual a R\$ 0,20, a impressão de 1 questionário e 1 TCLE custam R\$ 2,40 e R\$ 0,40 respectivamente. Para custos com envio de questionário e TCLE para 5 participantes, via Correios, considerou-se um valor médio de 50,00, totalizando 250,00. As considerações

supracitadas foram aplicadas para determinação do custo total, conforme especificado no Quadro 1. A fonte deste recurso será a taxa de bancada da Bolsa de Produtividade em Pesquisa (PQ) do pesquisador responsável (Professor Nilo Cesar Consoli) e será destinada a uma empresa prestadora de serviços de impressão gráfica e a Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos.

Quadro 1 – Orçamento financeiro detalhado para execução da pesquisa

Etapa	Recurso	Fonte	Destinação	Valor unitário (R\$)	Unidade	Valor total (R\$)
Cadastro e aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Aplicação do questionário	Impressão de questionário	Taxa de bancada da Bolsa de Produtividade em Pesquisa (PQ) do pesquisador responsável	Empresa prestadora de serviços de impressão gráfica	2,40	5	12,00
	Impressão de TCLE			0,40	5	2,00
	Envio de questionário e TCLE		Empresa Brasileira de Correios	50,00	5	250,00
Análise e redação dos dados	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Redação de artigo científico	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Total						264,00

5. EQUIPE

Este projeto conta com a participação dos seguintes pesquisadores: i) Mariana Tonini de Araújo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (UFRGS); ii) Suéllen Tonatto Ferrazzo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (UFRGS); iii) Nilo Cesar Consoli, Pós-Graduação em Engenharia Civil (UFRGS), e iv) Cecilia Gravina da Rocha, School of Civil and Environmental Engineering, University of Technology Sydney (UTS). Os pesquisadores serão responsáveis pela coordenação deste projeto e orientações durante a coleta e análise de dados.

6. RESULTADOS ESPERADOS

A partir deste projeto espera-se: (i) identificar e mensurar os impactos sociais da estabilização solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland; (ii) compreender como cada setor

envolvido contribui para os impactos sociais em termos de magnitude (maior ou menor) e sentido (positivo ou negativo), e (iii) compreender como os *stakeholders* (trabalhadores, comunidade local e sociedade) são afetados. Por fim, tais resultados de ACVS serão incluídos na ACV ambiental e econômica (estudos anteriormente realizados) para determinar qual produto é mais sustentável: mistura estabilizada de solo-ligante álcali-ativado ou de solo-cimento Portland. Observa-se que estes resultados serão utilizados tanto na tese das pesquisadoras quanto para a publicação de artigos científicos.

7. CRONOGRAMA

O cronograma proposto para o desenvolvimento deste projeto está apresentado no Quadro 2. O período de duração deste projeto é de 8 meses.

Quadro 2 - Cronograma de execução das atividades da pesquisa

Etapas	2022					2023		
	8	9	10	11	12	1	2	3
Cadastro e aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa	X	X	X					
Aplicação da pesquisa				X				
Análise e redação dos dados				X	X			
Redação de artigo científico					X	X	X	X

REFERÊNCIAS

- BLAND, J.M., ALTMAN, D.G., 1997. Statistics notes: Cronbach's alpha. *BMJ* 314, 572–572. <https://doi.org/10.1136/bmj.314.7080.572>
- DA COSTA, T. P.; QUINTEIRO, P.; TARELHO, L. A. C.; ARROJA, L.; DIAS, A. C. Life cycle assessment of woody biomass ash for soil amelioration. *Waste Management*, v. 101, p. 126–140, 2020.

DA ROCHA, C. G.; PASSUELLO, A.; CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; KANAZAWA, N. M. Life cycle assessment for soil stabilization dosages: A study for the Paraguayan Chaco. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 309–318, 2016.

DONG, Y.H., NG, S.T., 2015. A social life cycle assessment model for building construction in Hong Kong. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 20, 1166–1180.

DREYER, L., 2006. Interpretation of the fundamental ILO conventions into business context: background for development of social LCA. Lyngby, Denmark.

GARRIDO, S. R. Social Life-Cycle Assessment: An introduction. In: ABRAHAM, M. A. (Ed.). *Encyclopedia of Sustainable Technologies*. 1. ed., Elsevier, 2017. v. 1p. 253–265.

GOEDKOOOP, M.J., DE BEER, I., HARMENS, R., SALING, P., FLOREA, A., HETTINGER, A.L., INDRANE, D., VISSER, D., MORAO, A., MUSOKE-FLORES, E., ALVARADO, C., RAWAT, I., SCHENKER, U., HEAD, M., COLLOTTA, M., ANDRO, T., VIOT, J.-F., WHATELET, A., 2020. *Product Social Impact Assessment Handbook - 2020*. Amersfoort.

GRI. G3 Sustainability reporting guidelines. **Global Reporting Initiative**, 2006.

ISO. **ISO 26000**: Guidelines for Social Responsibility. International Organization for Standardization, v. 1, p. 106, 2010.

HOSSAIN, M.U., POON, C.S., DONG, Y.H., LO, I.M.C., CHENG, J.C.P., 2018. Development of social sustainability assessment method and a comparative case study on assessing recycled construction materials. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 23, 1654–1674.

KLOEPFFER, W. State-of-the-art in life cycle sustainability assessment (LCSA): Life cycle sustainability assessment of products. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 2, p. 89–95, 2008.

METHOT, A., 2005. **FIDD: A green and socially responsible venture capital fund**. Presentation on the life cycle approaches for green investment.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA. **Quantidade de acidentes do trabalho, por situação do registro e motivo, segundo a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), no estado do Rio Grande do Sul - 2018/2020**. 2022.

SALDANHA, R. B.; DA ROCHA, C. G.; CAICEDO, A. M. L.; CONSOLI, N. C. Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 298, p. 123648, 2021.

SAMANIEGO, R. A. Q. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SAMUEL, R.; PUPPALA, A. J.; RADOVIC, M. Sustainability benefits assessment of metakaolin-based geopolymer treatment of high plasticity clay. **Sustainability**, v. 12, p. 10495, 2020.

UNEP-SETAC. **Guidelines for social life cycle assessment of products**. 1. ed. Paris: United Nations Environment Programme, 2009.

UNEP/SETAC, 2013. **The Methodological Sheets for Sub - Categories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA)**, Pre publication- Version. The Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA).

VISENTIN, C., DA SILVA TRENTIN, A.W., BRAUN, A.B., THOMÉ, A., 2021. Social life cycle assessment of the nanoscale zero-valent iron synthesis process for application in contaminated site remediation. **Environmental Science and Pollution Research**, 29, p. 21603–21620.

QUESTIONÁRIO – TRANSPORTE RODOVIÁRIO

Dados de perfil

1 - Em qual setor do mercado você trabalha?

- Transporte rodoviário Construção de rodovias Indústria de cimento Portland
- Indústria de cal Indústria de hidróxido de sódio Outro.
- Especifique: _____

2 - Qual sua profissão e/ou cargo ocupado?

Este questionário compreende três categorias sociais:

1. **Trabalhadores:** todas as pessoas da empresa de transporte rodoviário que utilizam da própria força de trabalho para executar obras ou serviços, mediante o pagamento de salário, por exemplo: motorista, mecânico, supervisor, engenheiro, gerente, etc.;
2. **Comunidade Local:** todos os agrupamentos de pessoas que estão dentro da mesma área geográfica onde a empresa está instalada, por exemplo: moradores da região, funcionários de instituições privadas e públicas, etc.;
3. **Sociedade:** grupos de indivíduos humanos que estão sob um mesmo regime político e econômico, em um mesmo território, por exemplo: sociedade brasileira, etc.

Avaliação de indicadores sociais

1. Qual cenário reflete a saúde dos trabalhadores da empresa de transporte rodoviário (isto é, o transporte de materiais e equipamentos dos seus locais de estoque até o canteiro de obras de estradas)?

<input type="checkbox"/>	<u>Nunca</u> ocorreram acidentes de trabalho.
<input type="checkbox"/>	<u>Raramente</u> (menos de uma vez ao ano) ocorre um acidente que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente menos sério</u> (cortes superficiais, fraturas leves, etc.) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério</u> (atropelamento, esmagamento, colisão com outros veículos, queimaduras, etc.) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda permanente</u> da sua capacidade para o trabalho. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério por ano</u> ocasionando a <u>morte</u> do trabalhador. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda permanente e/ou temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

2 – Qual cenário reflete o salário dos trabalhadores da empresa de transporte rodoviário?

<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria, <u>mas a maioria ainda</u> recebe um <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> os trabalhadores recebem <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário pelo menos igual</u> ao piso salarial da categoria, e <u>outros</u> trabalhadores recebem <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem um <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

3 - Qual cenário reflete a participação feminina (incluindo mulheres transexuais e travestis) na força de trabalho da empresa de transporte rodoviário?

<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 20% ou mais da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 15% ou mais e menos de 20% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 10% ou mais e menos de 15% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a mais de 5% e menos de 10% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 5% ou menos da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

4 – Qual cenário reflete o nível de diálogo (ex: pagamento de salário, férias, horas extras, demissões, etc) com a representação coletiva dos trabalhadores para discutir relações de trabalho da empresa de transporte rodoviário?

<input type="checkbox"/>	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, <u>executa os acordos</u> (ex: ajustes salariais, férias, licença paternidade, etc) feitos em negociação coletiva com o sindicato, e <u>consulta o sindicato</u> sobre decisões com grandes consequências (ex: demissões, etc).
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>executa os acordos</u> feitos em negociação coletiva com o sindicato.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, mas <u>não participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>interfere/dificulta a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>não participa</u> de negociação coletiva em negociação coletiva.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

5 – Qual cenário reflete a situação da empresa de transporte rodoviário na saúde e segurança da comunidade local (ex: reduzir/evitar ou favorecer a poluição sonora, poluição de córregos e rios por resíduos ou efluentes/esgoto, contaminação de solos, emissão de gases poluentes, acidentes e/ou mortes ocasionadas por falha tecnológica ou por não cumprimento de procedimentos de segurança do trabalho, etc.)?

