

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**METODOLOGIA DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE SOLOS TRATADOS COM CAL**

Luizmar da Silva Lopes Junior

Porto Alegre
Novembro de 2011

CIP - Catalogação na Publicação

da Silva Lopes Junior, Luizmar
Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico
de Solos Tratados com Cal / Luizmar da Silva Lopes
Junior. -- 2011.
226 f.

Orientador: Nilo César Consoli.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS,
2011.

1. Solo-cal. 2. Relação vazios/cal. 3.
Comportamento solo-cal. 4. Dosagem solo-cal. I.
César Consoli, Nilo, orient. II. Título.

LUIZMAR DA SILVA LOPES JUNIOR

**METODOLOGIA DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE SOLOS TRATADOS COM CAL**

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 Doutor em Engenharia

Porto Alegre
Novembro de 2011

LUIZMAR DA SILVA LOPES JUNIOR

**METODOLOGIA DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE SOLOS TRATADOS COM CAL**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 28 de novembro de 2011

Prof. Nilo César Consoli
Ph.D. pela Concordia University, Canadá
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Eng. Sandro Sandroni (GEOPROJETOS)
Ph.D. pelo Imperial College, Reino Unido

Prof. Antônio Thomé (UPF)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Fernando Schnaid (UFRGS)
Ph.D. pela University of Oxford, Reino Unido

*Dedico este trabalho a
minha família, em especial ao meu avô
Derli de Souza Lopes (in memoriam)*

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar os meus agradecimentos as seguintes pessoas e instituições:

Primeiramente a minha família, em especial ao meu avô Derli de Souza Lopes (in memoriam), exemplo de caráter e determinação, meus pais Luizmar e Beatriz e meus irmãos pelo amor, incentivo e apoio incondicional dispensado em todos os momentos da minha vida.

A família Lovato pelo apoio e companheirismo, em especial a minha noiva Patrícia pela ajuda, compreensão e carinho dedicado.

Ao meu orientador Nilo Cesar Consoli pela confiança que depositou em mim, dedicação, amizade e empenho com que me orientou, além do exemplo de caráter e profissionalismo.

Aos professores Antônio Thomé e Pedro Prietto pelo interesse, incentivo, amizade e conhecimentos transmitidos.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS pelos ensinamentos ministrados.

Aos funcionários da Escola de Engenharia da UFRGS pelo apoio nas atividades realizadas, em especial ao laboratorista João Diniz e ao pessoal da secretaria do PPGEC, Ana Luiza, Liliane e Carmem.

A todos os meus colegas e amigos, em especial ao Anderson Fonini, Lucas Festugato, Francisco Dalla Rosa, Rodrigo Cruz, Márcio Floss, José Rojas, Amanda Dalla Rosa e Emanuele Gauer pelo companheirismo e ajuda prestada durante o doutorado.

Ao CNPq, a CAPES e à UFRGS pelo suporte financeiro à pesquisa.

Por fim agradeço a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho, pois nossas conquistas sempre são o resultado de um esforço conjunto.

RESUMO

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Cada vez mais frequente a utilização de técnicas tradicionais da engenharia geotécnica depara-se com obstáculos de caráter econômico e ambiental. A técnica do solo-cal torna-se atrativa quando o melhoramento das propriedades do solo do local constitui-se numa alternativa de projeto. A técnica de tratamento de solos com cal encontra aplicação, por exemplo, na construção de bases para pavimentos, na proteção de taludes em barragens de terra e como camada de suporte para fundações superficiais. As últimas pesquisas em solos tratados com cal estão no desenvolvimento de metodologias de dosagem baseadas em critérios racionais onde a relação volume de vazios/volume de cal desempenha papel fundamental na obtenção da resistência desejada. Nesse sentido, este estudo tem por objetivo validar a relação volume de vazios/volume de cal na estimativa da resistência à compressão simples e triaxial, comportamento tensão-dilatância e rigidez inicial de um solo tratado com cal curado por períodos longos e quantificar a influência da adição de resíduos de diferentes potenciais de reatividade no comportamento mecânico do solo-cal. Para isso foram realizados ensaios de compressão simples e triaxial, medidas de sucção matricial e medidas de G_0 através da técnica de bender elements. Os resultados mostram uma correlação entre resistência e o módulo cisalhante inicial; e que os mesmos crescem não linearmente com o aumento da quantidade de cal e com a redução na porosidade da mistura compactada curada por períodos longos. Para uma mesma relação vazios/cal, a adição de resíduos nas misturas teve um efeito significativo no comportamento do solo-cal estudado. A relação vazios/cal, definido pela razão entre a porosidade da mistura compactada e o teor volumétrico de cal, ajustado por uma potência, demonstrou ser um parâmetro eficaz na estimativa do comportamento mecânico do solo-cal estudado e independe do tempo de cura, de tensões confinantes e da adição de resíduos, na faixa de valores estudado.

Palavras-chave: solo-cal; relação vazios/cal; comportamento solo-cal; dosagem solo-cal.

ABSTRACT

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Prevision Methodology of Mechanical Behavior of Soils Treated with Lime**. 2011. Thesis (Doctor in Engineering) – Civil Engineering Post-Graduation Program, UFRGS, Porto Alegre.

Not rarely, the use of traditional techniques in geotechnical engineering faces obstacles of economical and environmental nature. The soil-lime technique becomes attractive when the improvement of the local soil is a project alternative. The treatment of soils with lime finds application, for instance, in the construction of pavement base layers, in slope protection of earth dams and as a support layer for shallow foundations. The last researches in soils treated with lime are in the development of dosage methodologies based on rational criteria where the voids/lime ratio plays a fundamental role in the assessment of the target strength. In that sense, this study has for objective to validate the use of the voids/lime ratio in the estimate of unconfined and confined compression strength, stress-dilatancy behavior and initial shear modulus of a treated soil with lime cured by long periods and to quantify the influence of the insertion of industrial wastes of different potentials reactivity in the mechanical behavior of the soil-lime. For that, a number of unconfined and confined compression tests, measurements of matric suction and bender elements were carried out. The results show a correlation between compression tests and the initial shear modulus; and that the same ones increased not linearly with the increase in lime content as well as with the reduction in the porosity of the compacted mixture cured for long periods. For a same voids/lime ratio value, the insertion of industrial wastes in the mixtures had a significant effect in the behavior of the soil-lime studied. In contrast, the voids/lime ratio, defined as the ratio between the porosity of the compacted mixture and the volumetric lime content, adjusted by a power, demonstrated to be the most appropriate parameter to assess the mechanical behavior of the soil-lime mixture studied and is independent of the curing time, of confined compression tests and of the insertion of industrial wastes, in the range of values studied.

Key-words: soil-lime; voids/lime ratio; soil-lime behavior; soil-lime dosage.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	25
1.2 OBJETIVOS	26
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1 VISÃO GERAL SOBRE A TÉCNICA DO SOLO-CAL.....	28
2.1.1 Materiais Utilizados no Solo-Cal.....	32
2.1.1.1 Solo	32
2.1.1.2 Cal	33
2.1.1.3 Resíduos Industriais	34
2.1.2 Reações Solo-Cal.....	34
2.1.3 Dosagem Solo-Cal	37
2.1.3.1 Métodos Clássicos.....	37
2.1.3.2 Metodologia Relação Vazios/Cal.....	38
2.2 VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DO SOLO-CAL	43
2.2.1 Efeito da Cal	43
2.2.2 Efeito da Densidade e Compactação.....	43
2.2.3 Efeito do Teor de Umidade e da Relação Água/Cal	44
2.2.4 Efeito do Tempo de Cura.....	45
2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO-CAL.....	47
2.3.1 Resistência à Compressão Simples.....	47
2.3.2 Resistência à Tração	48
2.3.3 Resistência ao Cisalhamento.....	49
2.3.4 Resposta Tensão-Deformação	50
2.3.5 Rigidez Inicial.....	51
2.3.6 Resposta Tensão-Dilatância.....	54
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	59
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	59
3.2 MATERIAIS.....	61

3.2.1 Solo	61
3.2.2 Resíduo de Britagem.....	61
3.2.3 Cinza Volante	62
3.2.4 Cal.....	63
3.2.5 Água.....	64
3.3 MÉTODOS	64
3.3.1 Coleta de Amostras	64
3.3.2 Preparação das Amostras	64
3.3.3 Ensaios de Caracterização	65
3.3.4 Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova	66
3.3.5 Ensaios de Compressão Simples.....	68
3.3.6 Medidas de Sucção	70
3.3.7 Ensaios de Compressão Triaxial.....	71
3.3.8 Medidas de G_0 Através da Técnica de Bender Elements.....	74
3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS.....	76
3.4.1 Programa de Ensaios de Compressão Simples	76
3.4.2 Programa de Ensaios Triaxiais.....	78
3.4.3 Programa de Ensaios com Bender Elements	79
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	80
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	80
4.1.1 Propriedades Físicas	80
4.1.2 Propriedades Químicas	83
4.1.3 Reatividade Potencial dos Materiais pelo Método Químico.....	83
4.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES	85
4.2.1 Solo-Cal	85
4.2.1.1 Efeito do Teor de Cal	85
4.2.1.2 Efeito da Porosidade.....	87
4.2.1.3 Relação Vazios/Cal	89
4.2.1.4 Tempo de Cura x Relação Vazios/Cal	91
4.2.2 Solo-Resíduo de Britagem-Cal	92
4.2.2.1 Efeito do Teor de Cal	93

4.2.2.2	Efeito da Porosidade.....	95
4.2.2.3	Efeito do Teor de Umidade de Moldagem	97
4.2.2.4	Relação Vazios/Cal	99
4.2.2.5	Tempo de Cura x Relação Vazios/Cal	103
4.2.3	Solo-Cinza Volante-Cal.....	105
4.2.3.1	Efeito do Teor de Cal e da Porosidade.....	105
4.2.3.2	Relação Vazios/Cal	106
4.2.3.3	Tempo de Cura x Relação Vazios/Cal	108
4.2.4	Efeito da Adição de Resíduos Industriais	109
4.3	MEDIDAS DE SUCÇÃO MATRICIAL.....	110
4.4	ENSAIOS TRIAXIAIS.....	111
4.4.1	Variação do Parâmetro B de Poro-pressão	112
4.4.2	Solo-Cal	113
4.4.2.1	Comportamento Tensão-Deformação x Relação $\eta/(C_{av})^{0,12}$	114
4.4.2.2	Efeito do Nível de Tensões Efetivas e Parâmetros de Resistência.....	117
4.4.2.3	Tensão Confinada x Tensão Não-Confinada.....	123
4.4.2.4	Análise da Rigidez	126
4.4.2.5	Comportamento Tensão x Dilatância	129
4.4.3	Solo-Resíduo de Britagem-Cal	133
4.4.3.1	Comportamento Tensão-Deformação x Relação $\eta/(C_{av})^{0,12}$	133
4.4.3.2	Efeito do Nível de Tensões Efetivas e Parâmetros de Resistência.....	137
4.4.3.3	Tensão Confinada x Tensão Não-Confinada.....	141
4.4.3.4	Análise da Rigidez	143
4.4.3.5	Comportamento Tensão x Dilatância	147
4.4.4	Solo-Cinza Volante-Cal.....	150
4.4.4.1	Comportamento Tensão-Deformação x Relação $\eta/(C_{av})^{0,12}$	151
4.4.4.2	Efeito do Nível de Tensões Efetivas e Parâmetros de Resistência.....	153
4.4.4.3	Tensão Confinada x Tensão Não-Confinada.....	157
4.4.4.4	Análise da Rigidez	158
4.4.4.5	Comportamento Tensão x Dilatância	161
4.5	MEDIDAS DE G_0	164

4.5.1 Leituras	164
4.5.2 Efeito do Teor de Cal.....	167
4.5.3 Efeito da Porosidade	170
4.5.4 Efeito da Relação Vazios/Cal	172
4.5.5 Efeito do Tempo de Cura.....	178
4.5.6 Correlação com a Resistência à Compressão Simples.....	180
4.6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO PARA A RELAÇÃO VAZIOS/CAL.....	180
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	185
5.1 CONCLUSÕES	185
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	190
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	191
APÊNDICE A – DADOS DOS CP’S ENSAIADOS À COMPRESSÃO SIMPLES.....	200
APÊNDICE B – DADOS DOS CP’S ENSAIADOS À COMPRESSÃO TRIAXIAL	219
APÊNDICE C – DADOS DOS CP’S ENSAIADOS COM BENDER ELEMENTS.....	223

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: mecanismo de troca de cátions (adaptado de PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1999)	35
Figura 2.2: mecanismo de estabilização solo-cal (adaptado de INGLES; METCALF, 1972)	36
Figura 2.3: relação vazios/cal ajustado versus resistência à compressão simples (LOPES JUNIOR, 2007)	39
Figura 2.4: relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado versus resistência à compressão simples (adaptado de DALLA ROSA, 2009a).....	40
Figura 2.5: previsão da tensão desvio através da relação vazios/cimento (CONSOLI et al., 2007)	41
Figura 2.6: tensão versus relação vazios/cimento para diferentes tensões confinantes (CRUZ, 2008) .	42
Figura 2.7: módulo cisalhante versus relação vazios/cimento (CRUZ, 2008)	42
Figura 2.8: efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal (adaptado de INGLÊS; METCALF, 1972).....	46
Figura 2.9: efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (adaptado de INGLÊS; METCALF, 1972).....	47
Figura 2.10: Curvas (ensaios triaxiais CIU) tensão-deformação-poropressão (CONSOLI et al., 1997)	51
Figura 2.11: curva de degradação da rigidez com o nível de deformação (adaptado de ATKINSON, 2000)	52
Figura 2.12: (a) Esquema de lâminas representando o intertravamento das partículas de solo; (b) Forças resultantes. (adaptado de WOOD, 1990).....	55
Figura 2.13: Comportamento tensão-dilatância generalizado (adaptado de ATKINSON, 1993).....	56
Figura 2.14: comportamento tensão-dilatância encontrado para dois solos arenosos cimentados naturalmente (adaptado de COOP; WILLSON, 2003)	57
Figura 2.15: Tensão-dilatância para um solo residual de arenito artificialmente cimentado sob uma determinada tensão de confinamento (adaptado de DALLA ROSA, 2006)	57
Figura 3.1: formações geológicas ao norte do estado do RS (adaptado de IBGE, 1986).....	62
Figura 3.2: (a) prensa para ensaio de compressão simples, (b) corpo-de-prova de solo-cal	69
Figura 3.3: corpo-de-prova para ensaio de sucção matricial	70
Figura 3.4: prensa triaxial e sistema de aquisição de dados	71
Figura 3.5: (a) sistema interno de medição de deformações axiais, (b) sistema interno de medição de deformações radiais.....	72
Figura 3.6: (a) equipamento para leitura de ondas sísmicas, (b) suporte com transdutores piezocerâmicos	75
Figura 3.7: programa de ensaios de compressão simples.....	76
Figura 3.8: pH SRAB x teor de cal	77

Figura 4.1: curvas granulométricas dos materiais	80
Figura 4.2: difratograma de raios x do arenito Botucatu.....	82
Figura 4.3: difratograma de raios x do resíduo de britagem	82
Figura 4.4: difratograma de raios x da cinza volante	82
Figura 4.5: reatividade potencial dos materiais de acordo com a ASTM C289/07.....	84
Figura 4.6: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal do SRAB-CAL (90 dias de cura).....	86
Figura 4.7: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal do SRAB-CAL (360 dias de cura).....	86
Figura 4.8: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do SRAB-CAL (90 dias de cura)	87
Figura 4.9: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do SRAB-CAL (360 dias de cura)	88
Figura 4.10: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-CAL (90 dias de cura).....	89
Figura 4.11: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-CAL (360 dias de cura).....	89
Figura 4.12: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-CAL (90 dias de cura)	90
Figura 4.13: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-CAL (360 dias de cura)	91
Figura 4.14: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-CAL (90 e 360 dias de cura)	92
Figura 4.15: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)	93
Figura 4.16: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)	94
Figura 4.17: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)	94
Figura 4.18: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)	95
Figura 4.19: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)	96
Figura 4.20: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)	96
Figura 4.21: resistência à compressão simples versus teor de umidade de moldagem do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)	97
Figura 4.22: resistência à compressão simples versus teor de umidade de moldagem do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)	98

Figura 4.23: resistência à compressão simples versus teor de umidade de moldagem do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)	98
Figura 4.24: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)	100
Figura 4.25: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)	100
Figura 4.26: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)	101
Figura 4.27: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)	102
Figura 4.28: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)	102
Figura 4.29: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)	103
Figura 4.30: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL (28,90 e 360 dias de cura)	104
Figura 4.31: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade, teor de cal e tempo de cura do SRAB-25%RBR-CAL	105
Figura 4.32: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%CV-CAL (28 dias de cura)	107
Figura 4.33: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%CV-CAL (90 dias de cura)	107
Figura 4.34: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%CV-CAL (28 e 90 dias de cura)	108
Figura 4.35: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado dos três compósitos utilizados para 90 dias de cura	109
Figura 4.36: posição dos pontos de moldagem escolhidos para os ensaios de compressão triaxial	111
Figura 4.37: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (28 dias de cura)	114
Figura 4.38: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (28 dias de cura).....	114
Figura 4.39: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (90 dias de cura)	115
Figura 4.40: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (90 dias de cura).....	115
Figura 4.41: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (360 dias de cura)	116
Figura 4.42: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (360 dias de cura).....	116

Figura 4.43: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 28 dias de cura)	118
Figura 4.44: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 28 dias de cura)	118
Figura 4.45: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 90 dias de cura)	119
Figura 4.46: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 90 dias de cura)	119
Figura 4.47: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 360 dias de cura)	120
Figura 4.48: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-CAL 360 dias de cura)	120
Figura 4.49: comportamento idealizado para solos estruturados onde a parcela coesiva é dominante: (a) comportamento tensão-deformação e (b) trajetória de tensões (adaptado de COOP; ATKINSON, 1993)	122
Figura 4.50: comportamento idealizado para solos estruturados onde a parcela friccional é preponderante: (a) comportamento tensão-deformação e (b) trajetória de tensões (adaptado de CUCCOVILLO; COOP, 1999)	122
Figura 4.51: envoltórias de ruptura do SRAB-CAL para 28, 90 e 360 dias de cura e $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$...	123
Figura 4.52: resistência confinada à 20kPa e não confinada versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-CAL para 28, 90 e 360 dias de cura	124
Figura 4.53: variação da resistência confinada à 20kPa e não confinada em relação a porosidade, teor de cal e tempo de cura do SRAB-CAL	125
Figura 4.54: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (28 dias de cura)	126
Figura 4.55: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (90 dias de cura)	126
Figura 4.56: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (360 dias de cura)	127
Figura 4.57: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 28 dias de cura)	128
Figura 4.58: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 90 dias de cura)	128
Figura 4.59: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 360 dias de cura)	129
Figura 4.60: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-CAL 28 dias de cura)	130
Figura 4.61: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-CAL 360 dias de cura)	130
Figura 4.62: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 28 dias de cura)	131

Figura 4.63: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 360 dias de cura)	131
Figura 4.64: comportamento tensão-dilatância para um solo cimentado (LO; WARDANI, 2002).....	132
Figura 4.65: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura).....	134
Figura 4.66: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)	134
Figura 4.67: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura).....	135
Figura 4.68: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)	135
Figura 4.69: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)	136
Figura 4.70: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)	136
Figura 4.71: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%RBR-CAL 28 dias de cura).....	137
Figura 4.72: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%RBR-CAL 28 dias de cura).....	138
Figura 4.73: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%RBR-CAL 90 dias de cura).....	138
Figura 4.74: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%RBR-CAL 90 dias de cura).....	139
Figura 4.75: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%RBR-CAL 360 dias de cura).....	139
Figura 4.76: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%RBR-CAL 360 dias de cura).....	140
Figura 4.77: envoltórias de ruptura do SRAB-25%RBR-CAL para 28, 90 e 360 dias de cura e $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$	141
Figura 4.78: resistência confinada à 20kPa e não confinada versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL para 28, 90 e 360 dias de cura.....	142
Figura 4.79: variação da resistência confinada à 20kPa e não confinada em relação a porosidade, teor de cal e tempo de cura do SRAB-25%RBR-CAL.....	143
Figura 4.80: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura).....	144
Figura 4.81: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura).....	144
Figura 4.82: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura).....	145

Figura 4.83: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%RBR-CAL 28 dias de cura).....	146
Figura 4.84: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%RBR-CAL 90 dias de cura).....	146
Figura 4.85: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%RBR-CAL 360 dias de cura).....	147
Figura 4.86: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-25%RBR-CAL 28 dias de cura).....	147
Figura 4.87: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-25%RBR-CAL 90 dias de cura).....	148
Figura 4.88: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-25%RBR-CAL 360 dias de cura).....	148
Figura 4.89: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%RBR-CAL 28 dias de cura).....	149
Figura 4.90: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%RBR-CAL 90 dias de cura).....	149
Figura 4.91: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%RBR-CAL 360 dias de cura).....	150
Figura 4.92: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%CV-CAL (28 dias de cura).....	151
Figura 4.93: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%CV-CAL (28 dias de cura).....	152
Figura 4.94: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%CV-CAL (90 dias de cura).....	152
Figura 4.95: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%CV-CAL (90 dias de cura).....	153
Figura 4.96: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%CV-CAL 28 dias de cura).....	154
Figura 4.97: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%CV-CAL 28 dias de cura).....	154
Figura 4.98: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%CV-CAL 90 dias de cura).....	155
Figura 4.99: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%CV-CAL 90 dias de cura).....	155
Figura 4.100: envoltórias de ruptura do SRAB-25%CV-CAL para 28 e 90 dias de cura e $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$	156
Figura 4.101: resistência confinada à 20kPa e não confinada versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%CV-CAL para 28 e 90 dias de cura.....	157
Figura 4.102: variação da resistência confinada à 20kPa e não confinada em relação a porosidade, teor de cal e tempo de cura do SRAB-25%CV-CAL.....	158

Figura 4.103: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%CV-CAL (28 dias de cura)	159
Figura 4.104: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%CV-CAL (90 dias de cura)	159
Figura 4.105: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%CV-CAL 28 dias de cura)	160
Figura 4.106: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%CV-CAL 90 dias de cura)	160
Figura 4.107: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-25%CV-CAL 28 dias de cura).....	161
Figura 4.108: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-25%CV-CAL 90 dias de cura).....	162
Figura 4.109: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%CV-CAL 28 dias de cura)	163
Figura 4.110: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%CV-CAL 90 dias de cura)	163
Figura 4.111: típico sinal recebido do ensaio com bender elements de um corpo de prova curado por 28 dias	165
Figura 4.112: típico sinal recebido do ensaio com bender elements de um corpo de prova curado por 90 dias	165
Figura 4.113: típico sinal recebido do ensaio com bender elements de um corpo de prova curado por 180 dias	166
Figura 4.114: variação do G_0 em relação à quantidade de cal de amostras com 7 dias de cura.....	167
Figura 4.115: variação do G_0 em relação à quantidade de cal em amostras com 15 dias de cura.....	167
Figura 4.116: variação do G_0 em relação à quantidade de cal em amostras com 28 dias de cura.....	168
Figura 4.117: variação do G_0 em relação à quantidade de cal em amostras com 90 dias de cura.....	168
Figura 4.118: variação do G_0 em relação à quantidade de cal em amostras com 180 dias de cura.....	169
Figura 4.119: variação do G_0 em relação à porosidade de amostras com 7 dias de cura	170
Figura 4.120: variação do G_0 em relação à porosidade de amostras com 15 dias de cura	170
Figura 4.121: variação do G_0 em relação à porosidade de amostras com 28 dias de cura	171
Figura 4.122: variação do G_0 em relação à porosidade de amostras com 90 dias de cura	171
Figura 4.123: variação do G_0 em relação à porosidade de amostras com 180 dias de cura	172
Figura 4.124: módulo cisalhante versus relação vazios/cal de amostras com 7 dias de cura.....	173
Figura 4.125: módulo cisalhante versus relação vazios/cal de amostras com 15 dias de cura.....	173
Figura 4.126: módulo cisalhante versus relação vazios/cal de amostras com 28 dias de cura.....	174
Figura 4.127: módulo cisalhante versus relação vazios/cal de amostras com 90 dias de cura.....	174

Figura 4.128: módulo cisalhante versus relação vazios/cal de amostras com 180 dias de cura.....	175
Figura 4.129: módulo cisalhante versus relação vazios/cal ajustado de amostras com 7 dias de cura	176
Figura 4.130: módulo cisalhante versus relação vazios/cal ajustado de amostras com 15 dias de cura	176
Figura 4.131: módulo cisalhante versus relação vazios/cal ajustado de amostras com 28 dias de cura	177
Figura 4.132: módulo cisalhante versus relação vazios/cal ajustado de amostras com 90 dias de cura	177
Figura 4.133: módulo cisalhante versus relação vazios/cal ajustado de amostras com 180 dias de cura	178
Figura 4.134: módulo cisalhante versus relação vazios/cal ajustado (todas as amostras).....	179
Figura 4.135: variação do G_0 em relação à porosidade, teor de cal e tempo de cura	179
Figura 4.136: razão G_0/q_u versus relação vazios/cal ajustado de amostras com 90 dias de cura	180
Figura 4.137: camada de solo-cal assente sobre o solo residual – determinação da capacidade de suporte	181
Figura 4.138: posicionamento dos pontos de moldagem	183
Figura 4.139: determinação da relação vazios/cal para dosagem da mistura	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Faixa de validade para aplicação da metodologia proposta por Thomé et al. (2005)	31
Tabela 2.2: Composição média das cales brasileiras (GUIMARÃES, 2002)	33
Tabela 2.3: Previsão da quantidade de cal em função do tipo de solo (adaptada de INGLES; METCALF, 1972).....	38
Tabela 3.1: etapas e ensaios do programa experimental	60
Tabela 3.2: caracterização da cal utilizada	63
Tabela 4.1: propriedades físicas dos materiais	81
Tabela 4.2: análise semi-quantitativa dos materiais	81
Tabela 4.3: caracterização química dos materiais	83
Tabela 4.4: resultados reatividade potencial pelo método químico	83
Tabela 4.5: valores típicos para o parâmetro B (adaptado de LAMBE;WHITMAN, 1979)	112
Tabela 4.6: programa de ensaios triaxiais em SRAB-CAL.....	113
Tabela 4.7: programa de ensaios triaxiais em SRAB-25%RBR-CAL	133
Tabela 4.8: programa de ensaios triaxiais em SRAB-25%CV-CAL	151
Tabela A.1: dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-CAL com 90 dias de cura.....	201
Tabela A.1 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-CAL com 90 dias de cura ...	202
Tabela A.1 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-CAL com 90 dias de cura ...	203
Tabela A.2: dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-CAL com 360 dias de cura.....	204
Tabela A.2 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-CAL com 360 dias de cura .	205
Tabela A.2 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-CAL com 360 dias de cura .	206
Tabela A.3: dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 28 dias de cura.....	207
Tabela A.3 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 28 dias de cura	208
Tabela A.3 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 28 dias de cura	209
Tabela A.3 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 28 dias de cura	210
Tabela A.4: dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 90 dias de cura.....	211
Tabela A.4 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 90 dias de cura	212
Tabela A.4 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 90 dias de cura	213

Tabela A.4 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 90 dias de cura	214
Tabela A.5: dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 360 dias de cura.....	215
Tabela A.5 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 360 dias de cura.....	216
Tabela A.5 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 360 dias de cura.....	217
Tabela A.5 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 360 dias de cura.....	218
Tabela B.1: dados gerais dos corpos-de-prova ensaiados à compressão triaxial do SOLO-CAL.....	220
Tabela B.2: dados gerais dos corpos-de-prova ensaiados à compressão triaxial do SOLO-RBR-CAL	221
Tabela B.3: dados gerais dos corpos-de-prova ensaiados à compressão triaxial do SOLO-CV-CAL.....	222
Tabela C.1: dados gerais dos corpos-de-prova ensaiados com bender elements	224
Tabela C.1 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova ensaiados com bender elements	225
Tabela C.1 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova ensaiados com bender elements	226

LISTA DE SÍMBOLOS

a : massa de água

B : parâmetro de poro-pressão de Skempton

c' : coesão efetiva

C_a : teor de cal calculado em relação à massa de solo seco e expresso em porcentagem

c_a : massa de cal

C_{av} : teor volumétrico de cal, expresso em porcentagem do volume total

C_u : coeficiente de uniformidade

d : parâmetro de dilatância igual ao quociente entre os incrementos de deformação plástica volumétrica e cisalhante

D_{10} : diâmetro efetivo

e : base do logaritmo neperiano (2,7183)

e : índice de vazios

E_s : módulo de deformação axial secante

G : módulo cisalhante

G_0, G_{max} : módulo cisalhante máximo

LL: limite de liquidez

LP: limite de plasticidade

p' : tensão efetiva normal média

q : tensão desvio

q_u : resistência à compressão não confinada na condição de saturação

R^2 : coeficiente de determinação

S : grau de saturação de moldagem.

S_f : grau de saturação após a imersão do corpo-de-prova por 24 horas.

V_{ca} : volume de cal

V_v : volume de vazios (igual ao volume de água mais o volume de ar)

γ_d : massa específica aparente seca

η : porosidade

ω : teor de umidade

ω_f : teor de umidade após a imersão do corpo-de-prova por 24 horas

δ : incremento de deformação

ε_a : deformação axial

ε_s : deformação cisalhante

ε_v : deformação volumétrica

ϕ' : ângulo de atrito efetivo

σ_1, σ_3 : tensões principais totais maior e menor

σ'_1, σ'_3 : tensões principais efetivas maior e menor

σ_d : tensão desvio

ψ : ângulo de dilatância

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM: American Society for Testing and Materials

CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul

CV: Cinza Volante

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

LEEG: Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

NBR: Norma Brasileira

PPGEC: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

RBR: Resíduo de Britagem

SUCS: Sistema Unificado de Classificação de Solos

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USACE: United States Army Corps of Engineers

USBR: United States Bureau of Reclamation

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Tendências evidentes em Geotecnia encontram-se na busca de novas tecnologias e alternativas que tornem economicamente viáveis as obras de engenharia e busquem solucionar os problemas relacionados com a agressão ao meio ambiente. A utilização de bases granulares para rodovias, por exemplo, torna-se inviável quando a jazida está muito distante do local da obra, pelos elevados custos associados ao transporte e danos ambientais provenientes da própria exploração e transporte do material.

Outro exemplo é a execução de fundações em terrenos de baixa capacidade de suporte e alta deformabilidade, onde a utilização de fundações profundas e os custos associados a essa solução podem-se tornar incompatíveis com porte do empreendimento, como no caso de conjuntos habitacionais de baixo custo.

Nesses casos, uma alternativa disponível é o melhoramento das propriedades do solo do local através da adição de cal ou cimento. A aplicação da técnica de tratamento de solos com cal vem sendo empregada com sucesso na construção de bases para pavimentos.

Inúmeras pesquisas (NÚÑEZ, 1991; THOMÉ, 1994; CARRARO, 1997; CONSOLI, 2001; LOVATO, 2004; LOPES JUNIOR, 2007; CONSOLI et al., 2009a, 2009b; DALLA ROSA, 2009a) sobre solos tratados com cal têm sido realizadas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, visando seu emprego como base para rodovias e como camada de suporte para fundações superficiais, investigando seu comportamento sob as mais diversas condições de carregamento, inclusive com ensaios de placa e provas de carga em verdadeira grandeza. Os resultados têm apresentado ganhos significativos de capacidade de suporte e redução nos recalques.

Entretanto, apesar das diversas aplicações, o procedimento de dosagem tradicional do solo-cal restringe-se à escolha do teor de cal necessário, geralmente a partir de uma estimativa

inicial fornecida pela literatura ou norma, seguida pela execução de uma série de ensaios laboratoriais. Na busca de metodologias baseadas em critérios racionais como existe, por exemplo, para o concreto convencional, onde a relação água/cimento desempenha papel fundamental na obtenção da resistência desejada, pesquisas recentes (LOPES JUNIOR, 2007; CONSOLI et al., 2009a; DALLA ROSA, 2009a) mostraram que a relação vazios/cal, definido pela razão entre a porosidade da mistura compactada e o teor volumétrico de cal, ajustado por uma potência pode ser utilizada na previsão da resistência mecânica de solos tratados com cal no estado não saturado.

Solos tratados com cal exibem um comportamento mecânico complexo, influenciado por diversos fatores, dentre os quais se destacam a quantidade de cal adicionada, a porosidade da mistura, teor de umidade e principalmente tempo de cura.

A presente pesquisa, ao identificar e quantificar as variáveis mais importantes no controle do comportamento de solos artificialmente tratados com cal fornecerá subsídios para que, a partir da manipulação adequada de tais variáveis por meio de dosagem, se possa atingir de forma objetiva e com maior confiabilidade as propriedades requeridas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é validar o uso da relação vazios/cal na estimativa da resistência à compressão simples e triaxial e verificar o comportamento tensão-deformação, comportamento tensão-dilatância e rigidez inicial de um solo siltoso tratado com cal, com ou sem adições (finos), curado por períodos longos.

Têm-se como objetivos específicos estabelecidos nesta pesquisa:

- Quantificar a influência isolada de cada uma das variáveis de interesse: quantidade de cal, porosidade da mistura compactada, teor de umidade de moldagem e tempo de cura sobre a resistência à compressão simples do solo-cal estudado.
- Verificar, através de ensaios triaxiais drenados, a influência da tensão confinante nas curvas de resistência versus relação vazios/cal e observar o comportamento tensão-deformação e tensão-dilatância das misturas estudadas.

- Quantificar a influência da adição de resíduos (normalmente utilizados em solos arenosos) de diferentes potenciais de reatividade no comportamento do solo-cal estudado e verificar os efeitos das adições na relação vazios/cal.
- Estabelecer uma relação entre a resistência à compressão simples e o módulo cisalhante inicial (G_0) na metodologia de dosagem, expressa pela relação vazios/cal.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A presente tese está estruturada em cinco capítulos descritos sucintamente a seguir:

No capítulo 1 é feita uma introdução, onde são apresentados o problema e a relevância da pesquisa e são definidos os objetivos gerais e específicos a serem atingidos.

O capítulo 2 constitui-se numa revisão da literatura acerca de aspectos relevantes ao tema abordado. Pretende-se dar ao leitor uma visão geral sobre a técnica de solos tratados com cal, enfatizando sua aplicação, os materiais utilizados e os métodos de dosagem existentes. Ainda neste capítulo, são abordadas as características comportamentais típicas de solos tratados com cal, bem como, nos fatores que exercem influência sobre tais características, incluindo trabalhos recentes sobre o uso da relação vazios/cal na previsão da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados.

No capítulo 3 é feita uma descrição detalhada do programa experimental adotado, especificando as variáveis de interesse, os materiais e métodos utilizados.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na etapa experimental, bem como, uma análise e discussão detalhada acerca dos mesmos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VISÃO GERAL SOBRE A TÉCNICA DO SOLO-CAL

O uso da cal como aditivo no tratamento de solos é o mais antigo método de estabilização química conhecida, utilizada nas mais variadas aplicações, como a Via Apia, construída pelos Romanos. Pode-se definir solo-cal como o produto resultante da mistura íntima compactada de solo (geralmente argila), cal e água, em proporções estabelecidas através de dosagem (USBR, 1998).

A adição de cal ao solo tem sido denominada de maneiras diferentes conforme o autor, sendo que termos como solo estabilizado, solo melhorado, solo modificado e solo tratado, são comumente utilizados. De maneira geral o critério para a adoção de uma ou outra denominação é o grau de alteração das propriedades do solo natural em função da quantidade de aglomerante aplicado. Entretanto os processos são conceitualmente os mesmos, ou seja, a introdução e mistura de cal ao solo para obtenção de propriedades como resistência ou deformabilidade adequadas a um determinado uso de engenharia. Nesta revisão da literatura não será feita distinção entre os termos, sendo mantido o termo utilizado pelo autor citado.

Utiliza-se solo-cal quando não se dispõem de um material ou combinação de materiais com as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade adequados ao projeto. A estabilização com cal é comumente empregada na construção de estradas, sendo geralmente utilizado como base ou sub-base de pavimentos (INGLES; METCALF, 1972).

Segundo Guimarães (1971), o uso expressivo de solo-cal em rodovias iniciou-se na década de 50. O autor relatou algumas experiências de sucesso em pistas experimentais de solo-cal no Brasil, entre elas:

I – Aeroporto de Congonhas (São Paulo) – na área de hangares da Varig (10.000 m²) foi construída uma base de solo-cal-agregado, com 6% de cal hidratada;

II – Rodovia Curitiba/Porto Alegre (Paraná) – próximo ao km 10, com 1000 metros de extensão. Foi utilizado um solo siltoso, com 3% e 7% de cal;

III – Rodovia Brasília/Fortaleza (Distrito Federal) – proximidades de Sobradinho, foram construídos dois trechos de 150 metros cada e bases com 1% e 3% de cal;

IV – Avenida Sernambetiba – Guanabara (Rio de Janeiro) – trecho de 18 km, com base de 3% a 4% de cal;

V – Rodovia Cruz Alta/Carazinho (BR-377/RS) – dois trechos experimentais em solo argiloso com 4% de cal.

Outra importante aplicação do solo-cal tem sido na proteção de taludes contra a erosão em obras hidráulicas como, por exemplo, no canal de irrigação de Friant-Kern na Califórnia, no qual foi utilizada cal virgem pulverizada (3% a 5%). Tanto no aspecto estanqueidade, como no de estabilidade, o canal, com vazão de 150 m³/min, não apresentou nenhuma erosão significativa após um ano de serviços contínuos (LITTLE, 1999; GUIMARÃES, 2002).

A técnica de melhoramento do solo também pode ser utilizada nas fundações de edificações de pequeno porte, em solos com baixa capacidade de suporte ou que apresentam baixa estabilidade volumétrica. Tais condições são problemáticas na medida em que podem causar severas patologias na edificação (INGLES; METCALF, 1972).

A solução tradicionalmente utilizada para suportar as cargas das construções nestes locais é o uso de fundações profundas, no entanto, este tipo de solução técnica pode inviabilizar a obra dependendo do tipo do empreendimento (THOMÉ et al., 2005).

Sandroni e Consoli (2010) apresentam uma ampla revisão bibliográfica sobre a prática da engenharia geotécnica em solos extremamente moles e expansivos. Dentre as posturas de projeto disponíveis na engenharia geotécnica em solos extremamente moles e expansivos, os autores destacam as seguintes: evitação, deslocamento, substituição, aterros convencionais, sobrecarga, reforços geossintéticos, drenos verticais, geotubos, tratamento de camada superficial por mistura com aglomerante seco, colunas de mistura de solo com ligantes, colunas de material granular, aterros reforçados com geossintéticos apoiados em colunas (material granular ou mistura de solo com ligantes) ou estacas, aterro sobre laje de concreto

estaqueada e congelamento. A adoção de uma ou mais soluções técnicas está associada principalmente ao tipo de obra e a espessura da camada de baixa resistência.

Thomé et al. (2005), a partir de uma série de resultados de ensaios de placa sobre sistemas de dupla camada, sendo a superior cimentada, e simulações numéricas através do Método dos Elementos Finitos, apresentam um método semi-empírico de dimensionamento de fundações superficiais apoiadas sobre uma camada de solo resistente, a qual se encontra assente sobre uma camada de baixa resistência.

As principais conclusões apresentadas por Thomé et al. (2005) são:

I - É possível utilizar um modelo simples para representar o comportamento de solos cimentados e não-cimentados, como o modelo elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Drucker-Prager em conjunto com o Método dos Elementos Finitos, para prever o comportamento de fundações superficiais apoiadas em um sistema de dupla camada;

II - dos parâmetros dos materiais, o módulo de elasticidade e o ângulo de atrito da camada cimentada não influenciam significativamente o valor de capacidade de carga referente a 2% de recalque relativo (sendo o recalque relativo igual ao recalque observado dividido pelo diâmetro da placa);

III - os parâmetros dos materiais que mais influenciam a capacidade de carga em um sistema de dupla camada, sendo a superior cimentada, em ordem e importância são: coesão da camada cimentada; coesão, módulo de elasticidade e ângulo de atrito interno da camada não-cimentada;

IV - a resposta tensão *versus* recalque relativo será única para uma mesma relação H/D, onde H é a espessura da camada cimentada e D é o diâmetro da fundação. Quanto maior esta relação, mais rígida e mais resistente será a resposta carga *versus* recalque. O recalque relativo em que ocorre a ruptura física de fundações sobre dupla camada também é função da relação H/D;

V - é possível suprimir as influências das variáveis geométricas diâmetro da fundação (D) e espessura da camada cimentada (H), desde que se normalize os resultados de carga aplicada pela carga obtida ao nível de recalque de 2% do tamanho da fundação (D/50).

Portanto a partir de um ensaio de placa de pequeno diâmetro sobre um sistema de dupla camada, além do valor da capacidade de carga a 2% de recalque relativo, é possível reproduzir a curva carga versus recalque de fundações de maiores dimensões. De acordo com os autores, os valores da capacidade de carga a 2% de recalque relativo de fundações superficiais apoiadas em sistema de dupla camada, sendo a superior cimentada, podem ser obtidos através das equações (2.1), (2.2) e (2.3) abaixo:

$$\text{Para } H/D = 1,00: \frac{q_{u2\%}}{Pa} = 2,10 \cdot e^{0,3235F} \quad (\text{equação 2.1})$$

$$\text{Para } H/D = 0,50: \frac{q_{u2\%}}{Pa} = 1,31 \cdot e^{0,3365F} \quad (\text{equação 2.2})$$

$$\text{Para } H/D = 0,25: \frac{q_{u2\%}}{Pa} = 0,84 \cdot e^{0,3328F} \quad (\text{equação 2.3})$$

Onde: $q_{u2\%}$: tensão de ruptura a 2% de recalque relativo.

$$F: \text{ fator de parâmetros } F = \ln\left(\frac{c'_1}{Pa}\right) + \ln\left(\frac{c'_2}{Pa}\right) + \frac{1}{\cos^4 \phi'_2} + \ln\left(\frac{E_2}{Pa}\right) \quad (\text{equação 2.4})$$

Pa : pressão atmosférica.

c'_1 : coesão da camada cimentada.

c'_2 : coesão da camada não-cimentada.

ϕ'_2 : ângulo de atrito interno da camada não-cimentada.

E_2 : módulo de elasticidade da camada não-cimentada.

Como esta formulação foi obtida a partir de dados experimentais, é necessário explicitar a sua faixa de validade. Na tabela 2.1 é apresentada a faixa de variação dos parâmetros para os quais a metodologia é aplicável.

Tabela 2.1: Faixa de validade para aplicação da metodologia proposta por Thomé et al. (2005)

MATERIAL CIMENTADO	MATERIAL NÃO-CIMENTADO
$0,19 \leq c'_1/Pa \leq 4,44$	$0,01 \leq c'_2/Pa \leq 0,50$
$0,70 \leq \text{tg}\phi'_1 \leq 1,19$	$0,26 \leq \text{tg}\phi'_2 \leq 0,70$
$2.961,0 \leq E_1/Pa \leq 14.810,0$	$98,0 \leq E_2/Pa \leq 988,0$
$2.961,0 \leq E_1/Pa \leq 14.810,0$	$98,0 \leq E_2/Pa \leq 988,0$

Além das aplicações destacadas anteriormente, como execução de fundações profundas, construção de caminhos de serviço, reforço em aterros, contenção em escavações (injeção de lama de cal sob pressão ou grouting), a técnica de solo-cal também pode ser utilizada na confecção de blocos para alvenaria ou ainda no fechamento de trincheiras abertas para passagem de canalizações (INGLES; METCALF, 1972; GUIMARÃES, 2002).

2.1.1 Materiais Utilizados no Solo-Cal

2.1.1.1 Solo

A cal tem pouco efeito em solos altamente orgânicos e também em solos com pouca ou nenhuma quantidade de argila. É mais eficiente em solos argilosos, podendo ser mais efetivo que o cimento em pedregulhos argilosos (INGLES; METCALF, 1972).

Para verificar qual aglomerante mais indicado a ser utilizado na estabilização de solos deve-se levar em consideração a granulometria do solo e a plasticidade. Solos com média a alta plasticidade são mais reativos a cal, a qual aumenta a trabalhabilidade, diminui a expansão volumétrica e aumenta a resistência (USACE, 1994).

Thompson (1966) denominou de reativos aqueles solos que ao reagirem com a cal sofrem substancial ganho de resistência, qual seja, 345 kN/m^2 , após 28 dias de cura à temperatura de $22,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Solos que apresentam limitada reatividade pozolânica (ganhos de resistência inferiores a 345 kN/m^2) são denominados de não-reativos.

Argilas expansivas apresentam uma resposta mais rápida à adição de cal. Bell (1996) constatou um rápido aumento inicial na resistência à compressão simples de um solo contendo montmorilonita, com pequenos teores de cal (2% a 3%). Além disso, para este solo, 4% de cal foi suficiente para atingir a resistência máxima, enquanto que para um solo rico em caulinita, a resistência máxima foi atingida com teores entre 4 e 6%. Entretanto, o nível de resistência alcançado pela mistura solo caulínico mais cal foi sensivelmente superior ao da outra.

Ormsby e Kinter (1973) constataram para um solo contendo como principal argilo-mineral a caulinita, que a mistura com cal cálcica apresentou maior resistência à compressão simples que a mistura com cal dolomítica. Quando o principal argilo-mineral presente era a montmorilonita, a cal dolomítica apresentou desempenho um pouco superior. Segundo Bhattacharja et al. (2003), independentemente da fonte de cálcio utilizada, é necessário que uma quantidade equivalente de cálcio seja disponibilizada para as reações pozolânicas. Na cal dolomítica a presença de magnésio reduz a disponibilidade de cálcio por peso unitário, o que poderia ser compensado pela dosagem de um maior teor de cal.

2.1.1.2 Cal

Conforme Guimarães (2002), a cal utilizada na estabilização ou melhoria dos solos é produto resultante da calcinação, em temperaturas próximas de 1000°C, de rochas carbonatadas cálcicas e magnesianas existentes na superfície terrestre. Na forma hidratada deve obedecer às determinações da Norma Brasileira NBR 7175.

Na tabela 2.2 são apresentadas as propriedades com valores médios das cales comercializadas no mercado brasileiro, segundo Guimarães (2002).

Tabela 2.2: Composição média das cales brasileiras (GUIMARÃES, 2002)

TIPO DE CAL	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ (%)	Perda ao Fogo (%)	CO ₂ (%)	SO ₃ (%)	CaO + MgO Base de Não-Volátil (%)	MgO Não Hidratado (%)
CAL VIRGEM CÁLCICA	90-98	0,1-0,8	0,5-3,5	0,2-1,0	0,5-5,0	0,2-3,8	0,1-0,6	96,0-98,5	-
CAL HIDRATADA CÁLCICA	70-74	0,1-1,4	0,5-2,5	0,2-0,8	23-27	1,5-3,5	0,1-0,0		0,5-1,8
CAL HIDRATADA DOLOMÍTICA OU MAGNESIANA	39-61	15-30	0,5-18,2	0,2-1,5	19-27	3,0-6,0	0,02-0,2	76-99	5 - 25
CAL VIRGEM DOLOMÍTICA OU MAGNESIANA	51-61	30-37	0,5-4,5	0,2-1,0	0,5-4,8	0,5-4,5	0,05-0,1		-

2.1.1.3 Resíduos Industriais

A preocupação com o destino dos resíduos proveniente de qualquer tipo de indústria é alvo de inúmeros trabalhos e pesquisas na atualidade. A introdução de resíduos industriais na área de melhoramento de solos visa basicamente solucionar problemas de caráter econômico, tecnológico, de consumo energético e de ordem ambiental (CINCOTTO, 1988).

Thomé (2008) apresenta uma ampla revisão bibliográfica do uso de resíduos industriais no melhoramento de solos no Brasil. Entre os materiais utilizados no melhoramento de solos no Brasil estão o fosfogesso, cal de carbureto, cinza pesada, fibras de garrafas PET, alcatrão de madeira, resíduo da indústria de pedras preciosas, resíduos de britagem, resíduos de construção e demolição e raspas de pneu.

O uso de resíduos como a cinza volante e filler proveniente da britagem de rochas basálticas, materiais utilizados nessa pesquisa, em princípio são normalmente utilizados como adições no melhoramento de solos com cal, onde a matriz é predominantemente arenosa com escassez de argila coloidal, a qual não reage satisfatoriamente à cal. Para a estabilização desses solos, quando o consumo de cal é muito elevado (economicamente inviável) ou quando a correção da granulometria não é possível (por falta de outros materiais), a adição de materiais silicosos pode torná-los reativos à cal (TRB, 1976; CONSOLI et al., 2001; LOPES JUNIOR, 2007; DALLA ROSA, 2009a).

2.1.2 Reações Solo-Cal

Castro (1995) observa que quando se adiciona cal a um solo fino em presença de água, ocorrem simultaneamente algumas reações químicas. A estabilização química com cal é caracterizada por duas etapas distintas: uma etapa inicial rápida (que dura de horas a dias), e uma outra mais lenta, que pode levar meses a anos.

Alguns fenômenos que podem originar a etapa rápida no processo da interação da cal com um solo fino são: troca catiônica, floculação-aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, adsorção de cal e reações químicas. A fase lenta é caracterizada pelas reações pozolânicas, que proporcionam um aumento da resistência, devido à formação de produtos

cimentantes; e pela carbonatação, que é uma reação prejudicial, uma vez que reduz a quantidade de cal disponível para produzir as reações pozolânicas.

Prusinski e Bhattacharja (1999) afirmam que a troca catiônica inicia o processo de estabilização muito rapidamente e é seguida pela floculação e aglomeração. Segundo os autores, a superfície do argilo-mineral é deficiente em carga e, para neutralizar essa deficiência, cátions e moléculas de água são atraídos para a superfície de clivagem carregada negativamente. Isso resultará em uma separação de duas camadas, chamada de dupla camada difusa. Grim (1953), apud Thomé (1994), afirmou que, assumindo igual concentração, a ordem de adsorção preferencial de cátions comuns, associados com os solos é dada pela série: $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+} < \text{Al}^{3+}$, da direita para a esquerda, ou seja, cátions de menor valência são substituídos por cátions de maior valência. Como a cal é uma fonte de cálcio livre, a sua adição em quantidade suficiente cria uma concentração de Ca^{++} , que serão adsorvidos na superfície dos argilo-minerais.

A floculação e aglomeração causam mudanças na textura da argila, pois sua estrutura é alterada de plana e paralela para uma orientação aleatória de partículas (PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1999). Conforme relato do TRB (1987), Herzog e Mitchell (1963) afirmaram que o fenômeno da floculação é causado pelo aumento da concentração eletrolítica da água intersticial, pelo alto pH e pela redução da espessura da dupla camada difusa, através de trocas catiônicas. O mecanismo de troca de cátions é mostrado na figura 2.1.

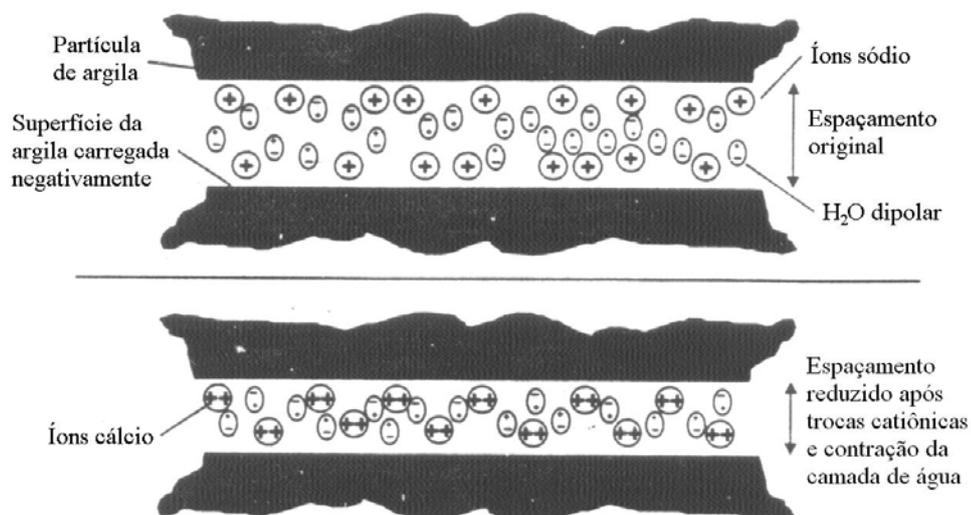


Figura 2.1: mecanismo de troca de cátions (adaptado de PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1999)

As reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica de misturas solo-cal. Esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes.

Segundo Rogers e Glendinning (2000), os íons hidroxila liberados da cal elevam o pH da mistura a um valor suficientemente alto, de modo que a sílica e a alumina sejam dissolvidas da argila. Essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio. Segundo relato do TRB (1987) esta reação não cessará enquanto houver Ca(OH)_2 reagindo e sílica disponível no solo. Conforme Ingles e Metcalf (1972), os géis de silicato resultantes da reação imediatamente cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios. Os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos. Os autores salientam que esta reação só ocorre em presença de água, que tem a função de carregar os íons cálcio e hidroxila para a superfície da argila. Este mecanismo é mostrado na figura 2.2.

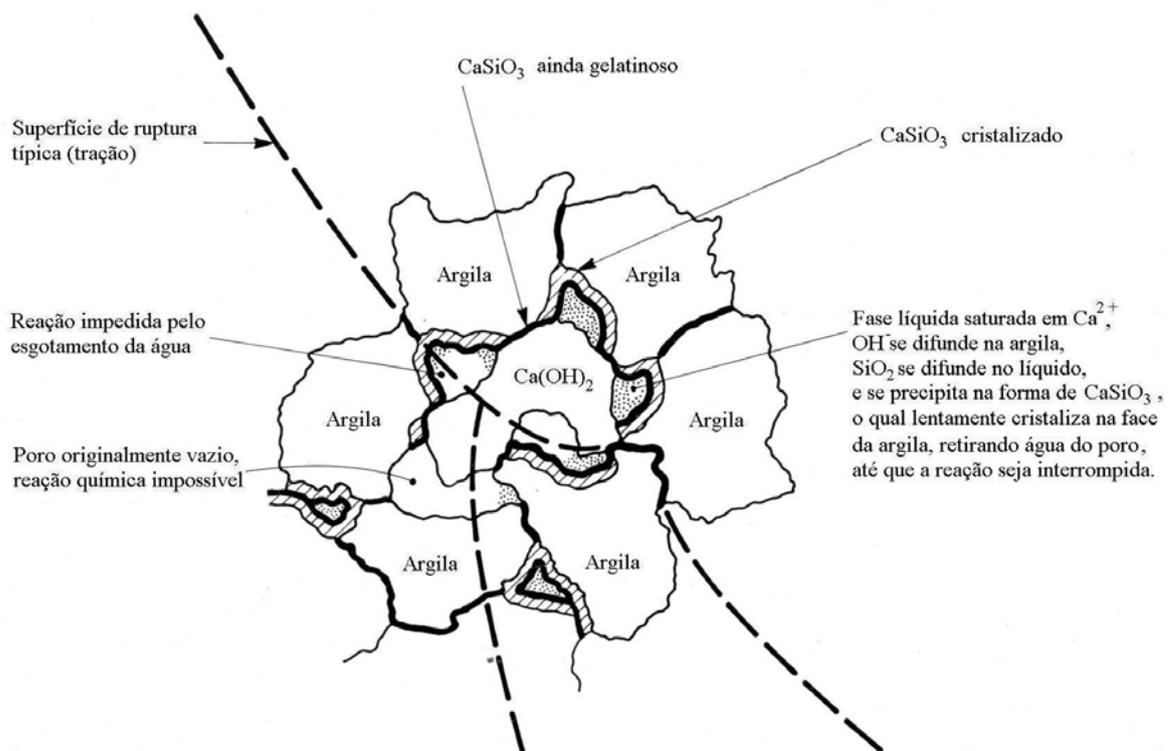


Figura 2.2: mecanismo de estabilização solo-cal (adaptado de INGLES; METCALF, 1972)

2.1.3 Dosagem Solo-Cal

2.1.3.1 Métodos Clássicos

A dosagem visa selecionar a quantidade de cal a ser adicionada ao solo que fornecerá a resistência e a durabilidade adequadas ao uso que o material se destina. O procedimento de dosagem é feito através de baterias de testes de laboratório (INGLES; METCALF, 1972).

Entre os métodos clássicos de dosagem de misturas solo-cal mais utilizados destacam-se:

I – Método do pH (EADES; GRIM, 1966) – consiste na determinação do teor mínimo de cal que produza um aumento no valor de pH para 12,4.

II – Método do ICL (Initial Consumption of Lime) – proposto por Rogers et al. (1997), é uma variação do método do pH, onde o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor constante (máximo);

III – Método do *Lime Fixation Point* (HILT; DAVIDSON, 1960) – baseado no limite de plasticidade, que determina o teor de cal máximo que proporciona melhoria na trabalhabilidade, sem ganhos significativos de resistência;

IV – Método de Thompson (1966) – que define como reativo um solo que apresente um aumento de resistência à compressão simples de pelo menos 345 kPa quando estabilizado com cal.

O método do pH apresenta algumas limitações para utilização em solos tropicais e subtropicais. Segundo relato do TRB (1987), estudos de Harty (1970) demonstraram que a porcentagem de cal obtida pelo método do pH não produz a máxima resistência à compressão nos solos tropicais e subtropicais. Conforme o autor, o método não assegura se a reação do solo com a cal produzirá um substancial aumento de resistência, devendo ser utilizado apenas como referência.

Núñez (1991), ao estudar um solo saprolítico de arenito, observou a impropriedade do método do pH para o solo em questão. Thomé (1994), ao tratar com cal um solo caracterizado

como Gley Húmico, verificou que o método Eades e Grim (1966) não se apresentou adequado para a determinação do teor ótimo de cal, o valor adotado pelo método (9%) simplesmente melhorou as características do material, não cimentando as partículas como esperado.

Segundo Bhattacharja et al. (2003), os métodos de dosagem existentes geralmente consideram a resistência como um critério secundário e não levam em consideração a durabilidade.

A título de ilustração, a tabela 2.3, adaptada de Inglês e Metcalf (1972), apresenta um indicativo da quantidade de cal a ser adicionada para a estabilização, de acordo com o tipo de solo.

Tabela 2.3: Previsão da quantidade de cal em função do tipo de solo
(adaptada de INGLES; METCALF, 1972)

TIPO DE SOLO	TEOR DE CAL PARA MODIFICAÇÃO	TEOR DE CAL PARA ESTABILIZAÇÃO
Pedra finamente britada	2 a 4	Não recomendado
Pedregulho argiloso bem graduado	1 a 3	≥ 3
Areias	Não recomendado	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado	≥ 5
Argila siltosa	1 a 3	2 a 4
Argilas	1 a 3	3 a 8
Solos orgânicos	Não recomendado	Não recomendado

2.1.3.2 Metodologia Relação Vazios/Cal

A relação volume de vazios/volume de agente cimentante na previsão do comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados é foco de inúmeras pesquisas recentes (FOPPA, 2005; LOPES JUNIOR, 2007; LAUTENSCHLÄGER, 2007; RIGHETTO, 2008; CRUZ, 2008; DALLA ROSA, 2009a; SANDRONI; CONSOLI, 2010).

O primeiro trabalho a testar a relação volume de vazios/volume de agente cimentante para solos tratados com cal foi apresentado por Lopes Junior (2007). O autor partiu do conceito de que dada uma variação no volume de vazios de uma amostra, uma variação proporcional no volume de cal seria suficiente para contrabalançar a perda ou ganho de resistência.

Em seu estudo, Lopes Junior (2007) utilizou solo residual de arenito Botucatu misturado com 25% de rocha basáltica pulverizada. As porcentagens de cal utilizadas, em relação à massa de solo seco, foram de 3%, 5%, 7%, 9% e 11%. Para cada porcentagem de cal foi feita uma série de ensaios de resistência à compressão simples, moldadas a diferentes teores de umidade e massas específicas aparentes secas, ambos determinados a partir das curvas de compactação das misturas de solo-cal.

A relação vazios/cal utilizada por Lopes Junior (2007) é definida pela seguinte expressão:

$$\frac{V_v}{V_{ca}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar + água)}}{\text{Volume absoluto de cal}} \quad (\text{equação 2.5})$$

Para Lopes Junior (2007), a melhor maneira de representar a relação vazios/cal na previsão da resistência à compressão simples e compatibilizar as taxas de variação das grandezas foi através da aplicação de uma potência igual a 0,06 sobre o parâmetro V_{ca} . Na figura 2.3 são mostrados os resultados obtidos para amostras com 28 e 90 dias de cura. Para o autor, o uso deste tipo de relação pode ser de utilizada para dosagem de solo-cal e controle de execução de misturas em campo.

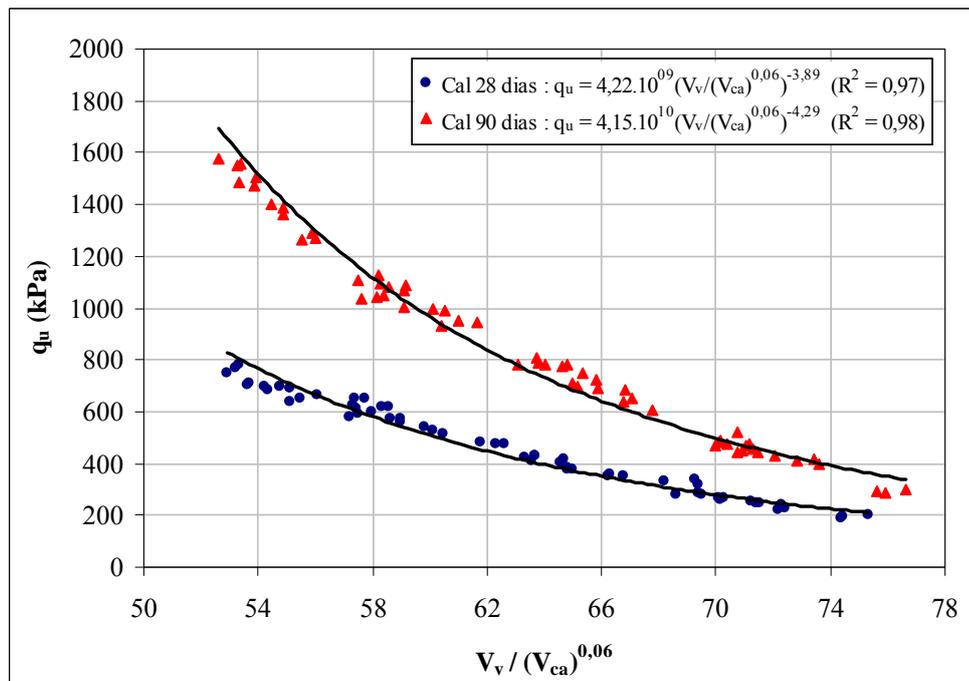


Figura 2.3: relação vazios/cal ajustado versus resistência à compressão simples (LOPES JUNIOR, 2007)

Posteriormente Dalla Rosa (2009a), utilizando o mesmo conceito vazios/cal, tratou um solo silte arenoso misturado com diferentes proporções de cinza volante (12,5%, 25% e 50%) com 3%, 5%, 7% e 9% de cal. Para cada porcentagem de cal foi feita uma série de ensaios de compressão simples, moldadas a diferentes massas específicas aparente secas e curadas por distintos períodos de cura. A figura 2.4 apresenta a relação vazios/cal, expressa na forma de porosidade/teor volumétrico de cal, com os resultados de compressão simples das amostras de solo-cal com 25% de cinza volante curadas previamente por 28, 60 e 90 dias. Para compatibilização das grandezas, o autor utilizou uma potência igual a 0,12, o qual não variou com o tempo de cura.

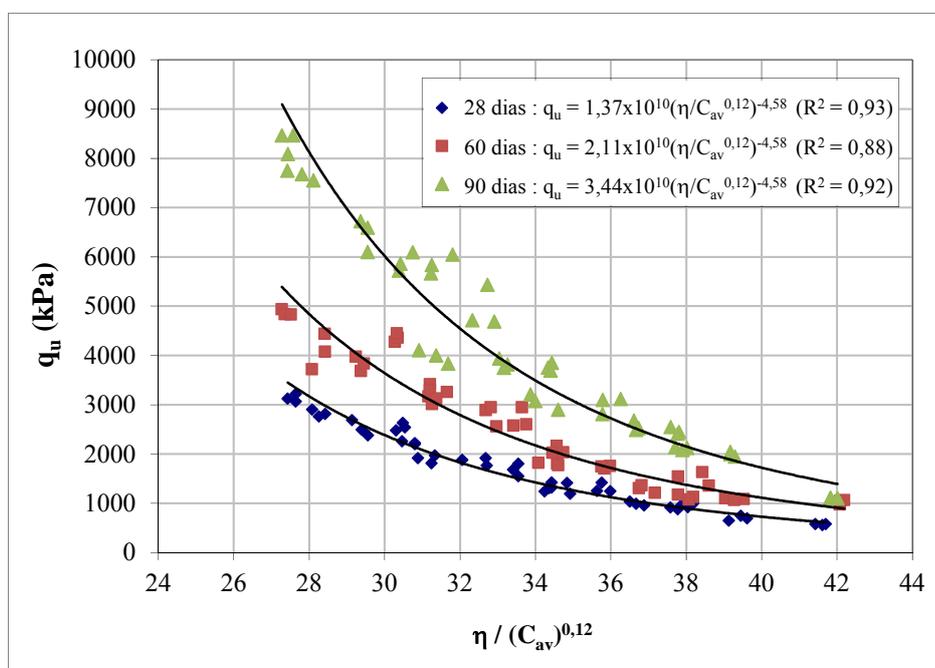


Figura 2.4: relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado versus resistência à compressão simples (adaptado de DALLA ROSA, 2009a)

Na literatura somente foram encontrados trabalhos correlacionando a quantidade de vazios com a quantidade de cimento, para a avaliação do comportamento tensão-deformação, tensão-dilatância e rigidez inicial, os quais são descritos abaixo.

Consoli et al (2007), com o objetivo de verificar o comportamento tensão-deformação de corpos-de-prova com mesma relação vazios/cimento, realizaram seis ensaios triaxiais não-drenados com tensões de confinamento de 20kPa e compararam com a curva de ajuste dos

resultados de resistência à compressão simples obtidos por Foppa (2005). Foram adotados três valores de $\eta/(C_{iv})^{0,28}$ (relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustados por um fator 0,28) para avaliação (20, 25 e 35), como é apresentado na figura 2.6.

Os autores concluíram que a relação vazios/cimento também fornece bons resultados para a previsão da tensão desvio dos ensaios triaxiais adensados não-drenados. Observaram, também, que a curva de ajuste dos ensaios triaxiais ficou próxima, porém, um pouco acima da curva de ajuste dos ensaios de compressão simples, devido ao efeito do confinamento (Figura 2.5).

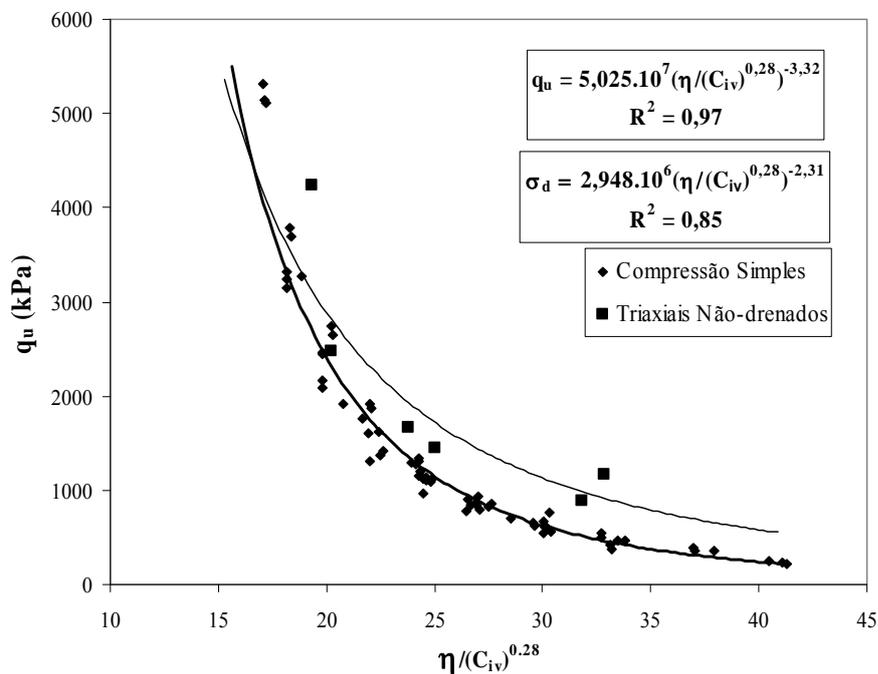


Figura 2.5: previsão da tensão desvio através da relação vazios/cimento (CONSOLI et al., 2007)

Cruz (2008), utilizando o conceito vazios/cimento, tratou uma areia fina com 2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12% de cimento. Para cada porcentagem de cimento foram moldadas amostras com 10% de umidade e diferentes índices de vazios (0,68; 0,73 e 0,80). O autor avaliou a resistência à compressão simples, a influência de tensões efetivas de confinamento e a rigidez inicial (G_0) através da técnica de bender elements. A figura 2.6 apresenta os resultados de resistência à compressão simples comparando com as resistências à compressão triaxial, para tensões de confinamento de 20, 200 e 400kPa.

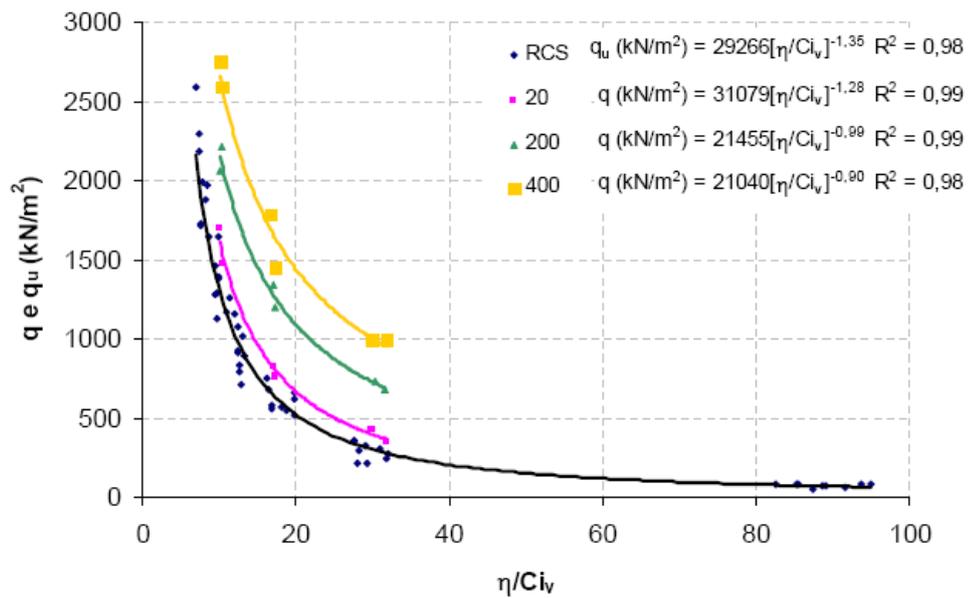


Figura 2.6: tensão versus relação vazios/cimento para diferentes tensões confinantes (CRUZ, 2008)

Na figura 2.7 são apresentadas as correlações entre a relação vazios/cimento e a rigidez inicial (G_0). A partir dos resultados de compressão simples e rigidez inicial, Cruz (2008) relacionou as duas variáveis de resposta, obtendo como equação resultante:

$$\frac{G_0}{q_u} \cong 1000 \sqrt{\frac{\eta}{C_{iv}}} \quad (\text{equação 2.6})$$

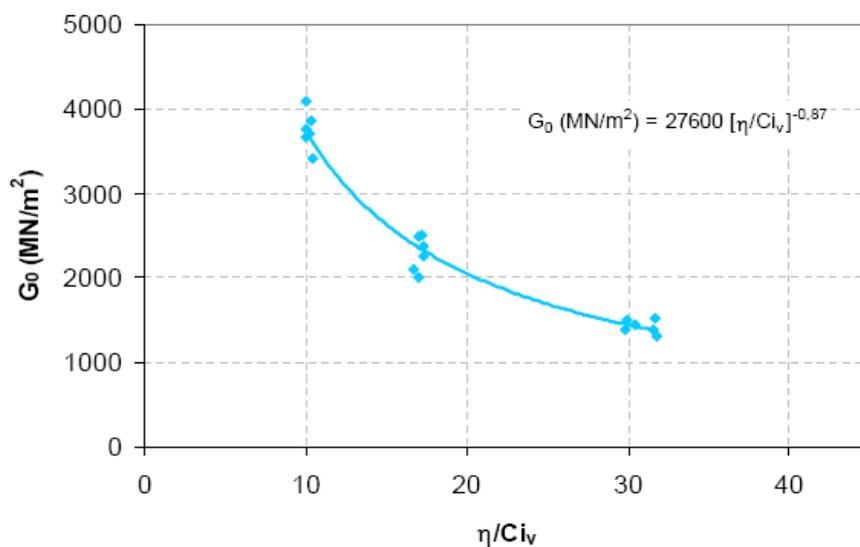


Figura 2.7: módulo cisalhante versus relação vazios/cimento (CRUZ, 2008)

2.2 VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DO SOLO-CAL

2.2.1 Efeito da Cal

A primeira resposta da mistura solo-cal será a redução do índice de plasticidade e melhoria na trabalhabilidade e a segunda será o ganho de resistência através da cimentação das partículas (INGLES; METCALF, 1972; ATTOH-OKINE, 1995; TRB, 1987).

Guimarães (1971) afirma que, de modo geral, a cal afeta favoravelmente certas propriedades dos solos, o que se reflete em variações das características físicas seguintes: granulometria, plasticidade, contração e retração, umidade de campo, densidade, trabalhabilidade, desintegração e compactação, resistência e permeabilidade.

Consoli et al. (2001), ao estudar um solo arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, verificaram que para uma mesma tensão confinante, o aumento da quantidade de cal provoca aumento da resistência de pico e diminuição da deformação na qual o pico é atingido.

2.2.2 Efeito da Densidade e Compactação

De similar importância à quantidade de cal é a densidade na qual a mistura é compactada. Com o aumento da densidade, a resistência aumenta, a permeabilidade diminui até um valor mínimo, próximo da umidade ótima, depois começa a aumentar novamente (INGLES; METCALF, 1972).

Diversos autores observaram que misturas solo-cal apresentam menor massa específica aparente máxima (γ_d) que o solo natural, para uma mesma energia de compactação. À medida que o teor de cal aumenta o γ_d continua diminuindo. Além disso, a umidade ótima aumenta com o aumento do teor de cal (TRB, 1987).

As partículas do solo, quando adicionada cal, se tornam mais flocladas, devido à substituição dos íons sódio monovalentes da argila por íons cálcio divalentes. Devido à floclação, a quantidade de vazios e o tamanho dos vazios no solo aumenta. Esta estrutura floclada é forte o suficiente para resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios mais alto, reduzindo assim o γ_d do solo. Quanto mais vazios houver, mais água será necessária para preenchê-los, o que resultará em uma umidade ótima maior, e uma curva de compactação mais achatada (SIVAPULLAIAH et al., 1998).

2.2.3 Efeito do Teor de Umidade e da Relação Água/Cal

Solos estabilizados com cal normalmente são compactados em campo na umidade ótima para obtenção da massa específica aparente seca máxima, como determinado no ensaio de compactação de Proctor. Entretanto, estudos com solo-cal e solo-cimento mostram que em alguns casos, o teor de umidade que proporciona máxima resistência e durabilidade não é necessariamente igual ao teor de umidade que gera a maior massa específica aparente seca, e sim um valor levemente inferior ao teor ótimo (CARRARO, 1997; FOPPA, 2005).

Kézdi (1979) observou que não existe uma correlação entre o teor de umidade de moldagem que confere aos corpos-de-prova o máximo valor de resistência e aquele que permite a compactação na máxima densidade.

Osinubi (1998) estudou a influência do retardamento da compactação em misturas solo-cal, observando uma redução na umidade ótima da mistura com a espera na compactação, o que pode ser atribuído às trocas catiônicas e à floclação das partículas de argila, que ocorrem simultaneamente, deste modo diminuindo a água disponível no sistema. Segundo o autor, em materiais compactados imediatamente após a mistura, a mudança nas características de compactação é principalmente devida à alteração na granulometria do solo; quando ocorre uma demora na compactação, os produtos de hidratação se unem às partículas tornando necessária a ruptura dessas agregações para que o solo seja compactado satisfatoriamente, o que pode não recuperar sua total resistência.

De acordo com Guimarães (1971), o tipo de cal utilizada também influencia no teor de umidade ótimo. Para um solo com 38% de argila e 32% de silte, estabilizado com cales

cálcica e dolomítica, o autor observou uma umidade ótima em média 1,3% maior para as misturas com cal cálcica que para as misturas com cal dolomítica.

Lopes Junior (2007) estudou misturas de solo residual de arenito Botucatu com 25% de rocha basáltica pulverizada, tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal. Nessas misturas utilizou-se 10%, 12%, 14% e 16% de umidade de moldagem. Os resultados mostraram que a variação de umidade de moldagem não afetou a resistência à compressão simples para os tempos de cura estudados (28 e 90 dias), verificou-se não existir relação entre a resistência à compressão simples e a relação água/cal. Segundo o autor, para o solo-cal estudado, a relação água/cal não é a melhor maneira de prever a resistência em solos no estado não-saturado. Em solos tratados com cal, Inglês e Metcalf (1972) afirmam que a água somente é necessária para transportar os íons cálcio e hidroxila para a superfície da argila para que ocorram as reações químicas, e que o teor ótimo de água obtido pelo ensaio de compactação é suficiente para efetivar esse processo.

2.2.4 Efeito do Tempo de Cura

Inglês e Metcalf (1972) apresentam um estudo sobre a influência do tempo de cura em diferentes tipos de solos, tratados com 5% de cal hidratada, observando taxas de ganhos de resistência maiores em pedregulhos arenosos, conforme a figura 2.8.

Thomé (1994) estudou misturas de uma argila mole (pedologicamente conhecida como Gley Húmico) com 5, 7 e 9% de cal dolomítica. Observou que a resistência não apresentou variação significativa para tempos de cura superiores a 7 dias. Segundo o autor, as reações pozolânicas foram impedidas ou sua quantidade insuficiente para cimentar as partículas. As reações pozolânicas poderiam ser impedidas pelos seguintes fatores simultâneos ou independentes: falta de água, temperatura de cura muito baixa, teor de cal insuficiente ou presença de matéria orgânica.

Carraro (1997) ao estudar um solo silte arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, observou que o teor de cal presente nas misturas não exerceu influência significativa sobre os valores médios de resistência à compressão simples até a idade de 90 dias de cura, para a maior idade de cura adotada (180 dias), a resistência à compressão

simples é fundamentalmente dependente do teor de cal de carbureto, apresentando uma relação aproximadamente linear.

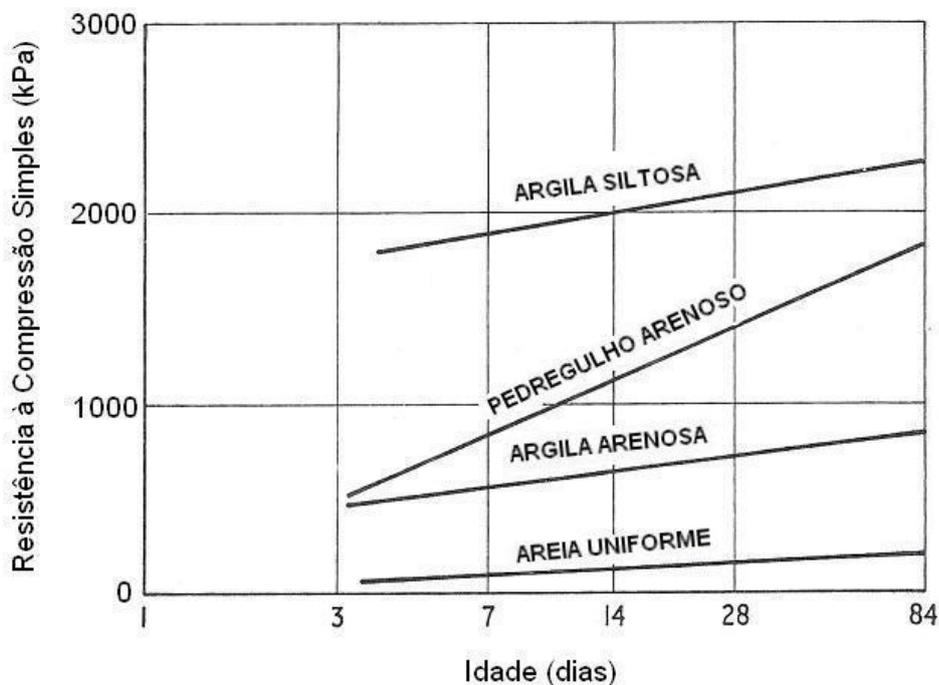


Figura 2.8: efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal (adaptado de INGLÊS; METCALF, 1972)

Lopes Junior (2007) verificou que misturas de solo residual de arenito Botucatu com 25% de rocha basáltica pulverizada, tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal, curadas com 90 dias, apresentaram em média, resistências 50% superiores em relação às amostras com 28 dias de cura.

Para as misturas de solo residual de Arenito Botucatu com 25% de cinza volante, tratadas com 3%, 5%, 7% e 9% de cal, Dalla Rosa (2009a) verificou que as amostras curadas por um período de 90 dias, apresentaram em média, resistências 35% superiores às amostras curadas por 60 dias, e estas, por sua vez, apresentaram resistências 65% superiores em relação às amostras com 28 dias de cura.

2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO-CAL

2.3.1 Resistência à Compressão Simples

A resistência de misturas solo-cal normalmente é avaliada através dos ensaios de compressão simples, compressão triaxial e índice de Suporte Califórnia (ISC), e depende de diversas variáveis como: tipos de solo e cal, teor de cal, tempo e temperatura de cura (TRB, 1987).

Segundo Inglês e Metcalf (1972), geralmente, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até certo nível, usualmente 8% para solos argilosos. A partir deste ponto a taxa de acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal, devido às misturas solo-cal apresentarem uma cimentação lenta e dependerá do tipo de solo (Figura 2.9).

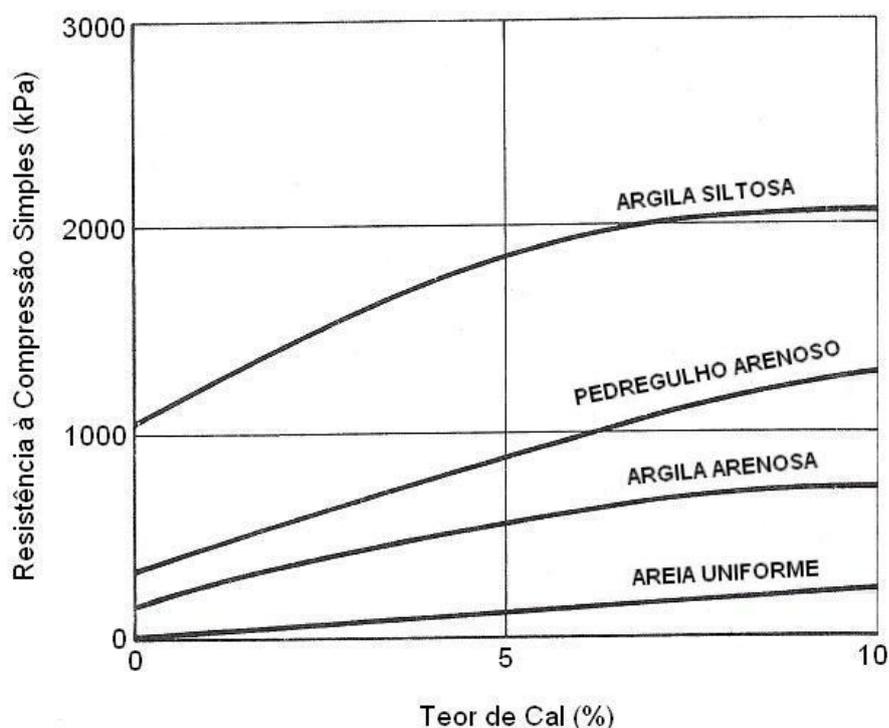


Figura 2.9: efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (adaptado de INGLÊS; METCALF, 1972)

Herrin e Mitchell (1961) afirmaram que não há, aparentemente, um teor ótimo de cal, que produza a máxima resistência em um solo estabilizado. Apontaram o teor e tipo de cal, o tipo de solo, a massa específica, o tempo e tipo de cura, como sendo os principais fatores que influenciam a resistência de misturas de solo e cal.

Ormsby e Kinter (1973), por sua vez, constataram que em solos ricos em caolinita a adição de cal cálcica dá maiores resistências do que a dolomítica, sendo a resistência à compressão simples função linear do teor de cal adicionado. Já para solos contendo montmorilonita a relação é uma equação do segundo grau, e os melhores efeitos são obtidos com a adição de cal dolomítica.

O aumento da resistência à compressão simples de misturas solo-cal, com o aumento da energia de compactação, foi observado por Mateos (1964), que afirmou que a resistência das misturas é fortemente influenciada pela temperatura de cura, recomendando a construção de camadas de pavimento estabilizadas com cal no início do verão. Carraro (1997) verificou que a energia de compactação influencia e é de fundamental importância na determinação da resistência mecânica de solos tratados com cal de carbureto e cinza volante.

2.3.2 Resistência à Tração

A resistência à tração do solo-cimento é de grande interesse em projetos de pavimentos e tem sido investigada por vários pesquisadores. (TRB, 1987).

Conforme citado por Núñez (1991), Thompson (1975) afirmou que a resistência à tração por compressão diametral conduz a menores valores que a resistência à tração na flexão. Constatou também que o quociente entre a resistência a tração pela resistência à compressão simples das misturas solo-cal estudadas varia de 0,10 a 0,15, independente do tipo e/ou teor de cal. Além disso, Ceratti (1979), ao estudar os efeitos da adição de cal e cinza volante a um solo residual compactado, também constatou uma relação entre 0,10 e 0,13.

Carraro (1997), ao estudar uma mistura de solo arenoso compactado com cinza volante e cal de carbureto, observou que valores médios de resistência à tração na compressão diametral aumentam com o tempo de cura e que a taxa de crescimento dos diferentes mecanismos de resistência (tração e compressão) é variável com o tempo de cura.

Segundo TRB (1987), estudos de Thompson (1969) demonstraram que o quociente entre a resistência à tração na flexão e a resistência à tração na compressão diametral é em torno de 2. Assim pode-se estimar que a resistência à tração na flexão é 25% da resistência à compressão simples.

2.3.3 Resistência ao Cisalhamento

Existe um entendimento geral que, para uma dada variação de tensões, a resistência ao cisalhamento de solos naturalmente e artificialmente cimentados pode ser representada por uma envoltória reta de Mohr-Coulomb, definida por um intercepto coesivo, que é apenas função da cimentação, e por um ângulo de atrito que parece não ser afetado pela cimentação (SCHNAID et al, 2001).

O principal efeito na resistência ao cisalhamento de um solo fino reativo é o de produzir um substancial aumento da coesão; sendo o aumento do ângulo de atrito bem menos expressivo. Considerando as baixas tensões confinantes atuantes no interior de pavimentos flexíveis ou fundações superficiais, o aumento da coesão é da maior importância. Para os solos de Illinois, Thompson (1966) observou que o ângulo de atrito interno de misturas solo-cal variava de 25° a 35° e obteve a seguinte relação entre a coesão (c) e a resistência à compressão simples (RCS):

$$c = 9,3 + 0,292 \text{ RCS} \quad (\text{equação 2.6})$$

Onde: c e RCS são medidas em psi (1 psi \cong 0,7 kgf/cm²)

Thomé (1994), ao estabilizar um solo classificado como Gley Húmico com 5%, 7% e 9% de cal (teores insuficientes para o desenvolvimento de reações pozolânicas, conforme esse autor), obteve valores de coesão e ângulo de atrito (ϕ), compreendidos entre 13,7kPa e 21,6kPa e 19,7° e 23,1°. O solo natural tinha c = 6,1kPa e ϕ = 18,3°.

Consoli et al. (2001), ao verificar o comportamento de um solo silte-arenoso tratado com 4% de cal de carbureto, observaram um acréscimo na coesão de 10kN/m² para 42kN/m² e um acréscimo no ângulo de atrito de 35° para 38°, em relação ao solo natural.

2.3.4 Resposta Tensão-Deformação

As características tensão-deformação são essenciais para a análise do comportamento de uma estrutura de pavimento ou fundações superficiais assentes sobre uma camada em solo-cal.

Em geral, o comportamento tensão-deformação de solos cimentados pode ser descrito como inicialmente rígido, aparentemente linear até um ponto de plastificação bem definido, além do qual o solo sofre aumento nas deformações plásticas até a ruptura. Outra característica apresentada é a marcante fragilidade na ruptura com a formação de planos de ruptura. Tal fragilidade aumenta com o aumento da quantidade de aglomerante e diminui com o aumento da tensão efetiva média (SCHNAID et al., 2001).

O efeito da cal nas características de deformabilidade de um solo fino reativo são marcantes. A tensão de ruptura aumenta significativamente, enquanto que a deformação para ruptura diminui. Akoto e Singh (1986) observaram que quando as tensões de tração são elevadas, as amostras de laterita tratadas com cal se deformam notavelmente antes de romperem. Thompson (1965), entretanto, afirmou que a análise da curva tensão deformação revela o comportamento frágil das misturas solo-cal.

Para o solo classificado como Gley Húmico, Thomé (1994) observou que o módulo secante, entre a origem e 75% da tensão de ruptura, aumenta com o teor de cal. Após 7 dias de cura, a mistura de solo tratado com 9% de cal apresentou módulo secante 2,63 vezes maior do que o solo natural.

Consoli et al. (1997) apresentam resultados de ensaios triaxiais CIU contendo o comportamento tensão-deformação-poropressão de misturas de argila com alto teor de umidade com 13% de cal e períodos de cura de 7, 28, 90 e 180 dias de cura (Figura 2.10). A partir de tais resultados é possível verificar a mudança no comportamento para com o tempo de cura em amostras com cal suficiente (mais de 11%) para a ocorrência de reações pozolânicas. Observa-se que a resistência não apresentou variação significativa para tempos de cura inferiores a 28 dias.

No solo silte-arenoso tratado com cal de carbureto e cinza volante, Consoli et al. (2001) observaram um comportamento frágil na ruptura e que a deformação axial na ruptura diminui com a cimentação, verificaram que não só a cimentação influencia nesse processo,

mas também as condições de compactação. Os autores observaram também que o módulo de deformação secante decresce de forma acentuada com o aumento das deformações axiais.

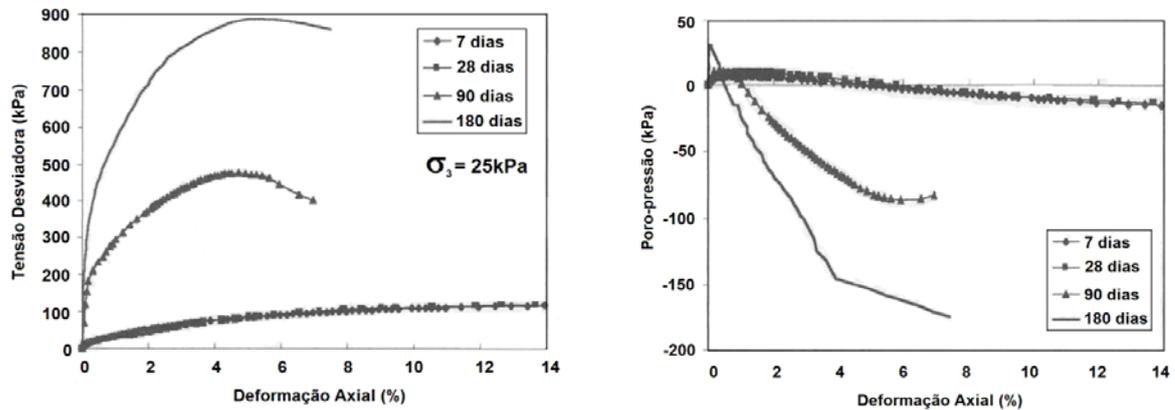


Figura 2.10: Curvas (ensaios triaxiais CIU) tensão-deformação-poropressão (CONSOLI et al., 1997)

2.3.5 Rigidez Inicial

O aumento da rigidez inicial é o efeito mais evidente em solos cimentados, por esta razão, e em função dos avanços tecnológicos realizados nas áreas de medição de deformações e de aquisição de dados em laboratório, diversos autores têm se dedicado ao estudo do comportamento a pequenas deformações de materiais geotécnicos. Entre eles, estão os trabalhos apresentados por Clough et al. (1981), Bressani (1990), Chang e Woods (1992), Hight e Jardine (1993), Tatsuoka et al (1999), Consoli et al (2000) e Schnaid et al (2001).

O fato de que, para pequenas deformações, o solo exhibe frequentemente um comportamento não-linear traz consequências práticas e de caráter fundamental (BURLAND, 1989). Por exemplo, Jardine et al. (1986) mostraram que a não linearidade da relação tensão-deformação do solo produz efeitos muito significativos na interação solo-estrutura, na distribuição de tensões na massa de solo e nos deslocamentos em zonas próximas à áreas carregadas e escavações. Burland (1989) enfatiza que se a natureza não-linear do comportamento do solo a pequenas deformações não é considerada, a interpretação de ensaios de campo pode se tornar confusa e equivocada.

Através dos trabalhos realizados por Atkinson e Salfors (1991) e Mair (1993), Atkinson (2000) apresenta na figura 2.11 uma típica curva rigidez-deformação, onde se observa a degradação da rigidez com o aumento da deformação, as faixas de deformações a que o solo está submetido em condições de serviço para diferentes estruturas geotécnicas e as faixas de deformações para as quais a rigidez pode ser determinada em diferentes ensaios laboratoriais. Verifica-se que para pequenas deformações a rigidez é relativamente alta, enquanto que, para deformações próximas da ruptura, o seu valor diminui drasticamente. Esta degradação, demonstra claramente a forte dependência da rigidez com o nível de deformação, comprovando o caráter não linear dos solos.