()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> (ex: frotas compostas por caminhões de tecnologia avançada) e possui <u>parcerias com empresas público-privadas</u> para melhorar a saúde e a segurança da comunidade local ¹ .
()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> que impactam na saúde e segurança da comunidade local.
()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	<u>Raramente</u> ocorrem acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	Ocorre <u>pelo menos um acidente por ano</u> com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

¹Exemplos: parcerias com prefeituras, hospitais/postos de saúde e empresas para adquirir/doar materiais e equipamentos da saúde e da segurança pública, e materiais de construção para reforma/ampliação de áreas hospitalares/postos de saúde e para iluminação pública, etc.

6 - Qual cenário reflete a situação da empresa de transporte rodoviário no engajamento comunitário (isto é, conjunto de ações para entender as preocupações, necessidades e desejos da comunidade local por meio do diálogo com líderes comunitários)?

<input type="checkbox"/>	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> para entender as demandas da comunidade, <u>possui normas internas</u> para incorporar as demandas das comunidades e leva em <u>consideração as necessidades das minorias locais</u> (ex: LGBTQIA+, indígenas, comunidades ribeirinhas, etc).
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários, e <u>possui normas internas</u> que obrigam a tomada de decisão posteriormente ao consentimento da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>raramente informa ou consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>nunca informa e nunca consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

7 – Qual cenário reflete a situação da empresa de transporte rodoviário no desenvolvimento de habilidades da comunidade local (realização de cursos, palestras ou treinamentos para as pessoas da localidade, de modo a suprir o déficit de mão de obra qualificada para atender às necessidades futuras do empregador)?

()	O empregador oferece <u>cursos relacionados à sua área de atuação</u> (ex: cursos de direção defensiva e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u>todos adultos</u> da comunidade <u>que se interessem</u> e patrocina cursos de capacitação técnica <u>não relacionados à sua área de atuação</u> (ex: cursos de primeiros socorros, informática, idiomas, etc).
()	O empregador oferece apenas <u>cursos relacionados à sua área de atuação</u> (ex: cursos de direção defensiva e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u>todos adultos</u> da comunidade <u>que se interessam</u> .
()	O empregador <u>oferece apenas cursos relacionados à sua área de atuação</u> e apenas para os <u>adultos</u> da comunidade <u>que já atuam no transporte rodoviário</u> .
()	O empregador não oferece cursos mas <u>desenvolveu um plano inicial</u> para qualificar a mão-de-obra local.
()	O empregador <u>não oferece cursos</u> mesmo havendo um déficit de mão-de-obra qualificada para atender às necessidades da empresa
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

8 – Qual cenário reflete a situação da empresa de transporte rodoviário na contribuição para o progresso econômico da sociedade (ex: criação de trabalhos, capacitação técnica, etc)?

<input type="checkbox"/>	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos</u> diretos e indiretos (ex: criação de novas filiais, incentivo ao primeiro emprego e à qualificação profissional, etc) e <u>é reconhecido como uma força construtiva</u> na sociedade.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>nunca se envolveu</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico (ex: evasões fiscais, corrupção, etc).
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e já realizou ações prejudiciais ao progresso econômico, mas mudou sua atitude <u>implementando políticas internas para acabar</u> com essas ações.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não estimula a criação de empregos</u> e <u>se envolve</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico e não implementa/implementou políticas internas para acabar com estas ações.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

9 – Qual cenário reflete a situação da empresa de transporte rodoviário no compromisso público com pautas de sustentabilidade frente a sociedade (ex: saúde e bem-estar, redução de desigualdades, preservação da fauna e flora, ações contra mudanças no clima, etc)?

()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> (ex: caminhões de menor consumo de combustíveis ou com acessórios para redução da emissão de ruídos/gases poluentes, etc) e <u>sociais</u> (ex: pagamento de salário acima do praticado por concorrentes, etc) em seus produtos ou serviços.
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> em seus produtos ou serviços.
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>traçou um plano de ação</u> para práticas mais sustentáveis que <u>ainda não está em funcionamento</u> .
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade, mas <u>nenhum plano de ação foi traçado</u> para práticas mais sustentáveis.
()	O empregador <u>nunca se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

10 – Qual cenário reflete a situação da empresa de transporte rodoviário no desenvolvimento tecnológico da sociedade (ex: criação e/ou melhoria de produtos, serviços, processos ou técnicas como desenvolvimento de novas tecnologias para caminhões visando menor consumo de combustível, estabilidade do veículo, etc.)?

()	O empregador <u>investiu em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades que resultaram em <u>novos produtos/serviços já comercializados no mercado</u> , e <u>continua a investir</u> na <u>criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços</u> .
()	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços</u> .
()	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>aprimoramento de produtos/serviços já existentes</u> .
()	O empregador <u>desenvolveu um plano de ação</u> visando contribuir com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua, mas este plano ainda <u>não foi colocado em prática</u> .
()	O empregador <u>não contribui</u> com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua (não realiza nenhuma das ações listadas acima).
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

Importância dos indicadores sociais

1 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Trabalhadores? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 4 (menos importante).

- () Acidentes de trabalho no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Salário médio dos trabalhadores no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Participação de mulheres no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores

2 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Comunidade Local? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).

- () Riscos para a saúde e segurança da comunidade local
- () Empresa/contratante informa, consulta e envolve a comunidade local
- () Empresa/contratante oferece desenvolvimento de habilidades para a comunidade local

3 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Sociedade? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).

- () Contribuição do serviço/produto para o progresso econômico
- () Compromisso público com pautas de sustentabilidade
- () Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico

4 – Dentre os indicadores considerados mais importantes nas questões 1 a 3, numere-os por ordem de importância (1 = mais importante, 3 = menos importante).

- ()
- ()
- ()

QUESTIONÁRIO – CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS

Dados de perfil

1 - Em qual setor do mercado você trabalha?

Transporte rodoviário Construção de rodovias Indústria de cimento
Portland

Indústria de cal Indústria de hidróxido de sódio Outro.
Especifique: _____

2 - Qual sua profissão e/ou cargo ocupado?

Este questionário compreende três categorias sociais:

1. **Trabalhadores:** todas as pessoas da empresa de construção de estradas que utilizam da própria força de trabalho para executar obras ou serviços, mediante o pagamento de salário, por exemplo: motorista, mecânico, supervisor, engenheiro, gerente, etc.;
2. **Comunidade Local:** todos os agrupamentos de pessoas que estão dentro da mesma área geográfica onde a empresa está instalada, por exemplo: moradores da região, funcionários de instituições privadas e públicas, etc.;
3. **Sociedade:** grupos de indivíduos humanos que estão sob um mesmo regime político e econômico, em um mesmo território, por exemplo: sociedade brasileira, etc.

Avaliação de indicadores sociais

1. Qual cenário reflete a saúde dos trabalhadores da empresa de construção de estradas?

<input type="checkbox"/>	<u>Nunca</u> ocorreram acidentes de trabalho.
<input type="checkbox"/>	<u>Raramente</u> (menos de uma vez ao ano) ocorre um acidente que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente menos sério</u> (cortes superficiais, fraturas leves, etc.) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério</u> (atropelamento, soterramento, esmagamento, queimaduras, choques elétricos, inalação de gases, vapores e material particulado, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda permanente</u> da sua capacidade para o trabalho. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério por ano</u> ocasionando a <u>morte</u> do trabalhador. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda permanente e/ou temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

2 – Qual cenário reflete o salário dos trabalhadores da empresa de construção de estradas?

<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria, <u>mas a maioria ainda</u> recebe um <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> os trabalhadores recebem <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário pelo menos igual</u> ao piso salarial da categoria, e <u>outros</u> trabalhadores recebem <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem um <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

3 - Qual cenário reflete a participação feminina (incluindo mulheres transexuais e travestis) na força de trabalho da empresa de construção de estradas?

<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 30% ou mais da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 20% ou mais e menos de 30% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 10% ou mais e menos de 20% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a mais de 5% e menos de 10% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 5% ou menos da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

4 – Qual cenário reflete o nível de diálogo (ex: pagamento de salário, férias, horas extras, demissões, etc) com a representação coletiva dos trabalhadores para discutir relações de trabalho da empresa de construção de estradas?

<input type="checkbox"/>	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, <u>executa os acordos</u> (ex: ajustes salariais, férias, licença paternidade, etc) feitos em negociação coletiva com o sindicato, e <u>consulta o sindicato</u> sobre decisões com grandes consequências (ex: demissões, etc).
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>executa os acordos</u> feitos em negociação coletiva com o sindicato.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, mas <u>não participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>interfere/dificulta a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>não participa</u> de negociação coletiva em negociação coletiva.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

5 – Qual cenário reflete a situação da empresa de construção de estradas na saúde e segurança da comunidade local (ex: reduzir/evitar ou favorecer a: poluição sonora, poluição de córregos e rios por resíduos ou efluentes/esgoto, contaminação de solos, emissão de gases poluentes, acidentes e/ou mortes ocasionadas por falha tecnológica ou por não cumprimento de procedimentos de segurança do trabalho, etc)?

()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> (ex: veículos e equipamentos com tecnologia avançada, etc) e possui <u>parcerias com empresas público-privadas</u> para melhorar a saúde e a segurança da comunidade local ¹ .
()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> que impactam na saúde e segurança da comunidade local.
()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	<u>Raramente</u> ocorrem acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	Ocorre <u>pelo menos um acidente por ano</u> com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

¹Exemplos: parcerias com prefeituras, hospitais/postos de saúde e empresas para adquirir/doar materiais e equipamentos da saúde e da segurança pública, e materiais de construção para reforma/ampliação de áreas hospitalares/postos de saúde e para iluminação pública, etc.

6 - Qual cenário reflete a situação da empresa de construção de estradas no engajamento comunitário (isto é, conjunto de ações para entender as preocupações, necessidades e desejos da comunidade local por meio do diálogo com líderes comunitários)?