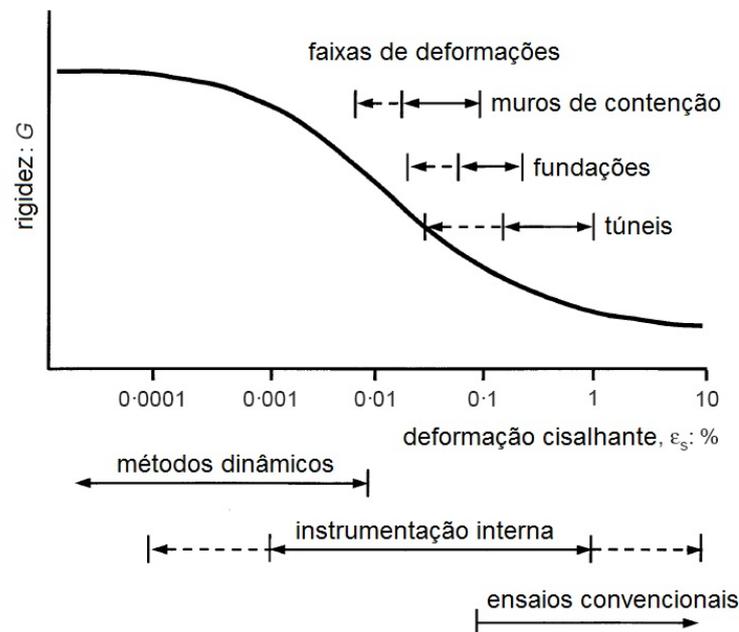


Figura 2.11: curva de degradação da rigidez com o nível de deformação (adaptado de ATKINSON, 2000)

Assim, vários estudos têm proposto a utilização de um modelo de comportamento baseado em múltiplas superfícies de plastificação, aperfeiçoando assim a concepção do comportamento destes materiais a pequenas deformações. Tatsuoka et al. (1999) apresenta um exemplo onde são observadas três superfícies de plastificação. A plastificação primária define o limite das deformações elásticas, onde é possível observar que a variação do módulo de variação volumétrica ou cisalhante parece permanecer constante. Neste estágio, as deformações máximas que delimitam esta região são normalmente inferiores a 0,001%. Uma superfície secundária delimita a região onde ainda não ocorrem deformações plásticas em grande escala, porém esta região é marcada pela quebra das ligações cimentantes entre os

contatos das partículas, sendo que quando superada a mesma, notáveis mudanças no vetor de incremento de deformações plásticas são constatadas. Por final, uma terceira superfície define o limite onde a partir deste ponto, deformações em larga escala são observadas, e como consequência, ocorre progressiva degradação da estrutura cimentante. Sendo assim, esta superfície é somente afetada por deformações relativamente grandes.

O comportamento na faixa de deformações intermediárias (10^{-5} a 10^{-2}) caracteriza-se por deformações irreversíveis não lineares, muito importantes na avaliação de movimentos em massas de solo e estrutura de engenharia, mas que, porém, são mais difíceis de caracterizar do que as propriedades quase-elásticas. A obtenção de parâmetros adequados para projeto nesta faixa de deformações é normalmente baseada em uma combinação das seguintes abordagens: (1) a combinação de parâmetros de rigidez quase-elásticos obtidos a partir de medidas sísmicas com dados a grandes deformações obtidos em ensaios de carregamento em campo; (2) a análise não linear de resultados de ensaios de placa ou pressiométricos; e (3) ensaios de laboratório com medidas na faixa de deformações de interesse, realizados sobre amostras da melhor qualidade possível e utilizando-se trajetórias de tensões relevantes (TATSUOKA et al., 1999).

Segundo Tatsuoka e Kohata (1994), a avaliação da rigidez inicial de solos cimentados e de rochas brandas para utilização na previsão de deformações e deslocamentos em estruturas geotécnicas deve considerar vários fatores: (a) a dependência da rigidez em relação ao estado de tensões e deformações; (b) a anisotropia inerente ou induzida e as heterogeneidades do solo; (c) a história de tensões e deformações; (d) a trajetória de tensões, a taxa de deformação, carregamento repetido e condições de drenagem; (e) a perturbação das amostras; e (f) a acurácia nas medições das deformações em laboratório.

Nos parágrafos seguintes, são destacadas algumas contribuições experimentais ao estudo da rigidez de materiais cimentados.

Chang e Woods (1992) estudaram o efeito de diversos tipos de cimentação no módulo de cisalhamento das areias. Os resultados, segundo os autores, mostraram claramente que o módulo de cisalhamento sempre cresce com o incremento da cimentação. No entanto, o gradiente desta variação não é constante. Além do grau de cimentação, as características granulométricas do solo e as propriedades do material cimentante também afetam o valor do módulo. Os autores postulam que o aumento do módulo de cisalhamento do solo cimentado

normalizado pelo módulo do solo não cimentado pode ser interpretado através das contribuições de dois fatores: (1) a redução do índice de vazios pelo preenchimento parcial ou total dos poros pelo material cimentante e (2) o enrijecimento da estrutura do solo.

Bressani (1990), ao estudar o comportamento de um solo artificial cimentado com diferentes composições, graus de cimentação e índice de vazios, estabeleceu algumas observações a este respeito. Todos os ensaios triaxiais realizados mostraram o mesmo modelo: o decréscimo da rigidez, representada pelo módulo secante, com o logaritmo das deformações axiais. A fim de normalizar o efeito da tensão de confinamento, o autor analisou a variação da relação E/σ'_3 com a tensão de confinamento. Para baixas tensões de confinamento, a rigidez normalizada observada foi bastante alta, comparável a valores para rochas brandas. Os resultados da análise mostraram que o solo artificial exibiu uma queda na rigidez normalizada com a tensão de confinamento, a qual não é comum para solos não cimentados. O autor observou que a variação do módulo secante, em termos absolutos, não é função direta da tensão de confinamento, dependendo do grau de cimentação, do índice de vazios e da composição mineralógica do solo.

Rotta et al. (1998), Consoli et al. (2000) e Dalla Rosa (2009b) investigaram experimentalmente o procedimento usual de obtenção da rigidez de solos cimentados em ensaios triaxiais convencionais, fixando-se na influência da aplicação de tensões confinantes antes e após a cimentação do solo. Os autores verificaram que a degradação da cimentação causou, nas amostras curadas sem confinamento, a queda da rigidez inicial com a tensão de confinamento, ao passo que nas amostras curadas sob tensão verificou-se o aumento com a tensão de confinamento.

2.3.6 Resposta Tensão-Dilatância

A dilatância pode ser definida como sendo a capacidade de um material variar de volume quando submetido à variação de tensões cisalhantes, sendo esta uma característica intrínseca dos materiais friccionais. Entre os trabalhos clássicos presentes na literatura, estão os apresentados por Rowe (1962, 1969a, 1969b) e Rowe et al (1963).

O comportamento de um solo puramente friccional pode ser melhor compreendido a partir de uma analogia com o deslizamento de dentes de uma serra sobre superfícies inclinadas (Figura 2.12a). Desta maneira, é possível entender que o ângulo de atrito mobilizado (ϕ'_m) é constituído de duas parcelas, onde uma delas é representada pelo ângulo de atrito no estado crítico (ϕ'_{cs}), que pode ser considerado como uma constante do material, e por outra parcela que representa o ângulo de dilatação (ψ) (Figura 2.12b).



Figura 2.12: (a) Esquema de lâminas representando o intertravamento das partículas de solo; (b) Forças resultantes. (adaptado de WOOD, 1990)

Na figura 2.13, Atkinson (1993) apresenta a relação entre q/p' e a taxa de dilatação para solos normalmente adensados e pré-adensados. Nos pontos A e C, a taxa de variação volumétrica é zero e $q/p' = M$. Consequentemente, plotando os dados do ensaio do solo, q/p' versus δ_{ev}/δ_{es} , a posição do ponto de estado crítico C pode ser encontrado até mesmo se o carregamento for terminado antes que as amostras tenham atingido o estado crítico.

Os conceitos apresentados acima sobre a dilatância foram criados a partir de materiais onde o comportamento é puramente friccional. Em solos estruturados por cimentação, a compreensão do comportamento tensão-dilatância vem sendo objeto de vários trabalhos, entre eles podemos citar os apresentados por Cecconi et al. (1998), Cuccovillo e Coop (1999), Ismail et al. (2002), Mántaras e Schnaid (2002), Schnaid e Mántaras (2004), Prietto (2004) e Dalla Rosa et al. (2008).

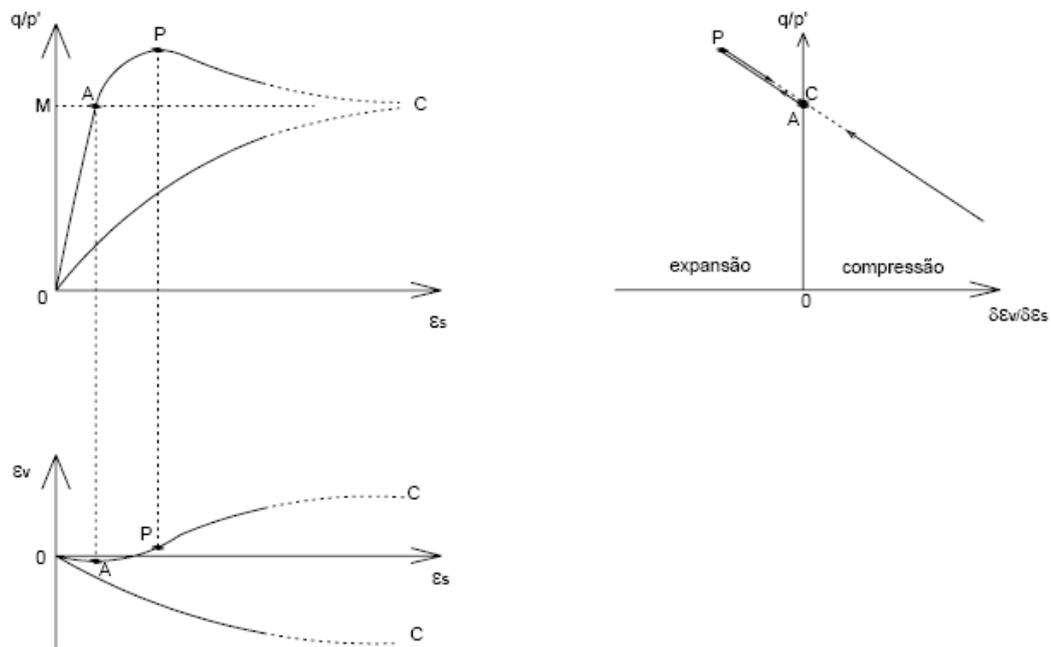


Figura 2.13: Comportamento tensão-dilatância generalizado (adaptado de ATKINSON, 1993)

A seguir, são apresentados alguns trabalhos que permitem uma melhor compreensão do fenômeno da dilatância em materiais onde além da parcela friccional há também uma parcela de contribuição da parte coesiva, ou seja, a cimentação do material.

Coop e Wilson (2003) apresentam um comportamento tensão-dilatância típico para dois solos arenosos cimentados, os quais são apresentados na figura 2.14. Verifica-se que diferentemente de um solo natural, o qual apresenta uma única tendência da curva tensão-dilatância, existe dois segmentos que basicamente determinam o comportamento do material. O primeiro compreende a fase resultante da cimentação do material, onde, posteriormente ocorre um ponto de inflexão na curva normalmente associado ao momento em que ocorre a plastificação. Posteriormente, progressiva desestruturação ocorre até que seja alcançada a máxima taxa de dilatação, onde o comportamento do solo estruturado tende a seguir um único caminho, o qual é denominado pelo comportamento friccional do material.

Este mesmo padrão de comportamento também foi identificado por Dalla Rosa (2006), onde para um solo residual de arenito, quando cimentado sob um determinado nível de tensões no confinamento, apresentou um ponto de plastificação junto a mudança do vetor de incremento de deformações na curva tensão dilatância (Figura 2.15).

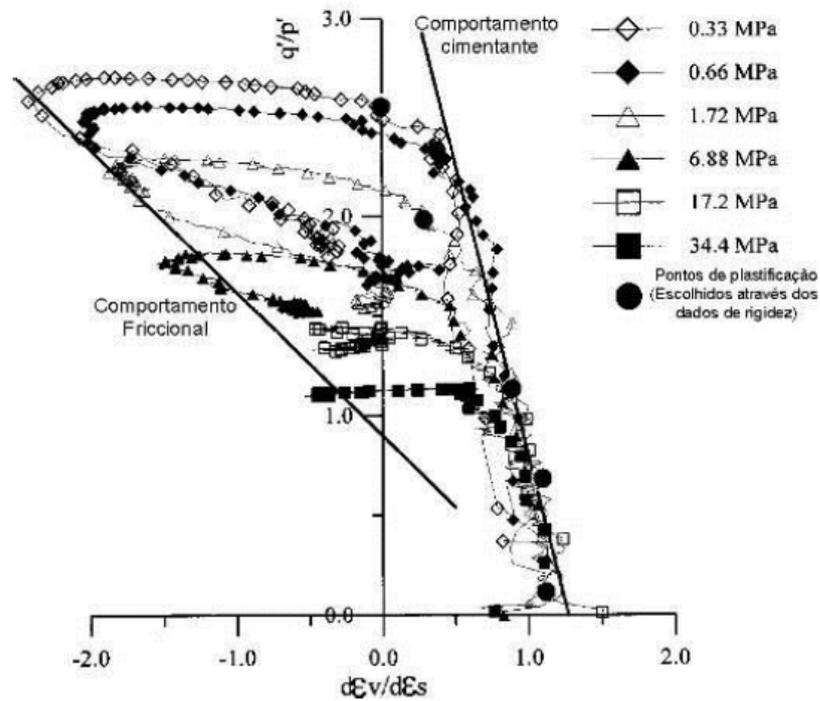


Figura 2.14: comportamento tensão-dilatância encontrado para dois solos arenosos cimentados naturalmente (adaptado de COOP; WILLSON, 2003)

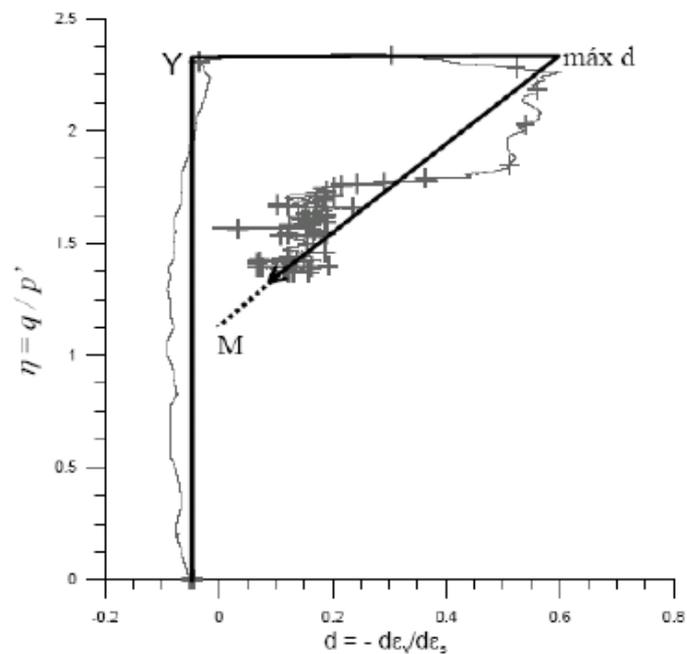


Figura 2.15: Tensão-dilatância para um solo residual de arenito artificialmente cimentado sob uma determinada tensão de confinamento (adaptado de DALLA ROSA, 2006)

Cuccovillo e Coop (1999) sugeriram a partir de considerações qualitativas do balanço de energia, que o intertravamento das partículas e a contínua presença de algum tipo de cimentação, inibem a dilatância de um solo na condição intacta. Dessa forma, após ser alcançado o ponto de plastificação, ocorre gradualmente um processo de desestruturação da cimentação existente, permitindo assim que a dilatância aumente até alcançar um valor máximo. Isto pode justificar o fato de que solos cimentados apresentam a máxima taxa de dilatância após ser alcançada a máxima tensão desvio durante a fase de cisalhamento.

Cecconi et al (1998) descrevem que o comportamento dilatante de materiais estruturados é influenciado diretamente pelo nível das tensões de confinamento, a medida que, com o aumento destas tensões, ocorre a transição de um comportamento dilatante para um comportamento compressivo, embora o pico da curva tensão-deformação não corresponda à máxima taxa de dilatação.

Ismail et al. (2002) identificou que o fenômeno da dilatância é fortemente influenciado pelo tipo de agente cimentante utilizado. No trabalho desenvolvido pelos autores, foram preparadas amostras artificialmente cimentadas com gesso, solução de calcita e cimento Portland, com resistências à compressão simples similares entre as diferentes misturas. O solo com cimento Portland quando submetido à compressão triaxial apresentou um forte dilatância e deformações do tipo *hardening*, diferentemente do comportamento observado para os demais agentes cimentantes. No caso de um aumento ligeiro do teor de gesso ou solução de calcita, identificou-se que os agentes cimentantes apresentaram deformações do tipo *strain-softening*, caracterizado por queda da tensão desvio após o pico, diferentemente do encontrado para o solo como cimento Portland.

Segundo Prietto (2004), a cimentação restringe a dilatância inicial do material, sendo a mesma, resultado do balanço de energia que deve ser satisfeito, onde o trabalho realizado externamente deve ser compensado internamente. Ainda segundo o autor em presença de cimentação, o trabalho disponível para ser dissipado no atrito é menor por um período, assim que o processo de degradação se intensifica, a dilatação progride e aumenta mesmo após a queda da relação de tensões. No ponto de máxima dilatância, a coesão entre as partículas foi totalmente eliminada e o material percorre uma trajetória de inclinação onde o comportamento é teoricamente e integralmente friccional tendendo atingir o estado crítico.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este programa experimental tem dois objetivos fundamentais. O primeiro consiste em avaliar a influência do tempo de cura na relação volume de vazios/volume de cal e seu consequente efeito na previsão da resistência, comportamento tensão-deformação e rigidez inicial de um solo tratado com cal. O segundo é verificar o efeito da adição de diferentes tipos de finos, associado com o tempo de cura, na previsão do comportamento de um solo-cal.

Basicamente, este programa experimental foi dividido quatro etapas. Na primeira etapa foram realizados os ensaios de caracterização física do solo, do resíduo de britagem, da cinza volante e da cal com o objetivo de classificar os materiais e acessar as propriedades necessárias ao desenvolvimento das etapas seguintes.

A segunda etapa consistiu na realização de uma bateria de ensaios de compressão simples, associados com medidas de sucção matricial, sobre os pontos de moldagem pré-estabelecidos de acordo com o programa de ensaios de compressão simples detalhado no item 3.4.1. Esta etapa tem por objetivo a validação da relação volume de vazios/volume de cal na previsão da resistência mecânica de um solo tratado com cal curado por períodos longos. Ainda nessa etapa, foi avaliada a influência da adição de finos, com diferentes reatividades potenciais, na relação volume de vazios/volume de cal.

A terceira etapa consistiu na realização de ensaios de compressão triaxial drenados em corpos-de-prova definidos a partir dos resultados obtidos nos ensaios de compressão simples. O objetivo desta etapa é verificar a influência do tempo de cura e da relação volume de vazios/volume de cal no comportamento tensão-deformação de um solo-cal (com e sem a adição de finos).

Na quarta etapa, através da técnica de bender elements, foi observada a variação da rigidez a pequeníssimas deformações (G_0) para com o tempo de cura. O objetivo desta etapa

foi buscar uma relação entre a resistência à compressão simples e G_0 para solos tratados com cal.

A tabela 3.1 apresenta de forma esquemática as etapas do programa experimental, bem como o tipo e número de ensaios que serão realizados em cada etapa.

No item 3.4 encontram-se detalhados os programas de ensaios. Como o programa de ensaios está baseado em resultados obtidos na etapa de caracterização, ele será apresentado após os itens referentes aos materiais e métodos.

Portanto nos itens 3.2 e 3.3, são apresentados os materiais e métodos, respectivamente, utilizados durante o programa experimental.

Tabela 3.1: etapas e ensaios do programa experimental

ETAPA	MATERIAL	TIPO DE ENSAIO	Nº DE ENSAIOS
Caracterização dos Materiais	Solo Resíduo de Britagem Cinza Volante	Massa Específica Real dos Grãos	3
		Análise Granulométrica	3
		Limite de Plasticidade	3
		Limite de Liquidez	3
		Compactação	4
		Análise Química	3
		Potencial de Reatividade Álcali-Sílica	3
		Difração por Raios-x	3
	Cal	Massa Específica Real dos Grãos	1
Resistência Mecânica	Solo-cal compactado	Compressão Simples	180
		Medidas de Sucção Matricial	60
	Solo-cal-resíduo de britagem compactado	Compressão Simples	315
		Medidas de Sucção Matricial	105
	Solo-cal-cinza volante compactado	Compressão Simples	96*
		Medidas de Sucção Matricial	25*
Comportamento Tensão-Deformação	Solo-cal compactado	Triaxiais Drenados	18
	Solo-cal-resíduo de britagem compactado	Triaxiais Drenados	18
	Solo-cal-cinza volante compactado	Triaxiais Drenados	12
Módulo Cisalhante	Solo-cal compactado	Bender Elements	300

* resultados compilados de Dalla Rosa (2009a).

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Solo

O solo utilizado no presente trabalho é um solo residual de arenito pertencente à denominada formação Botucatu (Figura 3.1). Além da existência de trabalhos prévios (NÚÑEZ, 1991; PRIETTO, 1996; HEINECK, 1998; ROTTA, 2000; FOPPA, 2005; LOPES JUNIOR, 2007; DALLA ROSA, 2009a), a escolha deste solo se deu por três fatores básicos: é um solo que cobre uma extensa área do território do Rio Grande do Sul sob regiões de relevante importância econômica; possui algumas características como erodibilidade e baixa capacidade de suporte, fazendo deste um material que necessita de algum tipo de adequação ou melhoria para emprego sob condições mais severas do ponto de vista de engenharia; por sua uniformidade de características físicas e boa trabalhabilidade em laboratório.

A jazida, de onde foi coletada a amostra, situa-se às margens da rodovia estadual RS-240, na localidade de Vila Scharlau, município de São Leopoldo no Rio Grande do Sul. Os resultados de caracterização do solo são apresentados no item 4.1.

3.2.2 Resíduo de Britagem

O resíduo de britagem, utilizado como adição no solo-cal desta pesquisa, é a fração fina (pulverizado) proveniente do processo de britagem da rocha basáltica, a qual pertence à denominada formação Serra Geral (Figura 3.1). A escolha deste material se deu por quatro fatores: é um material que pode ser utilizado na estabilização de solos como comprova Lopes Junior (2007); cobre uma extensa área do território do Rio Grande do Sul sob regiões de relevante importância econômica; questão ambiental, por se tratar de um material poluente com inexpressiva utilização na engenharia corrente; constar nos objetivos a comparação da adição de finos com diferentes reatividades potenciais em um solo silte-arenoso tratado com cal curado por períodos longos e seus efeitos na relação volume de vazios/volume de cal.

O resíduo de britagem utilizado neste trabalho é oriundo da usina de britagem pertencente à empresa Andretta e Cia. Ltda., localizada na região norte do estado do Rio

Grande do Sul no município de Erechim. Os resultados de caracterização do resíduo são apresentados no item 4.1.

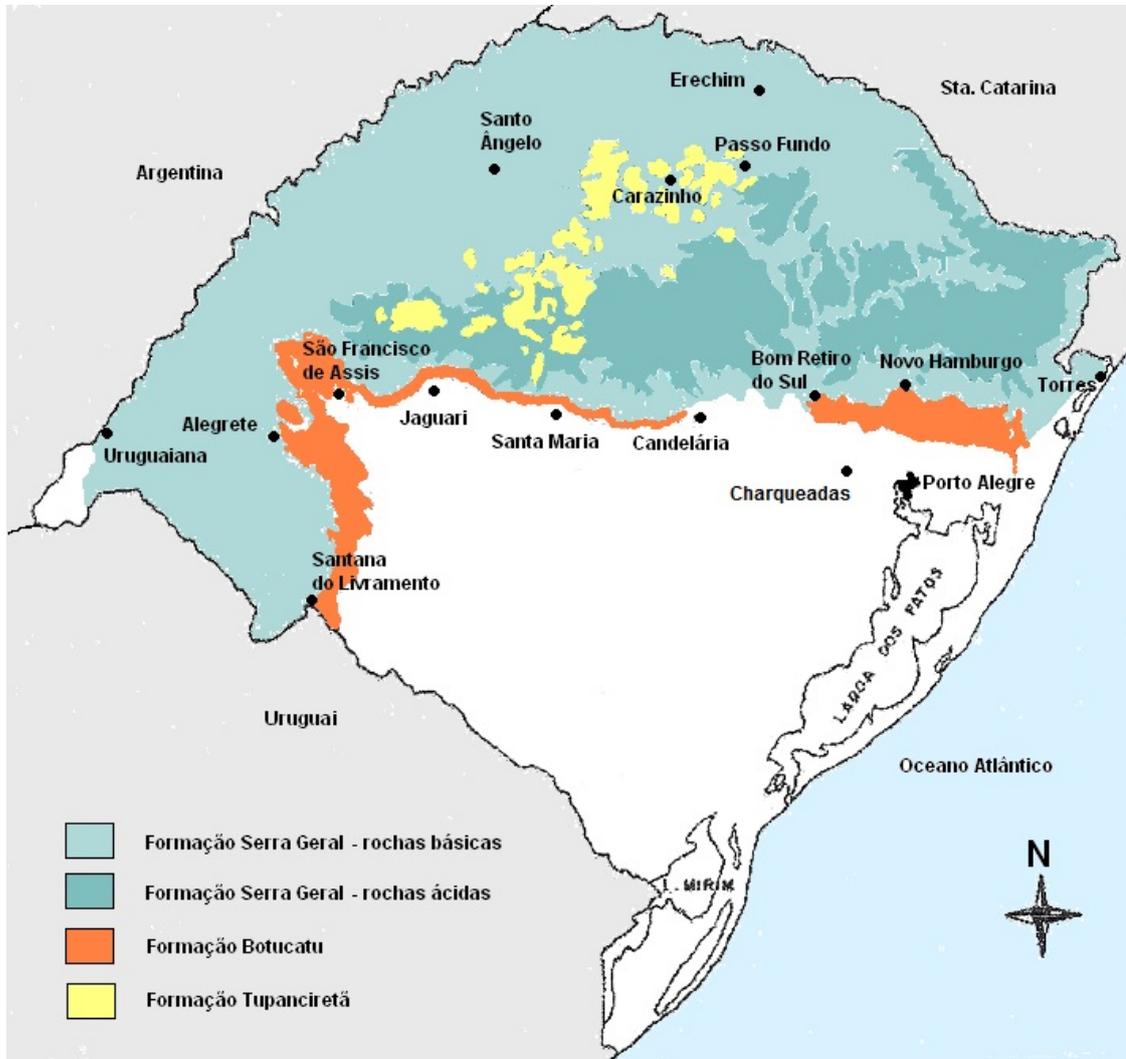


Figura 3.1: formações geológicas ao norte do estado do RS (adaptado de IBGE, 1986)

3.2.3 Cinza Volante

A cinza volante utilizada neste trabalho é proveniente do processo da queima do carvão mineral em usinas termelétricas. Além da existência de trabalhos prévios (CERATTI, 1979; CARRARO, 1997; DALLA ROSA, 2009a), a escolha deste material se deu por três fatores básicos: questão ambiental, por se tratar de um material poluente; largamente difundido na estabilização de solos por sua altíssima reatividade potencial e ausência de

pesquisas avaliando seus efeitos na relação volume de vazios/volume de cal analisados sob o ponto de vista comportamental (tensão-deformação).

A cinza volante utilizada é oriunda da Usina Termelétrica Charqueadas, a qual pertence à Companhia Tractebel Energia Suez, localizada no município de Charqueadas no Estado do Rio Grande do Sul (Figura 3.1). Os resultados de caracterização da cinza são apresentados no item 4.1.

3.2.4 Cal

A cal utilizada no trabalho foi uma cal hidratada dolomítica, comercialmente chamada de “Primor Extra”, produzida na cidade de Caçapava do Sul - RS. A tabela 3.2 apresenta os resultados fornecidos pelo fabricante dos ensaios de caracterização da cal utilizada, fornecida pelo fabricante, comparando com as exigências da NBR 7175.

Tabela 3.2: caracterização da cal utilizada

PROPRIEDADES	LIMITES DA NBR 7175	ANÁLISE
Densidade	$\leq 600\text{g/l}$	510 g/l
Perda ao Fogo	-	23,3 %
Resíduo Insolúvel	-	4,7 %
CO ₂ (anidrido carbônico)	$\leq 5\%$	2,2 %
Óxidos Totais	$\geq 88\%$	94,8 %
Óxidos ã hidratados	$\leq 15\%$	11,0 %
CaO	-	44,8 %
MgO	-	27,9 %
Umidade	$\leq 1,5\%$	0,6 %
Resíduo na peneira 0,600mm	$\leq 0,5\%$	0,0 %
Resíduo na peneira 0,075mm	$\leq 15\%$	8,0 %

Os ensaios de massa específica da cal seguiram as recomendações da NBR NM 23/2001. Obteve-se, a partir de três determinações, o valor médio de 2,49 g/cm³.

3.2.5 Água

A água utilizada para a moldagem dos corpos-de-prova foi à água potável proveniente da rede de abastecimento pública. Já para os ensaios de caracterização utilizou-se água destilada quando especificada pela respectiva norma.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Coleta de Amostras

A amostra de solo foi coletada no estado deformado, mediante escavação com ferramenta manual, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. A amostra assim obtida foi armazenada e transportada em tonéis plásticos adequadamente vedados. Durante a coleta, todos os cuidados foram tomados no sentido de se evitar a contaminação da amostra.

O resíduo de britagem e a cinza volante foram coletados diretamente dos reservatórios dos equipamentos das usinas, mediante o uso de ferramentas manuais, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. As amostras assim obtidas foram armazenadas e transportadas em sacos plásticos adequadamente vedados.

A cal, adquirida em embalagem de 20 kg, foi armazenada em recipientes de vidro, com volume de aproximadamente 4 litros cada, e adequadamente vedados para evitar reações com dióxido de carbono presente na atmosfera.

3.3.2 Preparação das Amostras

A preparação das amostras para os ensaios de caracterização e para a moldagem dos corpos-de-prova, que envolve os procedimentos de secagem ao ar, destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica seguiu os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457/86.

As amostras assim preparadas eram armazenadas até a data da sua utilização em sacos plásticos, devidamente identificados e vedados.

3.3.3 Ensaio de Caracterização

Para caracterização dos materiais foram utilizados os ensaios de determinação do teor de umidade, granulometria, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade, compactação, determinação do pH, fluorescência de raios-x, difração por raios-x e potencial de reatividade Álcali-Sílica.

As determinações do teor de umidade do solo e dos resíduos seguiram os procedimentos descritos pelo anexo da norma NBR 6457/86.

A análise granulométrica dos materiais foi realizada de acordo com os procedimentos descritos pela NBR 7181/84. Neste ensaio foi utilizado defloculante.

A determinação da massa específica real dos grãos de solo, resíduo de britagem e cinza volante seguiu o método descrito pela NBR 6508/84.

A determinação da massa específica real da cal seguiu as recomendações da NM 23/2001.

A obtenção dos limites de liquidez e de plasticidade dos materiais seguiram os métodos descritos nas normas NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente.

Para os ensaios de compactação foram utilizados os procedimentos descritos pela NBR 7182/86.

Para determinação do pH foi empregado um pH-metro micronal B374 com eletrodo de vidro combinado. O eletrodo foi calibrado com soluções de pH 7,0 e pH 4,0 para determinação do pH do solo e calibrado com soluções de pH 7,0 e pH 10,0 para medições do resíduo de britagem e da cinza volante.

Para determinação qualitativa e quantitativa dos elementos que compõe cada material empregado (solo, resíduo de britagem e cinza volante) foi utilizado a técnica de espectrometria por fluorescência de raios-x. Os ensaios foram realizados no Laboratório de

Geoquímica do Instituto de Geociências da UFRGS, em um espectrômetro da marca Rigaku RIX 2000, com tubo de Ródio de 60 KV.

Nos ensaios de difratometria de raios-x realizados em amostras de solo, resíduo de britagem e cinza volante, foi utilizado um difratômetro SIEMENS, modelo D5000, com velocidade do goniômetro de 1°/min, e tubo de cobre, pertencente ao Instituto de Geociências da UFRGS. A identificação dos minerais foi realizada pelo método do pó (também chamado de mineralogia total).

O ensaio de Reatividade Potencial, normalizado pela ASTM C289-07, permitiu avaliar a reatividade potencial álcali-sílica de cada material através da relação entre a quantidade de sílica dissolvida (milimoles/litro) e a redução da alcalinidade (milimoles/litro). Neste método, o material passante na peneira 0,30mm é imerso em solução de hidróxido de sódio, à temperatura de 80°C, por 24 horas. Após este período, determina-se, por fotometria, a sílica dissolvida, bem como a redução da alcalinidade da solução de NaOH. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Análises Inorgânicas da Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (CIENTEC).

3.3.4 Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova

Foram utilizados, para os ensaios de compressão simples, compressão triaxial e medição da rigidez inicial pelo método de bender elements, corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A confecção dos corpos-de-prova foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura.

Após a pesagem dos materiais (solo, resíduo, cal e água) com resolução de 0,01 g, o solo, o resíduo e a cal eram misturados com o auxílio de uma espátula metálica, até que a mistura adquirisse coloração uniforme. Em seguida, era adicionada água continuando o processo de mistura até que a homogeneidade fosse obtida.

A quantidade de resíduo e cal necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo seco utilizada e a quantidade de água (teor de umidade) em relação à soma das

massas de solo seco, resíduo e cal. A quantidade total de mistura permitia a moldagem de um corpo-de-prova e uma sobra para determinação do teor de umidade.

Após a mistura dos materiais, a quantidade de material necessário para confecção de um corpo-de-prova era dividido em três partes iguais, armazenados em recipientes com tampa para evitar a perda da umidade, para posterior compactação.

Ao final deste processo, duas pequenas porções da mistura eram retiradas e colocadas em cápsulas para determinação do teor de umidade. A média dos dois teores de umidade medidos era adotada como sendo o teor de umidade de corpo-de-prova.

A amostra era, então, compactada estaticamente em três camadas no interior de um molde de ferro fundido tripartido, devidamente lubrificado, de maneira que cada camada atingisse as especificações de teor de umidade e peso específico aparente seco, tomando-se o cuidado de escarificar levemente os topos acabados da primeira e da segunda camada para aumentar a integração entre as camadas superpostas.

Concluído o processo de moldagem, o corpo-de-prova era imediatamente extraído do molde, sua massa e medidas (diâmetro e altura) devidamente anotados com resolução de 0,01g e 0,1 mm respectivamente, e acondicionado em um saco plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas do teor de umidade.

Os corpos-de-prova assim obtidos eram, então, armazenados e curados por um período de até 360 dias em um ambiente com temperatura e umidade controladas (temperatura de $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar maior que 95%). Para este procedimento foi utilizada a câmara úmida do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (NORIE/UFRGS).

Foram considerados aptos para ensaios os corpos-de-prova que atendiam as seguintes tolerâncias:

- Massa específica aparente seca (γ_d): grau de compactação de 99% a 101%, sendo o grau de compactação definido como o valor de γ_d efetivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de γ_d definido como meta. (Exemplo: para $\gamma_d = 18,0 \text{ kN/m}^3$ considerou-se aceitáveis corpos-de-prova que apresentaram valores de γ_d compreendidos entre 17,8 e 18,2 kN/m^3).

- Teor de umidade (ω): valor especificado $\pm 0,5$ pontos percentuais (Exemplo: para um objetivo de $\omega = 10\%$ foram aceitos valores compreendidos entre 9,5% e 10,5%).

- Dimensões: diâmetro $50 \pm 0,5$ mm e altura 100 ± 1 mm.

A figura 3.2b apresenta o aspecto final de um corpo-de-prova moldado de acordo com os procedimentos descritos anteriormente.

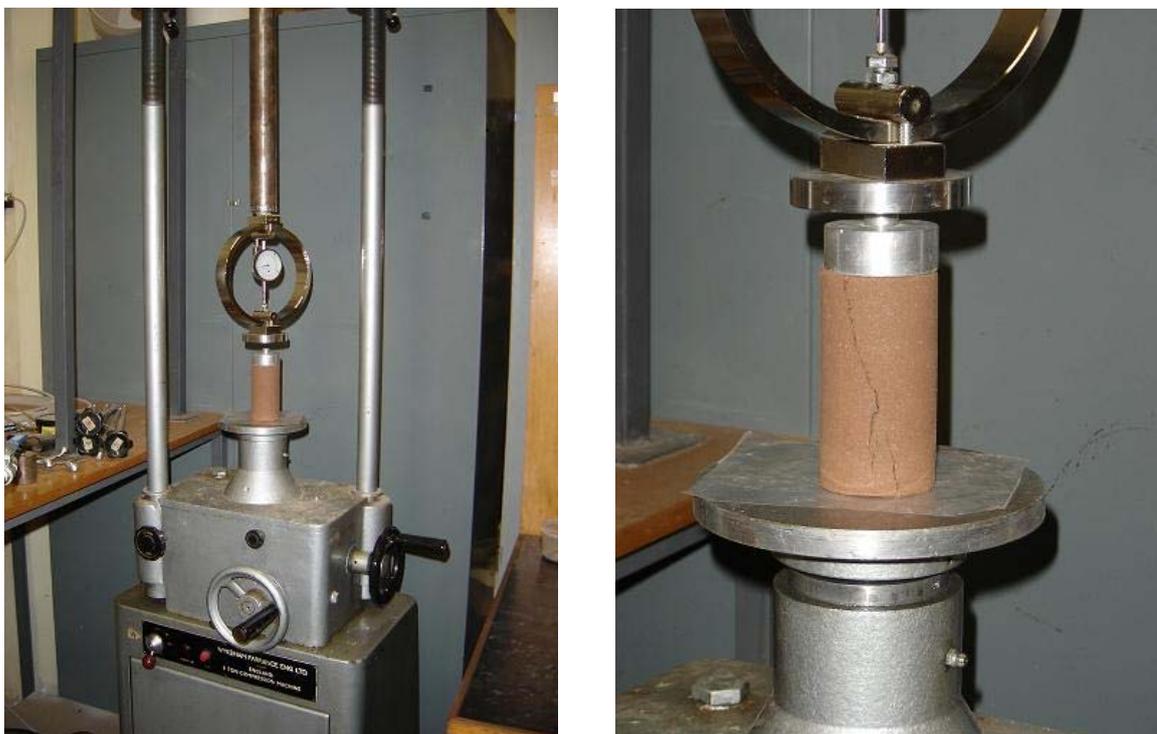
3.3.5 Ensaios de Compressão Simples

Ensaios de compressão simples têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade da estabilização com cal ou acessar aspectos relativos à importância de fatores influentes sobre a resistência de solos tratados. Uma das razões para tal é a experiência acumulada com este tipo de ensaio na área de concretos, além de ser um ensaio de simples e rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido no meio técnico.

Porém sabe-se que, quando da utilização do solo cimentado como uma camada compactada sobre um solo de baixa capacidade de suporte, a ruptura do sistema geralmente ocorre por tração na base da camada estabilizada. Pareceria mais razoável, então, utilizar o ensaio de resistência à tração como uma medida direta da resistência do solo-cal. Entretanto resultados apresentados por Núñez (1991) demonstraram que a resistência à tração para o solo utilizado nesta pesquisa tratado com 9% de cal variou entre 9% e 20% da resistência à compressão simples. Esse fato, aliado aos aspectos mencionados acima, fez com que o ensaio de compressão simples fosse adotado para a medição da influência das variáveis independentes.

Para estes ensaios foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 50 kN, além de anéis dinamométricos calibrados com capacidade de 10 kN e 50 kN e resolução de 0,005 kN e 0,023 kN respectivamente (Figura 3.1a). A velocidade de deformação destes ensaios foi de 1,14 mm por minuto. O procedimento dos ensaios de compressão simples seguiu a norma americana ASTM D 5102/96.

Os corpos-de-prova, após serem curados na câmara úmida, eram submersos em um recipiente com água por um período de 24 horas, visando aproximar a condição de saturação. A temperatura da água do tanque era controlada e mantida em 23 ± 3 °C.



(a)

(b)

Figura 3.2: (a) prensa para ensaio de compressão simples, (b) corpo-de-prova de solo-cal

Imediatamente antes do ensaio de compressão simples, os corpos-de-prova eram retirados do tanque e superficialmente secos com auxílio de um tecido absorvente. Procedia-se então a execução do ensaio e anotava-se a carga máxima atingida pelo corpo-de-prova.

Como critério de aceitação para o ensaio de resistência à compressão simples, estipulou-se que as resistências individuais de três corpos-de-prova não deveriam se afastar mais de 10% da resistência média desse conjunto.

3.3.6 Medidas de Sucção

Como todos os corpos-de-prova do programa de ensaios, no teor de umidade de moldagem, encontram-se na condição não-saturada, um determinado nível de sucção está presente. As medidas sucção neste trabalho tem o objetivo de verificar qual sua magnitude e se esta apresenta variação significativa entre os corpos-de-prova.

A sucção medida foi a matricial, ou seja, a proveniente das forças capilares existentes no interior da amostra.

Utilizou-se para a medição da sucção matricial a técnica do papel filtro. O método baseia-se no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso, com deficiência de umidade, é posto em contato com um papel filtro, com umidade menor. O papel passa a absorver uma certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de sucção. Tendo-se a relação entre sucção e umidade do papel filtro (curva de calibração) pode-se obter a sucção do solo a partir da curva de calibração (MARINHO, 1995).

Esta técnica foi escolhida por ser uma técnica simples e de baixo custo. Ela fornece resultados plenamente satisfatórios desde que se tenha extremo cuidado nos procedimentos utilizados. Foi utilizado o papel filtro da marca Whatman N° 42 e equações de calibração apresentadas por Chandler et al. (1992) e recomendadas por Marinho (1995).

Os procedimentos adotados para a medição da sucção matricial foram os mesmos que os utilizados por Feuerharmel (2003), Foppa (2005), Lopes Junior (2007), Cruz (2008) e Dalla Rosa (2009a). Na figura 3.3 podemos verificar uma típica amostra para ensaio de sucção matricial.

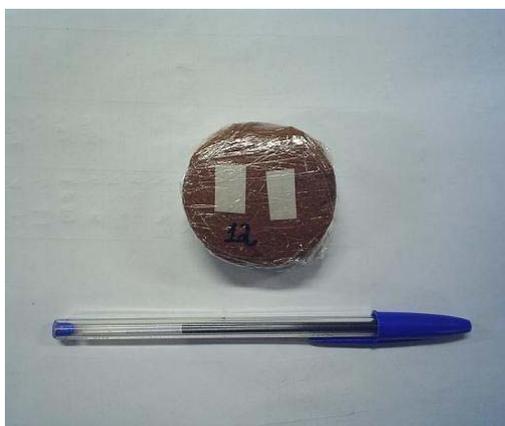


Figura 3.3: corpo-de-prova para ensaio de sucção matricial

3.3.7 Ensaio de Compressão Triaxial

Ensaio triaxiais adensados drenados (CID) em trajetórias de tensão convencional (compressão axial) foram realizados com objetivo de analisar as características comportamentais de amostras de solo-cal com elevados tempos de cura e diferentes tipos de adições e seus efeitos na relação volume de vazios/volume de cal.

Para este estudo com a utilização do solo-cal optou-se por tensões de confinamento efetivas de 20, 200 e 400 kPa, tensões estas consideradas usuais em estudos anteriores e projetos de engenharia. Não foram utilizadas tensões confinantes mais altas devido às limitações do equipamento.

Os ensaios triaxiais foram realizados sob deformação controlada à uma taxa de 3% por hora, em um equipamento marca Geonor (Figura 3.4). O equipamento permite o monitoramento da poro-pressão no corpo-de-prova e da pressão confinante através de dois transdutores de pressão acoplados à base da câmara triaxial, calibrados linearmente para um intervalo de 500 kPa de pressão e com resolução menor que 0,1 kPa.

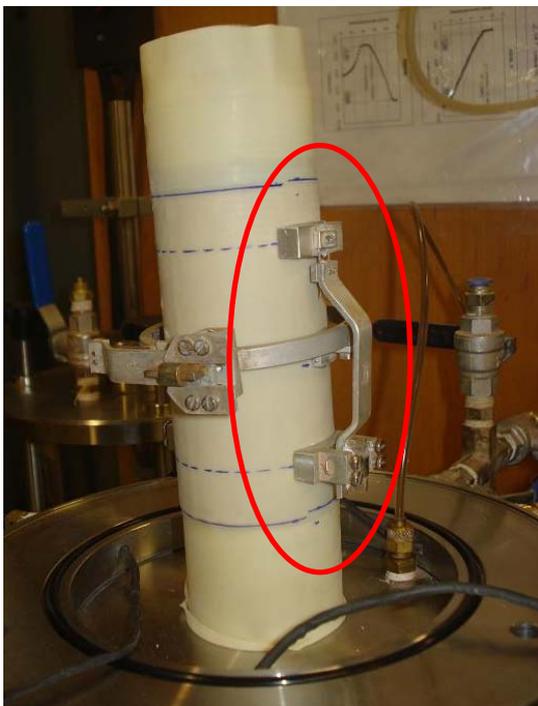


Figura 3.4: prensa triaxial e sistema de aquisição de dados

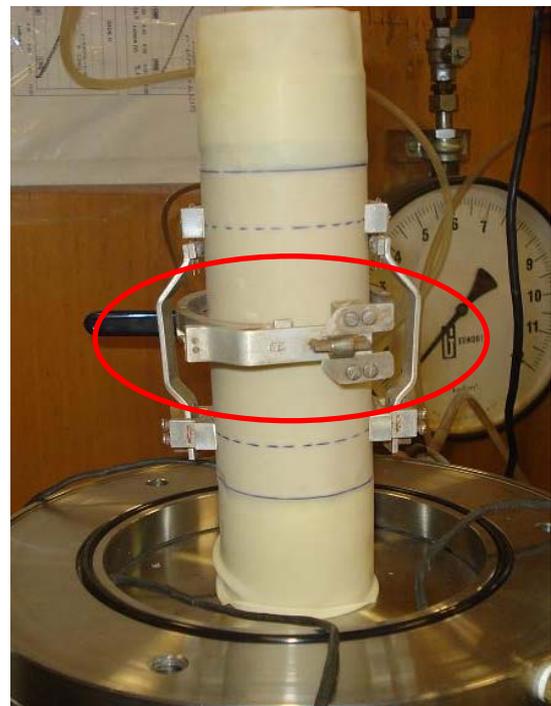
A medição do carregamento aplicado foi feita através de uma célula de carga com capacidade de 10 kN e resolução de 0,005 kN, posicionada externamente à câmara triaxial.

As deformações axiais foram medidas por meio de dois sistemas independentes. Um sistema interno, constituído por dois dispositivos utilizando sensores de efeito Hall que permitiam a medição das deformações iniciais com maior resolução (menor que $1\mu\text{m}$), e um sistema externo convencional, constituído por um transdutor de deslocamento linear (resolução menor que $10\mu\text{m}$) medindo o deslocamento relativo entre a câmara triaxial e o pistão de carga.

Os sensores de medição interna de deformações (em detalhe nas figuras 3.5a e 3.5b) seguem o arranjo descrito por Clayton et al. (1989) e a técnica de instalação dos mesmos seguiu os procedimentos descritos por Martins (1994). O intervalo médio de deslocamento para os quais os sensores foram calibrados era de 5,00 mm.



(a)



(b)

Figura 3.5: (a) sistema interno de medição de deformações axiais,
(b) sistema interno de medição de deformações radiais

A execução dos ensaios triaxiais seguiu os procedimentos gerais descritos pela BS 1377 (1990) e consistia em duas fases principais. Na primeira era feita a saturação e adensamento do corpo-de-prova e na segunda o carregamento axial até a ruptura.

Na fase de saturação, primeiramente procedia-se a percolação de água durante um período de 24 horas, no sentido da base para o topo do corpo-de-prova sob uma pressão de 15 kPa na base e 0 kPa (pressão atmosférica) no topo. Durante esta fase, era mantida uma tensão confinante de 35 kPa para evitar a criação a passagem de água entre a membrana de látex e o corpo-de-prova.

Após a percolação, aplicava-se uma contra-pressão de aproximadamente 450 kPa no topo do corpo-de-prova. Essa contra-pressão era aplicada através de incrementos de 50 kPa ao mesmo tempo que um incremento de mesmo valor era aplicado de tensão confinante, porém sempre mantendo a diferença inicial de 20 kPa (tensão efetiva). O monitoramento da saturação foi feito através do parâmetro de poro-pressão B (SKEMPTON, 1954) nos últimos 5 estágios de aplicação de contra-pressão.

O adensamento das amostras foi efetuado através da aplicação de incrementos de 50 kPa de tensão efetiva até atingir a tensão confinante efetiva de ensaio, com exceção das amostras com 20 kPa de tensão confinante efetiva de ensaio, a qual permanecia com esta tensão desde o início da percolação.

Concluídos a saturação e o adensamento, procedia-se ao cisalhamento da amostra a uma taxa de deformação axial constante de 0,05% por minuto. Ao final do ensaio, as dimensões do corpo-de-prova eram tomadas para posterior uso nas correções. Para cálculo das tensões aplicadas, foram feitas as correções de área propostas por La Rochelle et al. (1988).

Não foi feita correção nas tensões em função da resistência imposta pela membrana de látex por ser considerada de difícil avaliação e de magnitude insignificante frente às tensões aplicadas.

3.3.8 Medidas de G_0 Através da Técnica de Bender Elements

Trata-se de um método simples utilizado para a obtenção do módulo cisalhante elástico de um solo a deformações muito pequenas, uma vez que a máxima deformação cisalhante produzida em um ensaio com bender elements foi estimada por Dyvik e Madshus (1985) como sendo menor que 10^{-5} . Desta forma, o módulo cisalhante estimado é G_0 , relevante a deformações muito pequenas.

Um bender element (ou transdutor de flexão) é um transdutor piezocerâmico duplo constituído por duas placas piezocerâmicas finas, rigidamente ligadas a uma lâmina metálica central e aos eletródos nas faces exteriores, como mostrada na figura 3.6b. A lâmina central funciona, igualmente, como material de reforço, já que as placas cerâmicas são, por si só, muito frágeis para serem manuseadas. O material piezoelétrico encontra-se envolvido por uma resina epóxi rígida, que o isola eletricamente e o protege do contato direto com o solo e a água.

Os transdutores são instalados no cabeçote superior da amostra e no pedestal do equipamento triaxial e que se projetam para dentro da amostra em aproximadamente 4mm. O transdutor instalado no cabeçote superior (transmissor) é excitado através da aplicação de uma voltagem, causando no mesmo uma vibração normal à face do cabeçote, enviando a onda através da amostra. A chegada da onda na outra extremidade da amostra é captada por outro transdutor, que funciona como o receptor. Quando a onda cisalhante atravessa a amostra, o receptor é movido mecanicamente e gera uma pequena voltagem que é mostrada em um osciloscópio digital, juntamente com o sinal transmitido. O tempo entre a transmissão e a recepção da onda é o tempo de viagem da mesma, com o qual pode-se calcular a velocidade da onda cisalhante V_s , e por sua vez, o módulo cisalhante elástico através da equação:

$$G_0 = \rho V_s^2 = \rho \left(\frac{L}{t} \right)^2$$

Onde ρ é a massa específica do solo, L é a distância entre os transdutores e t é o tempo de viagem da onda.

Uma das vantagens deste tipo de teste é que trata-se de um ensaio não destrutivo, que permite qualquer número de medições do módulo cisalhante durante todo o ensaio.

O equipamento utilizado para a captação de ondas sísmicas através da técnica de bender elements foi montado pelo Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG) e consiste basicamente em um gerador de funções, um amplificador de sinal, um osciloscópio para visualização das ondas e os transdutores piezocerâmicos, como mostrado nas figuras 3.6a e 3.6b.

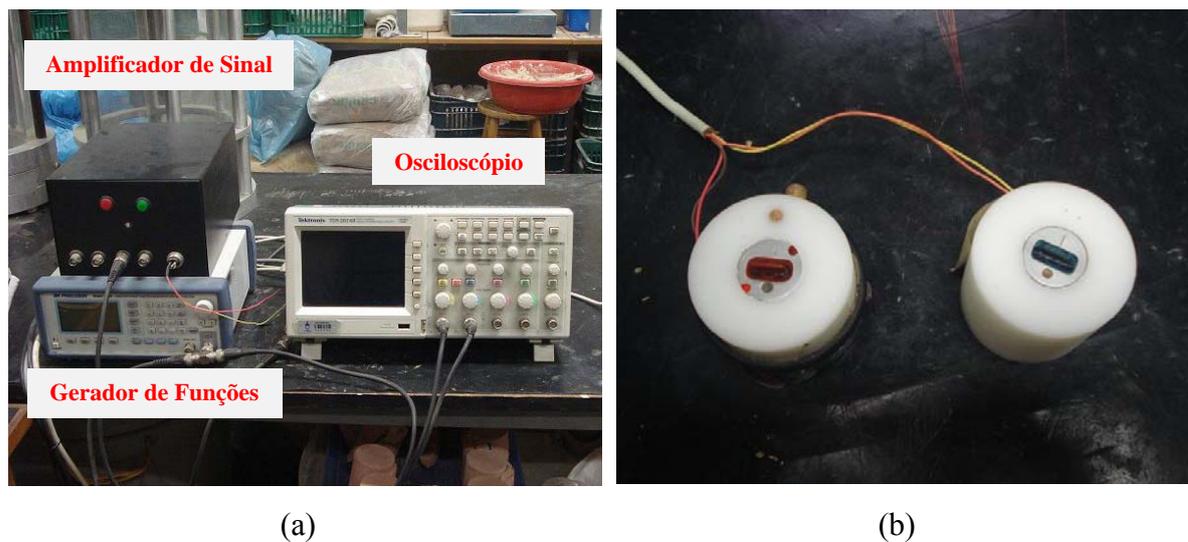


Figura 3.6: (a) equipamento para leitura de ondas sísmicas, (b) suporte com transdutores piezocerâmicos

Os procedimentos para a realização dos testes e métodos de interpretação seguiram as metodologias apresentadas por Jovicic et al (1996) e Greening et al. (2004).

Depois de curadas em câmara úmida, em todas as amostras a serem testadas, fez-se necessário a abertura prévia de um sulco na base e no topo do corpo-de-prova, onde os transdutores foram instalados com o auxílio de uma pasta úmida feita com o mesmo material do corpo-de-prova.

Como critério de aceitação para o ensaio, estipulou-se que as leituras individuais de três corpos-de-prova não deveriam se afastar mais de 10% da leitura média desse conjunto.

3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS

3.4.1 Programa de Ensaios de Compressão Simples

O programa de ensaios de compressão simples consistiu em dois objetivos principais: (a) verificar a influência das variáveis: teor de cal, porosidade, teor de umidade de moldagem, relação vazios/cal e tempo de cura em um solo silte-arenoso tratado com cal e (b) verificar a influência da adição de dois tipos de finos com diferentes reatividades potenciais nestas variáveis.

Para isto foi elaborado o programa de ensaios apresentado na figura 3.7. Nela podemos observar a curva de compactação na energia normal e curvas de saturação do arenito Botucatu (SRAB), sem adição de cal e resíduo; a curva de compactação do solo com 25% de resíduo de britagem (RBR), para as energias normal e modificada; a curva de compactação do solo com 25% de resíduo de britagem e 11% de cal na energia normal e os pontos de moldagem dos corpos-de-prova. A posição dos pontos de moldagem foi estabelecida de modo que estes ficassem compreendidos dentro de uma faixa de pesos específicos aparentes secos e teores de umidade exequíveis numa situação de campo e laboratório.

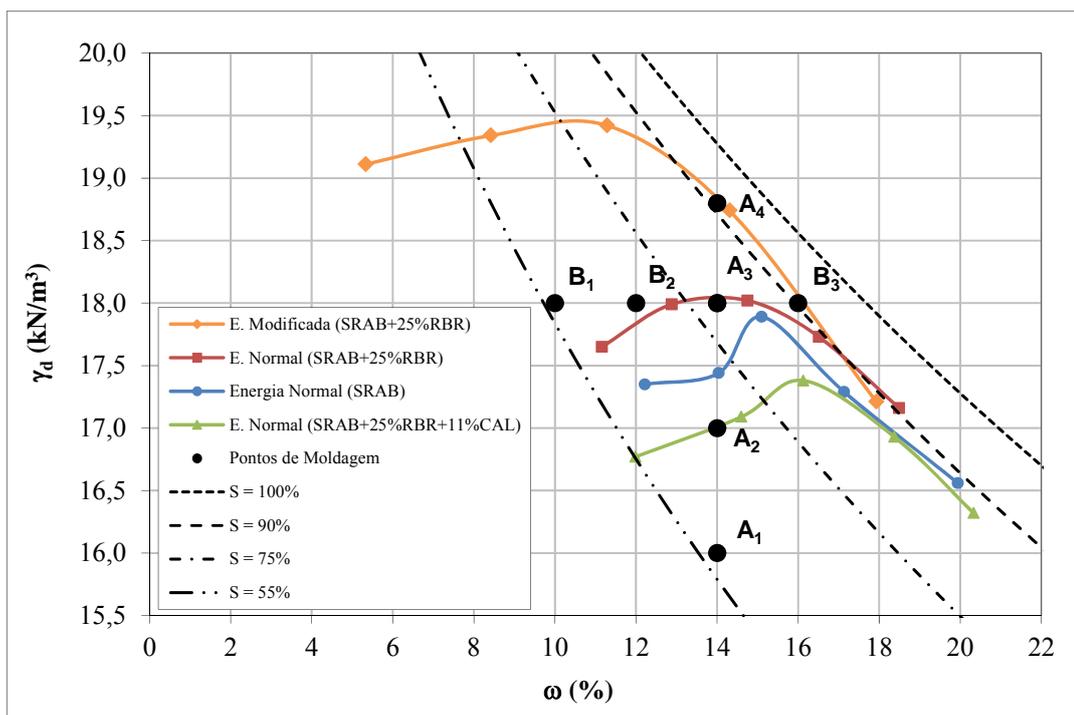


Figura 3.7: programa de ensaios de compressão simples

Para a avaliação das variáveis no arenito Botucatu tratado somente com cal foi moldado corpos-de-prova com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal para cada ponto da linha “A” da figura 3.7 e para cada tempo de cura (28, 90 e 360 dias). Para o solo tratado somente com cal não foi avaliado a influência do teor de umidade de moldagem.

Os teores de cal utilizadas neste trabalho (3% a 11%) foram definidos a partir do método do ICL (ROGERS et al., 1997) e experiência brasileira e internacional com o solo-cal. Na figura 3.8, é apresentada a variação do pH do solo residual de arenito Botucatu em relação a quantidade de cal. Verifica-se que é necessário um teor mínimo de 3% de cal para cessar a variação do pH e chegar à valores constantes nas três misturas (pH \approx 12,6).

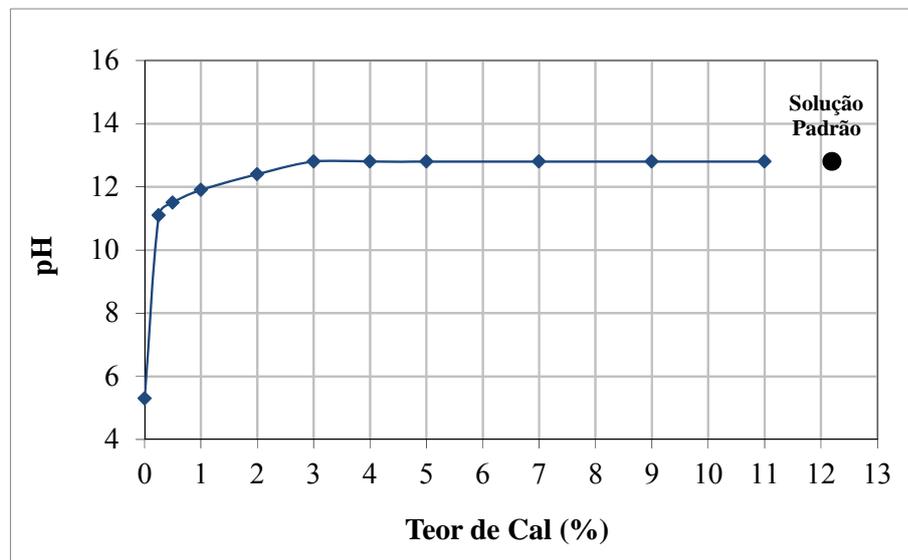


Figura 3.8: pH SRAB x teor de cal

Para a escolha dos finos a ser utilizado como aditivo no solo-cal (resíduos de britagem e cinza volante) e determinação do teor de resíduo em 25% foi levado em consideração a existência de trabalhos prévios (TRB, 1976; CARRARO, 1997; LOPES JUNIOR, 2007; DALLA ROSA, 2009a) e a os resultados de reatividade potencial de cada material, apresentados no item 4.1.

Nas misturas de solo-cal com 25% de resíduo de britagem foram moldados corpos-de-prova com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal para cada ponto da linha “A” e da linha “B” da

figura 3.7 e para cada tempo de cura (28, 90 e 360 dias). Os resultados com 28 e 90 dias de cura foram compilados de Lopes Junior (2007).

As misturas de solo-cal com 25% de cinza volante, curados por 28 e 90 dias de cura, apresentados neste trabalho como comparação foram compilados de Dalla Rosa (2009a), o autor moldou para cada peso específico considerado (14, 15, 16 e 17 kN/m³) e cada tempo de cura (28 e 90 dias) corpos-de-prova com 3%, 5%, 7% e 9% de cal. Neste trabalho Dalla Rosa (2009a) não avaliou a influência do teor de umidade de moldagem.

Devido à dispersão característica dos ensaios de compressão simples, cada corpo-de-prova foi moldado em triplicata, obtendo-se assim, uma maior confiabilidade nos resultados.

3.4.2 Programa de Ensaio Triaxiais

Esta fase do programa de ensaios teve como objetivo: (a) verificar o comportamento dos materiais com diferentes valores de relação vazios/cal, (b) comportamento dos materiais para um mesmo valor de vazios/cal moldados com quantidades de cal e porosidade diferentes, (c) obtenção de curva de tensão versus relação vazios/cal avaliados em diferentes tempos de cura e (d) influência do tempo de cura nos parâmetros de resistência.

Para mensuração das variáveis de interesse observou-se as curvas de resistência à compressão simples versus relação vazios/cal, ajustado por um expoente, obtidas para as três misturas (solo-cal, solo-RBR-cal e solo-CV-cal). A partir destes resultados, para cada curva obtida, foram determinados três pontos de interesse principais: (1) onde há uma maior taxa de ganho de resistência, (2) onde essa taxa assume valor intermediário e (3) onde há uma menor taxa de ganho de resistência.

Como a determinação destes pontos dependem exclusivamente dos resultados obtidos nos ensaios de compressão simples, os valores específicos dos pontos de moldagem, bem como as tensões confinantes de ensaio e os tempos de cura adotados serão apresentados no item 4.4.

3.4.3 Programa de Ensaios com Bender Elements

O programa de ensaios com bender elements objetivou avaliar a influência das variáveis: teor de cal, porosidade, relação vazios/cal e tempo de cura sobre a rigidez inicial de um solo silte-arenoso tratado com cal. Para a mensuração da influência de uma variável isoladamente foi necessário que as outras variáveis fossem mantidas constantes.

Com isso, cada ponto da linha “A”, mostrados na figura 3.7, foi moldado com 5 diferentes teores de cal: 3%, 5%, 7%, 9% e 11%. Depois de moldados, os corpos-de-prova foram embalados e devidamente armazenados em câmara úmida até o dia da leitura pré-determinado. Após a leitura, cada corpo-de-prova era novamente embalado e armazenado até o dia da próxima leitura. Foram realizadas leituras com 7, 15, 28, 90 e 180 dias de cura em todos os corpos-de-prova.

Devido à dispersão característica dos ensaios, cada corpo-de-prova foi moldado em triplicata, obtendo-se assim, uma maior confiabilidade nos resultados.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.1.1 Propriedades Físicas

As propriedades físicas do solo residual de arenito Botucatu (SRAB), do resíduo de britagem (RBR) e da cinza volante (CV), determinadas nesta pesquisa são apresentadas na tabela 4.1. A figura 4.1 apresenta a curva granulométrica de cada material utilizado obtida com o uso de defloculante.

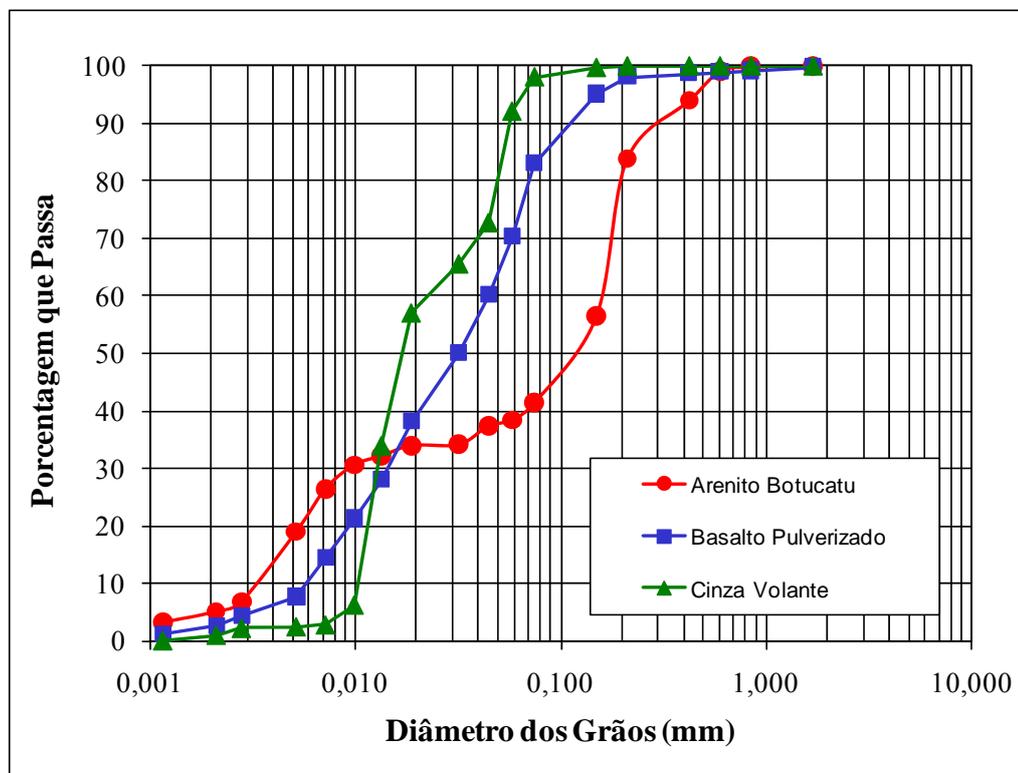


Figura 4.1: curvas granulométricas dos materiais

Tabela 4.1: propriedades físicas dos materiais

PROPRIEDADES	SRAB	RBR	CV
Limite de Liquidez (LL)	23%	28%	-
Limite de Plasticidade (LP)	13%	20%	-
Índice de Plasticidade (IP)	10%	8%	Não-plástico
Densidade Real dos Grãos (G)	2,64	3,33	2,28
% de Areia Média ($0,2 < \phi < 0,6$ mm)	16,2%	1,9%	1,0%
% de Areia Fina ($0,06 < \phi < 0,2$ mm)	45,4%	38,4%	7,0%
% de Silte ($0,002 < \phi < 0,06$ mm)	33,4%	57,5%	90,0%
% de Argila ($\phi < 0,002$ mm)	5,0%	2,2%	2,0%
Diâmetro Efetivo (D_{10})	0,0032 mm	0,0066 mm	0,012 mm
Coefficiente de Uniformidade (C_u)	50	9	2

Podemos classificar o SRAB como uma areia argilosa (SC) e o RBR como um silte arenoso (ML) – não-plástico de acordo com o Sistema Unificado de Classificação. A CV utilizada é do tipo F de acordo com a ASTM C618/98 e classificada como um silte arenoso (ML) – não-plástico de acordo com o Sistema Unificado de Classificação.

Através do difratograma da amostra de solo, apresentado na figura 4.2, identificou-se a presença dos minerais: quartzo, caulinita e hematita (responsável pela cor rosada característica de solo residual de arenito Botucatu). Na figura 4.3 é apresentado o difratograma da amostra de resíduo de britagem, podemos evidenciar a presença dos minerais do grupo dos plagioclásios, feldspatos e esmectita. Na figura 4.4 é apresentado o difratograma da amostra de cinza volante, podemos observar basicamente a presença de quartzo e mullita. A análise semi-quantitativa é apresentada na tabela 4.2.

Tabela 4.2: análise semi-quantitativa dos materiais

Análises	SRAB	RBR	CV
Quartzo	83%	-	88%
Caolinita	16%	-	-
Hematita	1%	-	-
Mullita	-	-	12%
Plagioclásio	-	66%	-
Feldspato alcalino	-	22%	-
Esmectita	-	12%	-

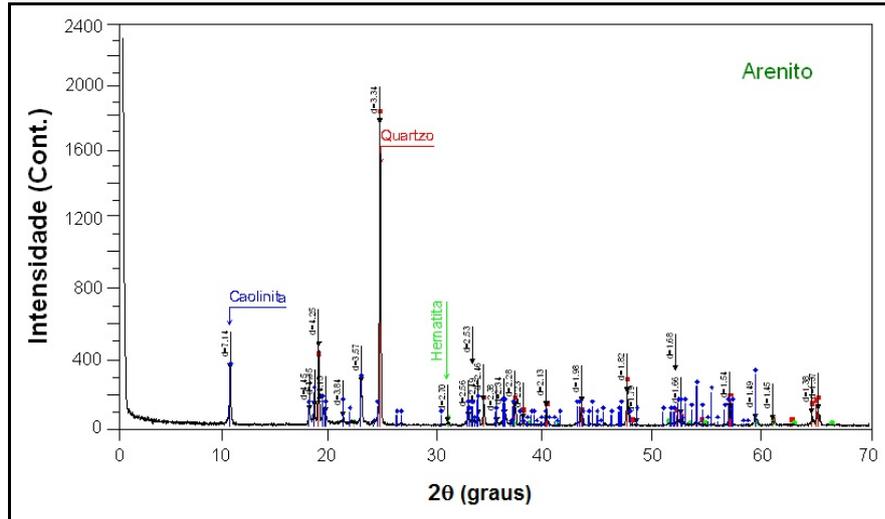


Figura 4.2: difratograma de raios x do arenito Botucatu

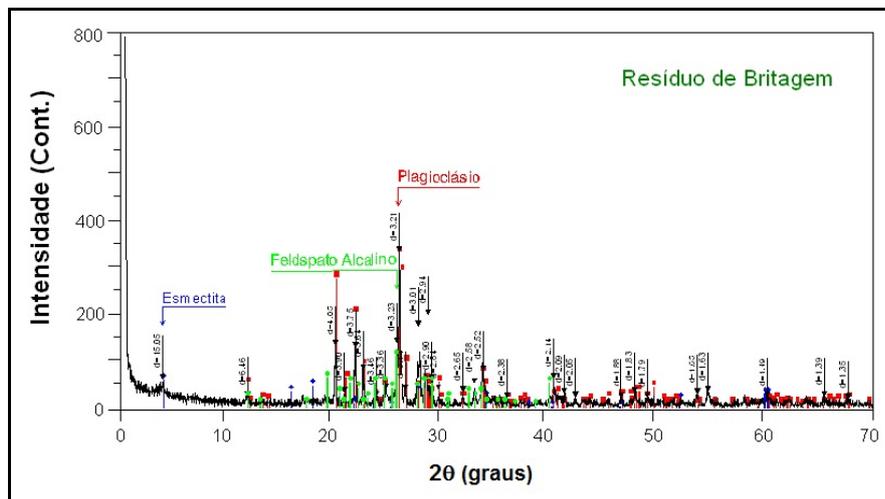


Figura 4.3: difratograma de raios x do resíduo de britagem

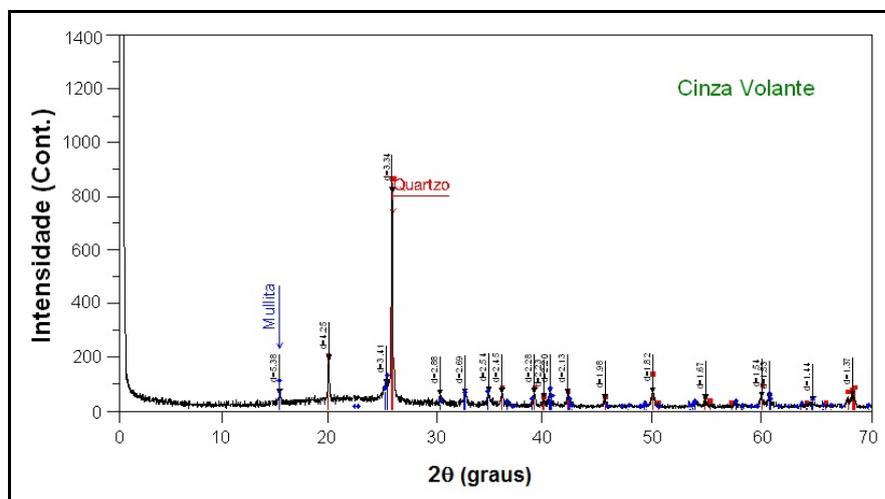


Figura 4.4: difratograma de raios x da cinza volante

4.1.2 Propriedades Químicas

A caracterização química obtida através de fluorescência de raios x é apresentada na tabela 4.3. Podemos evidenciar que os materiais utilizados nesta pesquisa são compostos principalmente por óxidos de silício, óxidos de alumínio e óxidos de ferro. O pH medido do solo ficou em 5,2, do resíduo de britagem em 9,6 e da cinza volante em 8,3.

Tabela 4.3: caracterização química dos materiais

Análises	SRAB	RBR	CV
Óxido de silício (SiO ₂)	62,5%	43,4%	64,0%
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	29,9%	11,3%	22,6%
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	5,6%	28,2%	6,9%
Óxido de cálcio (CaO)	-	11,1%	1,9%
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,7%	1,9%	1,9%
Óxido de magnésio (MgO)	-	0,9%	0,1%
Óxido de sódio (Na ₂ O)	-	0,4%	-

4.1.3 Reatividade Potencial dos Materiais pelo Método Químico

As amostras analisadas também foram submetidas à verificação da reatividade potencial pelo método químico de acordo com as prescrições da ASTM C289/07. Este método avalia a reatividade potencial álcali-silica de um agregado, através da relação entre a concentração de sílica dissolvida e a redução da alcalinidade. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.4 e ilustrados na figura 4.5.

Tabela 4.4: resultados reatividade potencial pelo método químico

Análises	SRAB	RBR	CV
Redução na alcalinidade (mmol/L)	207	190	426
Concentração de SiO ₂ (mmol/L)	16	247	611

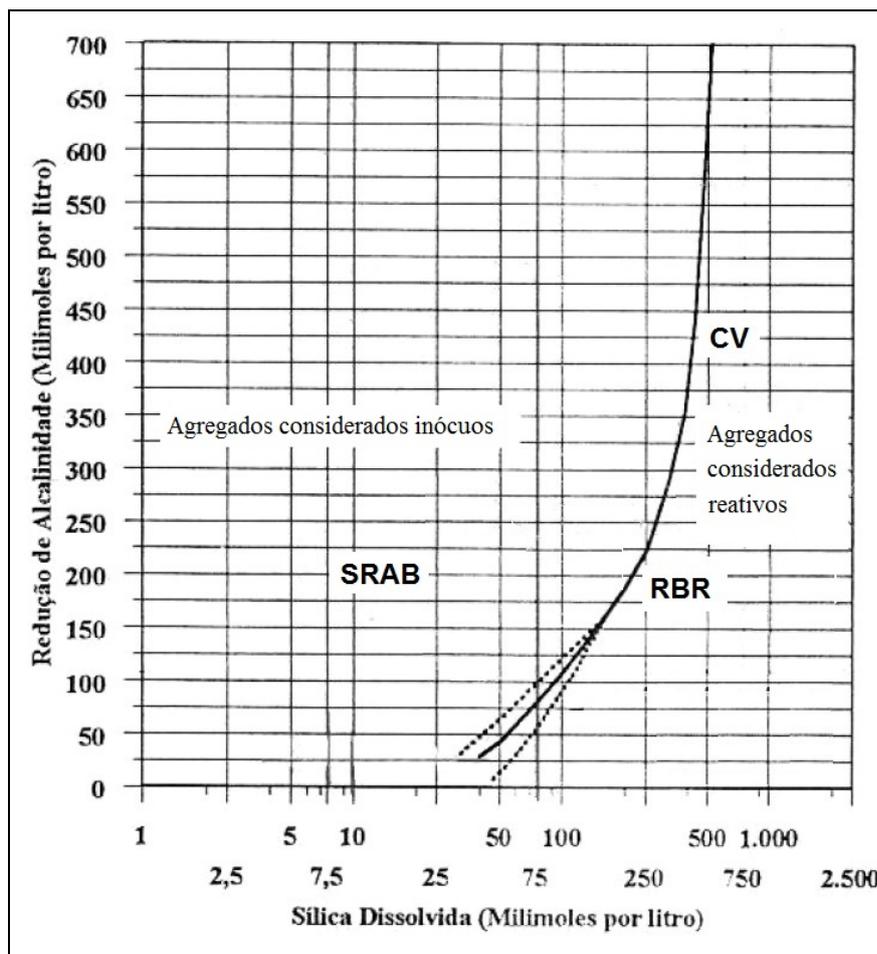


Figura 4.5: reatividade potencial dos materiais de acordo com a ASTM C289/07

De acordo com os resultados obtidos neste ensaio, e conforme se observa na figura 4.5, o solo residual de arenito Botucatu foi considerado agregado inerte (lado esquerdo da curva). As amostras de resíduo de britagem e cinza volante foram caracterizadas como potencialmente reativo (lado direito da curva).

Por se tratar de uma metodologia aplicada em agregados para uso em concreto, cabe salientar que o ensaio executado nesta pesquisa foi realizado em amostras no estado natural, não retirando o material passante na peneira 0,15mm como recomenda a norma. Essa mudança na metodologia se deu principalmente porque o objetivo deste ensaio foi determinar a diferença de potencialidade reativa dos materiais utilizados nesta pesquisa, pois apesar de serem materiais com granulometrias e constituições químicas semelhantes, existe uma diferença considerável de resistência mecânica adquirida quando comparamos amostras de solo-cal, solo-cal com RBR e solo-cal com CV, resultados que serão apresentados e discutidos adiante.

4.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

4.2.1 Solo-Cal

As tabelas A.1, A.2, A.3, do apêndice “A”, apresentam as características de todos os corpos-de-prova ensaiados à compressão simples para o solo tratado somente com cal, para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. Pode-se observar nestas tabelas que os dados foram agrupados a cada três linhas, pois correspondem às três repetições para um mesmo ponto de moldagem (mesmo teor de umidade, porosidade, teor de aglomerante e tempo de cura).

A partir destes dados, foram elaboradas as figuras 4.6 a 4.15, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento solo-cal em estudo são evidenciados. Os corpos-de-prova com 28 dias foram descartados das análises, pois não suportaram a fase de saturação (imersão por 24 horas).

4.2.1.1 Efeito do Teor de Cal

Na figura 4.6 e 4.7, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal para 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$).

Pode-se observar que a quantidade de cal tem um considerável efeito sobre a resistência à compressão simples do material, tanto para corpos-de-prova ensaiados a 90 dias como para corpos-de-prova ensaiados a 360 dias. Mesmo pequenas adições de cal são suficientes para gerar ganhos de resistência. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 11%, a resistência à compressão simples, em média, cresceu 70% em ambos os casos.

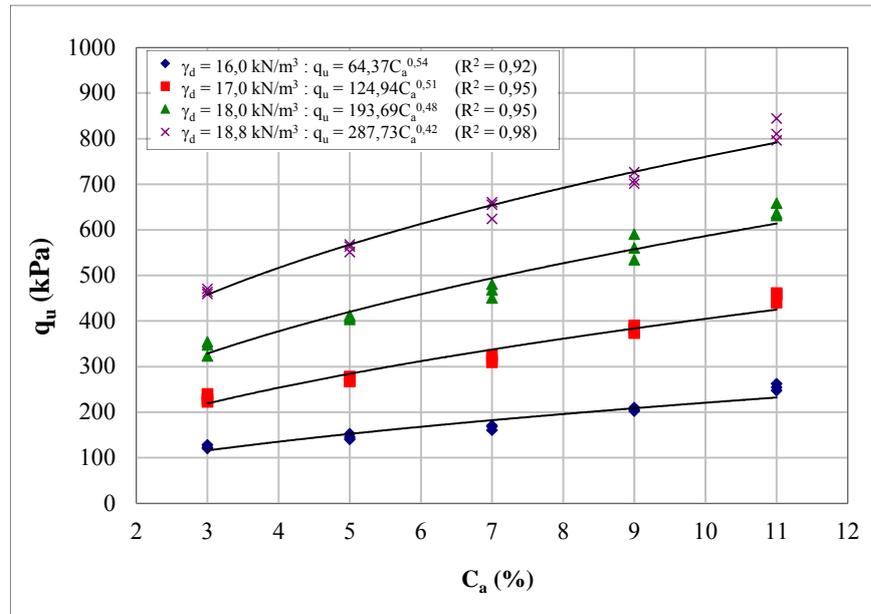


Figura 4.6: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal do SRAB-CAL (90 dias de cura)

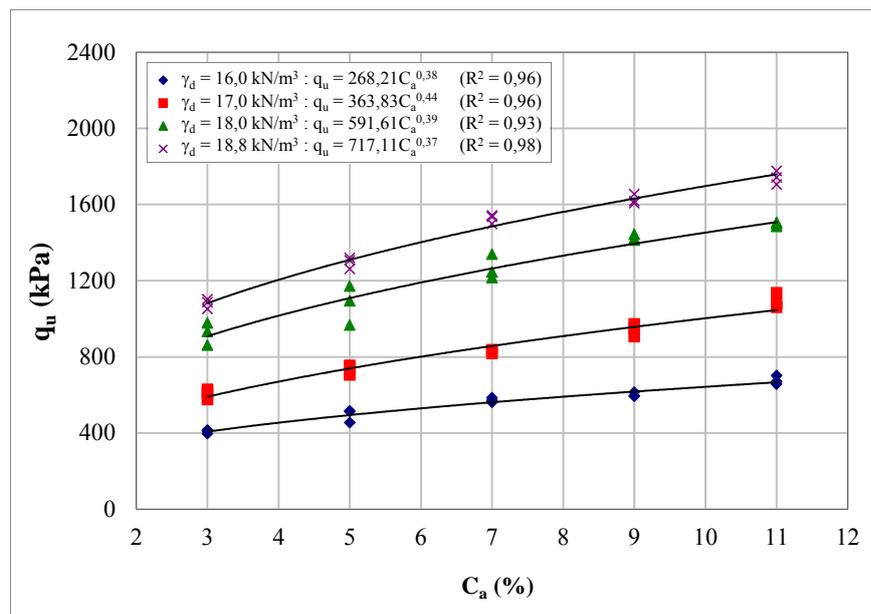


Figura 4.7: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal do SRAB-CAL (360 dias de cura)

Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples tende a não linearidade com o aumento da quantidade de cal. Essa tendência é mais acentuada nas amostras com 360 dias de cura. A taxa de aumento de resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, praticamente permanece a mesma com o aumento da massa específica aparente seca para ambos os tempos de cura.

Núñez (1991) verificou que, para misturas de arenito Botucatu e cal, o aumento na porcentagem de cal (3% a 9%) não influenciou consideravelmente a resistência à compressão simples de amostras curadas por 28 dias. Entretanto, para amostras com 90 dias, o autor observou que o teor de cal é fator decisivo nos ganhos de resistência. Tal fato se deve principalmente as reações pozolânicas, as quais são lentas, podendo estender-se por anos, e só se iniciam certo tempo depois da compactação. Segundo relato do TRB (1987) esta reação não cessará enquanto houver hidróxido de cálcio disponível para manter o pH elevado para dissolução da sílica e da alumina dos argilominerais do solo.

4.2.1.2 Efeito da Porosidade

Nas figuras 4.8 e 4.9, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade do solo-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$).

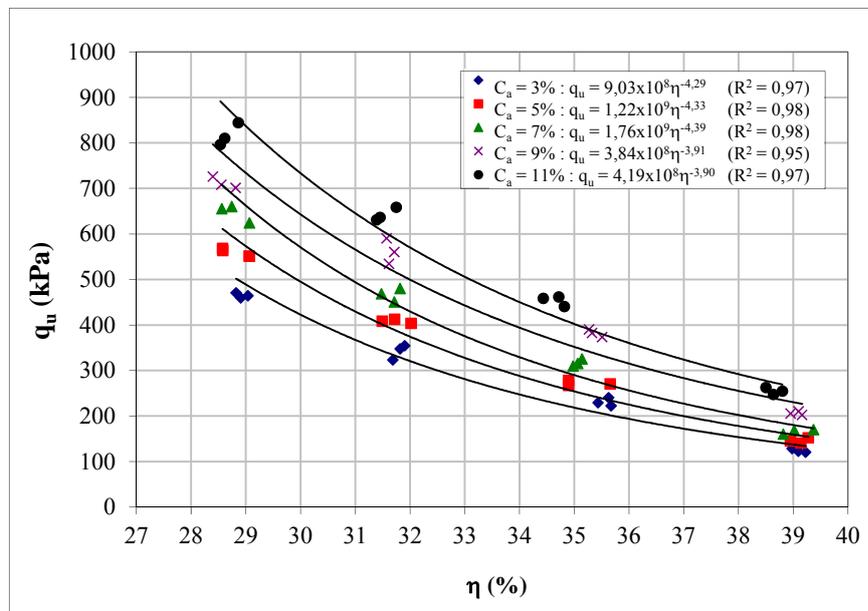


Figura 4.8: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do SRAB-CAL (90 dias de cura)

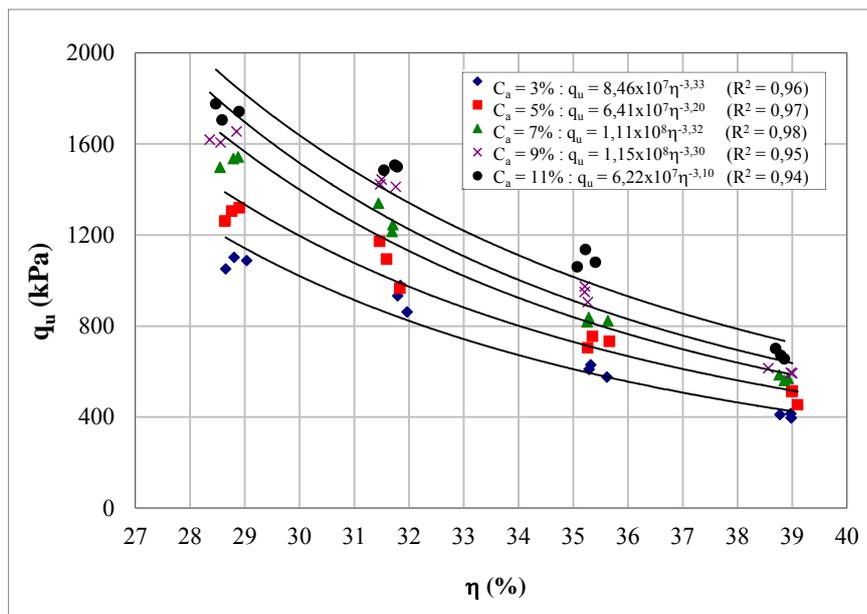


Figura 4.9: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do SRAB-CAL (360 dias de cura)

Verifica-se que, de maneira contrária à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência a compressão simples do solo-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos consideráveis de resistência. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou em 2,8 vezes e 3,4 vezes a resistência à compressão simples do solo-cal testado para 90 e 360 dias de cura, respectivamente.

A resistência à compressão simples aumentou potencialmente com a redução da porosidade das misturas compactadas com 90 e 360 dias de cura. O efeito benéfico em termos de aumento de resistência com a diminuição da porosidade tem sido reportado em diversos trabalhos (INGLES;METCALF, 1972; NÚÑEZ, 1991; FOPPA, 2005; LOPES JUNIOR, 2007; DALLA ROSA, 2009a). Esse aumento, em termos de resistência à compressão simples, pode ser atribuído pela existência de um maior número de contatos entre as partículas existentes, tornando a cimentação mais efetiva. Além desse aspecto, a maior capacidade de distribuição de tensões no interior da amostra, bem como a maior capacidade de mobilização de atrito nas porosidades mais baixas também contribuem para o ganho de resistência do material.

4.2.1.3 Relação Vazios/Cal

Nas figuras 4.10 e 4.11, são apresentadas as curvas de variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cal, expressa pela relação porosidade/teor volumétrico de cal, dos corpos-de-prova com 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

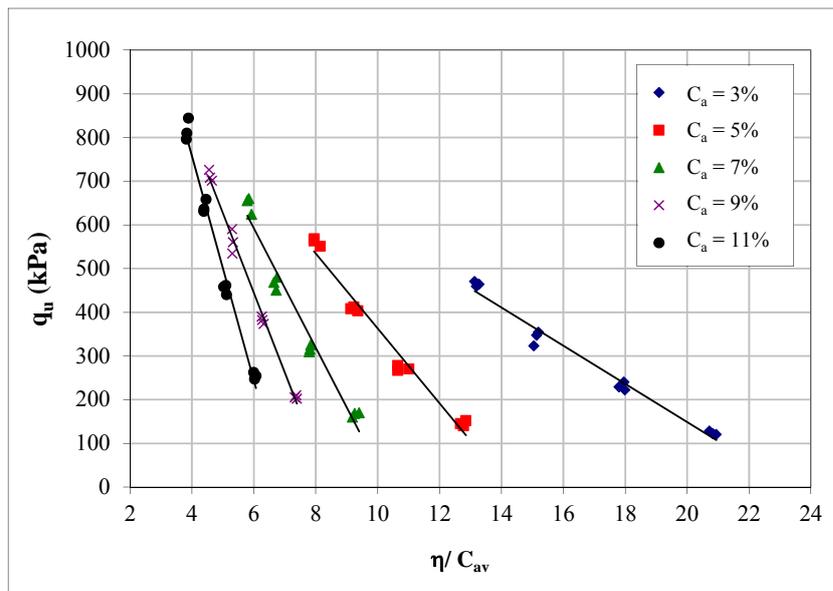


Figura 4.10: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-CAL (90 dias de cura)

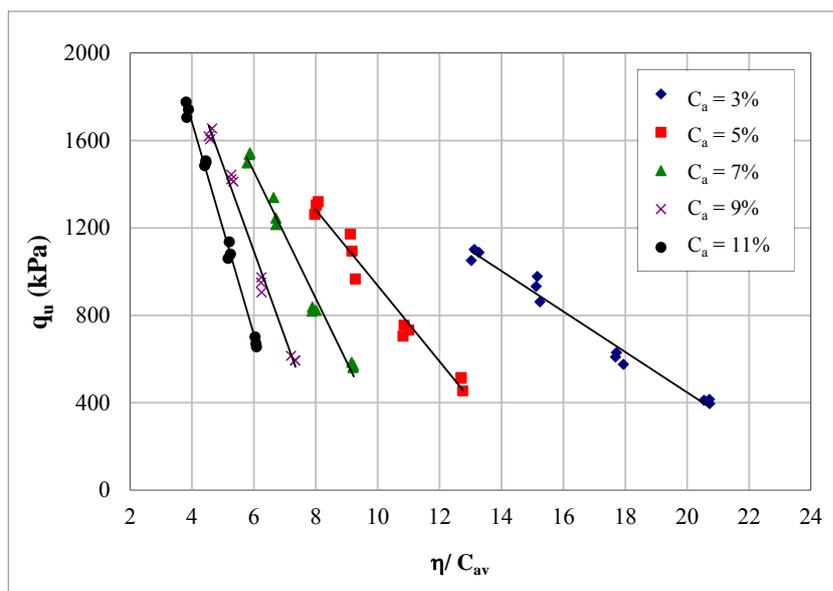


Figura 4.11: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-CAL (360 dias de cura)

Pode-se observar que não existe uma correlação única entre a resistência à compressão simples e a relação porosidade/teor volumétrico de cal, nota-se ainda, que iguais valores de porosidade/teor volumétrico de cal, obtidos de diferentes combinações de cal e porosidades, apresentam distintas resistências.

Lopes Junior (2007), estudando misturas de arenito Botucatu com resíduo de britagem e teores de 3% a 11% de cal, avaliou separadamente a relação das grandezas volume de vazios (V_v) e inverso do volume de cal ($1/V_{ca}$) com a resistência à compressão simples. O autor verificou que a taxa de variação da resistência em relação a cada uma dessas grandezas são substancialmente diferentes.

Uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas é através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Após diversas tentativas obteve-se que, aplicando uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro C_{av} , haveria uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, resultando num melhor ajuste para a relação vazios/cal.