()	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> para entender as demandas da comunidade, <u>possui normas internas</u> para incorporar as demandas das comunidades e leva em <u>consideração as necessidades das minorias locais</u> (ex: LGBTQIA+, indígenas, comunidades ribeirinhas, etc).
()	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários, e <u>possui normas internas</u> que obrigam a tomada de decisão posteriormente ao consentimento da comunidade local.
()	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários.
()	O empregador <u>raramente informa ou consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
()	O empregador <u>nunca informa e nunca consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

7 – Qual cenário reflete a situação da empresa de construção de estradas no desenvolvimento de habilidades da comunidade local (realização de cursos, palestras ou treinamentos para as pessoas da localidade, de modo a suprir o déficit de mão de obra qualificada para atender às necessidades futuras do empregador)?

()	O empregador oferece <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de direção defensiva e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessem </u> e patrocina cursos de capacitação técnica <u> não relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de primeiros socorros, informática, idiomas, etc).
()	O empregador oferece apenas <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de direção defensiva e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessam </u> .
()	O empregador <u> oferece apenas cursos relacionados à sua área de atuação </u> e apenas para os <u> adultos </u> da comunidade <u> que já atuam na construção de estradas </u> .
()	O empregador não oferece cursos mas <u> desenvolveu um plano inicial </u> para qualificar a mão-de-obra local.
()	O empregador <u> não oferece cursos </u> mesmo havendo um déficit de mão-de-obra qualificada para atender às necessidades da empresa
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

8 – Qual cenário reflete a situação da empresa de construção de estradas na contribuição para o progresso econômico da sociedade (ex: criação de trabalhos, capacitação técnica, etc)?

<input type="checkbox"/>	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> (ex: criação de novas filiais, incentivo ao primeiro emprego e à qualificação profissional, etc) e <u>é reconhecido como uma força construtiva</u> na sociedade.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos, e nunca se envolveu</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico (ex: evasões fiscais, corrupção, etc).
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos, e já realizou</u> ações prejudiciais ao progresso econômico, mas mudou sua atitude <u>implementando políticas internas para acabar</u> com essas ações.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos, e se envolve</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico e não implementa/implementou políticas internas para acabar com estas ações.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

9 – Qual cenário reflete a situação da empresa de construção de estradas no compromisso público com pautas de sustentabilidade frente a sociedade (ex: saúde e bem-estar, redução de desigualdades, preservação da fauna e flora, ações contra mudanças no clima, etc)?

()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> (ex: veículos e equipamentos de menor consumo de combustíveis e/ou com acessórios para redução da emissão de ruídos/gases poluentes, etc) e <u>sociais</u> (ex: pagamento de salário acima do praticado por concorrentes, etc) em seus produtos ou serviços.
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> em seus produtos ou serviços.
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>traçou um plano de ação</u> para práticas mais sustentáveis que <u>ainda não está em funcionamento</u> .
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade, mas <u>nenhum plano de ação foi traçado</u> para práticas mais sustentáveis.
()	O empregador <u>nunca se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

10 – Qual cenário reflete a situação da empresa de construção de estradas no desenvolvimento tecnológico da sociedade (ex: criação e/ou melhoria de produtos, serviços, processos ou técnicas como desenvolvimento de pavimentos mais duráveis/sustentáveis, etc)?

<input type="checkbox"/>	O empregador <u>investiu em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades que resultaram em <u>novos produtos/serviços já comercializados no mercado</u> , e <u>continua a investir</u> na criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>aprimoramento de produtos/serviços já existentes</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>desenvolveu um plano de ação</u> visando contribuir com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua, mas este plano ainda <u>não foi colocado em prática</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não contribui</u> com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua (não realiza nenhuma das ações listadas acima).
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

Importância dos indicadores sociais

1 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Trabalhadores? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 4 (menos importante).

- () Acidentes de trabalho no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Salário médio dos trabalhadores no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Participação de mulheres no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores

2 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Comunidade Local? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).

- () Riscos para a saúde e segurança da comunidade local
- () Empresa/contratante informa, consulta e envolve a comunidade local
- () Empresa/contratante oferece desenvolvimento de habilidades para a comunidade local

3 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Sociedade? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).

- () Contribuição do serviço/produto para o progresso econômico
- () Compromisso público com pautas de sustentabilidade
- () Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico

4 – Dentre os indicadores considerados mais importantes nas questões 1 a 3, numere-os por ordem de importância (1 = mais importante, 3 = menos importante):

- ()
- ()
- ()

QUESTIONÁRIO – INDÚSTRIA DE CIMENTO PORTLAND

Dados de perfil

1 - Em qual setor do mercado você trabalha?

- Transporte rodoviário Construção de rodovias Indústria de cimento Portland
- Indústria de cal Indústria de hidróxido de sódio Outro.
- Especifique: _____

2 - Qual sua profissão e/ou cargo ocupado?

Este questionário compreende três categorias sociais:

1. **Trabalhadores:** todas as pessoas da empresa de cimento Portland que utilizam da própria força de trabalho para executar obras ou serviços, mediante o pagamento de salário, por exemplo: motorista, mecânico, operador, químico, supervisor, engenheiro, gerente, etc.;
2. **Comunidade Local:** todos os agrupamentos de pessoas que estão dentro da mesma área geográfica onde a empresa está instalada, por exemplo: moradores da região, funcionários de instituições privadas e públicas, etc.;
3. **Sociedade:** grupos de indivíduos humanos que estão sob um mesmo regime político e econômico, em um mesmo território, por exemplo: sociedade brasileira, etc.

Avaliação de indicadores sociais

1. Qual cenário reflete a saúde dos trabalhadores da empresa de produção de cimento Portland?

<input type="checkbox"/>	<u>Nunca</u> ocorreram acidentes de trabalho.
<input type="checkbox"/>	<u>Raramente</u> (menos de uma vez ao ano) ocorre um acidente que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente menos sério</u> (cortes superficiais, fraturas leves, dores em geral, amnésia, perda da fala, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério</u> (atropelamento, esmagamento, queimaduras, cortes, choques elétricos, inalação de gases, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda permanente</u> da sua capacidade para o trabalho. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério por ano</u> ocasionando a <u>morte</u> do trabalhador. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda permanente e/ou temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

2 – Qual cenário reflete o salário dos trabalhadores da empresa de produção de cimento Portland?

<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria, <u>mas a maioria ainda</u> recebe um <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> os trabalhadores recebem <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário pelo menos igual</u> ao piso salarial da categoria, e <u>outros</u> trabalhadores recebem <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem um <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

3 - Qual cenário reflete a participação feminina (incluindo mulheres transexuais e travestis) na força de trabalho da empresa de produção de cimento Portland?

<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 30% ou mais da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 20% ou mais e menos de 30% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 15% ou mais e menos de 20% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a mais de 10% e menos de 15% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 10% ou menos da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

4 – Qual cenário reflete o nível de diálogo (ex: pagamento de salário, férias, horas extras, demissões, etc) com a representação coletiva dos trabalhadores para discutir relações de trabalho da empresa de produção de cimento Portland?

<input type="checkbox"/>	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, <u>executa os acordos</u> (ex: ajustes salariais, férias, licença paternidade, etc) feitos em negociação coletiva com o sindicato, e <u>consulta o sindicato</u> sobre decisões com grandes consequências (ex: demissões, etc).
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>executa os acordos</u> feitos em negociação coletiva com o sindicato.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, mas <u>não participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>interfere/dificulta a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>não participa</u> de negociação coletiva em negociação coletiva.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

5 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cimento Portland na saúde e segurança da comunidade local (ex: reduzir/evitar ou favorecer a: poluição sonora, poluição de córregos e rios por resíduos ou efluentes/esgoto, contaminação de solos, emissão de gases poluentes, acidentes e/ou mortes ocasionadas por falha tecnológica ou por não cumprimento de procedimentos de segurança do trabalho, etc)?

()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> (ex: embalagens mais resistentes, equipamentos com tecnologia avançada) e possui <u>parcerias com empresas público-privadas</u> para melhorar a saúde e a segurança da comunidade local ¹ .
()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> que impactam na saúde e segurança da comunidade local.
()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	<u>Raramente</u> ocorrem acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	Ocorre <u>pelo menos um acidente por ano</u> com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

¹Exemplos: parcerias com prefeituras, hospitais/postos de saúde e empresas para adquirir/doar materiais e equipamentos da saúde e da segurança pública, e materiais de construção para reforma/ampliação de áreas hospitalares/postos de saúde e para iluminação pública, etc.

6 - Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cimento Portland no engajamento comunitário (isto é, conjunto de ações para entender as preocupações, necessidades e desejos da comunidade local por meio do diálogo com líderes comunitários)?

()	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> para entender as demandas da comunidade, <u>possui normas internas</u> para incorporar as demandas das comunidades e leva em <u>consideração as necessidades das minorias locais</u> (ex: LGBTQIA+, indígenas, comunidades ribeirinhas, etc).
()	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários, e <u>possui normas internas</u> que obrigam a tomada de decisão posteriormente ao consentimento da comunidade local.
()	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários.
()	O empregador <u>raramente informa ou consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
()	O empregador <u>nunca informa e nunca consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

7 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cimento Portland no desenvolvimento de habilidades da comunidade local (realização de cursos, palestras ou treinamentos para as pessoas da localidade, de modo a suprir o déficit de mão de obra qualificada para atender às necessidades futuras do empregador)?

()	O empregador oferece <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de manuseio de produtos químicos e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessem </u> e patrocina cursos de capacitação técnica <u> não relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de primeiros socorros, informática, idiomas, etc).
()	O empregador oferece apenas <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de manuseio de produtos químicos e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessam </u> .
()	O empregador <u> oferece apenas cursos relacionados à sua área de atuação </u> e apenas para os <u> adultos </u> da comunidade <u> que já atuam na produção de cimento Portland </u> .
()	O empregador <u> não oferece cursos </u> mas <u> desenvolveu um plano inicial </u> para qualificar a mão-de-obra local.
()	O empregador <u> não oferece cursos </u> mesmo havendo um déficit de mão-de-obra qualificada para atender às necessidades da empresa
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

8 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cimento Portland na contribuição para o progresso econômico da sociedade (ex: criação de trabalhos, capacitação técnica, etc)?