Nas figuras 4.12 e 4.13, são apresentadas as curvas de variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,12, dos corpos-de-prova com 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

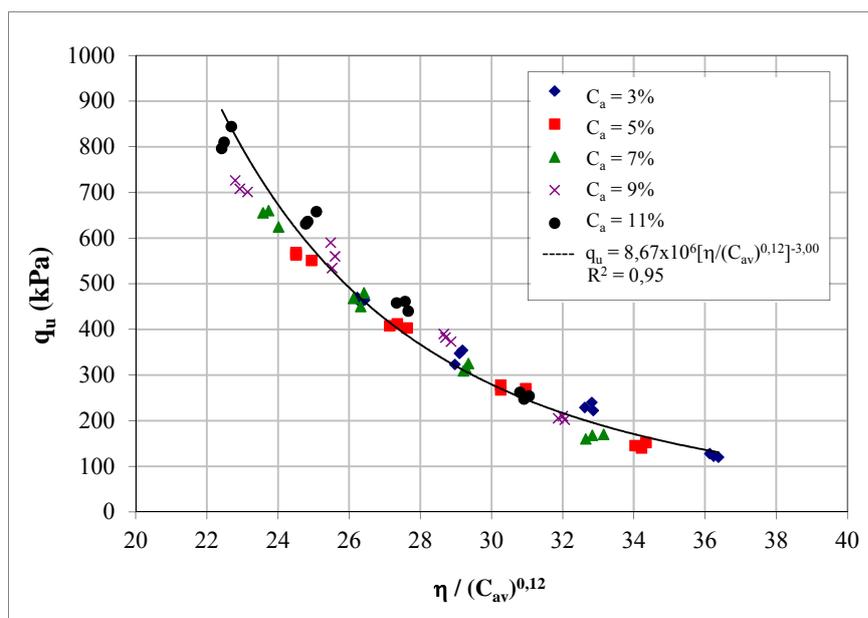


Figura 4.12: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-CAL (90 dias de cura)

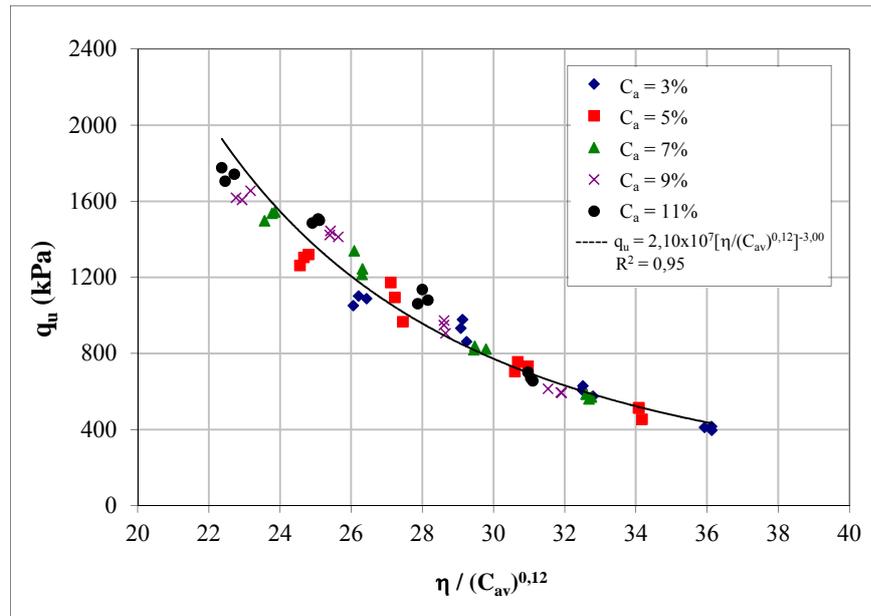


Figura 4.13: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-CAL (360 dias de cura)

Pode-se observar uma boa correlação entre o volume de vazios/volume de cal ajustados e a resistência à compressão simples do solo-cal compactado em estudo. Foi utilizado no ajuste curva tipo potência, a qual apresentou melhores coeficientes de correlação R^2 .

4.2.1.4 Tempo de Cura x Relação Vazios/Cal

O efeito do tempo de cura é claramente notado pelo fato das amostras de 28 dias de cura não terem suportado a imersão e as amostras com 90 e 360 dias de cura apresentaram ganhos consideráveis de resistência.

Na figura 4.14 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustado) pela resistência à compressão simples das amostras com 90 e 360 dias de cura. Pode-se notar que o expoente de ajuste da relação η/C_{av} que define a tendência exponencial da curva é o mesmo.

Os pontos que formam a curva de 360 dias apresentam, em média, o dobro de resistência do que os pontos que formam a curva das amostras com 90 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} .

Os resultados da figura 4.14, indicam a existência de relações distintas e únicas para as tendências de cada tempo de cura. Comparando as equações obtidas em cada tempo de cura, pode-se observar que a resistência à compressão simples tem um relacionamento direto com a relação η/C_{av} (ajustado) para os dois tempos de cura, tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito do tempo de cura. Portanto, uma relação única pode ser conseguida relacionando a resistência à compressão simples com a porosidade, com o teor volumétrico de cal e com o tempo de cura, o qual será apresentada e discutida no item 4.4.2.3.

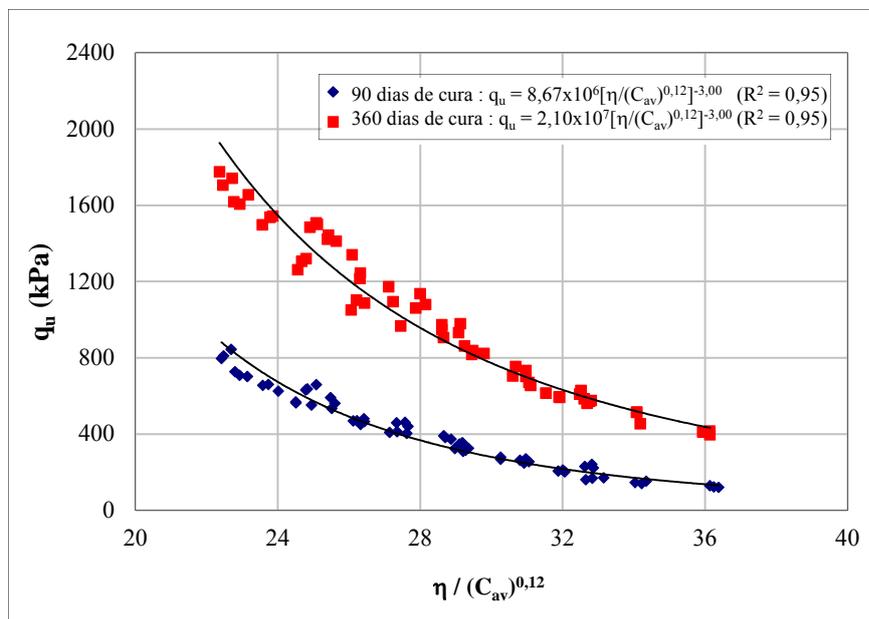


Figura 4.14: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-CAL (90 e 360 dias de cura)

4.2.2 Solo-Resíduo de Britagem-Cal

As tabelas A.4, A.5, A.6, do apêndice “A”, apresentam as características de todos os corpos-de-prova ensaiados à compressão simples para o solo tratado somente com cal, para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. Pode-se observar nestas tabelas que os dados foram agrupados a cada três linhas, pois correspondem às três repetições para um mesmo ponto de moldagem (mesmo teor de umidade, porosidade, teor de aglomerante e tempo de cura).

A partir destes dados, foram elaboradas as figuras 4.16 a 4.32, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento solo-cal com adição de resíduo de britagem pulverizado em estudo são evidenciados.

4.2.2.1 Efeito do Teor de Cal

Nas figuras 4.16, 4.17 e 4.18, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$).

Pode-se observar que a quantidade de cal tem um considerável efeito sobre a resistência à compressão simples do material. Mesmo pequenas adições de cal são suficientes para gerar ganhos de resistência. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 11%, a resistência à compressão simples, em média, acresceu 40% para as amostras com 90 dias de cura, 55% para as amostras com 90 dias de cura e 150% para as amostras com 360 dias de cura.

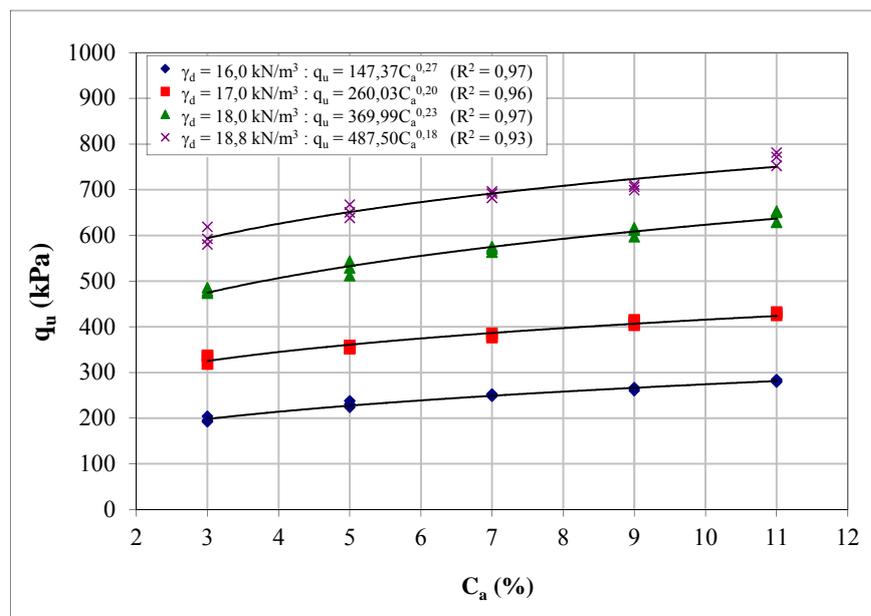


Figura 4.15: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)

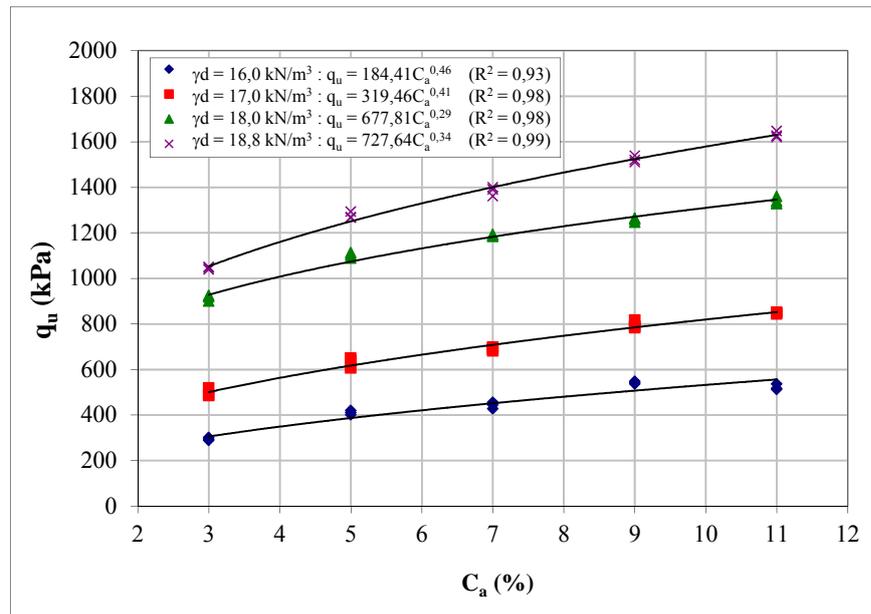


Figura 4.16: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)

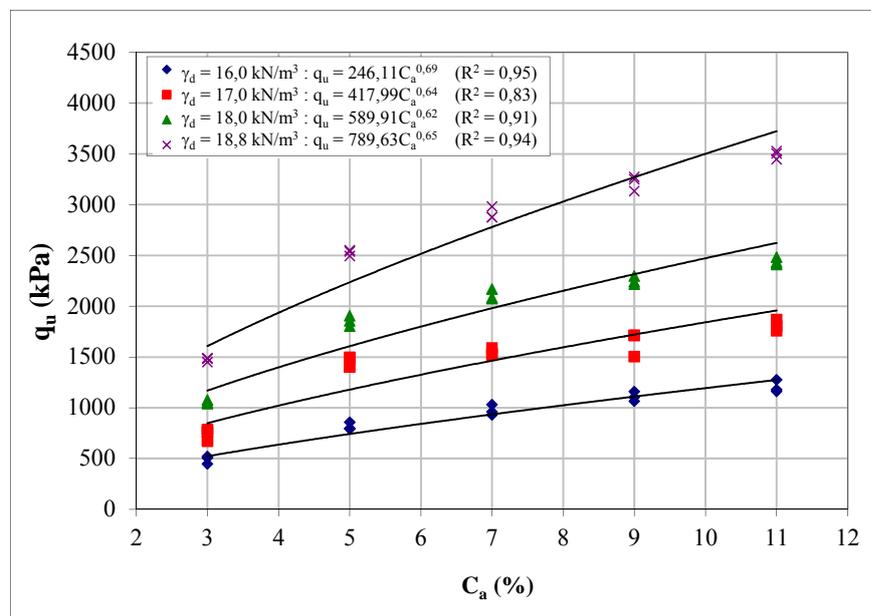


Figura 4.17: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)

Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples tende a não linearidade com o aumento da quantidade de cal. Além disso, a taxa de aumento de resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, praticamente permanece a mesma com o aumento da massa específica aparente seca.

4.2.2.2 Efeito da Porosidade

Nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade do solo-resíduo de britagem-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$).

Verifica-se que, de maneira contrária à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência a compressão simples do solo-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos consideráveis de resistência. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material triplicou a resistência à compressão simples, para todos os tempos de cura.

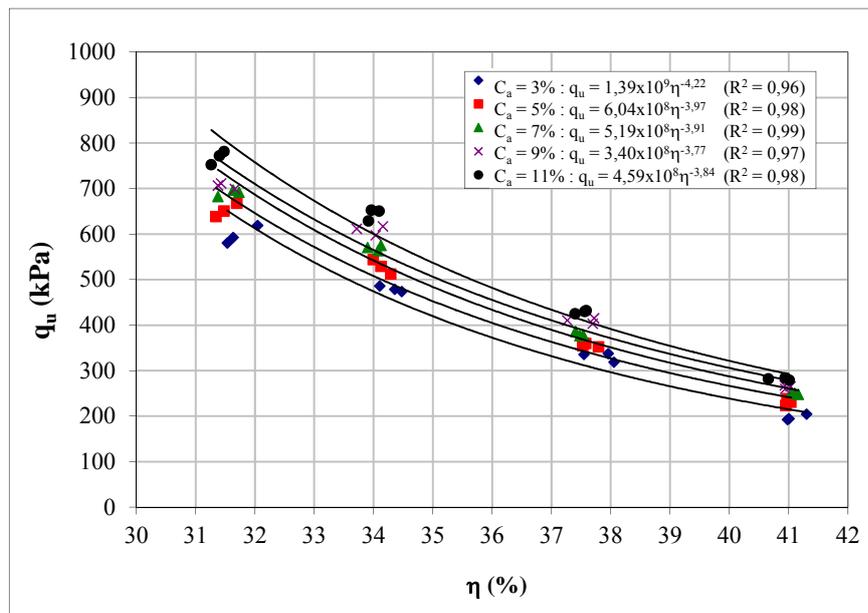


Figura 4.18: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)

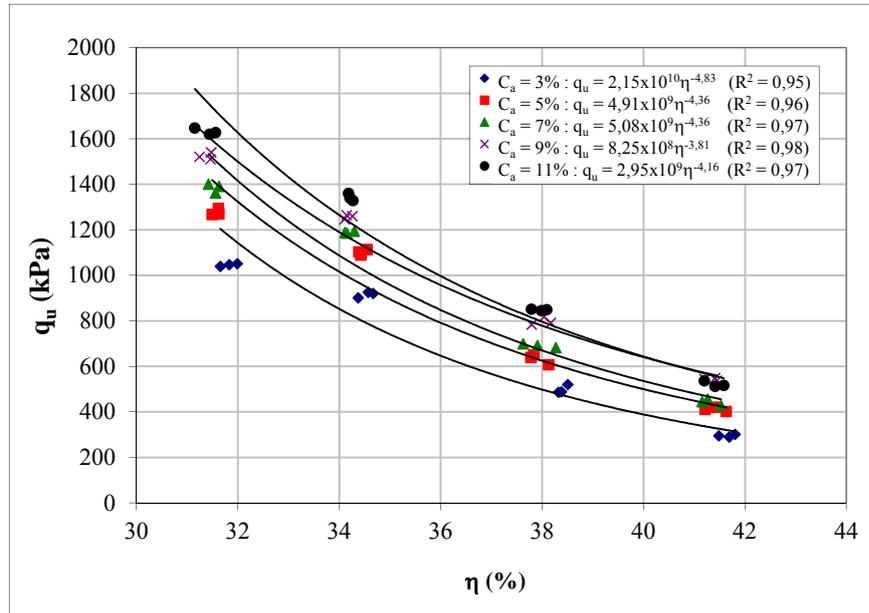


Figura 4.19: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)

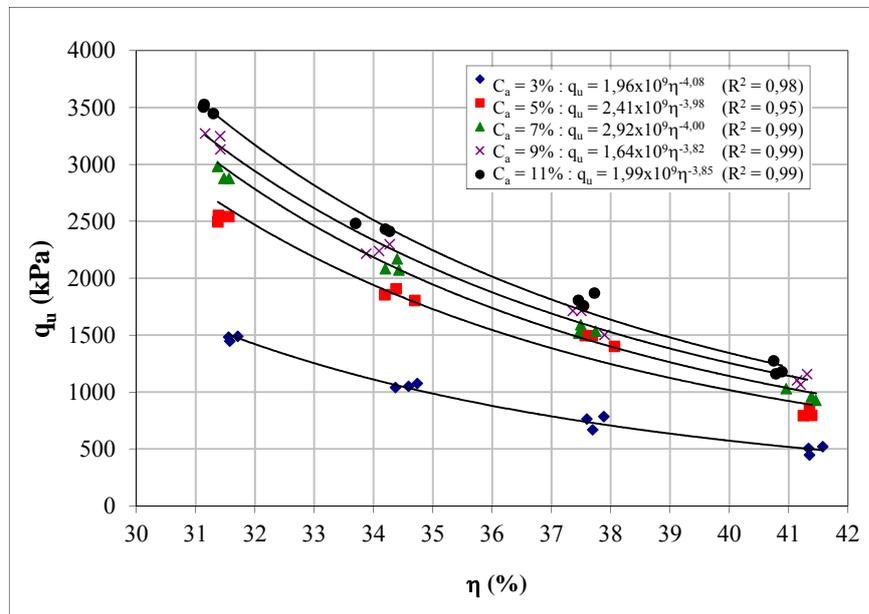


Figura 4.20: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)

Comparando a figura 4.9 (amostras tratadas somente com cal) com a figura 4.20 (amostras tratadas com cal e 25% de resíduo de britagem), observa-se que todas as misturas apresentaram relativamente a mesma taxa de aumento da resistência com a diminuição da porosidade, independentemente da adição do resíduo. Entretanto, as amostras com 3% de cal e 25% de resíduo de britagem, curadas por 360 dias, apresentadas na figura 4.20, não obtiveram o mesmo ganho proporcional de resistência com a adição de resíduo que as demais amostras. Para esse período de cura, 3% de cal não é suficiente para manter o pH elevado e ainda reagir pozolanicamente com toda a sílica e a alumina presentes na mistura, sendo menos eficiente na formação de materiais cimentantes do que amostras mais ricas em hidróxido de cálcio.

4.2.2.3 Efeito do Teor de Umidade de Moldagem

Nas figuras 4.22, 4.23 e 4.24, são apresentadas a variação da resistência à compressão simples em função do teor de umidade de moldagem para os corpos-de-prova de mesmo peso específico aparente seco ($18,0\text{kN/m}^3$), para amostras com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente.

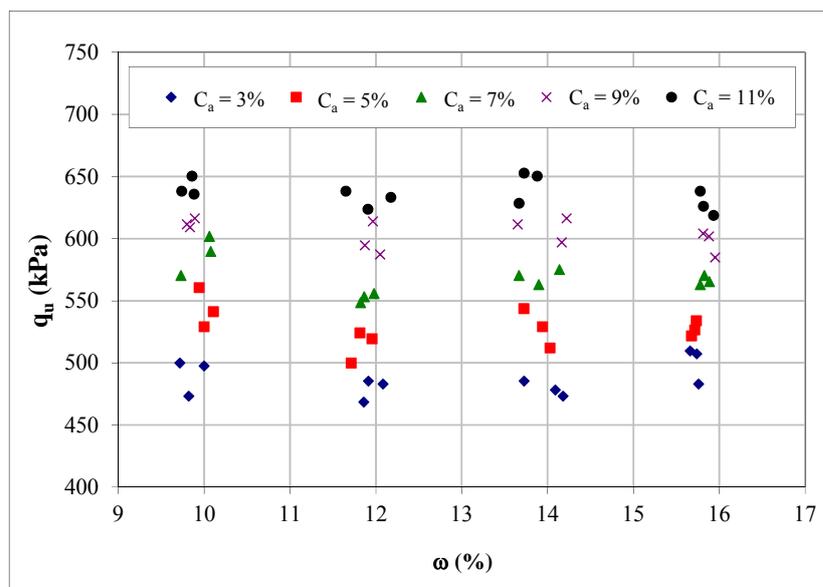


Figura 4.21: resistência à compressão simples versus teor de umidade de moldagem do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)

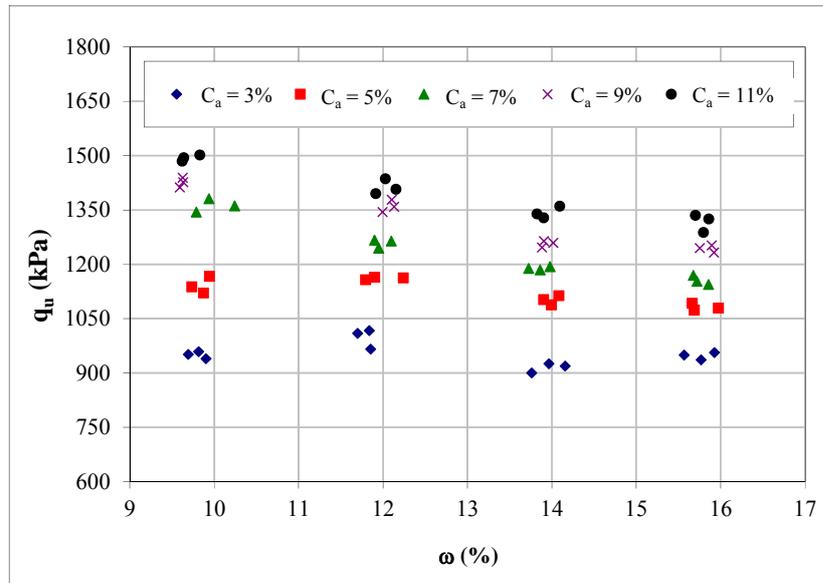


Figura 4.22: resistência à compressão simples versus teor de umidade de moldagem do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)

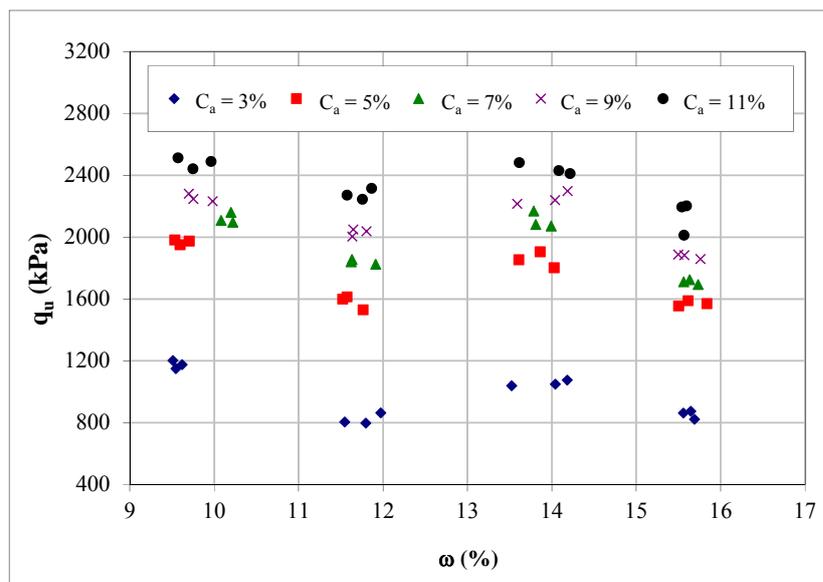


Figura 4.23: resistência à compressão simples versus teor de umidade de moldagem do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)

Carraro (1997) avaliou o efeito da variação nas condições de compactação sobre a resistência à compressão simples um mistura de solo (arenito Botucatu), cal e cinza volante. O autor verificou que, mantendo-se constante a massa específica aparente seca e variando-se o teor de umidade de moldagem, a máxima resistência é obtida para um ponto localizado no tramo seco da curva de compactação, próximo à umidade ótima.

Foppa (2005) observou um aumento da resistência à compressão simples com o aumento do teor de umidade até um valor ótimo, a partir do qual a resistência passa a diminuir. O autor verificou que o teor de umidade que gerou a maior resistência é ligeiramente inferior (tramo seco) ao teor ótimo obtido no ensaio de compactação.

Nas figuras 4.21, 4.22 e 4.23, pode-se observar também que a variação do teor de umidade de moldagem não afetou consideravelmente a resistência à compressão simples, independentemente do tempo de cura. Não foram realizadas análises microscópicas, portanto não foi possível averiguar a influência do teor de umidade na estrutura das misturas, bem como definir qual a feição estrutural (estrutura floculada, estrutura dispersa ou arranjo granular) do SRAB-RBR-CAL em estudo.

Diferentemente do trabalho realizado por Horpibulsuk et al. (2003), onde os autores verificaram que a relação água/cimento é um parâmetro apropriado para análise do desenvolvimento da resistência mecânica de argilas moles com altos teores de umidade, como acontece no concreto, onde os vazios estão praticamente preenchidos por água, no presente estudo verifica-se que não é possível estabelecer uma relação entre o teor de umidade e a resistência à compressão simples.

Nas misturas em estudo, os vazios estão apenas parcialmente preenchidos pela água, não existindo relação entre a quantidade de vazios e a quantidade de água. Portanto, o papel desempenhado pelos vazios e pela quantidade de água são diferentes. Logo, para solos tratados com cal no estado não-saturado, a relação entre a porosidade e o teor de cal é mais apropriada na análise e controle da resistência mecânica.

4.2.2.4 Relação Vazios/Cal

Nas figuras 4.25, 4.26 e 4.27, são apresentadas as curvas de variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cal, expressa pela relação porosidade/teor volumétrico de cal, dos corpos-de-prova com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

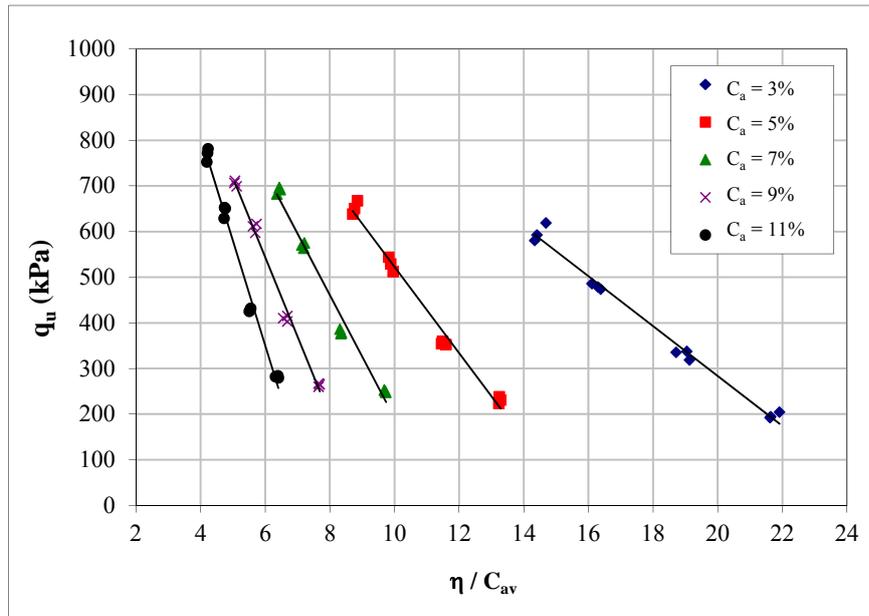


Figura 4.24: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)

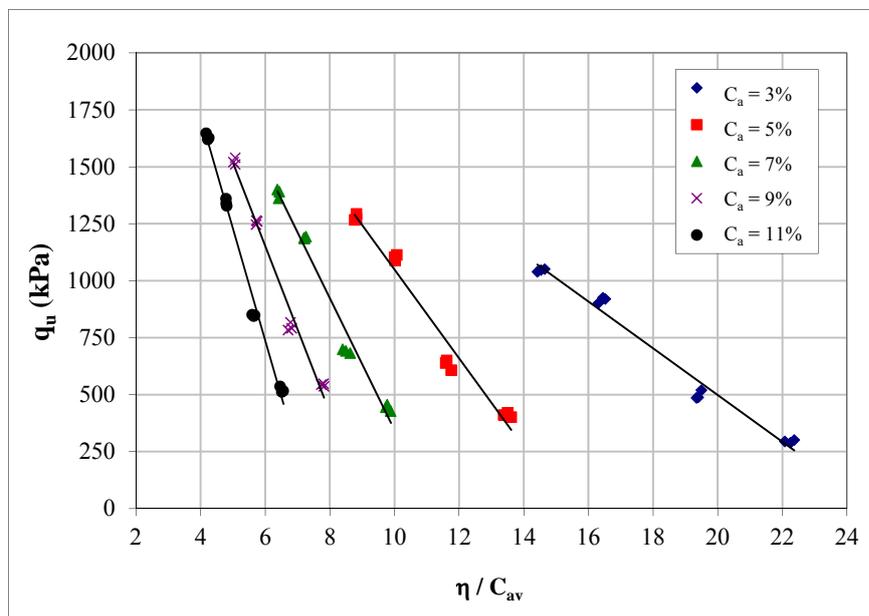


Figura 4.25: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)

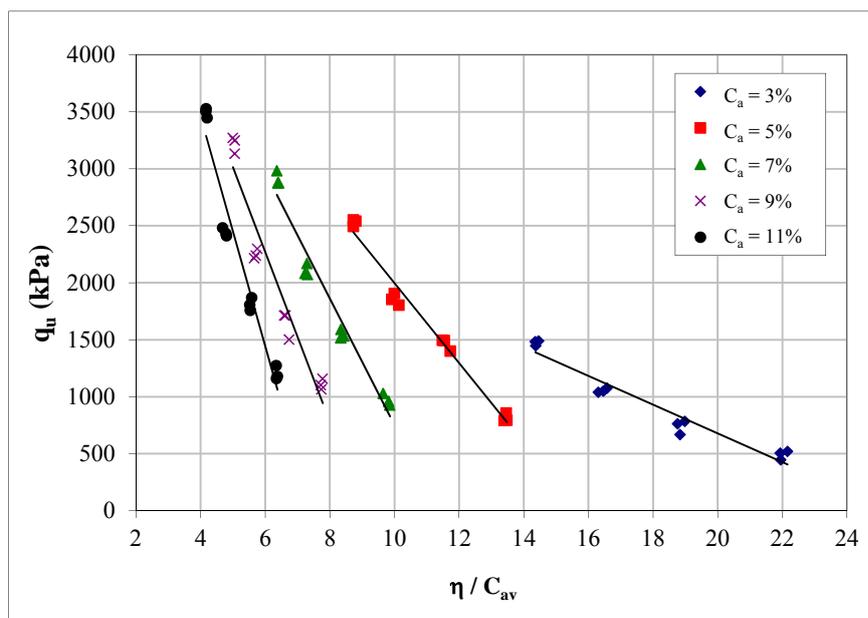


Figura 4.26: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)

Pode-se observar que não existe uma correlação única entre a resistência à compressão simples e a relação porosidade/teor volumétrico de cal, como ocorre com o solo-cal sem adição de finos, nota-se ainda, que iguais valores de porosidade/teor volumétrico de cal, obtidos de diferentes combinações de cal e porosidades, apresentam distintas resistências.

Como já citado anteriormente, uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas é através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Após diversas tentativas obteve-se que, aplicando uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro C_{av} , haveria uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, resultando num melhor ajuste para a relação vazios/cal.

Nas figuras 4.28, 4.29 e 4.30, são apresentadas as curvas de variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,12, dos corpos-de-prova com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

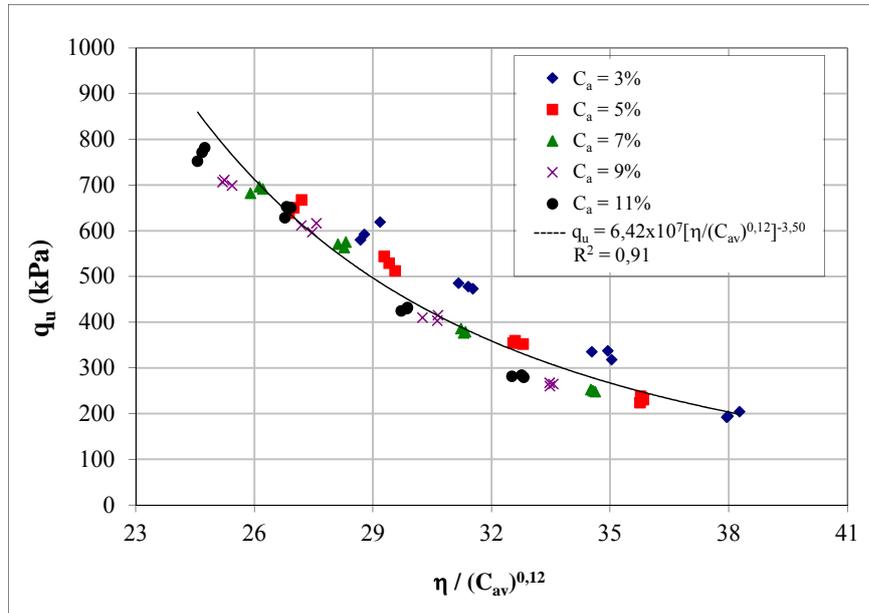


Figura 4.27: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)

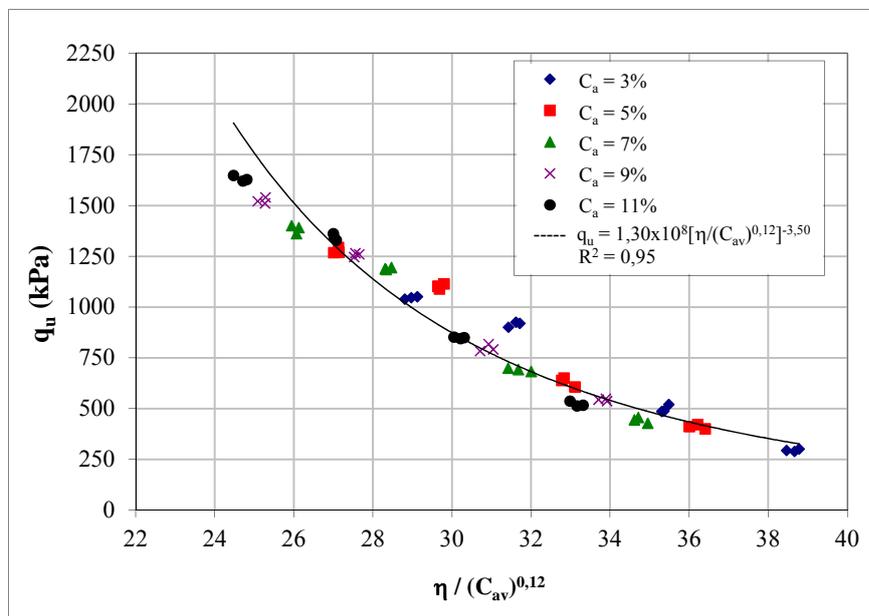


Figura 4.28: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)

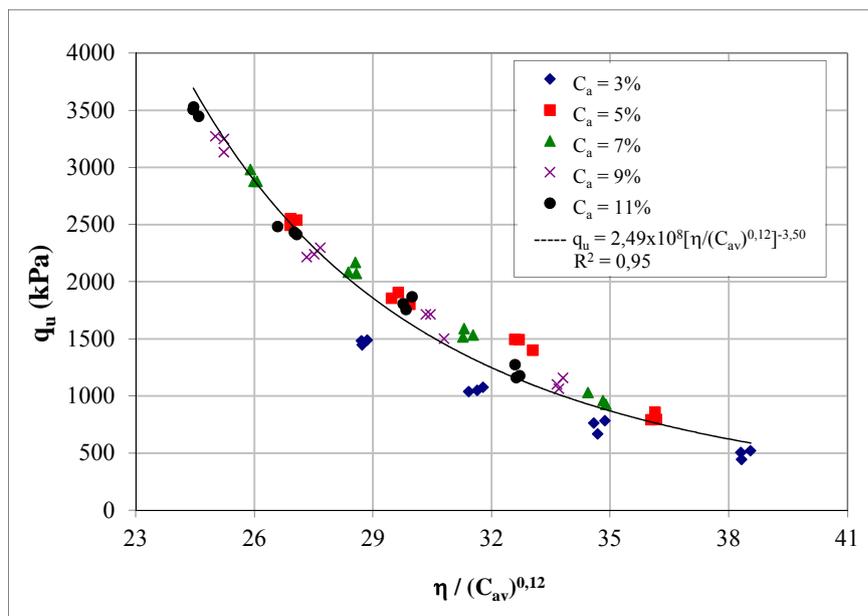


Figura 4.29: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)

Verifica-se também que mesmo com a adição de 25% de resíduo de britagem (material com maior potencial de reatividade em relação ao solo) apresentar maiores resistências do que o solo-cal sem adições, a potência usada para compatibilizar a variação da resistência à compressão simples pela relação vazios/cal permanece a mesma (0,12). Esse fator está associado ao tipo de agente cimentante (no presente estudo a cal), a matriz de solo e no mecanismo de cimentação (empacotamento ou preenchimento de vazios) (FOPPA, 2005; LOPES JUNIOR, 2007; CRUZ, 2008; DALLA ROSA, 2009a).

Pode-se observar uma boa correlação entre o volume de vazios/volume de cal ajustados e a resistência à compressão simples do solo-resíduo de britagem-cal compactado em estudo. Foi utilizado no ajuste curva tipo potência, a qual apresentou melhores coeficientes de correlação R^2 .

4.2.2.5 Tempo de Cura x Relação Vazios/Cal

Assim como no solo-cal, o solo-cal com resíduo de britagem foi claramente influenciado pelo tempo de cura, por se tratar da adição de um material com maior potencial de reatividade, o efeito do tempo de cura foi mais pronunciado no solo com adição de 25% de resíduo de britagem e cal.

Na figura 4.30 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustado) pela resistência à compressão simples das amostras com 28, 90 e 360 dias de cura. Pode-se notar que o expoente de ajuste da relação η/C_{av} que define a tendência exponencial da curva é o mesmo. Os pontos que formam a curva, em média, duplicam as resistências quando comparamos amostras com 28 e 90 dias de cura e amostras com 90 e 360 dias de cura.

Ainda na figura 4.30, pode-se observar a existência de relações distintas e únicas para as tendências de cada tempo de cura. Comparando as equações obtidas em cada tempo de cura, nota-se que a resistência à compressão simples tem um relacionamento direto com a relação η/C_{av} (ajustado) para os três tempos de cura, tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito do tempo de cura. Portanto, uma relação única pode ser conseguida relacionando a resistência à compressão simples com a porosidade, com o teor volumétrico de cal e com o tempo de cura, como apresentado na figura 4.31.

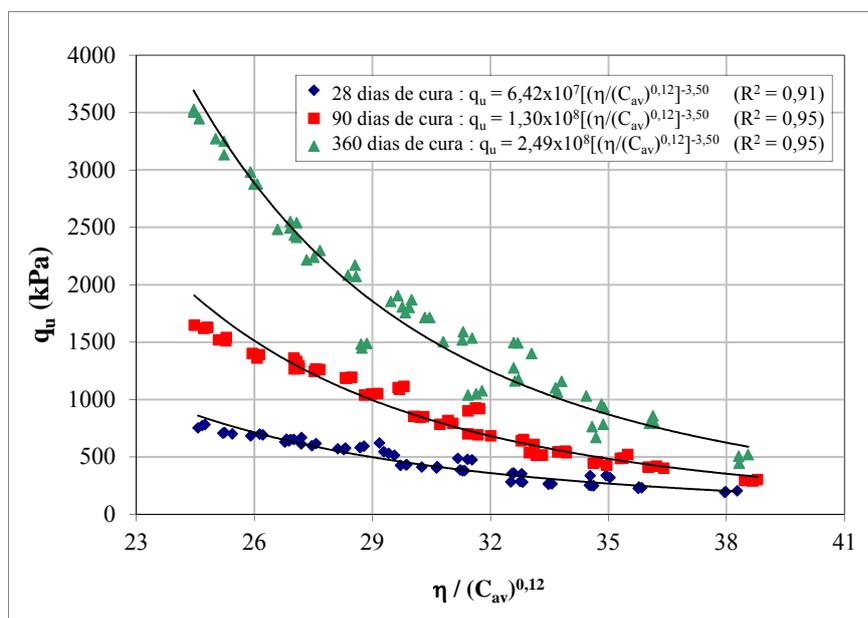


Figura 4.30: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL (28,90 e 360 dias de cura)

A figura 4.14 demonstra também, que para as misturas estudadas com adição de 25% de resíduo de britagem, a resistência à compressão simples tende a não linearidade com o aumento do tempo de cura.

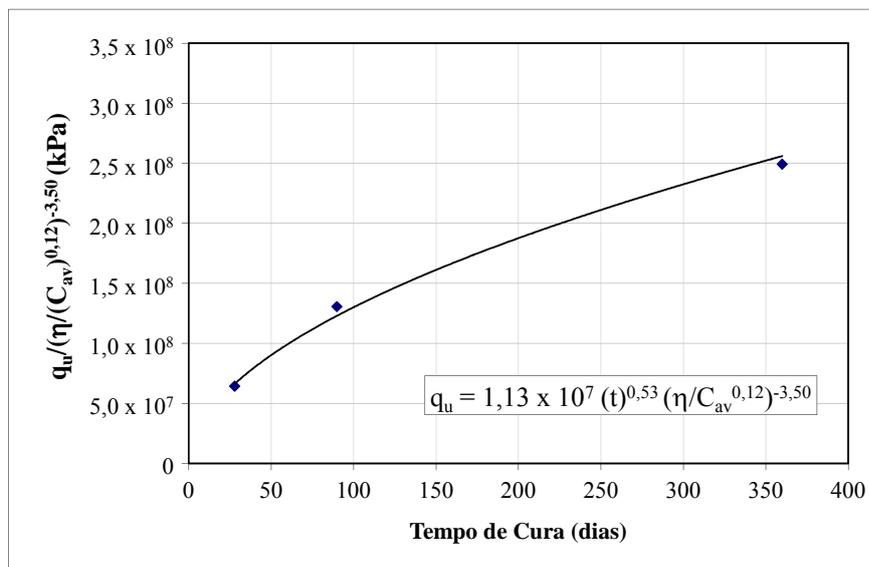


Figura 4.31: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade, teor de cal e tempo de cura do SRAB-25%RBR-CAL

4.2.3 Solo-Cinza Volante-Cal

A cinza volante foi utilizada com o objetivo de comparar o comportamento mecânico (em termos de resistência não confinada) de misturas com diferentes adições de finos e seus efeitos na relação η/C_{av} usado na previsão de resistência à compressão simples. As análises apresentadas neste item foram elaboradas com base nos dados retirados das tabelas A.5 e A.7 do apêndice A do trabalho realizado por Dalla Rosa (2009a).

A partir destes dados, foram elaboradas as figuras 4.33 a 4.36, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento solo-25% cinza volante-cal em estudo são evidenciados.

4.2.3.1 Efeito do Teor de Cal e da Porosidade

Assim como no solo-cal e no solo-cal com resíduo de britagem, Dalla Rosa (2009a) observou que o teor de cal promove ganhos significativos de resistência no SRAB com 25% de cinza volante tratado com 3, 5, 7 e 9% de cal. Aumentando-se o teor de cal de 3% para 9%,

a resistência à compressão simples, em média, aumentou 80% e 100%, para 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Por outro lado, como ocorre também em amostras sem adições, a porosidade do solo-cal com cinza volante exerce forte influência sobre a resistência à compressão simples, em média, a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material, a resistência triplicou, tanto para amostras de 28 dias de cura, como para amostras com 90 dias de cura.

4.2.3.2 Relação Vazios/Cal

Dalla Rosa (2009a) também não observou uma correlação única entre a resistência à compressão simples e a relação porosidade/teor volumétrico de cal sem o uso de um ajuste para compatibilizar as taxas de variações. Após diversas tentativas, Dalla Rosa (2009a) estudando o SRAB tratado com 25% de cinza volante e cal Primor Extra (mesmo utilizado nesta pesquisa), obteve uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro C_{av} .

A obtenção da mesma potência de compatibilização das taxas de variações da resistência com a relação vazios/cal ajustado, tanto para SRAB sem adição, quanto para o SRAB com 25% de resíduo de britagem, reforça a hipótese de que esse fator está ligado primeiramente no tipo de agente cimentante que se está utilizando e em segundo na matriz de solo, e independe da efetividade das reações pozolânicas que ocorre entre a cal e a matriz de solo (com ou sem adições). Essa hipótese é válida dentro da faixa de valores estudados, pois em solos tratados com cal, a resistência com o tempo de cura é altamente dependente da quantidade de hidróxido de cálcio livre na mistura.

Nas figuras 4.32 e 4.33, são apresentadas as curvas de variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,12, dos corpos-de-prova com 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

Pode-se observar uma boa correlação entre o volume de vazios/volume de cal ajustados e a resistência à compressão simples do solo-resíduo de britagem-cal compactado em estudo. Foi utilizado no ajuste curva tipo potência, a qual apresentou melhores coeficientes de correlação R^2 .