()	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> (ex: criação de novas filiais, incentivo ao primeiro emprego e à qualificação profissional, etc) e <u>é reconhecido</u> como uma força construtiva na sociedade.
()	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> .
()	O empregador <u>não estimula</u> a criação de empregos diretos e indiretos, e <u>nunca se envolveu</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico (ex: evasões fiscais, corrupção, etc).
()	O empregador <u>não estimula</u> a criação de empregos diretos e indiretos, e <u>já realizou</u> ações prejudiciais ao progresso econômico, mas mudou sua atitude <u>implementando políticas internas para acabar</u> com essas ações.
()	O empregador <u>não estimula</u> a criação de empregos diretos e indiretos, e <u>se envolve</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico e não implementa/implementou políticas internas para acabar com estas ações.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

9 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cimento Portland no compromisso público com pautas de sustentabilidade frente a sociedade (ex: saúde e bem-estar, redução de desigualdades, preservação da fauna e flora, ações contra mudanças no clima, etc)?

()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> (ex: equipamentos com menor consumo de eletricidade, equipamentos para redução da emissão de ruídos/gases poluentes, etc) e <u>sociais</u> (ex: pagamento de salário acima do praticado por concorrentes, etc) em seus produtos ou serviços.
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> em seus produtos ou serviços.
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>traçou um plano de ação</u> para práticas mais sustentáveis que <u>ainda não está em funcionamento</u> .
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade, mas <u>nenhum plano de ação foi traçado</u> para práticas mais sustentáveis.
()	O empregador <u>nunca se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

10 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cimento Portland no desenvolvimento tecnológico da sociedade (ex: criação e/ou melhoria de produtos, serviços, processos ou técnicas como desenvolvimento de novas embalagens para o produto, etc)?

<input type="checkbox"/>	O empregador <u>investiu em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades que resultaram em <u>novos produtos/serviços já comercializados no mercado</u> , e <u>continua a investir na criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para criação e/ou <u>aprimoramento de produtos/serviços</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>aprimoramento de produtos/serviços já existentes</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>desenvolveu um plano de ação</u> visando contribuir com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua, mas este plano ainda <u>não foi colocado em prática</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não contribui</u> com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua (não realiza nenhuma das ações listadas acima).
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

Importância dos indicadores sociais (do ponto de vista do profissional)

1 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Trabalhadores? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 4 (menos importante). Não pode haver repetição de números.

- () Acidentes de trabalho no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Salário médio dos trabalhadores no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Participação de mulheres no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores

2 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Comunidade Local? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante). Não pode haver repetição de números.

- () Riscos para a saúde e segurança da comunidade local
- () Empresa/contratante informa, consulta e envolve a comunidade local
- () Empresa/contratante oferece desenvolvimento de habilidades para a comunidade local

3 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Sociedade? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante). Não pode haver repetição de números.

- () Contribuição do serviço/produto para o progresso econômico
- () Compromisso público com pautas de sustentabilidade
- () Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico

4 – Dentre os indicadores considerados mais importantes nas questões 1 a 3, numere-os por ordem de importância (1 = mais importante, 3 = menos importante):

- ()
- ()
- ()

QUESTIONÁRIO – INDÚSTRIA DE CAL

Dados de perfil

1 - Em qual setor do mercado você trabalha?

Transporte rodoviário Construção de rodovias Indústria de cimento
Portland

Indústria de cal Indústria de hidróxido de sódio Outro.
Especifique: _____

2 - Qual sua profissão e/ou cargo ocupado?

Este questionário compreende três categorias sociais:

1. **Trabalhadores:** todas as pessoas da empresa de produção de cal que utilizam da própria força de trabalho para executar obras ou serviços, mediante o pagamento de salário, por exemplo: motorista, químico, operador, supervisor, engenheiro, gerente, etc.;
2. **Comunidade Local:** todos os agrupamentos de pessoas que estão dentro da mesma área geográfica onde a empresa está instalada, por exemplo: moradores da região, funcionários de instituições privadas e públicas, etc.;
3. **Sociedade:** grupos de indivíduos humanos que estão sob um mesmo regime político e econômico, em um mesmo território, por exemplo: sociedade brasileira, etc.

Avaliação de indicadores sociais

1. Qual cenário reflete a saúde dos trabalhadores da empresa de produção de cal?

<input type="checkbox"/>	<u>Nunca</u> ocorreram acidentes de trabalho.
<input type="checkbox"/>	<u>Raramente</u> (menos de uma vez ao ano) ocorre um acidente que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente menos sério</u> (cortes superficiais, fraturas leves, dores em geral, amnésia, perda da fala, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério</u> (atropelamento, esmagamento, queimaduras, cortes, choques elétricos, inalação de gases, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda permanente</u> da sua capacidade para o trabalho. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério por ano</u> ocasionando a <u>morte</u> do trabalhador. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda permanente e/ou temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

2 – Qual cenário reflete o salário dos trabalhadores da empresa de produção de cal?

<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria, <u>mas a maioria ainda</u> recebe um <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> os trabalhadores recebem <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário pelo menos igual</u> ao piso salarial da categoria, e <u>outros</u> trabalhadores recebem <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem um <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

3 - Qual cenário reflete a participação feminina (incluindo mulheres transexuais e travestis) na força de trabalho da empresa de produção de cal?

<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 30% ou mais da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 20% ou mais e menos de 30% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 15% ou mais e menos de 20% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a mais de 10% e menos de 15% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 10% ou menos da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

4 – Qual cenário reflete o nível de diálogo (ex: pagamento de salário, férias, horas extras, demissões, etc) com a representação coletiva dos trabalhadores para discutir relações de trabalho da empresa de produção de cal?

<input type="checkbox"/>	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, <u>executa os acordos</u> (ex: ajustes salariais, férias, licença paternidade, etc) feitos em negociação coletiva com o sindicato, e <u>consulta o sindicato</u> sobre decisões com grandes consequências (ex: demissões, etc).
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>executa os acordos</u> feitos em negociação coletiva com o sindicato.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, mas <u>não participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>interfere/dificulta a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>não participa</u> de negociação coletiva em negociação coletiva.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

5 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cal na saúde e segurança da comunidade local (ex: reduzir/evitar ou favorecer a: poluição sonora, poluição de córregos e rios por resíduos ou efluentes/esgoto, contaminação de solos, emissão de gases poluentes, acidentes e/ou mortes ocasionadas por falha tecnológica ou por não cumprimento de procedimentos de segurança do trabalho, etc)?

()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> (ex: embalagens mais resistentes, equipamentos com tecnologia avançada, etc) e possui <u>parcerias com empresas público-privadas</u> para melhorar a saúde e a segurança da comunidade local ¹ .
()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> que impactam na saúde e segurança da comunidade local.
()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	<u>Raramente</u> ocorrem acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	Ocorre <u>pelo menos um acidente por ano</u> com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

¹Exemplos: parcerias com prefeituras, hospitais/postos de saúde e empresas para adquirir/doar materiais e equipamentos da saúde e da segurança pública, e materiais de construção para reforma/ampliação de áreas hospitalares/postos de saúde e para iluminação pública, etc.

6 - Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cal no engajamento comunitário (isto é, conjunto de ações para entender as preocupações, necessidades e desejos da comunidade local por meio do diálogo com líderes comunitários)?

()	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> para entender as demandas da comunidade, <u>possui normas internas</u> para incorporar as demandas das comunidades e leva em <u>consideração as necessidades das minorias locais</u> (ex: LGBTQIA+, indígenas, comunidades ribeirinhas, etc).
()	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários, e <u>possui normas internas</u> que obrigam a tomada de decisão posteriormente ao consentimento da comunidade local.
()	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários.
()	O empregador <u>raramente informa ou consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
()	O empregador <u>nunca informa e nunca consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

7 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cal no desenvolvimento de habilidades da comunidade local (realização de cursos, palestras ou treinamentos para as pessoas da localidade, de modo a suprir o déficit de mão de obra qualificada para atender às necessidades futuras do empregador)?

()	O empregador oferece <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de manuseio de produtos químicos e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessem </u> e patrocina cursos de capacitação técnica <u> não relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de primeiros socorros, informática, idiomas, etc).
()	O empregador oferece apenas <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de manuseio de produtos químicos e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessem </u> .
()	O empregador <u> oferece apenas cursos relacionados à sua área de atuação </u> e apenas para os <u> adultos </u> da comunidade <u> que já atuam na produção de cal </u> .
()	O empregador não oferece cursos, mas <u> desenvolveu um plano inicial </u> para qualificar a mão-de-obra local.
()	O empregador <u> não oferece cursos </u> mesmo havendo um déficit de mão-de-obra qualificada para atender às necessidades da empresa.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

8 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cal na contribuição para o progresso econômico da sociedade (ex: criação de trabalhos, capacitação técnica, etc)?

<input type="checkbox"/>	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> (ex: criação de novas filiais, incentivo ao primeiro emprego e à qualificação profissional, etc), e <u>é reconhecido como uma força construtiva</u> na sociedade.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não estimula</u> a criação de empregos diretos e indiretos, e <u>nunca se envolveu</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico (ex: evasões fiscais, corrupção, etc).
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não estimula</u> a criação de empregos diretos e indiretos, e já realizou ações prejudiciais ao progresso econômico, mas mudou sua atitude <u>implementando políticas internas para acabar</u> com essas ações.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não estimula</u> a criação de empregos diretos e indiretos, e se envolve em ações prejudiciais ao progresso econômico e não implementa/implementou políticas internas para acabar com estas ações.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

9 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cal no compromisso público com pautas de sustentabilidade frente a sociedade (ex: saúde e bem-estar, redução de desigualdades, preservação da fauna e flora, ações contra mudanças no clima, etc)?