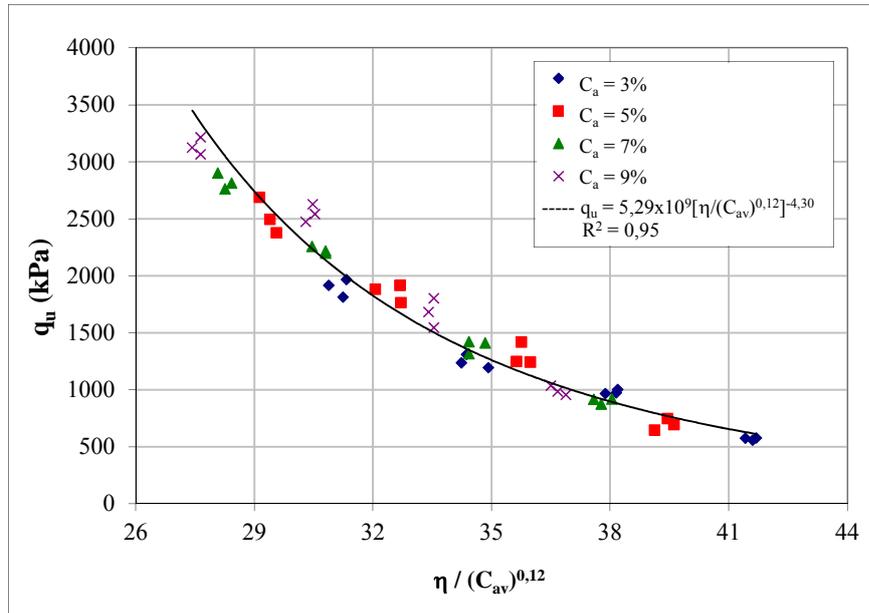


Figura 4.32: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%CV-CAL (28 dias de cura)

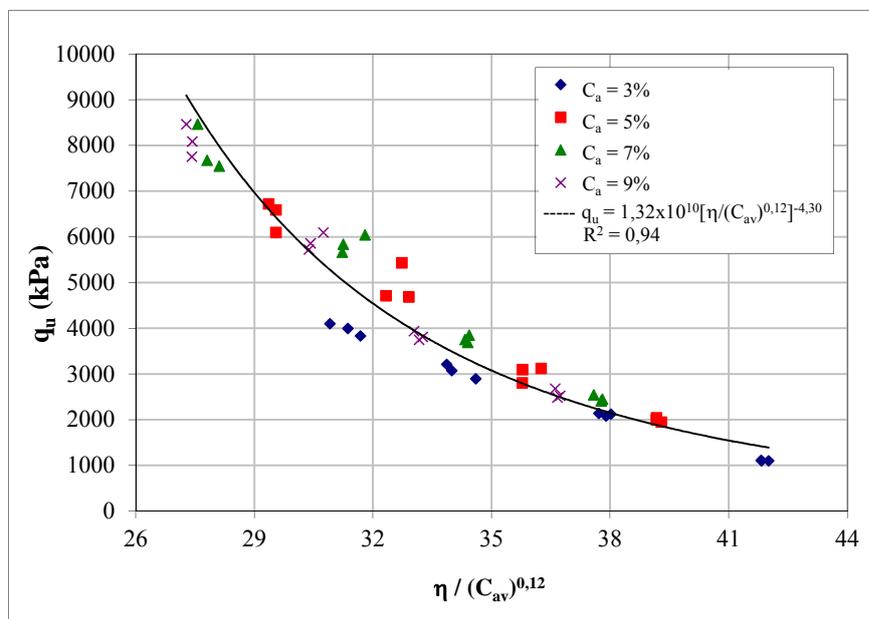


Figura 4.33: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%CV-CAL (90 dias de cura)

4.2.3.3 Tempo de Cura x Relação Vazios/Cal

Na figura 4.34 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustado) pela resistência à compressão simples das amostras com 28 e 90 dias de cura. Pode-se notar que o expoente de ajuste da relação η/C_{av} que define a tendência exponencial da curva é o mesmo.

Assim como no solo-cal e no solo-cal com resíduo de britagem, o solo-cal com cinza volante foi claramente influenciado pelo tempo de cura. Os pontos que formam as curvas, em média, duplicam as resistências quando comparamos amostras com 28 e 90 dias de cura. A taxa do aumento da resistência com a redução da relação η/C_{av} (ajustado) aumenta com o tempo de cura.

Ainda na figura 4.34, pode-se observar a existência de relações distintas e únicas para as tendências de cada tempo de cura. Comparando as equações obtidas em cada tempo de cura, nota-se que a resistência à compressão simples tem um relacionamento direto com a relação η/C_{av} (ajustado) para os dois tempos de cura, tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito do tempo de cura.

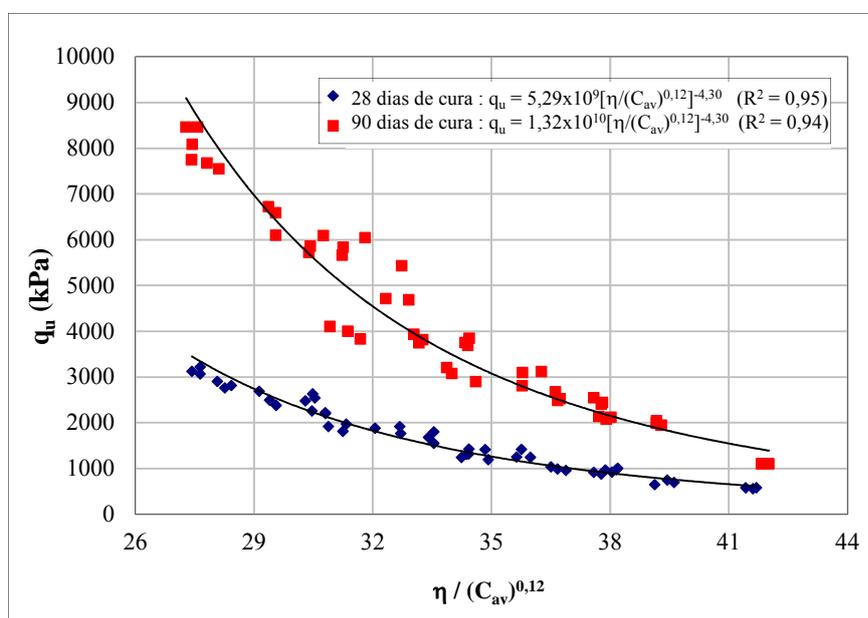


Figura 4.34: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%CV-CAL (28 e 90 dias de cura)

4.2.4 Efeito da Adição de Resíduos Industriais

Na figura 4.35 são apresentadas as curvas de variação da resistência à compressão simples pela relação vazios/cal ajustado, para o solo-cal, solo-cal com resíduo de britagem e solo-cal com cinza volante, ensaiados com 90 dias de cura. Observa-se claramente a diferença do efeito da adição de finos, com diferentes potenciais de reatividade, na resistência à compressão simples das misturas.

Ainda na figura 4.35, pode-se observar a existência de relações distintas e únicas para as misturas estudadas. Comparando as equações obtidas de cada material, nota-se que a resistência à compressão simples tem um relacionamento direto com a relação η/C_{av} (ajustado), tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito da inserção de RBR e CV.

As reações entre a cal e a CV mostrou-se muito mais efetiva que as reações entre a cal e o RBR, principalmente por tratar-se de materiais com mineralogia e potenciais de reatividade distintos. Entretanto, podemos utilizar a mesma potência de compatibilização da variação da resistência à compressão simples com a relação vazio/cal para as distintas misturas, considerando as faixas de valores utilizadas neste trabalho.

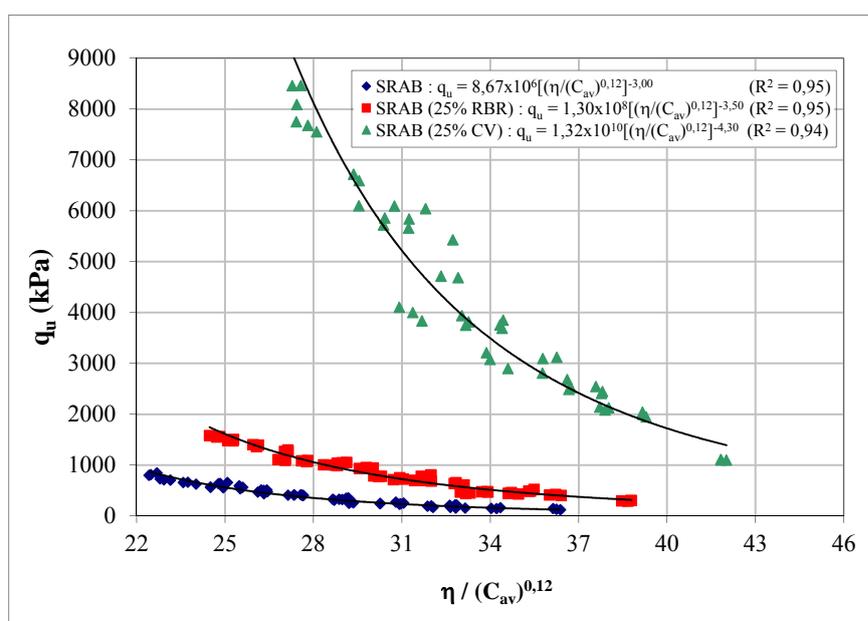


Figura 4.35: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado dos três compósitos utilizados para 90 dias de cura

4.3 MEDIDAS DE SUCCÃO MATRICIAL

Nas tabelas A1 a A3, do apêndice A são apresentados os resultados das medidas de sucção matricial feitas sobre o SRAB-CAL, nas tabelas A4 a A6, do apêndice A são apresentados os resultados para o SRAB-25%RBR-CAL, os dados de sucção referente as amostras com cinza volante encontram-se no trabalho realizado por Dalla Rosa (2009a), onde:

S = grau de saturação de moldagem;

Sf = grau de saturação após a imersão do corpo-de-prova por 24 horas;

Em relação às tabelas A1 a A6, referentes a todos os corpos-de-prova ensaiados nesta pesquisa, verifica-se que o grau de saturação de moldagem variou de 50% até 80%. O grau de saturação obtido após a imersão não apresentou variação significativa em relação ao índice de vazios, girando em torno de 80% para todos os corpos-de-prova, incluindo os corpos-de-prova com adição de RBR.

Sabe-se que variações no índice de vazios e teor de umidade de moldagem afetam a sucção (FEUERHARMEL, 2003), porém os resultados obtidos não apresentaram correlação com esses parâmetros.

De acordo com Cruz (2001), em geral, os solos compactados próximos ao teor ótimo de umidade apresentam grau de saturação variando entre 70% e 90%, com valores de sucção compreendidos entre 0 kPa e 1000 kPa. O autor também apresenta medidas de sucção de treze solos residuais lateríticos compactados, para os quais encontrou valores de sucção variando de 30 kPa até 250 kPa. Da mesma forma, Marinho e Silva (2001) citam que a maioria dos solos compactados apresentam, no teor ótimo de umidade, sucções variando de 50 kPa a 300 kPa.

Em função do elevado grau de saturação, obtido após a imersão dos corpos-de-prova por 24 horas antes de serem submetidos à compressão simples (em média 80%), valores de sucção abaixo de 100 kPa eram esperados para todos os corpos-de-prova. Isso ocorreu para 90% das amostras. Como o processo de imersão dos corpos-de-prova por 24 horas se mostrou satisfatório no aumento e uniformização do grau de saturação das amostras, acredita-se também que os corpos-de-prova não apresentaram grandes variações na sucção, permitindo, assim, desconsiderar a sucção como mais uma variável nas análises das variáveis investigadas.

4.4 ENSAIOS TRIAXIAIS

A seguir serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios de compressão triaxial das três misturas (SRAB-CAL, SRAB-RBR-CAL e SRAB-CV-CAL) selecionadas a partir dos resultados dos ensaios de compressão simples, bem como serão abordados aspectos relacionados às condições de execução dos ensaios.

A partir das curvas apresentadas nas figuras 4.14, 4.30 e 4.34, foram selecionados os pontos a serem avaliados. As relações vazios/cal escolhidas para análise foram: 21, 26, 30 e 35, para o solo-cal; 26, 30 e 35, para o solo-cal com resíduo de britagem e 30, 35 e 40, para o solo-cal com cinza volante. A figura 4.36 apresenta as curvas de resistência à compressão simples versus relação vazios/cal para os três compósitos estudados curados por 90 dias e a posição dos pontos escolhidos.

Para cada ponto em estudo foram ensaiadas amostras com 28, 90 e 360 dias de cura, com exceção das amostras com cinza volante, as quais foram ensaiadas apenas para 28 e 90 dias de cura. Os resultados e as características de cada ponto de moldagem serão discutidos nos itens a seguir.

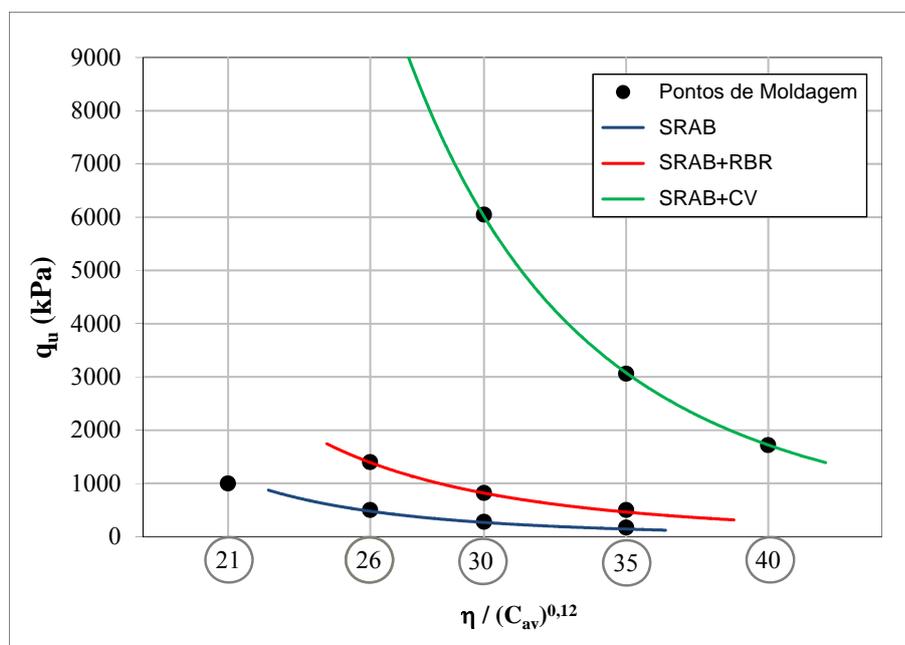


Figura 4.36: posição dos pontos de moldagem escolhidos para os ensaios de compressão triaxial

4.4.1 Variação do Parâmetro B de Poro-pressão

Neste trabalho utilizou-se para controle do grau de saturação da amostra a ser cisalhada o parâmetro B (SKEMPTON, 1954). Este parâmetro é definido pela razão entre a variação da poro-pressão e a correspondente variação da tensão total aplicada em um carregamento isotrópico e não-drenado.

Para solos em geral, quando a amostra encontra-se saturada, obtém-se B igual ou muito próximo da unidade, ou seja, praticamente toda tensão aplicada se transforma em excesso de poro-pressão. Entretanto, quando a compressibilidade do solo se torna da mesma ordem de grandeza da compressibilidade da água, como é o caso de solos muito densos, solos cimentados ou rochas brandas, o valor do parâmetro B, na condição de saturação, é menor que a unidade. A tabela 4.5, adaptada de Lambe e Whitman (1979), ilustra alguns exemplos de valores para o parâmetro B.

Tabela 4.5: valores típicos para o parâmetro B (adaptado de LAMBE; WHITMAN, 1979)

MATERIAL	S (%)	B
Arenito	100	0,286
Granito	100	0,342
Concreto	100	0,582
Areia Densa	100	0,9921
Areia Fofa	100	0,9984
Argila de Londres	100	0,9981

Na presente pesquisa, a condição de saturação das amostras era arbitrariamente alcançada quando duas medições sucessivas do parâmetro B não indicavam variação superior a 5%. Para o nível de 450 kPa de contra-pressão, o valor de B variou de 0,75 a 0,90 para todas as amostras e compósitos estudados. Foi observado que o parâmetro B apresenta valores menores que a unidade, tanto menor quanto maior for a cimentação induzida pelos resíduos ou pelo tempo de cura.

Carraro (1997), ao estudar o comportamento de misturas compactadas de solo (arenito Botucatu), cal de carbureto e cinza volante, obteve valores para B menores que a unidade. Por exemplo, para as misturas com 4% de cal de carbureto obteve um valor médio para B de 0,71

e para as misturas com 4% de cal de carbureto mais 25% de cinza volante, obteve um valor médio para B igual a 0,65. Cabe salientar que as amostras foram ensaiadas para um nível máximo de 350 kPa de contra-pressão devido a limitações do equipamento utilizado pelo autor.

Prietto (1996) apresenta valores para o parâmetro B medidos no mesmo tipo de solo utilizado neste trabalho, em função dos diferentes teores de cimento utilizados. O autor verificou que B diminuiu linearmente com o aumento da cimentação. O autor obteve, para os teores de 3% e 5% de cimento, valores de B da ordem de 0,85 e 0,70 respectivamente, na condição de saturação completa.

Os exemplos acima citados sugerem que a faixa de valores obtidos neste trabalho para o parâmetro B, apesar de abaixo da unidade, indicam que um alto grau de saturação foi obtido, reduzindo ao menor valor possível a tensão de sucção presente nos corpos-de-prova antes de serem submetidos ao cisalhamento.

4.4.2 Solo-Cal

A tabela B.1 do apêndice “B”, apresenta as características de todos os corpos-de-prova ensaiados para o solo tratado somente com cal, para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. A partir destes dados, foram elaboradas as figuras 4.39 a 4.65, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento solo-cal em estudo são evidenciados. Um resumo dos corpos-de-prova ensaiados segue abaixo na tabela 4.6.

Tabela 4.6: programa de ensaios triaxiais em SRAB-CAL

Relação $\eta/(C_{av})^{0,12}$	Teor de Cal (%)	Teor Vol. de Cal (%)	Porosidade (%)	Tensão Confinante (kPa)	Tempo de Cura (dias)
21	10	6,92	26,49	20	28, 90, 360
26	9	5,80	32,11	20	28, 90, 360
30	5	3,23	34,53	20	28, 90, 360
35	7	3,98	41,31	20, 200, 400	28, 90, 360

4.4.2.1 Comportamento Tensão-Deformação x Relação $\eta/(C_{av})^{0,12}$

As figuras 4.37, 4.39 e 4.41 apresentam a tensão desvio versus deformação axial com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, para diferentes valores de relação vazios/cal. As figuras 4.38, 4.40 e 4.42 apresentam a deformação volumétrica versus deformação axial para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Os resultados são referentes às tensões de confinamento de 20kPa.

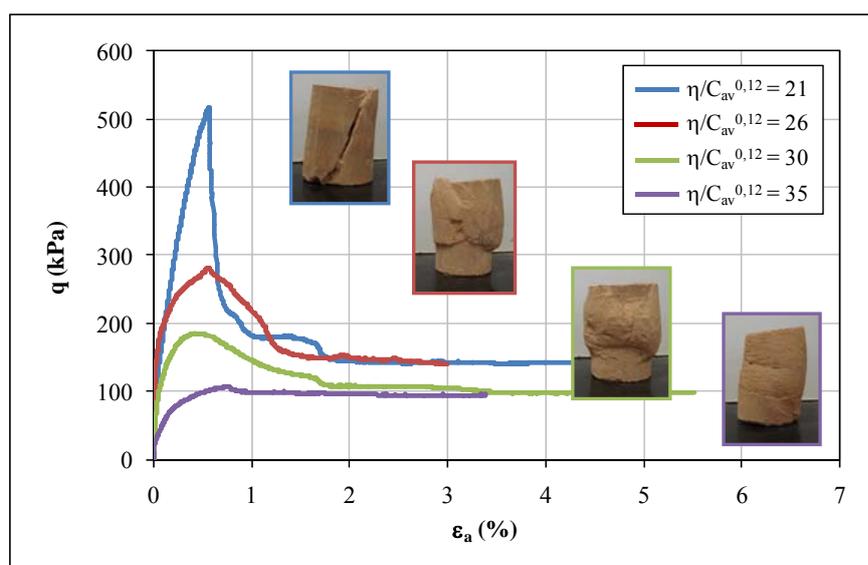


Figura 4.37: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (28 dias de cura)

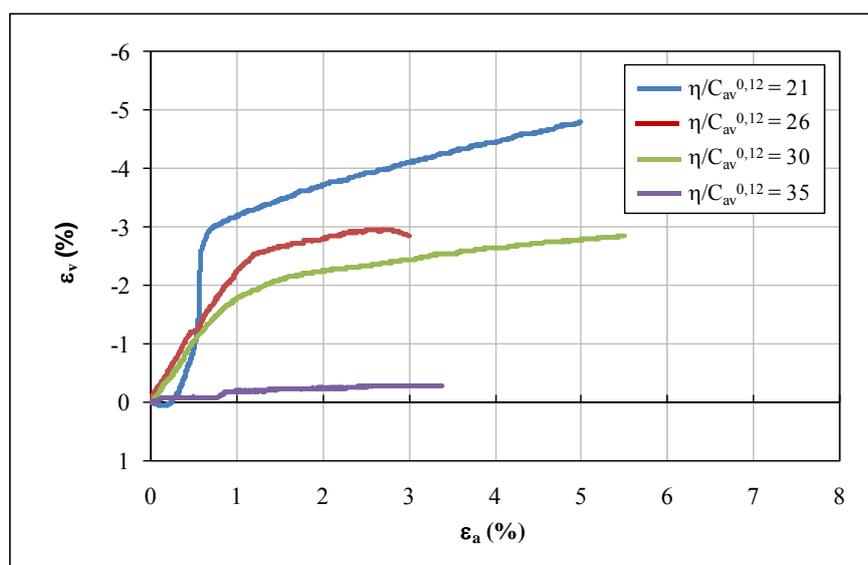


Figura 4.38: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (28 dias de cura)

Na figura 4.37, resultados para 28 dias de cura, nota-se que todos os ensaios apresentaram pico de ruptura, sendo mais pronunciado nas amostras com menores relações vazios/cal. Na figura 4.38, resultados para 28 dias de cura, observa-se que todos os ensaios apresentaram mínima compressão inicial seguida de uma forte expansão que, após a ruptura, diminuiu o seu gradiente tendendo, no final, para um valor constante.

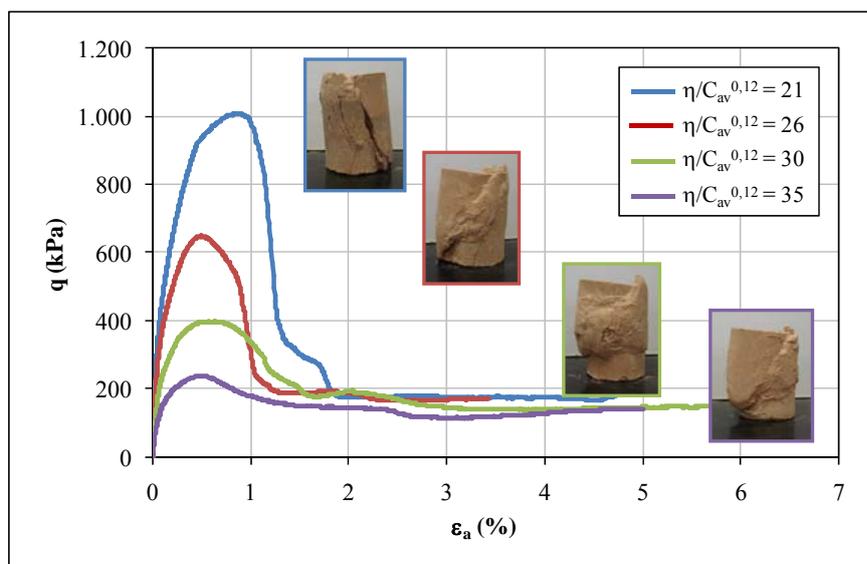


Figura 4.39: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (90 dias de cura)

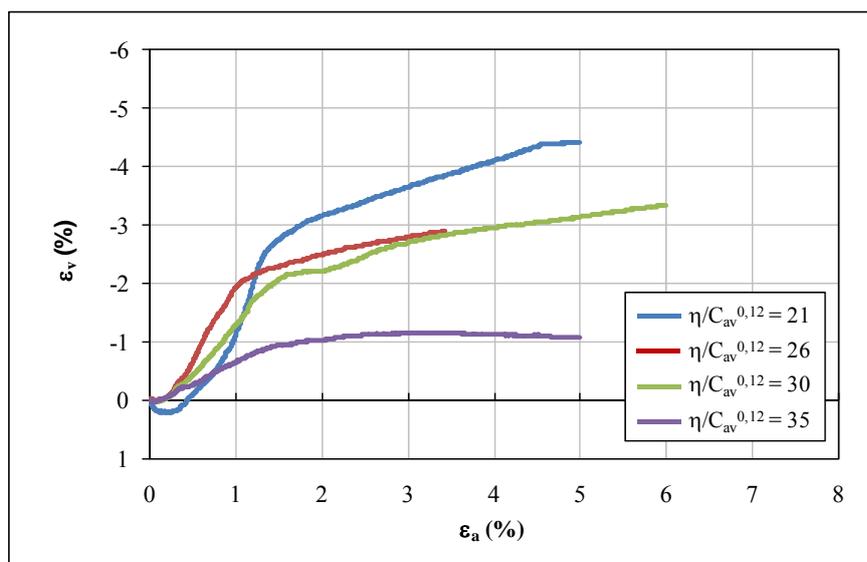


Figura 4.40: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (90 dias de cura)

Nas figuras 4.41 e 4.42, resultados para 90 dias de cura, assim como nos ensaios com 28 dias de cura, todas as amostras apresentaram pico de ruptura, sendo mais pronunciado nas amostras com menores valores de relações vazios/cal. Quanto a variação volumétrica observa-se também que todos os ensaios apresentaram pequena compressão inicial seguida de uma forte expansão que, após a ruptura, diminuiu o seu gradiente tendendo, no final, para um valor constante.

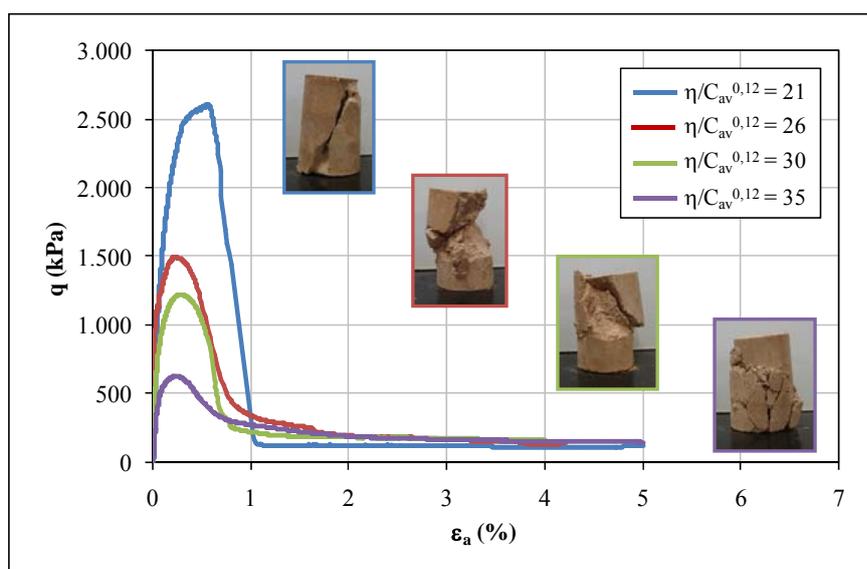


Figura 4.41: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (360 dias de cura)

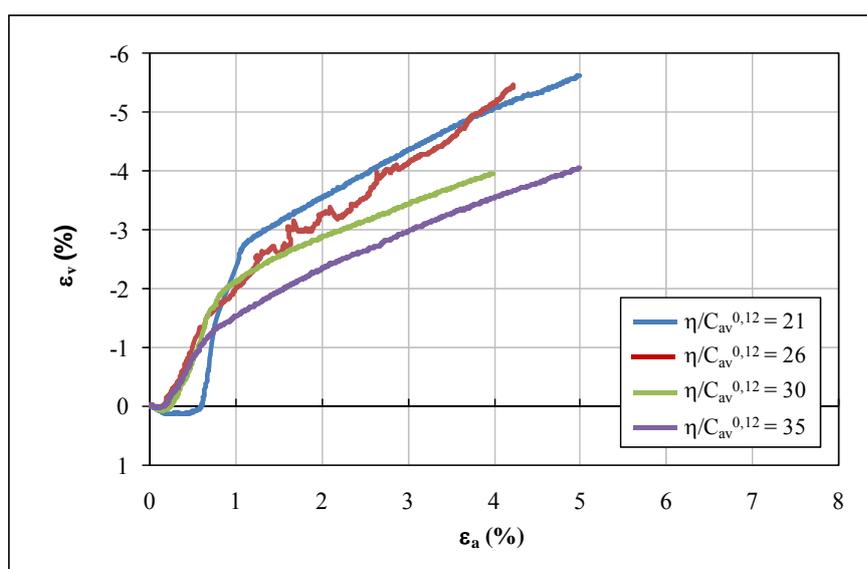


Figura 4.42: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (360 dias de cura)

Nas figuras 4.41 e 4.42, resultados para 360 dias de cura, assim como nos ensaios com 28 e 90 dias de cura, todas as amostras apresentaram pico de ruptura, sendo mais pronunciado nas amostras com menores valores de relações vazios/cal. Quanto a variação volumétrica observa-se também que todos os ensaios apresentaram compressão inicial seguida de uma forte expansão que, após a ruptura, diminuiu o seu gradiente tendendo, no final, para um valor constante.

As curvas tensão-deformação apresentadas identificam uma tendência geral. Um exame detalhado destas curvas mostra que, de forma geral, o comportamento tensão-deformação pode ser descrito como sendo muito rígido inicialmente, aparentemente linear, até um ponto de plastificação bem definido, a partir do qual o solo experimenta deformações plásticas crescentes até a ruptura. O comportamento pós-ruptura caracteriza-se por uma queda da tensão desvio, mais intensa e rápida nas amostras de maior tempo de cura e menor relação vazios/cal, e pela existência de um estado último, ao que tudo indica independente do grau de cimentação, onde a tensão desvio se aproxima de um valor estável com as deformações axiais crescentes.

4.4.2.2 Efeito do Nível de Tensões Efetivas e Parâmetros de Resistência

As figuras 4.43, 4.45 e 4.47 apresentam o comportamento tensão desvio versus deformação axial com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, para um mesmo valor de relação vazios/cal, apresentado na forma de porosidade/teor volumétrico. As figuras 4.44, 4.46 e 4.48 apresentam a deformação volumétrica versus deformação axial para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Os resultados são referentes à $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ e tensões de confinamento de 20kPa, 200kPa e 400kPa.

Na figura 4.43, resultados para 28 dias de cura, nota-se que somente o ensaio com 20kPa de confinamento efetivo de ensaio apresentou pico de ruptura, os demais ensaios não apresentaram ruptura definida com o aumento da tensão confinante. Na figura 4.44, resultados para 28 dias de cura, observa-se que somente o ensaio com 20kPa apresentou mínima compressão inicial seguida de uma expansão, os demais apresentaram somente compressão.

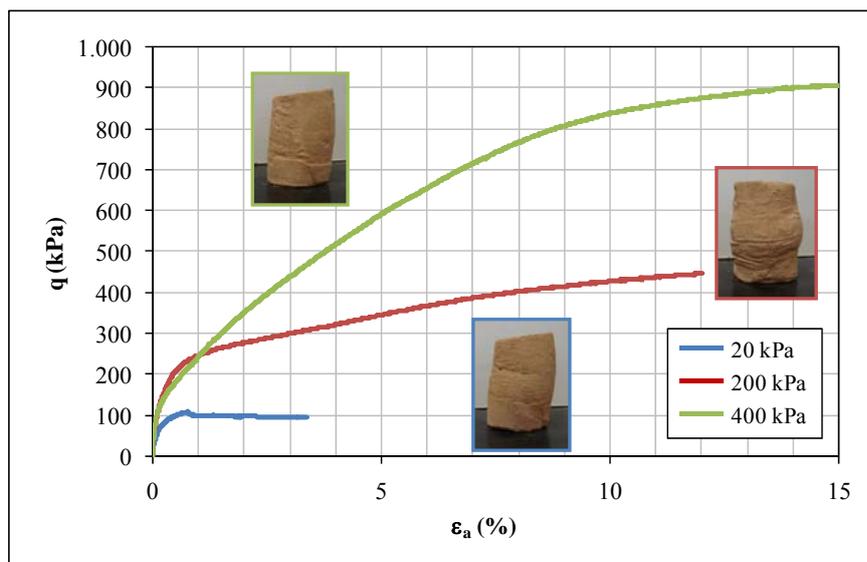


Figura 4.43: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 28 dias de cura)

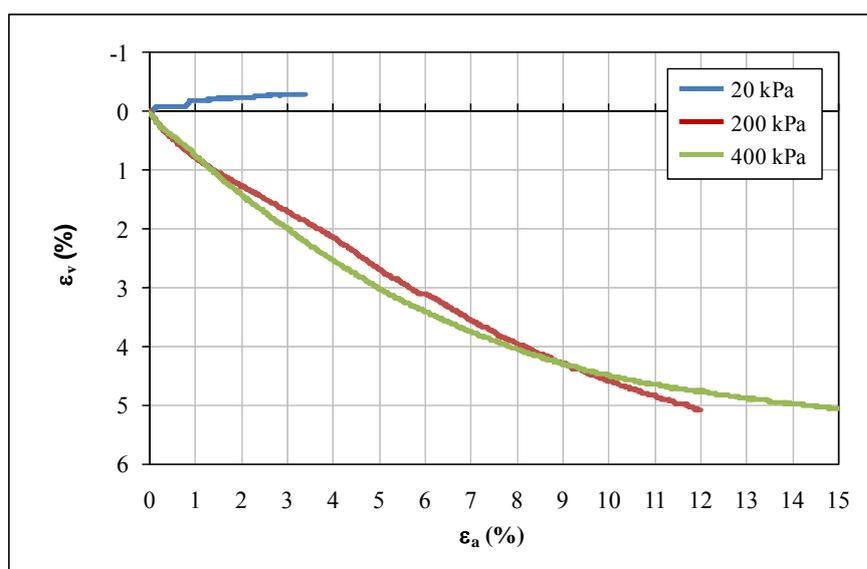


Figura 4.44: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 28 dias de cura)

Na figura 4.45, resultados para 90 dias de cura, nota-se também que somente o ensaio com 20kPa de confinamento efetivo de ensaio apresentou pico de ruptura, os demais ensaios não apresentaram ruptura definida com o aumento da tensão confinante. Na figura 4.46, resultados para 90 dias de cura, observa-se também que somente o ensaio com 20kPa apresentou compressão inicial seguida de uma forte expansão, os demais apresentaram somente compressão.

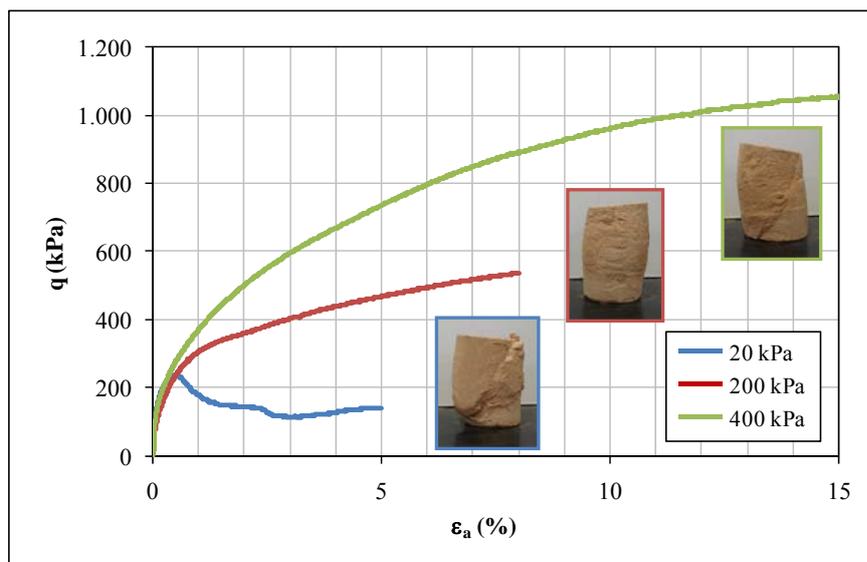


Figura 4.45: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 90 dias de cura)

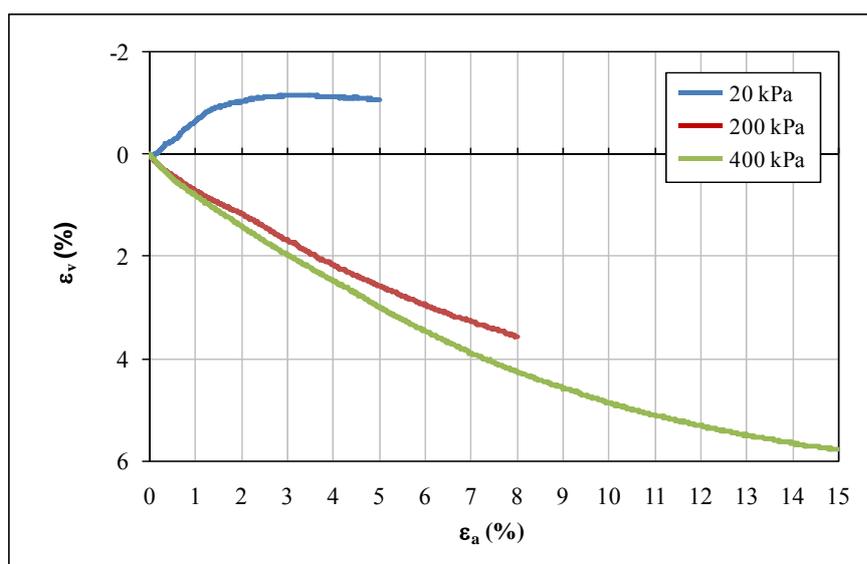


Figura 4.46: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 90 dias de cura)

Na figura 4.47, resultados para 360 dias de cura, ao contrário das amostras com 28 e 90 dias de cura, nota-se a presença de pico de ruptura em todos os ensaios, sendo menos pronunciado na amostra com 400kPa. Na figura 4.48, resultados para 360 dias de cura, o ensaio com 20kPa apresentou uma pequena compressão inicial seguida de uma forte expansão, nos ensaios com 200kPa e 400kPa apresentaram somente compressão, menos pronunciado no ensaio com 200kPa.

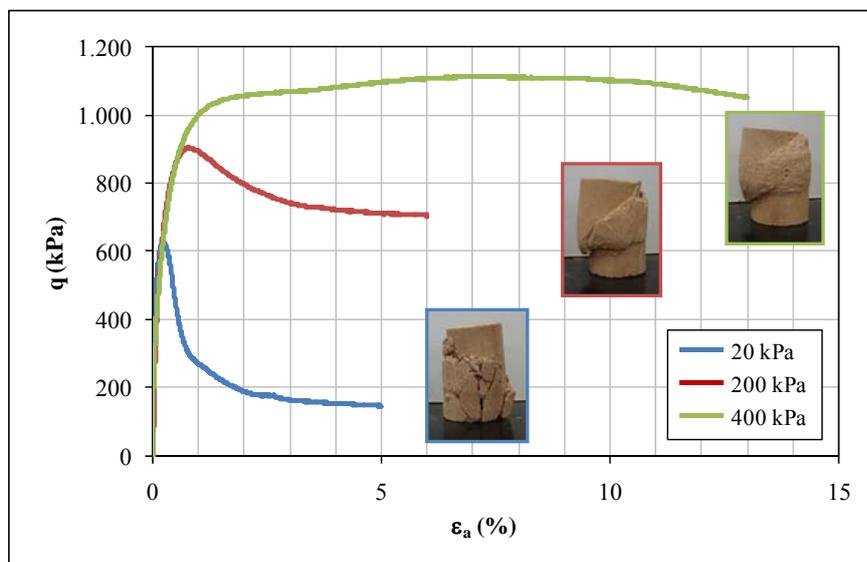


Figura 4.47: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 360 dias de cura)

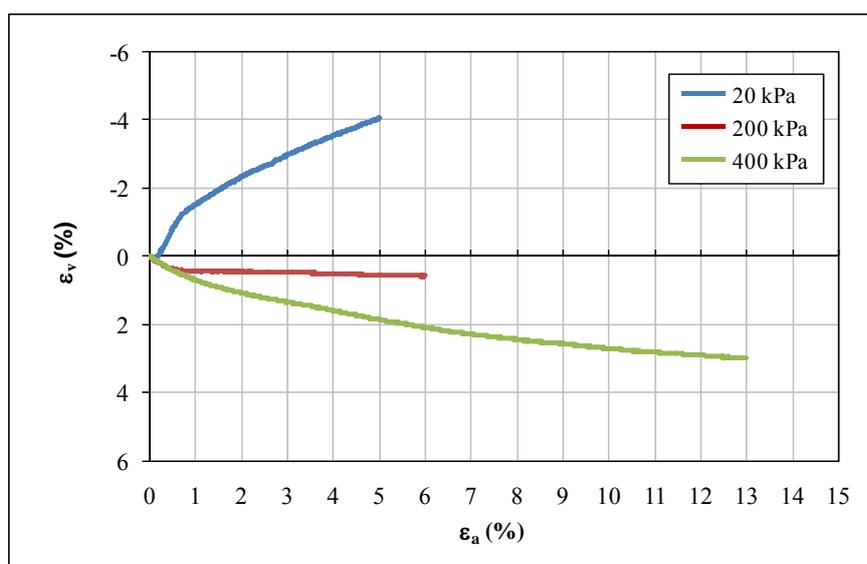


Figura 4.48: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-CAL 360 dias de cura)

Pode-se observar com as curvas tensão-deformação, do solo-cal em estudo, que apesar de ganhos expressivos de resistência com o tempo de cura, as misturas com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$, com exceção dos ensaios de 360 dias de cura, não apresentaram ruptura definida para tensões de confinamento de 200kPa e 400kPa, isso mostra a fragilidade da cimentação existente entre o solo residual de arenito Botucatu e a cal para estes níveis de tensões.

Leroueil e Vaughan (1990), afirmam que o comportamento de materiais estruturados em compressão triaxial, quando submetidos a tensões confinantes baixas, apresenta como características, uma resistência de pico seguida de deformações do tipo “softening”, como as observadas para um solo denso e não coesivo, seguido de notável deformação de expansão. Sob altas tensões de confinamento, o comportamento observado se apresenta de forma dúctil, podendo a plastificação ocorrer ainda durante a fase de aplicação do confinamento do solo. Neste caso, a máxima resistência é alcançada somente após grandes deformações, acompanhado de considerável contração do material.

Da mesma forma, Cecconi et al. (1998) também definem que o comportamento destes materiais está diretamente ligado ao nível de tensões de confinamento, sendo que quando submetidos à compressão triaxial sob baixas tensões confinantes, estes materiais tendem a se comportar como rochas. Do contrário, estes mesmos materiais submetidos ao cisalhamento sob altas tensões confinantes, comportam-se similarmente a um solo. Ainda, os autores afirmam que a região onde estes materiais comportam-se como rochas é sempre dependente da trajetória de tensões, porém, a amplitude desta região é controlada mais pelas ligações cimentantes do que pelo índice de vazios inicial, estado e história de tensões como no caso de solos sedimentares.

Assim, seguindo esta mesma analogia, Coop e Atkinson (1993) definem três classes de comportamento de solos estruturados durante o ensaio de compressão triaxial: (A) ocorre quando sob carregamento isotrópico é alcançada a tensão de plastificação do solo e posterior cisalhamento da amostra, provocará um comportamento muito similar ao do mesmo solo na condição desestruturada; (B) ocorre a tensões de confinamento intermediárias, tal que a estrutura cimentante do material ainda se encontra intacta antes do início do ensaio propriamente dito, nessa classe, a plastificação ocorre durante a fase de cisalhamento da amostra e a resistência de pico é governada pelo comportamento friccional do solo não cimentado; (C) e, por fim, a terceira classe para amostras que são cisalhadas com baixas tensões de confinamento, na qual, a resistência de pico ocorre a pequenas deformações, alcançando um estado fora de região que limita o estado de tensões para o solo não cimentado. A figura 4.49 mostra de forma esquemática o comportamento idealizado pelos autores e que foi descrito acima, para solos estruturados onde a parcela cimentação está mais presente.

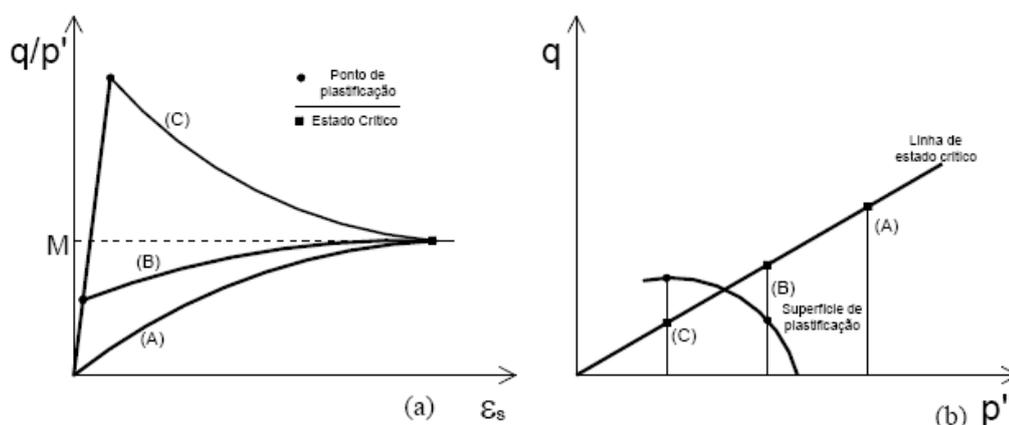


Figura 4.49: comportamento idealizado para solos estruturados onde a parcela coesiva é dominante: (a) comportamento tensão-deformação e (b) trajetória de tensões (adaptado de COOP; ATKINSON, 1993)

No caso onde o comportamento friccional se apresenta com maior influência, Cuccovillo e Coop (1999) demonstram que este padrão de comportamento segue o esquema apresentado na figura 4.50. Para estes materiais, os autores afirmam que pode ser observado pico de resistência e um comportamento tensão-deformação linear quando amostras são cisalhadas sob baixas tensões confinantes (A). Sob médias tensões, poderia ser observado um comportamento linear no trecho inicial da curva tensão-deformação (B1) de forma que após a plastificação, este comportamento seria não linear, ou mesmo não linear em todo o seu trecho (B2), onde em ambos os casos a resistência de pico é diretamente governada pela dilatância do material. E por fim, (C) caso onde sob altas tensões confinantes, onde se daria a compressão ou mesmo a quebra de partículas.

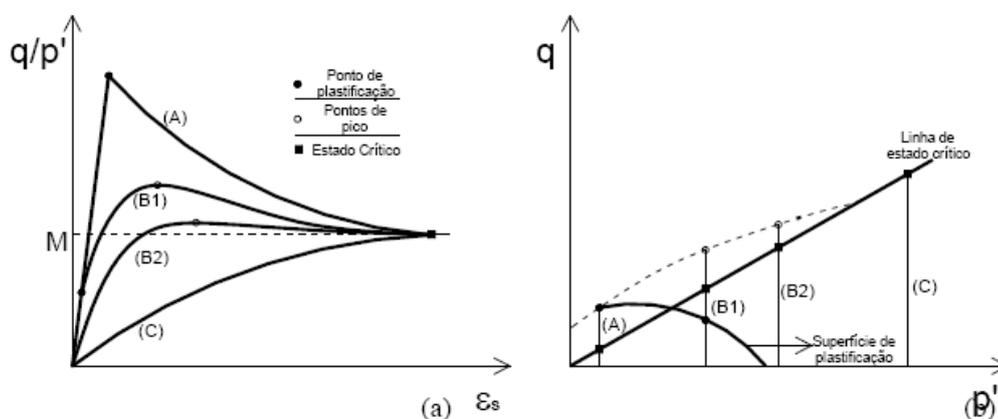


Figura 4.50: comportamento idealizado para solos estruturados onde a parcela friccional é preponderante: (a) comportamento tensão-deformação e (b) trajetória de tensões (adaptado de CUCCOVILLO; COOP, 1999)

Na figura 4.51, são apresentadas as envoltórias de ruptura no espaço p' versus q , obtidas para 28, 90 e 360 dias de cura e $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$.