()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> (ex: equipamentos com menor consumo de eletricidade, equipamentos para redução da emissão de ruídos/gases poluentes, etc) e <u>sociais</u> (ex: pagamento de salário acima do praticado por concorrentes, etc) em seus produtos ou serviços.
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> em seus produtos ou serviços.
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>traçou um plano de ação</u> para práticas mais sustentáveis que <u>ainda não está em funcionamento</u> .
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade, mas <u>nenhum plano de ação foi traçado</u> para práticas mais sustentáveis.
()	O empregador <u>nunca se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

10 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cal no desenvolvimento tecnológico da sociedade (ex: criação e/ou melhoria de produtos, serviços, processos ou técnicas como desenvolvimento de novas embalagens para o produto, etc)?

<input type="checkbox"/>	O empregador <u>investiu em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades que resultaram em <u>novos produtos/serviços já comercializados no mercado</u> , e <u>continua a investir</u> na criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços.
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>aprimoramento de produtos/serviços já existentes</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>desenvolveu um plano de ação</u> visando contribuir com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua, mas este plano ainda <u>não foi colocado em prática</u> .
<input type="checkbox"/>	O empregador <u>não contribui</u> com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua (não realiza nenhuma das ações listadas acima).
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

Importância dos indicadores sociais

1 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Trabalhadores? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 4 (menos importante).

- () Acidentes de trabalho no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Salário médio dos trabalhadores no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Participação de mulheres no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores

2 – Qual a Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Comunidade Local? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).

- () Riscos para a saúde e segurança da comunidade local
- () Empresa/contratante informa, consulta e envolve a comunidade local
- () Empresa/contratante oferece desenvolvimento de habilidades para a comunidade local

3 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Sociedade? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).

- () Contribuição do serviço/produto para o progresso econômico
- () Compromisso público com pautas de sustentabilidade
- () Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico

4 – Dentre os indicadores considerados mais importantes nas questões 1 a 3, numere-os por ordem de importância (1 = mais importante, 3 = menos importante):

- ()
- ()
- ()

QUESTIONÁRIO – INDÚSTRIA DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO

Dados de perfil

1 - Em qual setor do mercado você trabalha?

- Transporte rodoviário Construção de rodovias Indústria de cimento Portland
- Indústria de cal Indústria de hidróxido de sódio Outro.
- Especifique: _____

2 - Qual sua profissão e/ou cargo ocupado?

Este questionário compreende três categorias sociais:

1. **Trabalhadores:** todas as pessoas da empresa de hidróxido de sódio que utilizam da própria força de trabalho para executar obras ou serviços, mediante o pagamento de salário, por exemplo: motorista, químico, operador, supervisor, engenheiro, gerente, etc.;
2. **Comunidade Local:** todos os agrupamentos de pessoas que estão dentro da mesma área geográfica onde a empresa está instalada, por exemplo: moradores da região, funcionários de instituições privadas e públicas, etc.;
3. **Sociedade:** grupos de indivíduos humanos que estão sob um mesmo regime político e econômico, em um mesmo território, por exemplo: sociedade brasileira, etc.

Avaliação de indicadores sociais

1. Qual cenário reflete a saúde dos trabalhadores da empresa de produção de hidróxido de sódio?

<input type="checkbox"/>	<u>Nunca</u> ocorreram acidentes de trabalho.
<input type="checkbox"/>	<u>Raramente</u> (menos de uma vez ao ano) ocorre um acidente que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente menos sério</u> (cortes superficiais, fraturas leves, dores em geral, amnésia, perda da fala, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério</u> (atropelamento, esmagamento, queimaduras, cortes, choques elétricos, inalação de gases, problemas respiratórios graves, perda de visão, irritações, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda permanente</u> da sua capacidade para o trabalho. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério por ano</u> ocasionando a <u>morte</u> do trabalhador. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda permanente e/ou temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

2 – Qual cenário reflete o salário dos trabalhadores da empresa de produção de hidróxido de sódio?

<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria, <u>mas a maioria ainda</u> recebe um <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> os trabalhadores recebem <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário pelo menos igual</u> ao piso salarial da categoria, e <u>outros</u> trabalhadores recebem <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem um <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

3 - Qual cenário reflete a participação feminina (incluindo mulheres transexuais e travestis) na força de trabalho da empresa de produção de hidróxido de sódio?

<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 20% ou mais da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 15% ou mais e menos de 20% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 10% ou mais e menos de 15% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a mais de 5% e menos de 10% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 5% ou menos da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

4 – Qual cenário reflete o nível de diálogo (ex: pagamento de salário, férias, horas extras, demissões, etc) com a representação coletiva dos trabalhadores para discutir relações de trabalho da empresa de produção de hidróxido de sódio?

()	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, <u>executa os acordos</u> (ex: ajustes salariais, férias, licença paternidade, etc) feitos em negociação coletiva com o sindicato, e <u>consulta o sindicato</u> sobre decisões com grandes consequências (ex: demissões, etc).
()	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>executa os acordos</u> feitos em negociação coletiva com o sindicato.
()	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
()	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, mas <u>não participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
()	O empregador <u>interfere/dificulta a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>não participa</u> de negociação coletiva em negociação coletiva.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

5 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de hidróxido de sódio na saúde e segurança da comunidade local (ex: reduzir/evitar ou favorecer a: poluição sonora, poluição de córregos e rios por resíduos ou efluentes/esgoto, contaminação de solos, emissão de gases poluentes, acidentes e/ou mortes ocasionadas por falha tecnológica ou por não cumprimento de procedimentos de segurança do trabalho, etc)?

()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> (ex: embalagens mais resistentes, equipamentos com tecnologia avançada, etc) e possui <u>parcerias com empresas público-privadas</u> para melhorar a saúde e a segurança da comunidade local ¹ .
()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> que impactam na saúde e segurança da comunidade local.
()	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	<u>Raramente</u> ocorrem acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	Ocorre <u>pelo menos um acidente por ano</u> com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

¹Exemplos: parcerias com prefeituras, hospitais/postos de saúde e empresas para adquirir/doar materiais e equipamentos da saúde e da segurança pública, e materiais de construção para reforma/ampliação de áreas hospitalares/postos de saúde e para iluminação pública, etc.

6 - Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de hidróxido de sódio no engajamento comunitário (isto é, conjunto de ações para entender as preocupações, necessidades e desejos da comunidade local por meio do diálogo com líderes comunitários)?

()	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> para entender as demandas da comunidade, <u>possui normas internas</u> para incorporar as demandas das comunidades e leva em <u>consideração as necessidades das minorias locais</u> (ex: LGBTQIA+, indígenas, comunidades ribeirinhas, etc).
()	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários, e <u>possui normas internas</u> que obrigam a tomada de decisão posteriormente ao consentimento da comunidade local.
()	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários.
()	O empregador <u>raramente informa ou consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
()	O empregador <u>nunca informa e nunca consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

7 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de hidróxido de sódio no desenvolvimento de habilidades da comunidade local (realização de cursos, palestras ou treinamentos para as pessoas da localidade, de modo a suprir o déficit de mão de obra qualificada para atender às necessidades futuras do empregador)?

()	O empregador oferece <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de manuseio de produtos químicos e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessem </u> e patrocina cursos de capacitação técnica <u> não relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de primeiros socorros, informática, idiomas, etc).
()	O empregador oferece apenas <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de manuseio de produtos químicos e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessem </u> .
()	O empregador <u> oferece apenas cursos relacionados à sua área de atuação </u> e apenas para os <u> adultos </u> da comunidade <u> que já atuam na produção de hidróxido de sódio </u> .
()	O empregador não oferece cursos, mas <u> desenvolveu um plano inicial </u> para qualificar a mão-de-obra local.
()	O empregador <u> não oferece cursos </u> mesmo havendo um déficit de mão-de-obra qualificada para atender às necessidades da empresa.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

8 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de hidróxido de sódio na contribuição para o progresso econômico da sociedade (ex: criação de trabalhos, capacitação técnica, etc)?

()	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> (ex: criação de novas filiais, incentivo ao primeiro emprego e à qualificação profissional, etc), e <u>é reconhecido</u> como uma <u>força construtiva</u> na sociedade.
()	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> .
()	O empregador <u>não estimula</u> a criação de <u>empregos diretos e indiretos</u> , e <u>nunca se envolveu</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico (ex: evasões fiscais, corrupção, etc).
()	O empregador <u>não estimula</u> a criação de <u>empregos diretos e indiretos</u> , e <u>já realizou</u> ações prejudiciais ao progresso econômico, mas mudou sua atitude <u>implementando políticas internas para acabar</u> com essas ações.
()	O empregador <u>não estimula</u> a criação de <u>empregos diretos e indiretos</u> , e <u>se envolve</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico e <u>não implementa/implementou</u> políticas internas para acabar com estas ações.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

9 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de hidróxido de sódio no compromisso público com pautas de sustentabilidade frente a sociedade (ex: saúde e bem-estar, redução de desigualdades, preservação da fauna e flora, ações contra mudanças no clima, etc)?

()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> (ex: equipamentos com menor consumo de eletricidade, equipamentos para redução da emissão de ruídos/gases poluentes, etc) e <u>sociais</u> (ex: pagamento de salário acima do praticado por concorrentes, etc) em seus produtos ou serviços.
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> em seus produtos ou serviços.
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>traçou um plano de ação</u> para práticas mais sustentáveis que <u>ainda não está em funcionamento</u> .
()	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade, mas <u>nenhum plano de ação foi traçado</u> para práticas mais sustentáveis.
()	O empregador <u>nunca se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade.
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

10 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de hidróxido de sódio no desenvolvimento tecnológico da sociedade (ex: criação e/ou melhoria de produtos, serviços, processos ou técnicas como desenvolvimento de novas embalagens para o produto, etc)?