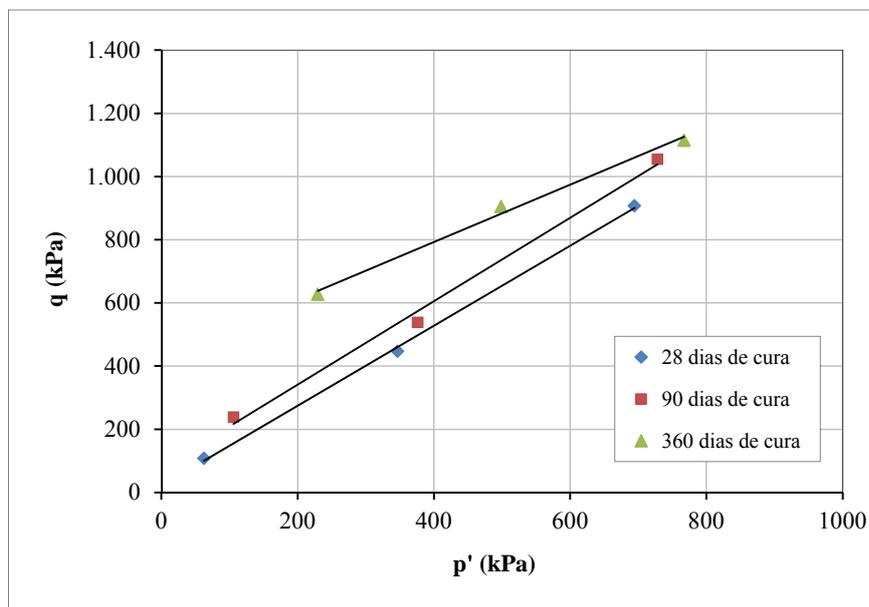


Figura 4.51: envoltórias de ruptura do SRAB-CAL para 28, 90 e 360 dias de cura e $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$

Para as amostras com 28 dias de cura foi obtido um intercepto coesivo de 10kPa e um ângulo de atrito de $31,6^\circ$, para 90 dias de cura foi obtido um intercepto coesivo de 37,6kPa e um ângulo de atrito de $32,8^\circ$ e para 360 dias de cura foi obtido um intercepto coesivo de 203,2kPa e um ângulo de atrito de $23,2^\circ$. Observa-se que, para o nível de tensões estudado e $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$, o tempo de cura influencia mais significativamente os valores do intercepto coesivo do que os valores de ângulo de atrito.

4.4.2.3 Tensão Confinada x Tensão Não-Confinada

Na figura 4.52 são apresentadas as curvas tensão desvio versus vazios/cal, definido pela relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado, obtidas a partir das tensões desvio máximas sob confinamento efetivo de 20kPa e tempos de cura de 28, 90 e 360 dias. Ainda na figura 4.52 são apresentadas as curvas resistência à compressão simples versus vazios/cal para 90 e 360 dias de cura. A elaboração destas curvas permitiu avaliar a influência das tensões de confinamento sobre a previsibilidade da resistência de um solo tratado com cal.

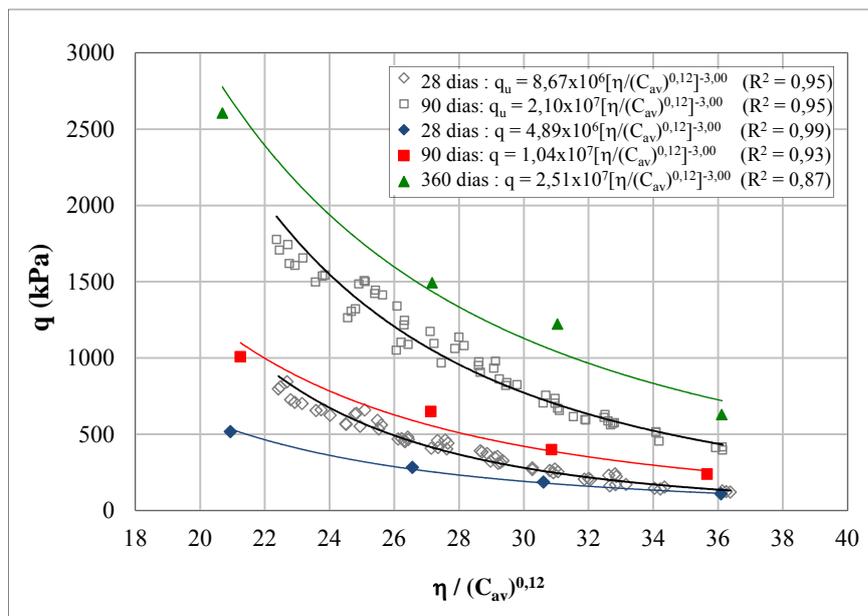


Figura 4.52: resistência confinada à 20kPa e não confinada versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-CAL para 28, 90 e 360 dias de cura

Observa-se nas curvas o ganho de resistência, para amostras de mesma relação vazios/cal, com o aumento da tensão confinante efetiva e com o aumento do tempo de cura. Para valores baixos de vazios/cal as reações pozolânicas entre a cal e solo são mais efetivas, já para valores altos de vazios/cal as curvas tendem ao paralelismo, pois a fraca cimentação inerente aos valores elevados de vazios/cal faz com que uma parte da resistência seja devida à componente friccional.

Ainda na figura 4.52, pode-se observar a existência de relações distintas e únicas para as tendências de cada tempo de cura e ensaio (confinado ou não confinado). Comparando as equações obtidas em cada tempo de cura, nota-se que as resistências têm um relacionamento direto com a relação η/C_{av} (ajustado), tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito do tempo de cura e confinamento. Portanto, uma relação única pode ser conseguida relacionando a máxima tensão desvio com a porosidade, com o teor volumétrico de cal e com o tempo de cura. Na figura 4.53 é apresentada essa relação obtida com os ensaios confinados comparando com os ensaios não confinados. Pode-se observar o efeito da tensão confinante com o tempo de cura.

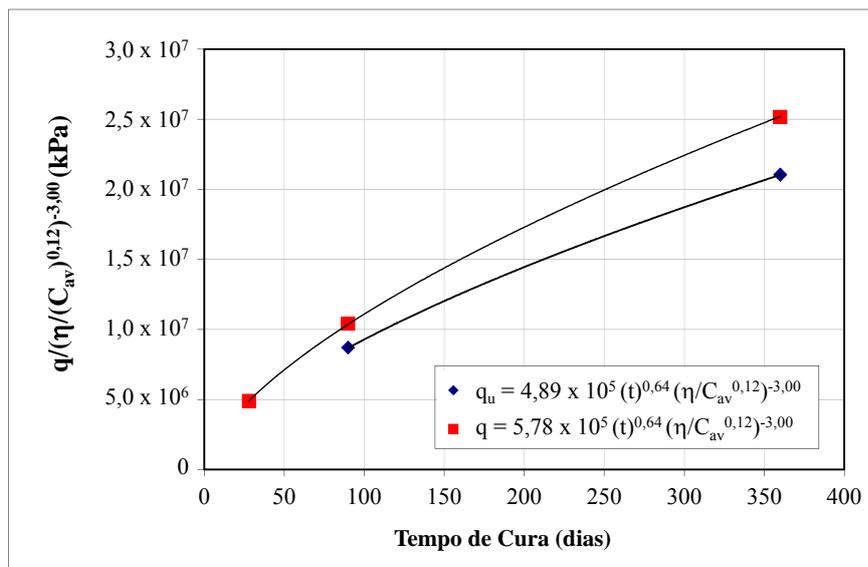


Figura 4.53: variação da resistência confinada à 20kPa e não confinada em relação a porosidade, teor de cal e tempo de cura do SRAB-CAL

Os resultados indicam que o tempo de cura exerce papel fundamental no valor máximo registrado para a tensão desvio destas misturas. Esta observação está em conformidade com diversos trabalhos encontrados na literatura que salientam a importância desta variável nos valores de resistência. Entretanto, não existe consenso a respeito do modelo de inter-relação entre essas variáveis. Alguns autores apontam para uma relação linear entre a resistência à compressão simples e o logaritmo do tempo de cura em misturas solo-cal (NÚÑEZ, 1999; INGLES; METCALF, 1972). Para Nardi (1975) citado por Carraro (1997), que estudou a estabilização de uma areia com cal hidratada e cinza volante para idades de cura de até 28 dias, a relação linear aritmética entre as variáveis pareceu ser mais adequada. Da análise dos resultados apresentados por Carraro (1997), de um solo residual de arenito Botucatu estabilizado com cal hidratada e cinza volante, verifica-se que a relação linear é válida para períodos de cura de até 90 dias. Entretanto, o incremento mais substancial observado na taxa de variação dos valores médios da resistência à compressão simples com o tempo de cura ocorre, precisamente, nas idades mais avançadas (entre 90 e 180 dias de cura). Autores ressaltam que as resistências desenvolvidas através de mecanismos de estabilização pozolânica são realmente lentas e, além disso, desenvolvem-se por períodos muito longos. De qualquer forma, devido à complexidade envolvida em solos tratados com cal, torna-se difícil a generalização de um único modelo de correlação adequado aos mais diversos tipos de materiais.

4.4.2.4 Análise da Rigidez

Nas figuras 4.54, 4.55 e 4.56, são apresentadas as variações dos módulos secantes com as deformações axiais, para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, para valores distintos de vazios/cal. Observa-se que a rigidez aumenta com a diminuição da relação vazios/cal, também pode-se notar que o módulo secante para deformações axiais acima de 1% tendem a valores próximos, independente do valor da relação vazios/cal.

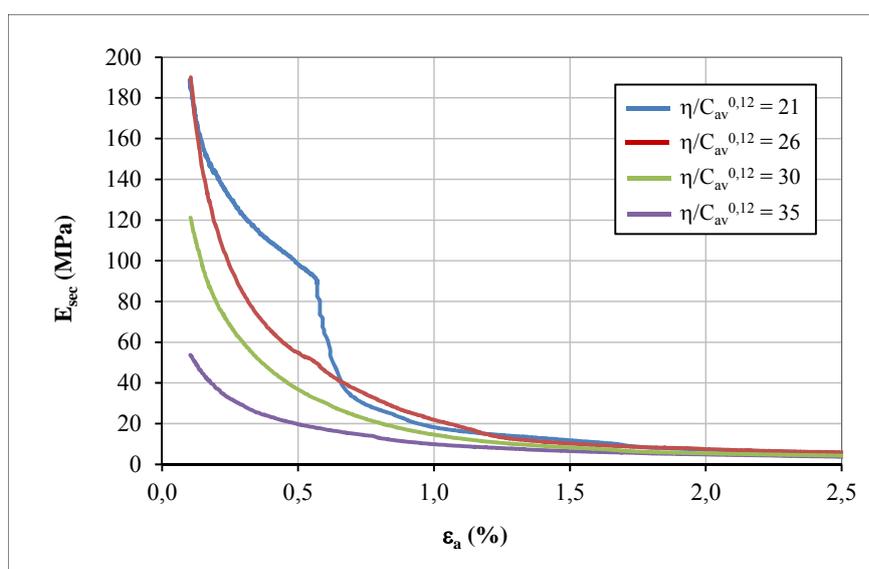


Figura 4.54: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (28 dias de cura)

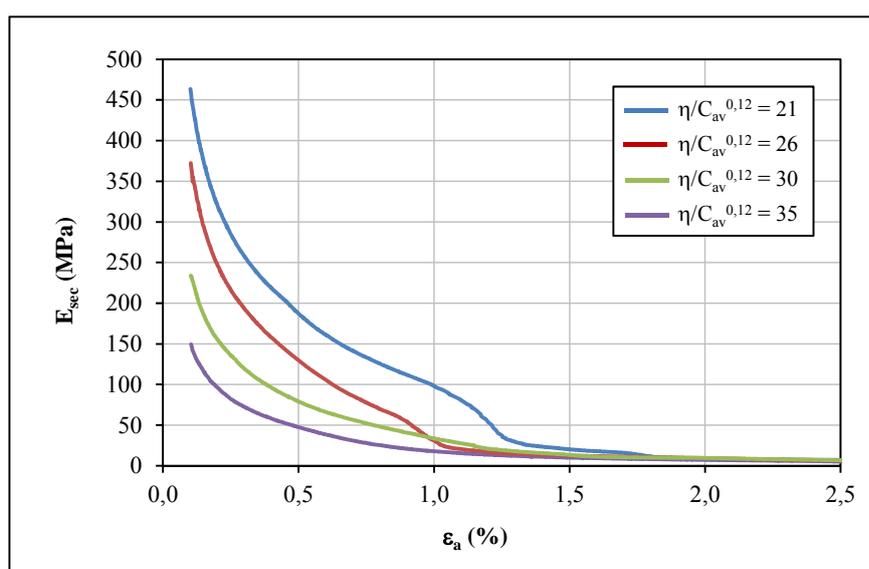


Figura 4.55: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (90 dias de cura)

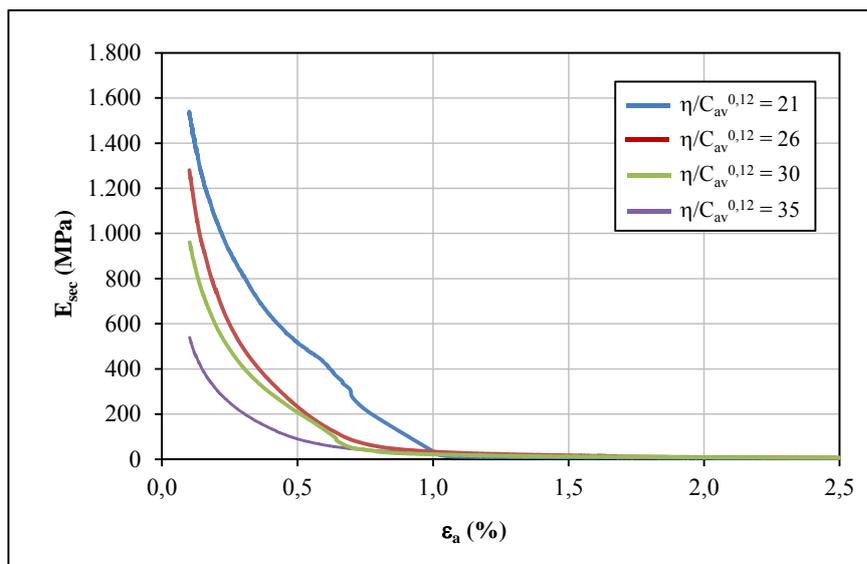


Figura 4.56: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-CAL (360 dias de cura)

O tempo de cura influenciou consideravelmente a rigidez das amostras. Para $\eta/C_{av}^{0,12} = 21$, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 142% de 28 para 90 dias de cura e aumentou 237% de 90 para 360 dias de cura. Para $\eta/C_{av}^{0,12} = 26$, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 97% de 28 para 90 dias de cura e aumentou 238% de 90 para 360 dias de cura. Para $\eta/C_{av}^{0,12} = 30$, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 91% de 28 para 90 dias de cura e aumentou 313% de 90 para 360 dias de cura. Para $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 172% de 28 para 90 dias de cura e aumentou 246% de 90 para 360 dias de cura

Nas figuras 4.57, 4.58 e 4.59, são apresentadas as variações dos módulos secantes com as deformações axiais, para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ e 20, 200 e 400kPa de tensões de confinamento efetivo de ensaio.

Observa-se que o tempo de cura tem uma influência significativa no módulo secante a 0,1% de deformação, para este nível de relação vazios/cal. Para 20kPa de confinamento efetivo de ensaios, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 172% de 28 para 90 dias de cura e 266% de 90 para 360 dias de cura. Para 200kPa, o módulo secante aumentou 13% de 28 para 90 dias de cura e 281% de 90 para 360 dias de cura. Para 400kPa, o módulo secante aumentou 37% de 28 para 90 dias de cura e 206% de 90 para 360 dias de cura.

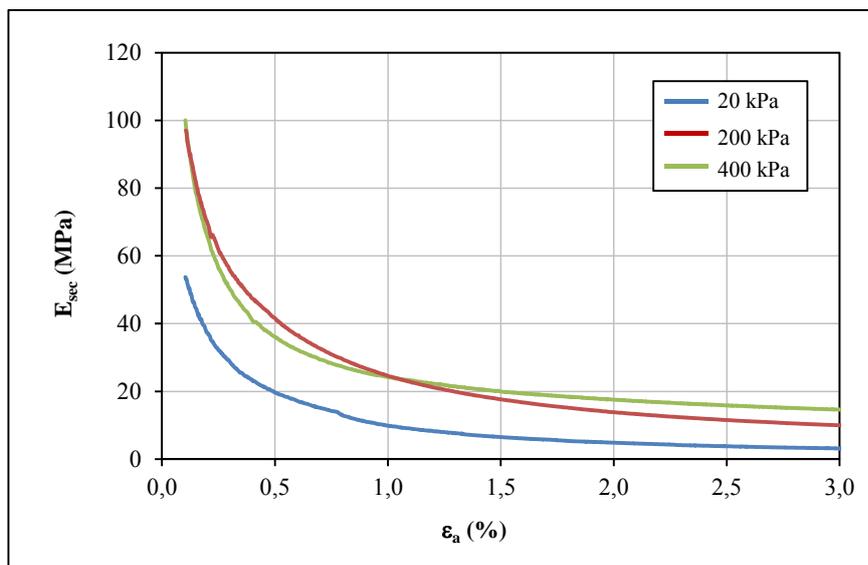


Figura 4.57: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 28 dias de cura)

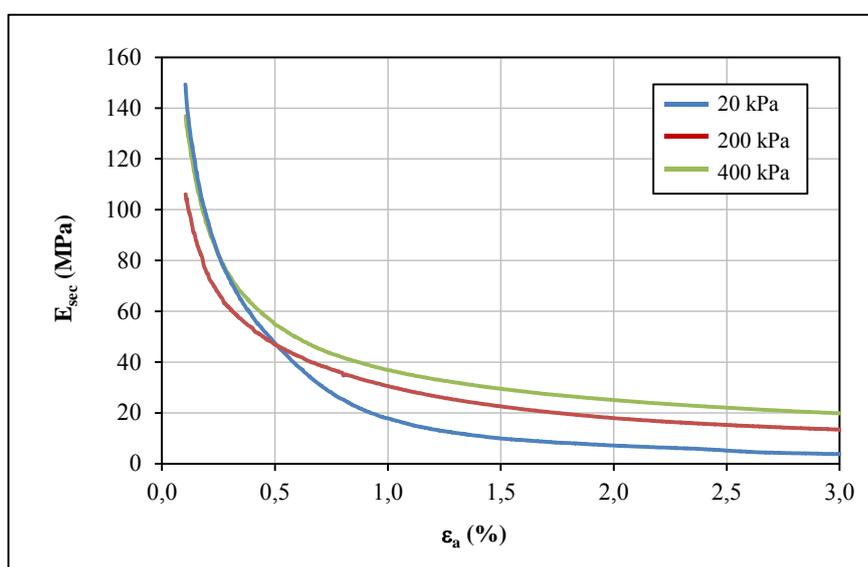


Figura 4.58: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 90 dias de cura)

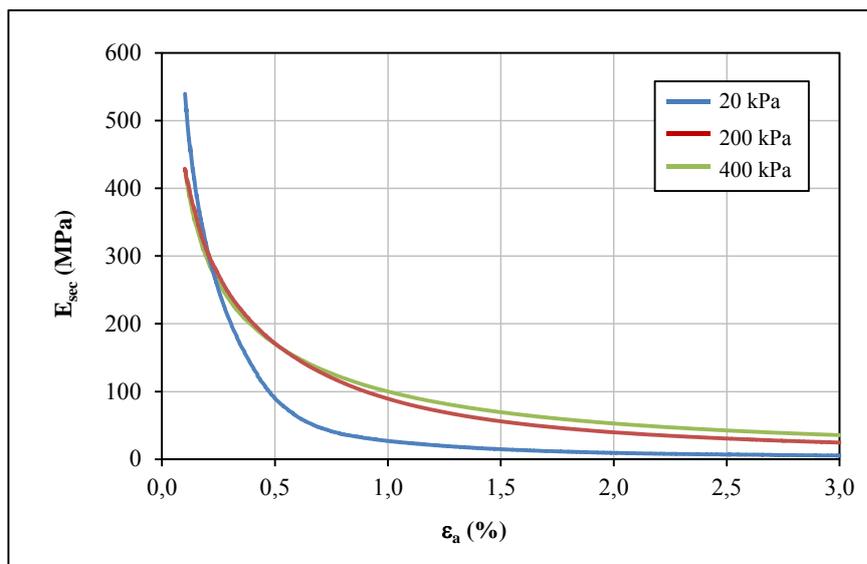


Figura 4.59: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 360 dias de cura)

Observa-se nas figuras 4.58 e 4.59 que o aumento da tensão confinante efetiva de ensaio diminuiu a rigidez das amostras, para deformações axiais menores que 0,5%, ao contrário das amostras com 28 dias de cura, apresentadas na figura 4.57. Este comportamento está associado ao início da degradação da cimentação durante a fase de adensamento.

4.4.2.5 Comportamento Tensão x Dilatância

Nas figuras 4.60 e 4.61, é apresentado o comportamento tensão-dilatância para 28 e 360 dias de cura, respectivamente, para valores distintos de vazios/cal. Pode-se constatar que para a mesma tensão de confinamento (20kPa), quanto menor a relação vazios/cal, maior é a razão q/p' e maior a dilatância máxima atingida pelas mesmas.

Observa-se, para este nível de tensões, que todas as amostras apresentaram curvas dilatantes típicas de solos estruturados, onde inicialmente no plano $q/p' \times \delta\epsilon_v/\delta\epsilon_s$ forma-se um trecho inicial vertical, considerado elástico (aumento de q/p' e $\delta\epsilon_v/\delta\epsilon_s$ constante), após este trecho temos a formação de um patamar horizontal, considerado zona de plastificação (q/p' constante e $\delta\epsilon_v/\delta\epsilon_s$ varia), atingindo uma dilatância máxima e no trecho final ocorre uma queda na razão q/p' onde há uma variação da dilatância do material, tendendo atingir gradualmente seu estado último ou crítico, onde $\delta\epsilon_v/\delta\epsilon_s = 0$.

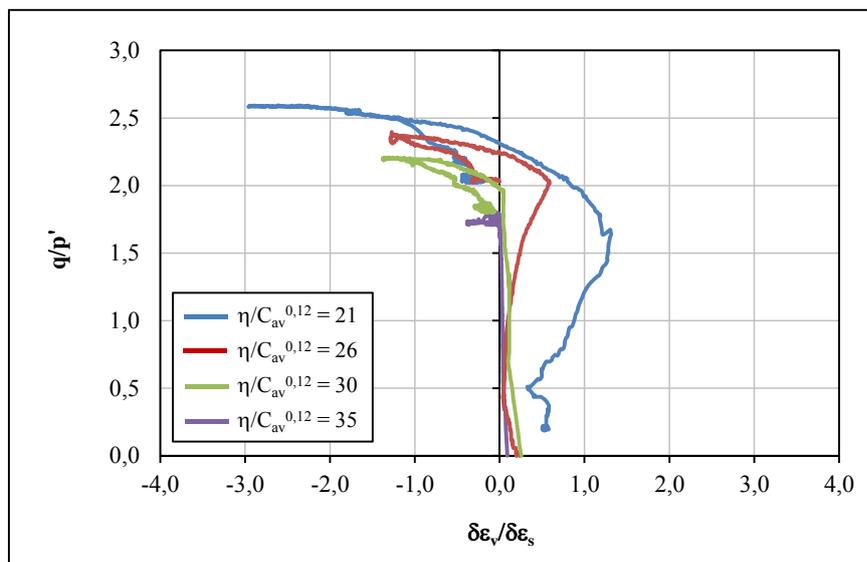


Figura 4.60: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-CAL 28 dias de cura)

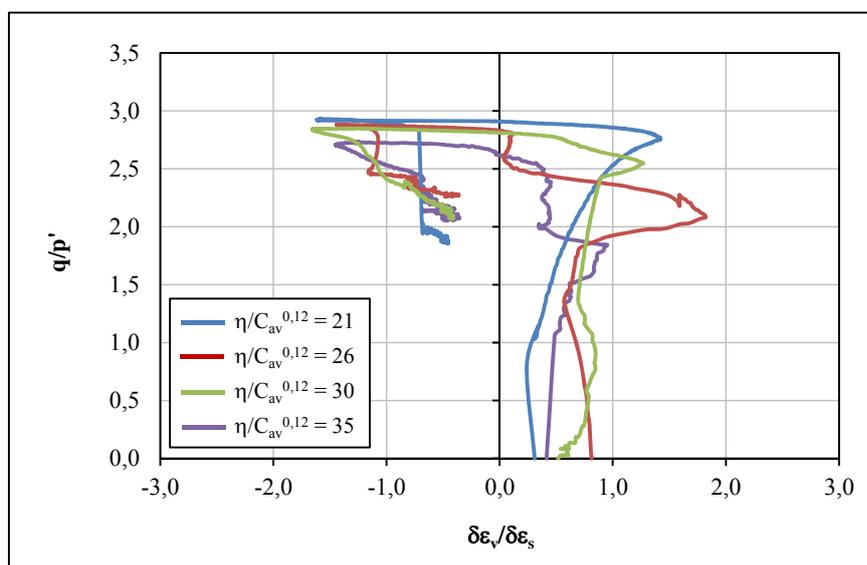


Figura 4.61: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-CAL 360 dias de cura)

Nas figuras 4.62 e 4.63, é apresentado o comportamento tensão-dilatância para 28 e 360 dias de cura, respectivamente, em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20kPa, 200kPa e 400kPa de tensão de confinamento efetivo de ensaio.

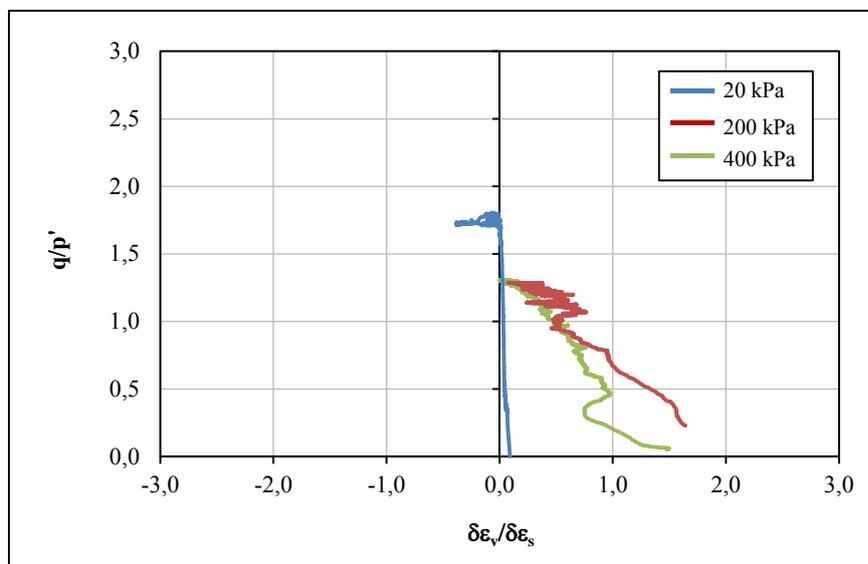


Figura 4.62: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 28 dias de cura)

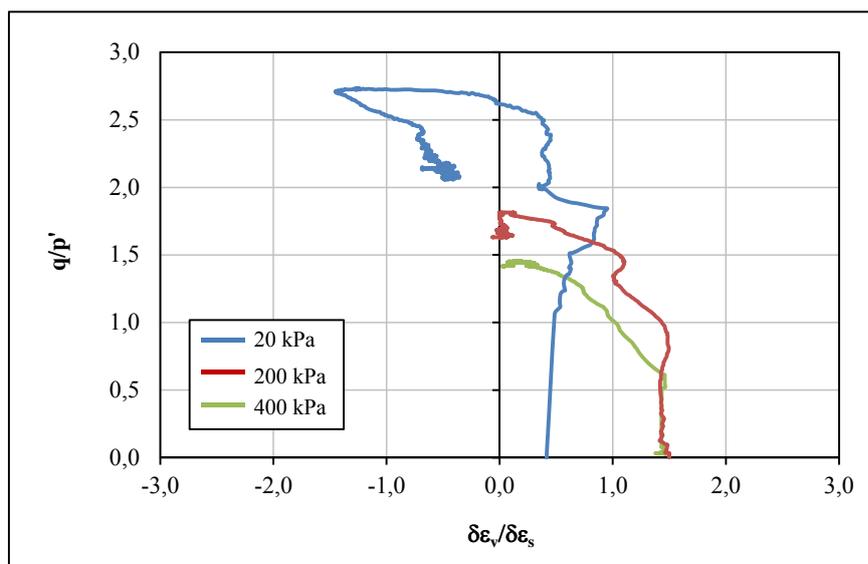


Figura 4.63: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-CAL 360 dias de cura)

Ainda nas figuras 4.62 e 4.63, verifica-se que para altas tensões de confinamento (200 kPa e 400 kPa) o material não apresentou dilatação. Para este nível de tensões, constatou-se com a progressiva desestruturação, um comportamento de material não cimentado. No entanto, nas amostras com 20 kPa de confinamento, pode-se observar comportamento típico de solos cimentados: um trecho inicial vertical, considerado elástico, a formação de um patamar, onde ocorre a plastificação e posterior ruptura, sendo mais acentuado nas amostras com 360 dias de cura.

Segundo Lo e Wardani (2002), ao investigarem a inter-relação dilatância-resistência para um silte estabilizado com cimento e cinza volante, estabeleceram uma função de ruptura que considera a contribuição da cimentação à resistência em duas partes: a ligação real entre as partículas e o aumento da dilatância na ruptura, as quais degradam com o aumento da tensão confinante, porém a diferentes taxas. A figura 4.64, apresentada a seguir, mostra alguns resultados obtidos por Lo e Wardani (2002) para amostras cimentadas no espaço tensão-dilatância $R:D$.

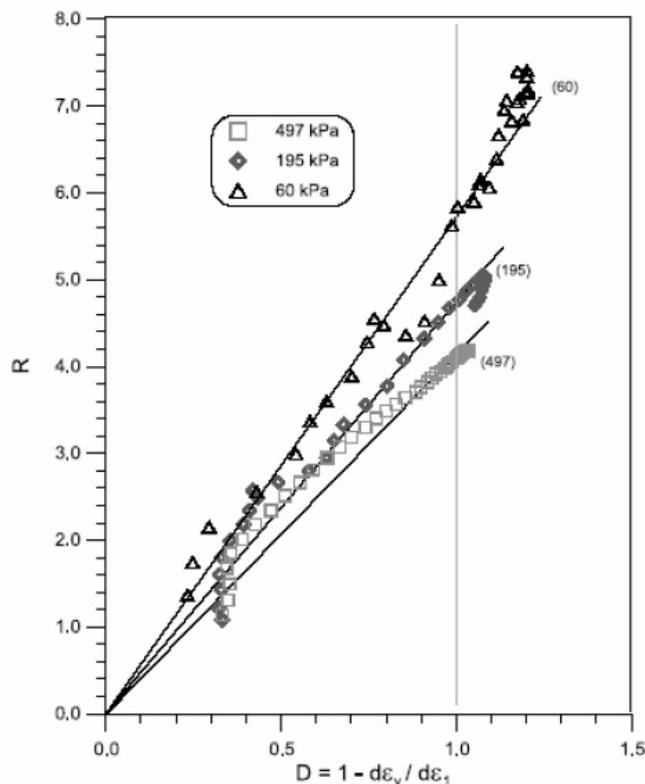


Figura 4.64: comportamento tensão-dilatância para um solo cimentado (LO; WARDANI, 2002)

4.4.3 Solo-Resíduo de Britagem-Cal

A tabela B.2 do apêndice “B”, apresenta as características de todos os corpos-de-prova ensaiados para o solo tratado com cal e adição de 25% de resíduo de britagem, para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental.

A partir destes dados, foram elaboradas as figuras 4.65 a 4.91, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento solo-RBR-cal em estudo são evidenciados. Um resumo dos corpos-de-prova ensaiados segue abaixo na tabela 4.7.

Tabela 4.7: programa de ensaios triaxiais em SRAB-25%RBR-CAL

Relação $\eta/(C_{av})^{0,12}$	Teor de Cal (%)	Teor Vol. de Cal (%)	Porosidade (%)	Tensão Confinante (kPa)	Tempo de Cura (dias)
26	9	6,00	32,24	20	28, 90, 360
30 _a	5	3,35	34,68	20	28, 90, 360
30 _b	10	6,11	37,28	20	28, 90, 360
35	7	4,11	41,47	20, 200, 400	28, 90, 360

4.4.3.1 Comportamento Tensão-Deformação x Relação $\eta/(C_{av})^{0,12}$

As figuras 4.65, 4.67 e 4.69 apresentam o comportamento tensão desvio versus deformação axial com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, para diferentes valores de relação vazios/cal. As figuras 4.66, 4.65 e 4.70 apresentam a deformação volumétrica versus deformação axial para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Os resultados são referentes às tensões de confinamento de 20kPa.

Na figura 4.65, resultados para 28 dias de cura, nota-se que todos os ensaios apresentaram pico de ruptura, sendo mais pronunciado nas amostras com menores relações vazios/cal. Na figura 4.66, resultados para 28 dias de cura, observa-se que todos os ensaios apresentaram mínima compressão inicial seguida de uma forte expansão que, após a ruptura, diminuiu o seu gradiente tendendo, no final, para um valor constante.

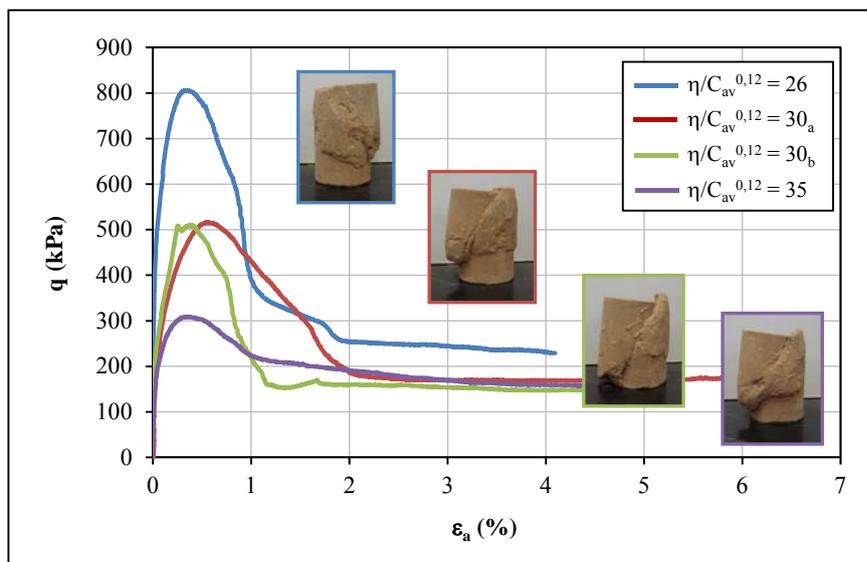


Figura 4.65: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)

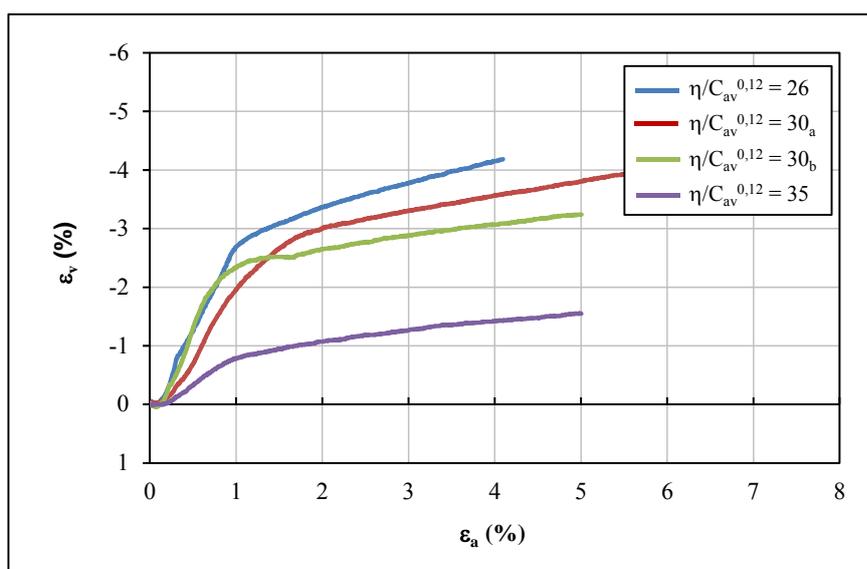


Figura 4.66: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)

Nas figuras 4.67 e 4.68 são apresentados os resultados para 90 dias de cura, assim como nos ensaios com 28 dias de cura, todas as amostras apresentaram pico de ruptura, sendo mais pronunciado nas amostras com menores relações vazios/cal. Quanto a variação volumétrica observa-se também que todos os ensaios apresentaram pequena compressão inicial seguida de uma forte expansão que, após a ruptura, diminuiu o seu gradiente tendendo, no final, para um valor constante.

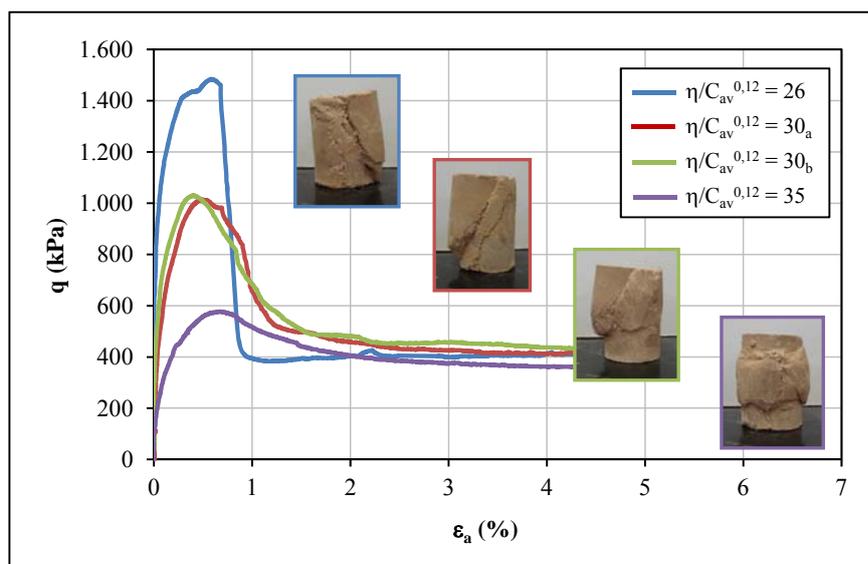


Figura 4.67: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)

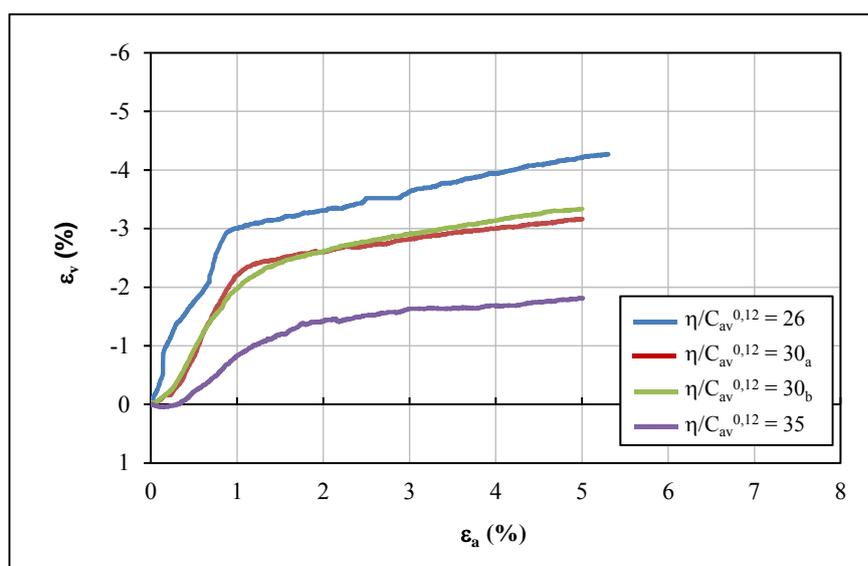


Figura 4.68: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)

Nas figuras 4.69 e 4.70 são apresentados os resultados para 360 dias de cura, assim como nos ensaios com 28 e 90 dias de cura, todas as amostras apresentaram pico de ruptura, sendo mais pronunciado nas amostras com menores relações vazios/cal. Quanto a variação volumétrica observa-se também que todos os ensaios apresentaram compressão inicial seguida de uma forte expansão que, após a ruptura, diminuiu o seu gradiente tendendo, no final, para um valor constante.

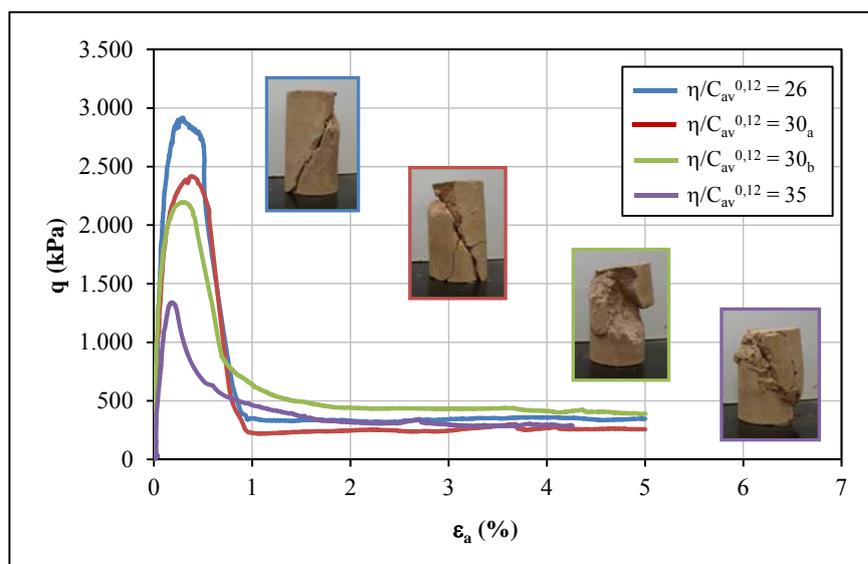


Figura 4.69: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)

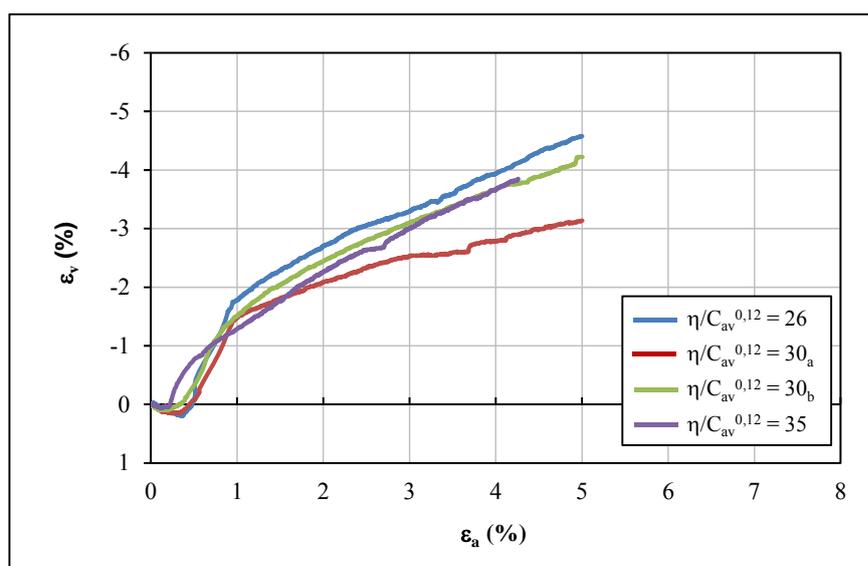


Figura 4.70: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)

As curvas tensão-deformação apresentadas identificam uma tendência geral. Um exame detalhado destas curvas mostra que, de forma geral, o comportamento tensão-deformação pode ser descrito como sendo muito rígido inicialmente, aparentemente linear, até um ponto de plastificação bem definido, a partir do qual o solo experimenta deformações plásticas crescentes até a ruptura. O comportamento pós-ruptura caracteriza-se por uma queda da tensão desvio, mais intensa e rápida nas amostras de maior tempo de cura e menor relação

vazios/cal, e pela existência de um estado último, ao que tudo indica independente do grau de cimentação, onde a tensão desvio se aproxima de um valor estável com as deformações axiais crescentes.

Verifica-se ainda que, para uma mesma relação $\eta/C_{av}^{0,12} = 30$, apesar das amostras apresentarem quantidades muito diferentes de teores de cal (5% e 10%), o comportamento foi muito semelhante, comprovando que para as misturas em estudo, nos tempos de cura estudados, a porosidade é muito mais influente do que a quantidade de cal.

4.4.3.2 Efeito do Nível de Tensões Efetivas e Parâmetros de Resistência

As figuras 4.71, 4.73 e 4.75 apresentam o comportamento tensão desvio versus deformação axial com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, para um mesmo valor de relação vazios/cal, apresentado na forma de porosidade/teor volumétrico. As figuras 4.72, 4.74 e 4.76 apresentam a deformação volumétrica versus deformação axial para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Os resultados são referentes à $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ e tensões de confinamento de 20kPa, 200kPa e 400kPa.

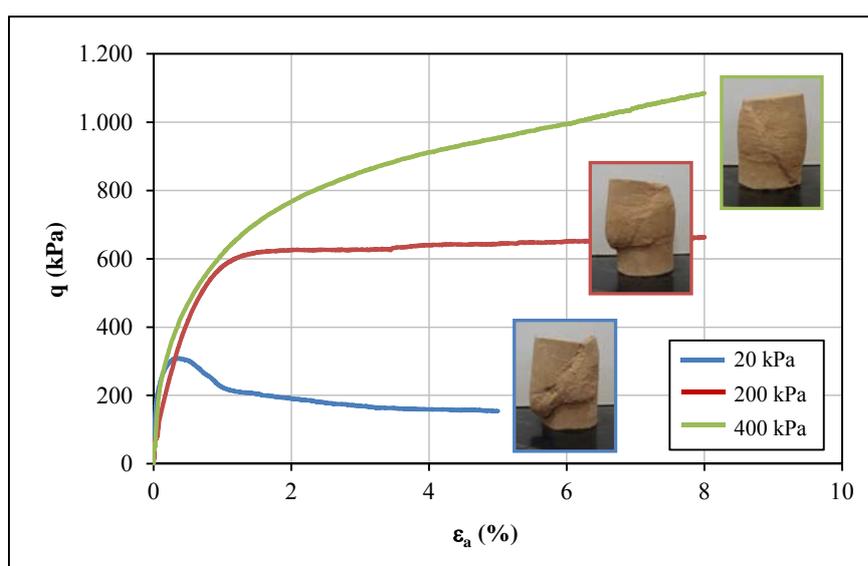


Figura 4.71: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%RBR-CAL 28 dias de cura)

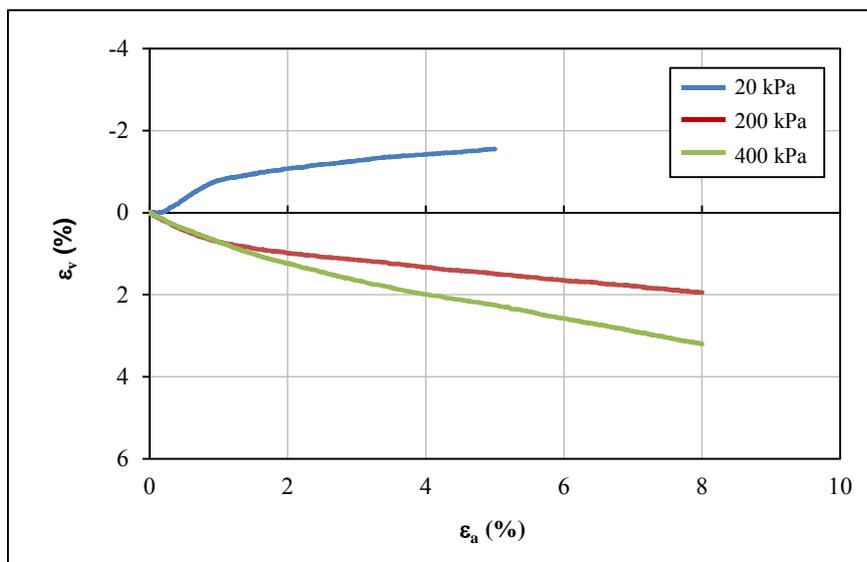


Figura 4.72: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%RBR-CAL 28 dias de cura)

Na figura 4.71, resultados para 28 dias de cura, nota-se que somente o ensaio com 20kPa de confinamento efetivo de ensaio apresentou pico de ruptura, os demais ensaios não apresentaram ruptura definida com o aumento da tensão confinante. Na figura 4.72, resultados para 28 dias de cura, observa-se que somente o ensaio com 20kPa apresentou compressão inicial seguida de uma expansão, os demais apresentaram somente compressão.