()	O empregador <u>investiu em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades que resultaram em <u>novos produtos/serviços já comercializados no mercado</u> , e <u>continua a investir</u> na criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços.
()	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços</u> .
()	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>aprimoramento de produtos/serviços já existentes</u> .
()	O empregador <u>desenvolveu um plano de ação</u> visando contribuir com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua, mas este plano ainda <u>não foi colocado em prática</u> .
()	O empregador <u>não contribui</u> com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua (não realiza nenhuma das ações listadas acima).
()	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

Importância dos indicadores sociais

1 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Trabalhadores? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 4 (menos importante). Não pode haver repetição de números.

- () Acidentes de trabalho no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Salário médio dos trabalhadores no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Participação de mulheres no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- () Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores

2 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Comunidade Local? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante). Não pode haver repetição de números.

- () Riscos para a saúde e segurança da comunidade local
- () Empresa/contratante informa, consulta e envolve a comunidade local
- () Empresa/contratante oferece desenvolvimento de habilidades para a comunidade local

3 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Sociedade? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante). Não pode haver repetição de números.

- () Contribuição do serviço/produto para o progresso econômico
- () Compromisso público com pautas de sustentabilidade
- () Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico

4 – Dentre os indicadores considerados mais importantes nas questões 1 a 3, numere-os por ordem de importância (1 = mais importante, 3 = menos importante):

- ()
- ()
- ()

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (Questionário)

Nº CAAE: 62830022.6.0000.5347

Título do Projeto: Análise de ciclo de vida social de misturas solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland

Orientador: Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli

Pesquisador Responsável: Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Telefone, e-mail e endereço para contato: Av. Osvaldo Aranha, 99. 3º andar, Campus Centro,

E-mail pesquisador responsável: consoli@ufrgs.br, +55 51 3308-3416

Local da coleta de dados: Regiões Sul e Sudeste do País (Brasil)

Você está sendo convidado a participar de uma pesquisa cujo objetivo é avaliar os impactos sociais envolvidos na estabilização de solo para base e sub-base de pavimentos, utilizando um ligante álcali-ativado (a base de resíduos agroindustriais) e cimento Portland. Se você aceitar participar da pesquisa, o procedimento envolvido em sua participação consiste em responder um questionário com perguntas relacionadas a indicadores de impactos sociais nos setores de mercado de trabalho envolvidos na estabilização de solo.

Não há qualquer possibilidade de danos à dimensão física, psíquica, moral, intelectual, social, cultural ou espiritual do ser humano, isto é, qualquer dano direto/indireto, bem como tardio/imediato, ao participante de pesquisa. O potencial risco seria em despendar tempo - aproximadamente 20 minutos - para responder ao questionário. Os benefícios para o participante da pesquisa e/ou sua comunidade serão de forma indireta. Ao participar da pesquisa o participante estará auxiliando no desenvolvimento de um novo produto, mais sustentável, e que no futuro pode ser comercializado e utilizado em obras de engenharia. Este novo produto reduzirá impactos ambientais (por exemplo, emissão de CO₂) e terá impactos sociais (por exemplo, geração de empregos devido a uma nova tecnologia) que se relacionam diretamente aos participantes da pesquisa.

Sua participação na pesquisa é totalmente voluntária, ou seja, não é obrigatória. Caso você decida não participar, ou ainda, desistir de participar e retirar seu consentimento, não haverá nenhum prejuízo. Não está previsto nenhum tipo de pagamento pela sua participação na pesquisa e você não terá nenhum custo com respeito aos procedimentos envolvidos, a não ser o tempo destinado à participação. Os dados coletados durante a pesquisa serão tratados confidencialmente. Os resultados serão apresentados de forma conjunta, sem a identificação

dos participantes. O pesquisador ficará responsável por guardar todos os e-mails enviados e recebidos com a anuência dos participantes pelo tempo mínimo de 5 anos após o término da pesquisa. Caso você tenha dúvidas, poderá entrar em contato com a pesquisadora Mariana Tonini de Araújo, pelo e-mail marianatonini93@gmail.com. A assinatura desse termo não exclui possibilidade do participante buscar indenização diante de eventuais danos decorrentes de sua participação na pesquisa.

O projeto foi avaliado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da UFRGS (CEP-UFRGS), órgão colegiado de caráter consultivo, deliberativo e educativo, cuja finalidade é avaliar – emitir parecer e acompanhar os projetos de pesquisa envolvendo seres humanos em seus aspectos éticos e metodológicos, realizados no âmbito da instituição. Você pode entrar em contato com o CEP-UFRGS no endereço Av. Paulo Gama, 110, sala 311, prédio Anexo I da Reitoria Campus Centro, Porto Alegre/RS, CEP: 90040-060; fone +55 51 3308-3787; e-mail: etica@propesq.ufrgs.br. Horário de funcionamento de segunda a sexta-feira das 08:00 às 12:00 e das 13:00 às 17:00. Cabe salientar que no período da pandemia de Covid19, informações serão fornecidas via e-mail.

(Para os participantes de pesquisa que aceitarem participar da pesquisa será fornecido via e-mail o termo de consentimento livre e esclarecido e o questionário.

Declaro que li e estou de acordo:

APÊNDICE B

Tabelas ANOVA para RCS, RCD e G₀ das misturas RAF-LAA e RAF-CPV respectivamente.

Tabela ANOVA – RCS de RAF-LAA.

Fonte	GL	SQ	MQ	Valor-F	Valor-p
Teor de umidade	1	4,157	4,157	217,25	0,0000
Peso específico	1	95,136	95,136	4972,46	0,0000
Teor de ligante	1	116,181	116,181	6072,47	0,0000
Temperatura de cura	1	34,619	34,619	1809,41	0,0000
Tempo de cura	1	22,149	22,149	1157,65	0,0000
Teor de umidade*Peso específico	1	0,293	0,293	15,31	0,0004
Teor de umidade*Teor de ligante	1	2,179	2,179	113,91	0,0000
Teor de umidade*Temperatura de cura	1	0,812	0,812	42,45	0,0000
Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,844	0,844	44,12	0,0000
Peso específico*Teor de ligante	1	21,961	21,961	1147,83	0,0000
Peso específico*Temperatura de cura	1	3,102	3,102	162,13	0,0000
Peso específico*Tempo de cura	1	2,291	2,291	119,77	0,0000
Teor de ligante*Temperatura de cura	1	6,534	6,534	341,53	0,0000
Teor de ligante*Tempo de cura	1	3,399	3,399	177,68	0,0000
Temperatura de cura*Tempo de cura	1	1,779	1,779	92,98	0,0000
Teor de umidade*Peso específico*Teor de ligante	1	0,21	0,21	11	0,0021
Teor de umidade *Peso específico*Temperatura de cura	1	0,034	0,034	1,76	0,1924
Teor de umidade*Peso específico*Tempo de cura	1	0,326	0,326	17,06	0,0002
Teor de umidade*Teor de ligante*Temperatura de cura	1	0,517	0,517	27	0,0000
Teor de umidade*Teor de ligante*Tempo de cura	1	0,424	0,424	22,17	0,0000
Teor de umidade *Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,063	0,063	3,3	0,0776
Peso específico*Teor de ligante*Temperatura de cura	1	0,105	0,105	5,48	0,0249
Peso específico*Teor de ligante*Tempo de cura	1	0,049	0,049	2,56	0,1184
Peso específico*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,177	0,177	9,27	0,0043
Teor de ligante*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,041	0,041	2,12	0,1544
Teor de umidade*Peso específico*Teor de ligante*Temperatura de cura	1	0,037	0,037	1,91	0,1753
Teor de umidade*Peso específico*Teor de ligante*Tempo de cura	1	0,264	0,264	13,8	0,0007
Teor de umidade*Peso específico*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,125	0,125	6,54	0,0149
Teor de umidade*Teor de ligante*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,009	0,009	0,46	0,5023
Peso específico*Teor de ligante*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	1,235	1,235	64,54	0,0000
Teor de umidade*Peso específico*Teor de ligante*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,19	0,19	9,95	0,0032
Curvatura	1	0,696	0,696	36,36	0,0000
Erro	36	0,689	0,019		
Total	68	320,627			

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos Quadrados.

Tabela ANOVA – RCD de RAF-LAA.

Fonte	GL	SQ	MQ	Valor-F	Valor-p
Teor de umidade	1	0,06414	0,06414	98,87	0,0000
Peso específico	1	1,02972	1,02972	1587,36	0,0000
Teor de ligante	1	1,15778	1,15778	1784,76	0,0000
Temperatura de cura	1	0,63083	0,63083	972,46	0,0000
Tempo de cura	1	0,22373	0,22373	344,89	0,0000
Teor de umidade*Peso específico	1	0,00936	0,00936	14,43	0,0005
Teor de umidade*Teor de ligante	1	0,02924	0,02924	45,08	0,0000
Teor de umidade*Temperatura de cura	1	0,01249	0,01249	19,25	0,0001
Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,01188	0,01188	18,32	0,0001
Peso específico*Teor de ligante	1	0,23571	0,23571	363,36	0,0000
Peso específico*Temperatura de cura	1	0,06313	0,06313	97,31	0,0000
Peso específico*Tempo de cura	1	0,02873	0,02873	44,29	0,0000
Teor de ligante*Temperatura de cura	1	0,07981	0,07981	123,02	0,0000
Teor de ligante*Tempo de cura	1	0,04295	0,04295	66,21	0,0000
Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,01199	0,01199	18,48	0,0001
Teor de umidade*Peso específico*Teor de ligante	1	0,00648	0,00648	9,99	0,0032
Teor de umidade *Peso específico*Temperatura de cura	1	0,00143	0,00143	2,2	0,1470
Teor de umidade*Peso específico*Tempo de cura	1	0,00714	0,00714	11,01	0,0021
Teor de umidade*Teor de ligante*Temperatura de cura	1	0,00397	0,00397	6,12	0,0182
Teor de umidade*Teor de ligante*Tempo de cura	1	0,00985	0,00985	15,19	0,0004
Teor de umidade *Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,00314	0,00314	4,83	0,0344
Peso específico*Teor de ligante*Temperatura de cura	1	0,00442	0,00442	6,82	0,0131
Peso específico*Teor de ligante*Tempo de cura	1	0,00936	0,00936	14,43	0,0005
Peso específico*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,00469	0,00469	7,23	0,0108
Teor de ligante*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,00223	0,00223	3,44	0,0718
Teor de umidade*Peso específico*Teor de ligante*Temperatura de cura	1	0,00044	0,00044	0,68	0,4151
Teor de umidade*Peso específico*Teor de ligante*Tempo de cura	1	0,00473	0,00473	7,29	0,0105
Teor de umidade*Peso específico*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,0064	0,0064	9,87	0,0034
Teor de umidade*Teor de ligante*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,003	0,003	4,62	0,0384
Peso específico*Teor de ligante*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,00219	0,00219	3,37	0,0747
Teor de umidade*Peso específico*Teor de ligante*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,00559	0,00559	8,61	0,0058
Curvatura	1	0,01212	0,01212	18,68	0,0001
Erro	36	0,02335	0,00065		
Total	68	3,742			

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos Quadrados.

Tabela ANOVA – G₀ de RAF-LAA.

Fonte	GL	SQ	MQ	Valor-F	Valor-p
Teor de umidade	1	3,7E+06	3,7E+06	242,93	0,0000
Peso específico	1	8,8E+07	8,8E+07	5763,98	0,0000
Teor de ligante	1	1,1E+08	1,1E+08	7474,42	0,0000
Temperatura de cura	1	2,8E+07	2,8E+07	1858,17	0,0000
Tempo de cura	1	1,6E+07	1,6E+07	1061,69	0,0000
Teor de umidade*Peso específico	1	3,3E+04	3,3E+04	2,2	0,1468
Teor de umidade*Teor de ligante	1	1,8E+06	1,8E+06	118,02	0,0000
Teor de umidade*Temperatura de cura	1	5,1E+05	5,1E+05	33,57	0,0000
Teor de umidade*Tempo de cura	1	8,6E+05	8,6E+05	56,72	0,0000
Peso específico*Teor de ligante	1	2,2E+07	2,2E+07	1464,95	0,0000
Peso específico*Temperatura de cura	1	1,5E+06	1,5E+06	95,61	0,0000
Peso específico*Tempo de cura	1	2,1E+06	2,1E+06	140,25	0,0000
Teor de ligante*Temperatura de cura	1	7,5E+06	7,5E+06	490,49	0,0000
Teor de ligante*Tempo de cura	1	4,1E+06	4,1E+06	270,81	0,0000
Temperatura de cura*Tempo de cura	1	9,8E+05	9,8E+05	64,6	0,0000
Teor de umidade*Peso específico*Teor de ligante	1	2,9E+03	2,9E+03	0,19	0,6671
Teor de umidade *Peso específico*Temperatura de cura	1	1,6E+05	1,6E+05	10,81	0,0023
Teor de umidade*Peso específico*Tempo de cura	1	7,0E+00	7,0E+00	0	0,9824
Teor de umidade*Teor de ligante*Temperatura de cura	1	6,6E+05	6,6E+05	43,72	0,0000
Teor de umidade*Teor de ligante*Tempo de cura	1	2,9E+05	2,9E+05	19,25	0,0001
Teor de umidade *Temperatura de cura*Tempo de cura	1	3,3E+05	3,3E+05	21,46	0,0000
Peso específico*Teor de ligante*Temperatura de cura	1	1,8E+05	1,8E+05	11,64	0,0016
Peso específico*Teor de ligante*Tempo de cura	1	4,9E+03	4,9E+03	0,33	0,5721
Peso específico*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	5,1E+05	5,1E+05	33,37	0,0000
Teor de ligante*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	5,9E+04	5,9E+04	3,87	0,0570
Teor de umidade*Peso específico*Teor de ligante*Temperatura de cura	1	4,1E+03	4,1E+03	0,27	0,6073
Teor de umidade*Peso específico*Teor de ligante*Tempo de cura	1	8,3E+03	8,3E+03	0,55	0,4639
Teor de umidade*Peso específico*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	1,2E+05	1,2E+05	7,8	0,0083
Teor de umidade*Teor de ligante*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	1,4E+05	1,4E+05	9,22	0,0044
Peso específico*Teor de ligante*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	2,4E+06	2,4E+06	156,67	0,0000
Teor de umidade*Peso específico*Teor de ligante*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	2,9E+05	2,9E+05	19,3	0,0001
Curvatura	1	6,0E+05	6,0E+05	39,57	0,0000
Erro	36	5,5E+05	1,5E+04		
Total	68	3,0E+08			

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos Quadrados.

Tabela ANOVA – RCS de RAF-CPV.

Fonte	GL	SQ	MQ	Valor-F	Valor-p
Teor de umidade	1	2,7823	2,7823	97,53	0,0000
Teor de cimento	1	23,4477	23,4477	821,91	0,0000
Temperatura de cura	1	4,002	4,002	140,28	0,0000
Tempo de cura	1	10,7592	10,7592	377,14	0,0000
Teor de umidade*Teor de cimento	1	0,4646	0,4646	16,29	0,0007
Teor de umidade*Temperatura de cura	1	0,0336	0,0336	1,18	0,2914
Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,0557	0,0557	1,95	0,1785
Teor de cimento*Temperatura de cura	1	0,0001	0,0001	0	0,9657
Teor de cimento*Tempo de cura	1	0,0089	0,0089	0,31	0,5835
Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,6802	0,6802	23,84	0,0001
Teor de umidade*Teor de cimento* Temperatura de cura	1	0,0093	0,0093	0,32	0,5756
Teor de umidade*Teor de cimento*Tempo de cura	1	0,0083	0,0083	0,29	0,5949
Teor de umidade*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,0952	0,0952	3,34	0,0835
Teor de cimento*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,0229	0,0229	0,8	0,3814
Teor de umidade*Teor de cimento*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,0724	0,0724	2,54	0,1276
Curvatura	1	1,0113	1,0113	35,45	0,0000
Erro	19	0,542	0,0285		
Total	35	43,9955			

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos Quadrados.

Tabela ANOVA – RCD de RAF-CPV.

Fonte	GL	SQ	MQ	Valor-F	Valor-p
Teor de umidade	1	0,09473	0,09473	114,8	0,0000
Teor de cimento	1	0,62499	0,62499	757,37	0,0000
Temperatura de cura	1	0,09021	0,09021	109,32	0,0000
Tempo de cura	1	0,28954	0,28954	350,86	0,0000
Teor de umidade*Teor de cimento	1	0,02126	0,02126	25,76	0,0001
Teor de umidade*Temperatura de cura	1	0,00000	0,00000	0,00	0,9628
Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,00034	0,00034	0,41	0,5297
Teor de cimento*Temperatura de cura	1	0,01389	0,01390	16,84	0,0006
Teor de cimento*Tempo de cura	1	0,00005	0,00005	0,06	0,8115
Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,00861	0,00861	10,43	0,0044
Teor de umidade*Teor de cimento* Temperatura de cura	1	0,00000	0,00000	0,00	0,9972
Teor de umidade*Teor de cimento*Tempo de cura	1	0,00006	0,00006	0,08	0,7848
Teor de umidade*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,00001	0,00001	0,01	0,9337
Teor de cimento*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,00189	0,00189	2,29	0,1463
Teor de umidade*Teor de cimento*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	0,00098	0,00098	1,18	0,2900
Curvatura	1	0,01356	0,01356	16,43	0,0007
Erro	19	0,01568	0,00083		
Total	35	1,17581			

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos Quadrados.

Tabela ANOVA – G₀ de RAF-CPV.

Fonte	GL	SQ	MQ	Valor-F	Valor-p
Teor de umidade	1	4320984	4320984	89,99	0,0000
Teor de cimento	1	26655389	26655389	555,13	0,0000
Temperatura de cura	1	4061553	4061553	84,59	0,0000
Tempo de cura	1	15709607	15709607	327,17	0,0000
Teor de umidade*Teor de cimento	1	405042	405042	8,44	0,0091
Teor de umidade*Temperatura de cura	1	91579	91579	1,91	0,1833
Teor de umidade*Tempo de cura	1	104683	104683	2,18	0,1562
Teor de cimento*Temperatura de cura	1	82572	82572	1,72	0,2054
Teor de cimento*Tempo de cura	1	99	99	0	0,9642
Temperatura de cura*Tempo de cura	1	138458	138458	2,88	0,1058
Teor de umidade*Teor de cimento* Temperatura de cura	1	7990	7990	0,17	0,6879
Teor de umidade*Teor de cimento*Tempo de cura	1	34219	34219	0,71	0,4091
Teor de umidade*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	19854	19854	0,41	0,5279
Teor de cimento*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	767938	767938	15,99	0,0008
Teor de umidade*Teor de cimento*Temperatura de cura*Tempo de cura	1	31680	31680	0,66	0,4267
Curvatura	1	37905	37905	0,79	0,3854
Erro	19	912320	48017		
Total	35	53381874			

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos Quadrados.

ANEXO A

Na sequência estão apresentados os seguintes documentos:

- Parecer da COMPESQ;
- Parecer Consubstanciado do Comitê de Ética em Pesquisa – CEP.

Re: Projeto de Pesquisa na Comissão de Pesquisa de Engenharia

Nilo Cesar Consoli <consoli@ufrgs.br>

Ter, 30/08/2022 17:01

Para: Suéllen Ferrazzo <suellenferrazzo@hotmail.com>; Marianatonini93 <marianatonini93@gmail.com>

Este é o e-mail do vice diretor da EE

Em 2022-08-30 16:47, reguly@ufrgs.br escreveu:

Prezado Pesquisador NILO CESAR CONSOLI,

Informamos que o projeto de pesquisa ANÁLISE DE CICLO DE VIDA SOCIAL DE MISTURAS SOLO-LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO E SOLO-CIMENTO PORTLAND encaminhado para análise em 12/08/2022 foi aprovado quanto ao mérito pela Comissão de Pesquisa de Engenharia com o seguinte parecer:

Aprovado quanto ao mérito.

Devido as suas características este projeto foi encaminhado nesta data para avaliação por .

Atenciosamente, Comissão de Pesquisa de Engenharia



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL -
PROPESQ UFRGS



PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: ANÁLISE DE CICLO DE VIDA SOCIAL DE MISTURAS SOLO-LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO E SOLO-CIMENTO PORTLAND

Pesquisador: NILO CESAR CONSOLI

Área Temática:

Versão: 3

CAAE: 62830022.6.0000.5347

Instituição Proponente: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 5.686.824

Apresentação do Projeto:

O pesquisador responsável, Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli (UFRGS), encaminha projeto de pesquisa intitulado "Análise de Ciclo de Vida Social de Misturas Solo-ligante Álcali-ativado e Solo-cimento Portland" com vistas a avaliar os impactos sociais envolvidos na estabilização de solo para base e sub-base de pavimentos, utilizando um ligante álcali-ativado (a base de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo), comparativamente ao uso de cimento Portland.

Trata-se de estudo da área de Engenharias que contará com financiamento próprio, duas doutorandas contempladas com bolsas como membros da equipe, além de pesquisadora sediada na Austrália.

O estudo será desenvolvido inteiramente no Brasil e envolverá entrevistas com 15 participantes.

Os proponentes esperam mensurar os impactos sociais da estabilização solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland; compreender como cada setor envolvido contribui para os impactos sociais em termos de magnitude e sentido; e compreender como os stakeholders (trabalhadores, comunidade local e sociedade) são afetados. Os resultados da Análise de Ciclo de Vida Social (ACVS) serão incluídos na ACV ambiental e econômica (estudos anteriormente realizados) para

Endereço: Av. Paulo Gama, 110 - Sala 311 do Prédio Anexo 1 da Reitoria - Campus Centro

Bairro: Farroupilha

CEP: 90.040-060

UF: RS

Município: PORTO ALEGRE

Telefone: (51)3308-3787

E-mail: etica@propesq.ufrgs.br



Continuação do Parecer: 5.686.824

determinar qual produto é mais sustentável.

Os resultados serão utilizados tanto nas teses de doutorado de duas pesquisadoras quanto na publicação de artigos científicos.

Objetivo da Pesquisa:

Objetivo primário:

O objetivo primário da pesquisa é avaliar os impactos sociais envolvidos na estabilização de solo para base e sub-base de pavimentos, utilizando um ligante álcali-ativado (a base de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo), comparativamente ao uso de cimento Portland. A pesquisa a ser desenvolvida orienta-se pela hipótese de que o solo estabilizado com ligante álcali-ativado causa menor impacto social do que o solo estabilizado com cimento Portland.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Riscos:

Segundo os proponentes, os riscos identificados serão mínimos, considerando principalmente que o tempo necessário para preenchimento do questionário não excederá 20 minutos. No questionário, não haverá perguntas sobre informações pessoais dos participantes.

Benefícios:

Os benefícios apontados serão a identificação e a compreensão dos impactos sociais gerados nos processos para estabilização de solo para base e sub-base de pavimentos, utilizando ligante álcali-ativado comparativamente ao cimento Portland.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

O estudo envolverá entrevistas com especialistas e outros trabalhadores em áreas de interesse para a avaliação de dez indicadores sociais. As classes de entrevistados e indicadores sociais estão identificados em tabela presente no "Projeto Detalhado".

Um questionário foi formulado para cada um dos cinco setores do mercado envolvidos: transporte rodoviário; construção de estradas; indústria de cimento Portland; indústria de cal; e indústria de hidróxido de sódio.

Segundo os proponentes, não serão coletados dados pessoais e não haverá uso de fontes secundárias de dados como prontuários, dados demográficos, etc.

Endereço: Av. Paulo Gama, 110 - Sala 311 do Prédio Anexo 1 da Reitoria - Campus Centro

Bairro: Farroupilha

CEP: 90.040-060

UF: RS

Município: PORTO ALEGRE

Telefone: (51)3308-3787

E-mail: etica@propesq.ufrgs.br



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL -
PROPESQ UFRGS



Continuação do Parecer: 5.686.824

O número de indivíduos abordados pessoalmente, recrutados, ou que sofrerão algum tipo de intervenção na pesquisa será de 15.

Cronograma foi apresentado com início da aplicação da pesquisa em 01 de novembro e conclusão da análise e redação dos dados em 31 de dezembro de 2022. Há previsão de redação e submissão de artigos científicos até final de março de 2023.

Orçamento informado no valor de R\$ R\$ 264,00. Financiamento próprio.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Vide campo Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações'.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

Trata-se de resposta ao parecer consubstanciado CEP Nº 5.648.669, datado em 16/09/2022:

Pendência 9: De acordo com a Norma Operacional CNS Nº 001 de 2013, item 3.3.e, todos os protocolos de pesquisa devem conter, obrigatoriamente, orçamento que detalhe os recursos, fontes e destinação, apresentar previsão de ressarcimento de despesas do participante e seus acompanhantes, quando necessário. Os valores de bolsas concedidas a pós-graduandos por agências governamentais não se caracterizam como orçamento da pesquisa, uma vez que no âmbito da UFRGS as pesquisas não podem onerar os alunos envolvidos. Sendo assim, solicita-se que a menção às bolsas seja removida, e que os itens, tais como material de consumo apresentados, sejam pormenorizados no orçamento, e que a responsabilidade do orçamento será do pesquisador principal.

Resposta versão 2: A resposta para a pendência 9 está incluída no "item 4" na página 11 do Projeto de Pesquisa, e na página 1 do TCLE.

Análise versão 2: Nas novas versões dos documentos, foi informado que serão desnecessários recursos financeiros para a execução da pesquisa, visto que as entrevistas e envio de documentos (TCLE) serão realizados por meio virtual. No entanto, ressalta-se que para o Sistema CEP/CONEP, não existem pesquisas com "custo zero". Ainda que o pesquisador entenda que não será necessário obter ou disponibilizar recursos para a realização do estudo, ele precisará informar o valor necessário para cada procedimento e etapa do estudo (mesmo que, de fato, o pesquisador

Endereço: Av. Paulo Gama, 110 - Sala 311 do Prédio Anexo 1 da Reitoria - Campus Centro

Bairro: Farroupilha

CEP: 90.040-060

UF: RS

Município: PORTO ALEGRE

Telefone: (51)3308-3787

E-mail: etica@propesq.ufrgs.br



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL -
PROPESQ UFRGS



Continuação do Parecer: 5.686.824

não arque com tais gastos), por exemplo, gastos com profissionais da área, exames, material de escritório, previsão de ressarcimento dos participantes de pesquisa, entre outros. Sendo assim, solicita-se que seja apresentado orçamento financeiro detalhado, que especifique TODOS os recursos, as fontes e a destinação. (Norma Operacional CNS Nº 001 de 2013, item 3.3.e). Pendência não atendida.

Resposta versão 3: A resposta a esta pendência está incluída no item "4. Orçamento", páginas 11 e 12 do Projeto de Pesquisa Análise: Às páginas 11 e 12 do Projeto Detalhado, foi apresentado quadro com orçamento financeiro detalhado para a execução da pesquisa. As explicações e justificativas foram apresentadas junto ao texto. A fonte dos recursos para custear os gastos será a taxa de bancada da Bolsa de Produtividade em Pesquisa (PQ) do pesquisador responsável, Prof. Nilo Cesar Consoli.

Análise versão 3: PENDÊNCIA ATENDIDA.

Diante do exposto, o Comitê de Ética em Pesquisa – CEP, de acordo com as atribuições definidas na Resolução CNS Nº 510, de 2016, na Resolução CNS Nº 466, de 2012, e na Norma Operacional Nº 001, de 2013, do CNS, manifesta-se pela aprovação do protocolo de pesquisa proposto.

Reitera-se aos pesquisadores a necessidade de elaborar e apresentar os relatórios parciais e final da pesquisa, como preconiza a Resolução CNS/MS nº 466/2012, Capítulo XI, Item XI.2: "d.

Considerações Finais a critério do CEP:

Aprovado.

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_2010011.pdf	26/09/2022 16:11:02		Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	ProjetoMarianaeSuellen2022UFRGS.pdf	26/09/2022 16:09:17	Suéllen Tonatto Ferrazzo	Aceito
Outros	CARTA_RESPOSTA.pdf	26/09/2022 16:03:15	Suéllen Tonatto Ferrazzo	Aceito

Endereço: Av. Paulo Gama, 110 - Sala 311 do Prédio Anexo 1 da Reitoria - Campus Centro

Bairro: Farroupilha

CEP: 90.040-060

UF: RS

Município: PORTO ALEGRE

Telefone: (51)3308-3787

E-mail: etica@propesq.ufrgs.br



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL -
PROPEAQ UFRGS



Continuação do Parecer: 5.686.824

TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	ApendiceBTermodeconsentimento.docx	09/09/2022 21:20:11	Mariana Tonini de Araujo	Aceito
Folha de Rosto	folhaDeRosto_assinada.pdf	31/08/2022 15:28:44	Mariana Tonini de Araujo	Aceito
Outros	ApendiceAQUESTIONARIOSDAPESQUISA.pdf	31/08/2022 12:20:43	Mariana Tonini de Araujo	Aceito

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

PORTO ALEGRE, 06 de Outubro de 2022

Assinado por:

**Patrícia Daniela Melchiors Angst
(Coordenador(a))**

Endereço: Av. Paulo Gama, 110 - Sala 311 do Prédio Anexo 1 da Reitoria - Campus Centro

Bairro: Farroupilha

CEP: 90.040-060

UF: RS

Município: PORTO ALEGRE

Telefone: (51)3308-3787

E-mail: etica@propesq.ufrgs.br