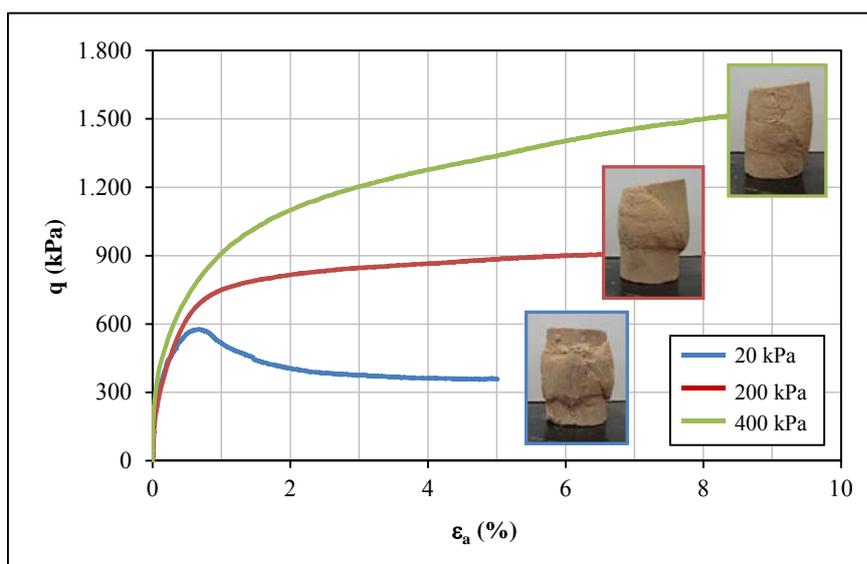


Figura 4.73: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%RBR-CAL 90 dias de cura)

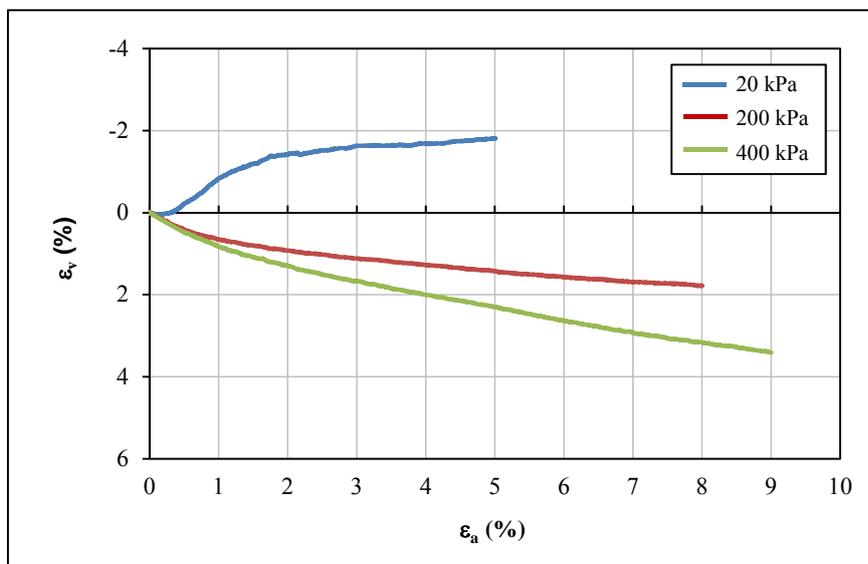


Figura 4.74: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%RBR-CAL 90 dias de cura)

Na figura 4.73, resultados para 90 dias de cura, nota-se também que somente o ensaio com 20kPa de confinamento efetivo de ensaio apresentou pico de ruptura, os demais ensaios não apresentaram ruptura definida com o aumento da tensão confinante. Na figura 4.74, resultados para 90 dias de cura, observa-se também que somente o ensaio com 20kPa apresentou compressão inicial seguida de uma forte expansão, os demais apresentaram somente compressão.

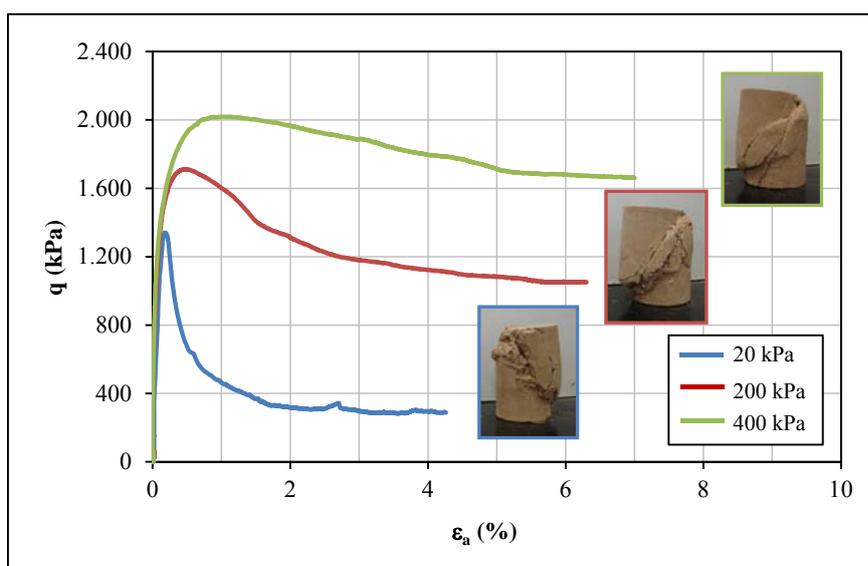


Figura 4.75: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%RBR-CAL 360 dias de cura)

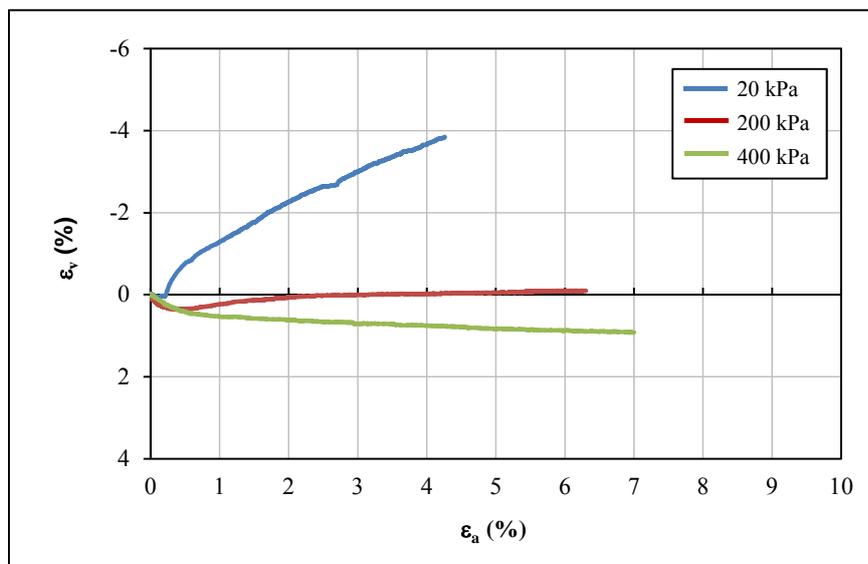


Figura 4.76: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%RBR-CAL 360 dias de cura)

Na figura 4.75, resultados para 360 dias de cura, ao contrário das amostras com 28 e 90 dias de cura, nota-se a presença de pico de ruptura em todos os ensaios, sendo menos pronunciado na amostra com 400kPa. Na figura 4.76, resultados para 360 dias de cura, o ensaio com 20kPa apresentou uma pequena compressão inicial seguida de uma forte expansão, nos ensaios com 200kPa e 400kPa apresentaram somente compressão, menos pronunciado no ensaio com 200kPa.

Pode-se observar com as curvas tensão-deformação, do solo-cal em estudo, que a adição de resíduo de britagem, além de promover ganhos expressivos de resistência, alterou o comportamento do material, tornando-o mais rígido com o tempo de cura. Entretanto, o material, para tempos de cura até 90 dias, ainda é muito influenciado pelo nível de tensões estudados.

Na figura 4.77, são apresentadas as envoltórias de ruptura no espaço p' versus q , obtidas para 28, 90 e 360 dias de cura e $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$.

Para as amostras com 28 dias de cura foi obtido um intercepto coesivo de 76,4kPa e um ângulo de atrito de 30,6°, para 90 dias de cura foi obtido um intercepto coesivo de 123,9kPa e um ângulo de atrito de 34,5° e para 360 dias de cura foi obtido um intercepto coesivo de 394,4kPa e um ângulo de atrito de 28,5°. Observa-se que a variação do intercepto

coesivo com o tempo de cura é muito mais pronunciada que a variação do ângulo de atrito, comportamento característico de solos artificialmente cimentados.

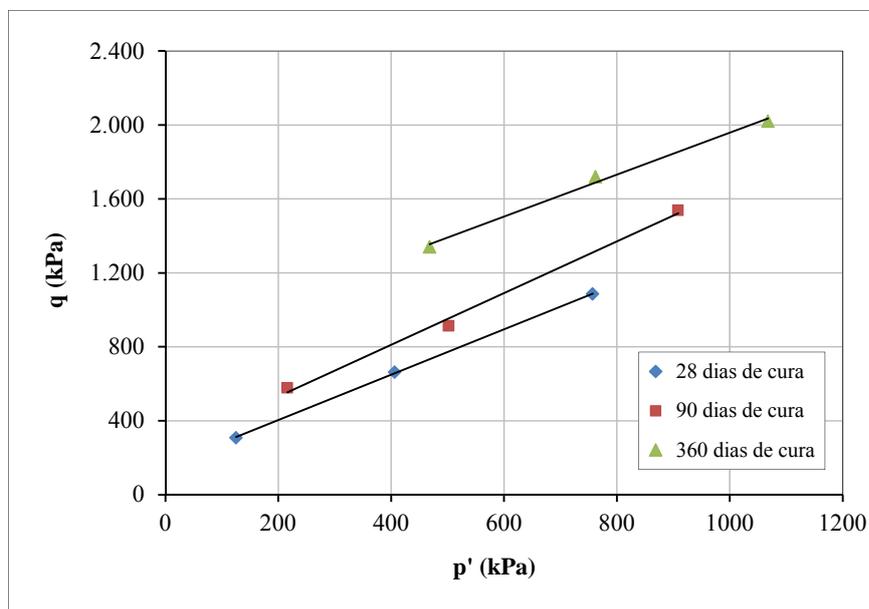


Figura 4.77: envoltórias de ruptura do SRAB-25%RBR-CAL para 28, 90 e 360 dias de cura e $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$

Observa-se que os valores de ângulo de atrito estão relativamente dentro da faixa dos valores obtidos para o solo sem adição de resíduo. O aumento dos valores do intercepto coesivo foi muito mais pronunciado do que o aumento dos valores de ângulo de atrito.

Esse comportamento assemelha-se com diversos trabalhos na bibliografia que sugerem que o ângulo de atrito não é influenciado pela cimentação, estando apenas a parcela referente ao intercepto coesivo sujeita à esta influência (CLOUGH et al., 1979, 1981). Entretanto, cabe salientar que os parâmetros de resistência obtidos, foram avaliados somente sob a influência da adição de resíduo de britagem e o tempo de cura, sem avaliar a influência da variação do teor de cal e da porosidade das misturas.

4.4.3.3 Tensão Confinada x Tensão Não-Confinada

Na figura 4.78 são apresentadas as curvas tensão desvio versus vazios/cal, definido pela relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado, obtidas a partir das tensões desvio máximas sob confinamento efetivo de 20kPa e tempos de cura de 28, 90 e 360 dias. Ainda na

figura 4.78 são apresentadas as curvas resistência à compressão simples versus vazios/cal para 90 e 360 dias de cura. A elaboração destas curvas permitiu avaliar a influência das tensões de confinamento sobre a previsibilidade da resistência de um solo tratado com cal e adição de resíduos de britagem.

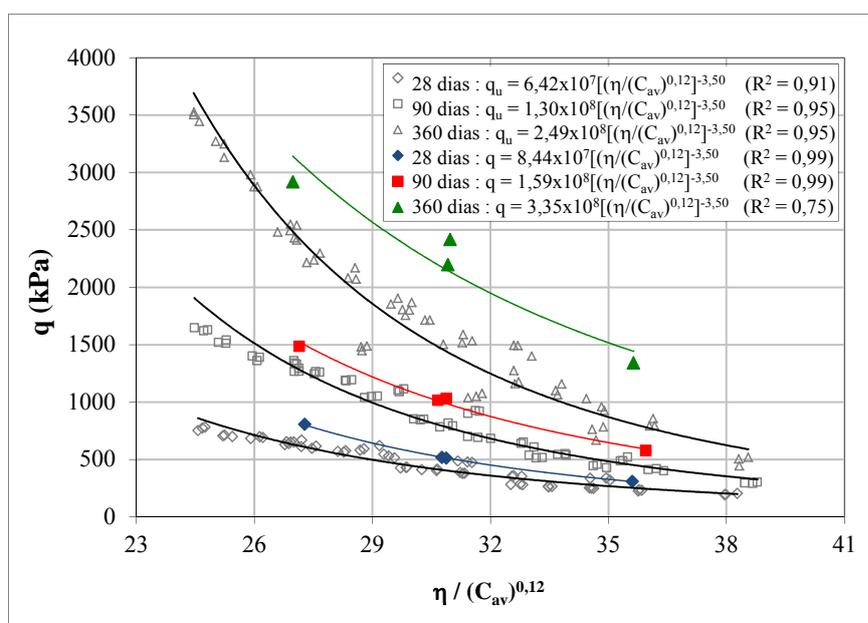


Figura 4.78: resistência confinada à 20kPa e não confinada versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL para 28, 90 e 360 dias de cura

Observa-se nas curvas o ganho de resistência, para amostras de mesma relação vazios/cal, com o aumento da tensão confinante efetiva e com o aumento do tempo de cura. Para valores baixos de vazios/cal as reações pozolânicas entre a cal e solo são mais efetivas, já para valores altos de vazios/cal as curvas tendem ao paralelismo, pois a fraca cimentação inerente aos valores elevados de vazios/cal faz com que uma parte da resistência seja devida à componente friccional.

Ainda na figura 4.78, pode-se observar a existência de relações distintas e únicas para as tendências de cada tempo de cura e ensaio (confinado ou não confinado). Comparando as equações obtidas em cada tempo de cura, nota-se que as resistências têm um relacionamento direto com a relação η / C_{av} (ajustado), tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito do tempo de cura e confinamento. Portanto, uma relação única pode ser conseguida relacionando a máxima tensão desvio com a porosidade, com o teor volumétrico de cal e com o tempo de

cura. Na figura 4.79 é apresentada essa relação obtida com os ensaios confinados comparando com os ensaios não confinados. Pode-se observar o efeito da tensão confinante com o tempo de cura.

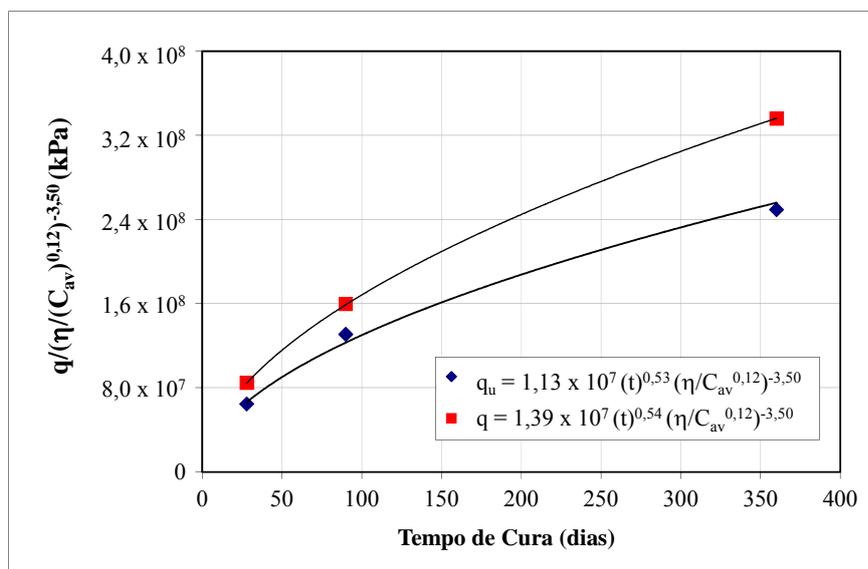


Figura 4.79: variação da resistência confinada à 20kPa e não confinada em relação a porosidade, teor de cal e tempo de cura do SRAB-25%RBR-CAL

4.4.3.4 Análise da Rigidez

Nas figuras 4.80, 4.81 e 4.82, são apresentadas as variações dos módulos secantes com as deformações axiais, para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, para valores distintos de vazios/cal. Observa-se que a rigidez aumenta com a diminuição da relação vazios/cal, também pode-se notar que o módulo secante para deformações axiais acima de 1% tendem a valores próximos, independente do valor da relação vazios/cal.

O tempo de cura influenciou consideravelmente a rigidez das amostras. Para $\eta/C_{av}^{0,12} = 26$, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 82% de 28 para 90 dias de cura e aumentou 91% de 90 para 360 dias de cura. Para $\eta/C_{av}^{0,12} = 30$, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 100% de 28 para 90 dias de cura e aumentou 191% de 90 para 360 dias de cura. Para $\eta/C_{av}^{0,12} = 30$, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 127% de 28

para 90 dias de cura e aumentou 133% de 90 para 360 dias de cura. Para $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 20% de 28 para 90 dias de cura e aumentou 212% de 90 para 360 dias de cura

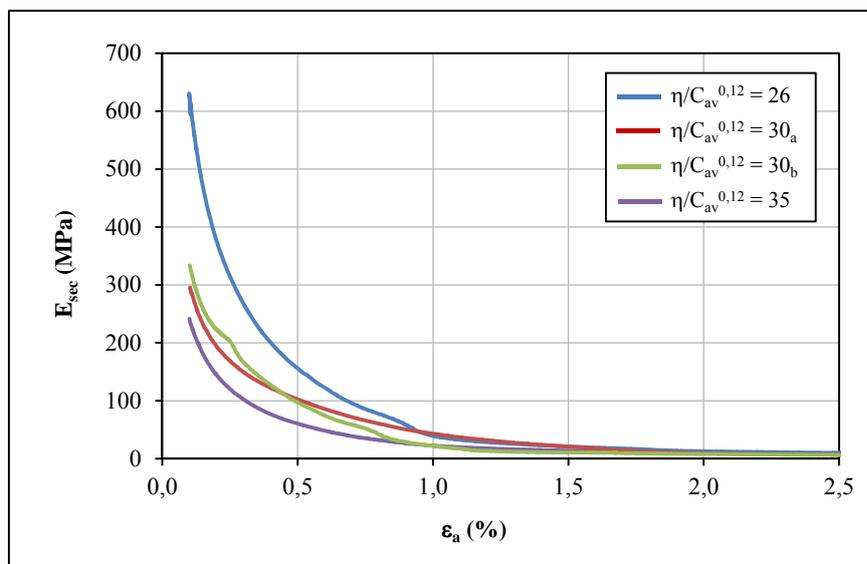


Figura 4.80: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (28 dias de cura)

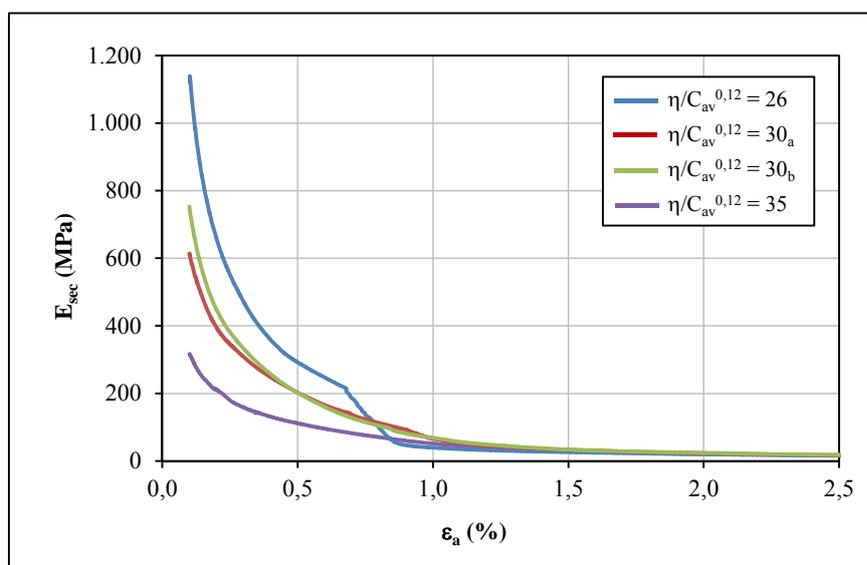


Figura 4.81: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (90 dias de cura)

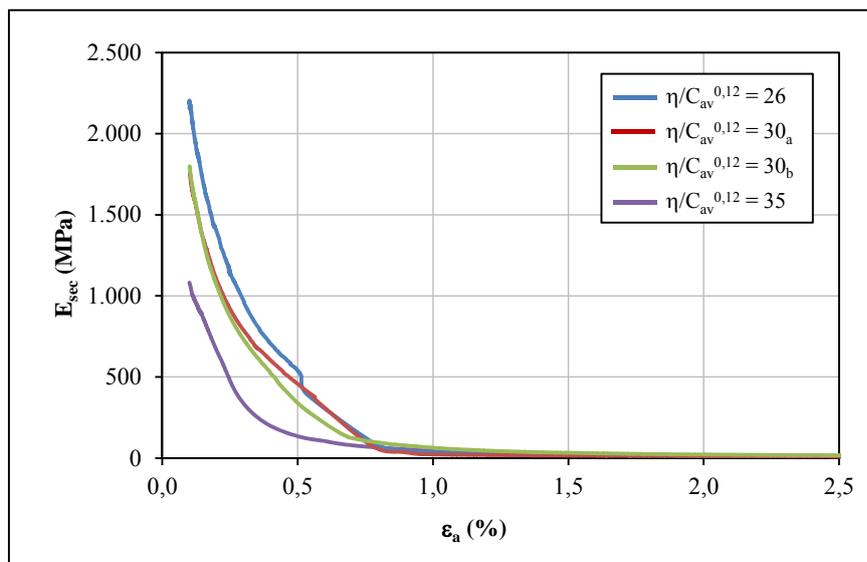


Figura 4.82: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL (360 dias de cura)

Verifica-se ainda que, para uma mesma relação $\eta/C_{av}^{0,12} = 30$, apesar das amostras apresentarem tensões de pico muito semelhantes, a rigidez das amostras com maiores teores de cal são levemente mais rígidas do que as amostras com menores teores de cal. Esse comportamento foi mais evidenciado nas amostras com 28 e 90 dias de cura.

Nas figuras 4.83, 4.84 e 4.85, são apresentadas as variações dos módulos secantes com as deformações axiais, para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ e 20, 200 e 400kPa de tensões de confinamento efetivo de ensaio.

Observa-se que o tempo de cura tem uma influência considerável no módulo secante a 0,1% de deformação, para este nível de relação vazios/cal. Para 20kPa de confinamento efetivo de ensaios, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 34% de 28 para 90 dias de cura e 240% de 90 para 360 dias de cura. Para 200kPa, o módulo secante aumentou 115% de 28 para 90 dias de cura e 364% de 90 para 360 dias de cura. Para 400kPa, o módulo secante aumentou 78% de 28 para 90 dias de cura e 229% de 90 para 360 dias de cura.

Verifica-se ainda que as amostras com resíduo de britagem curadas por 90 e 360 dias apresentaram um aumento da rigidez com a tensão confinante, ao contrário das amostras com 28 dias de cura. Este comportamento comprova a dependência do material para com tempo de cura e a quantidade de sílica e alumina disponível para as reações pozolânicas.

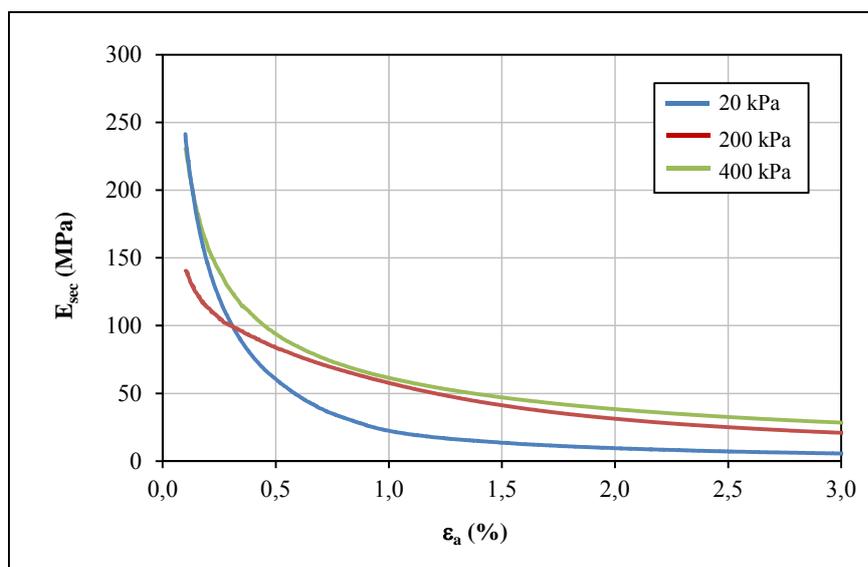


Figura 4.83: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%RBR-CAL 28 dias de cura)

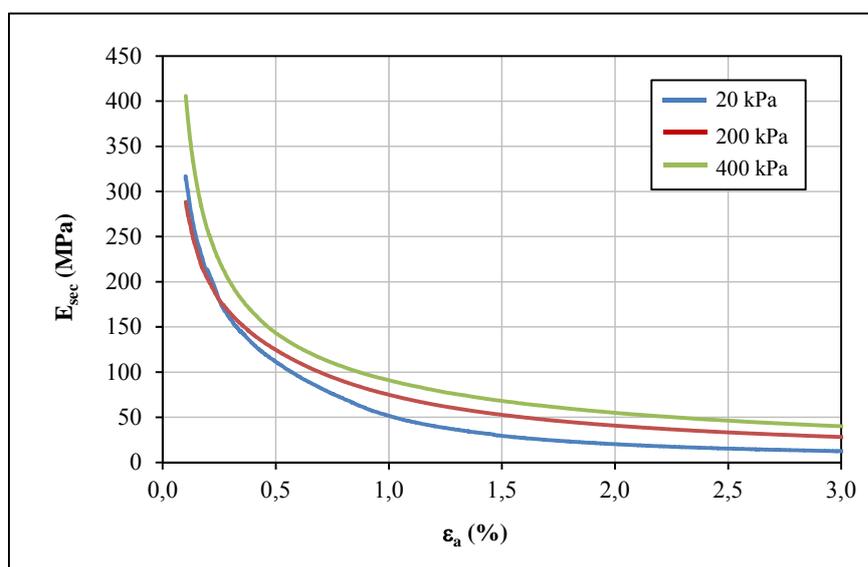


Figura 4.84: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%RBR-CAL 90 dias de cura)

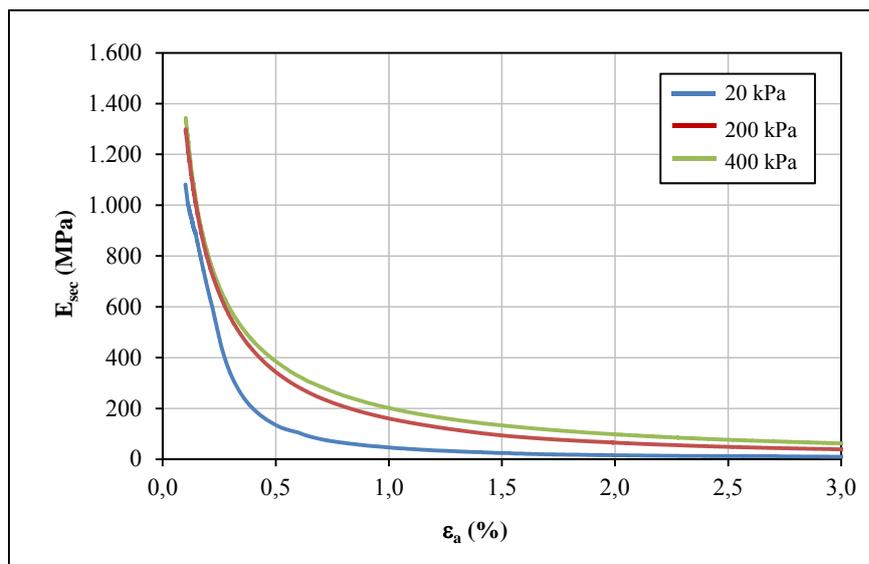


Figura 4.85: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%RBR-CAL 360 dias de cura)

4.4.3.5 Comportamento Tensão x Dilatância

Nas figuras 4.86, 4.87 e 4.88, é apresentado o comportamento tensão-dilatância para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, para valores distintos de vazios/cal. Pode-se constatar que para a mesma tensão de confinamento (20kPa), quanto menor a relação vazios/cal, maior é a razão q/p' e maior a dilatância máxima atingida pelas mesmas.

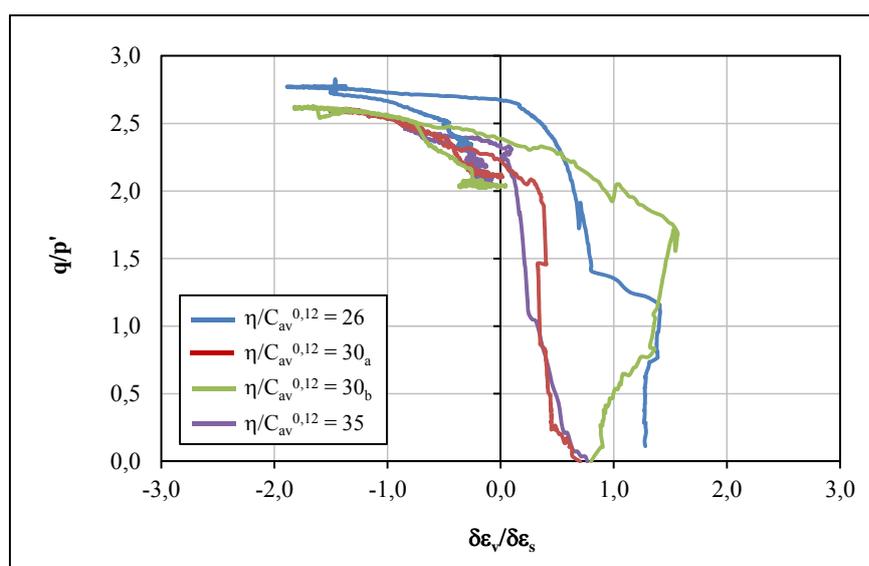


Figura 4.86: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-25%RBR-CAL 28 dias de cura)

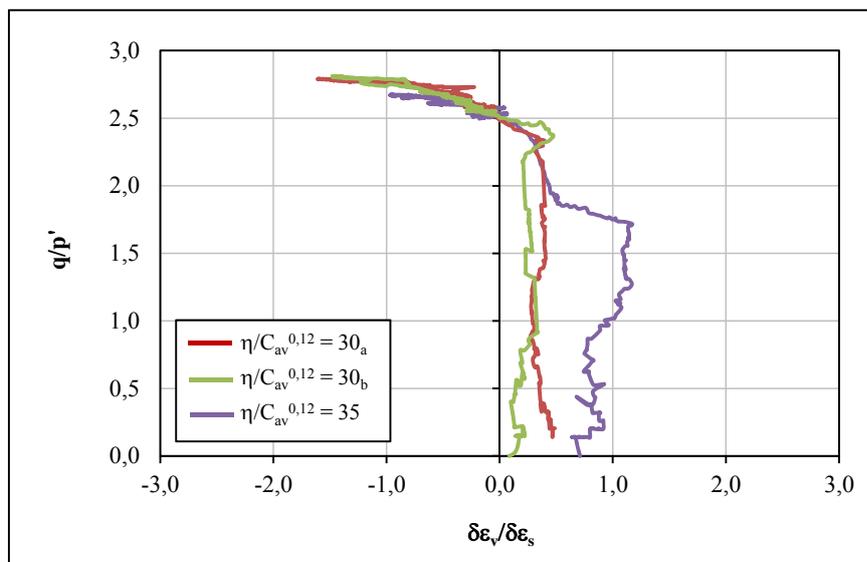


Figura 4.87: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-25%RBR-CAL 90 dias de cura)

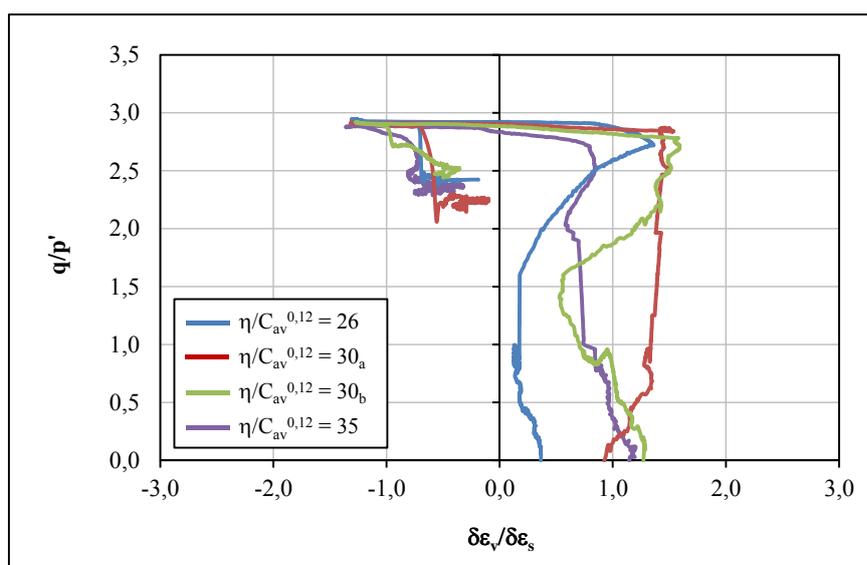


Figura 4.88: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-25%RBR-CAL 360 dias de cura)

Observa-se, para este nível de tensões, que todas as amostras apresentaram curvas dilatantes típicas de solos estruturados, onde inicialmente no plano $q/p' \times \delta\epsilon_v/\delta\epsilon_s$ forma-se um trecho inicial vertical, considerado elástico (aumento de q/p' e $\delta\epsilon_v/\delta\epsilon_s$ constante), após este trecho temos a formação de um patamar horizontal, considerado zona de plastificação (q/p' constante e $\delta\epsilon_v/\delta\epsilon_s$ varia), atingindo uma dilatância máxima e no trecho final ocorre uma

queda na razão q/p' onde há uma variação da dilatância do material, tendendo atingir gradualmente seu estado último ou crítico, onde $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s = 0$.

Nas figuras 4.89, 4.90 e 4.91, é apresentado o comportamento tensão-dilatância para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20kPa, 200kPa e 400kPa de tensão de confinamento efetivo de ensaio.

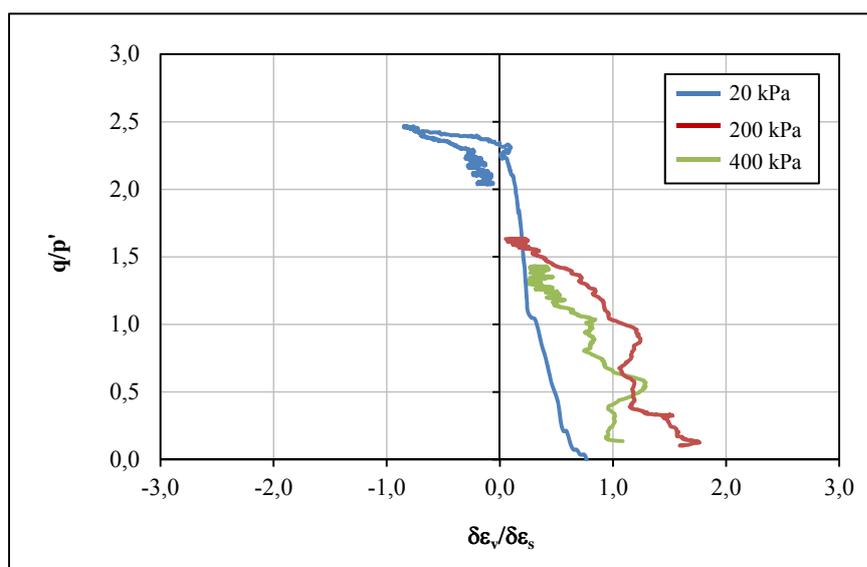


Figura 4.89: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%RBR-CAL 28 dias de cura)

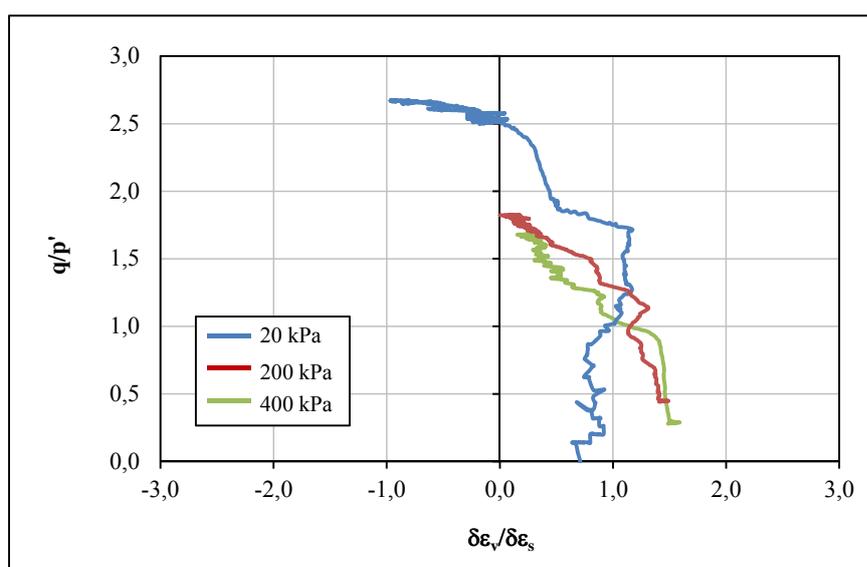


Figura 4.90: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%RBR-CAL 90 dias de cura)

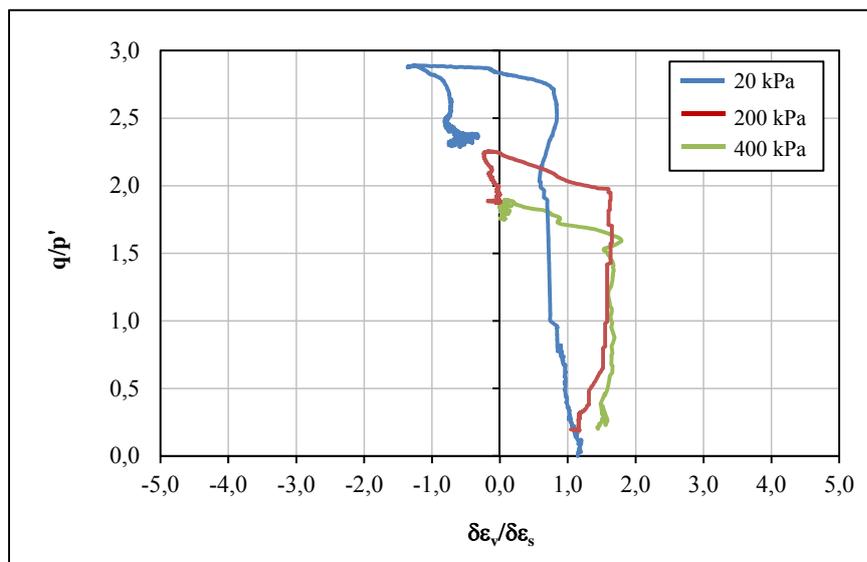


Figura 4.91: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%RBR-CAL 360 dias de cura)

Ainda nas figuras 4.89, 4.90 e 4.91, verifica-se que para 28 e 90 dias de cura e altas tensões de confinamento (200 kPa e 400 kPa), o material não apresentou dilatação. Para este nível de tensões, constatou-se com a progressiva desestruturação, um comportamento de material não cimentado. No entanto, nas amostras com 20 kPa de confinamento, pode-se observar comportamento típico de solos cimentados: um trecho inicial vertical, considerado elástico, a formação de um patamar, onde ocorre a plastificação e posterior ruptura, sendo mais acentuado nas amostras com 360 dias de cura.

4.4.4 Solo-Cinza Volante-Cal

A tabela B.3 do apêndice “B”, apresenta as características de todos os corpos-de-prova ensaiados para o solo tratado com cal e adição de 25% de cinza volante, para 28 e 90 dias de cura, respectivamente, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental.

A partir destes dados, foram elaboradas as figuras 4.92 a 4.109, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento solo-CV-cal em estudo são evidenciados. Um resumo dos corpos-de-prova ensaiados segue abaixo na tabela 4.8.

Tabela 4.8: programa de ensaios triaxiais em SRAB-25%CV-CAL

Relação $\eta/(C_{av})^{0,12}$	Teor de Cal (%)	Teor Vol. de Cal (%)	Porosidade (%)	Tensão Confinante (kPa)	Tempo de Cura (dias)
30	5	3,13	34,40	20	28, 90
35 _a	3	1,82	37,61	20	28, 90
35 _b	7	3,86	41,15	20, 200, 400	28, 90
40	9	4,33	47,68	20	28, 90

4.4.4.1 Comportamento Tensão-Deformação x Relação $\eta/(C_{av})^{0,12}$

As figuras 4.92 e 4.94 apresentam o comportamento tensão desvio versus deformação axial com 28 e 90 dias de cura, respectivamente, para diferentes valores de relação vazios/cal. As figuras 4.93 e 4.95 apresentam a deformação volumétrica versus deformação axial para 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Os resultados são referentes às tensões de confinamento de 20kPa.

Na figura 4.92, resultados para 28 dias de cura, nota-se que todos os ensaios apresentaram pico de ruptura, sendo mais pronunciado nas amostras com menores relações vazios/cal. Na figura 4.93, resultados para 28 dias de cura, observa-se que todos os ensaios apresentaram compressão inicial seguida de uma forte expansão que, após a ruptura, diminuiu o seu gradiente tendendo, no final, para um valor constante.

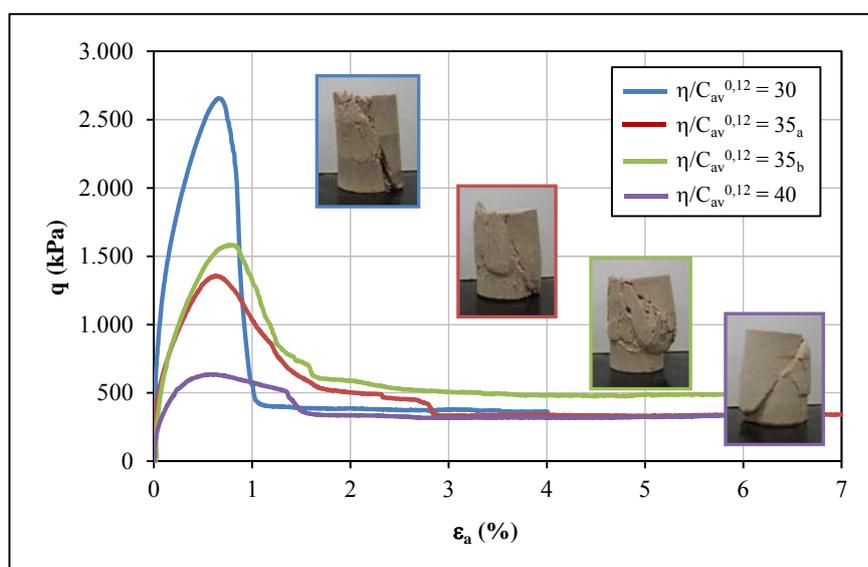


Figura 4.92: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%CV-CAL (28 dias de cura)

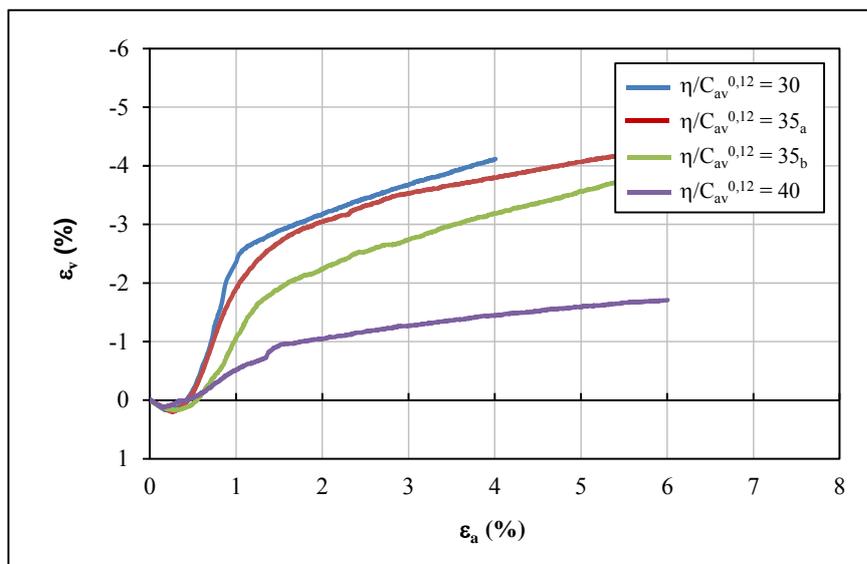


Figura 4.93: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%CV-CAL (28 dias de cura)

Nas figuras 4.94 e 4.95 são apresentados os resultados para 90 dias de cura, assim como nos ensaios com 28 dias de cura, todas as amostras apresentaram pico de ruptura, sendo mais pronunciado nas amostras com menores relações vazios/cal. Quanto a variação volumétrica observa-se também que todos os ensaios apresentaram compressão inicial seguida de uma forte expansão que, após a ruptura, diminuiu o seu gradiente tendendo, no final, para um valor constante.

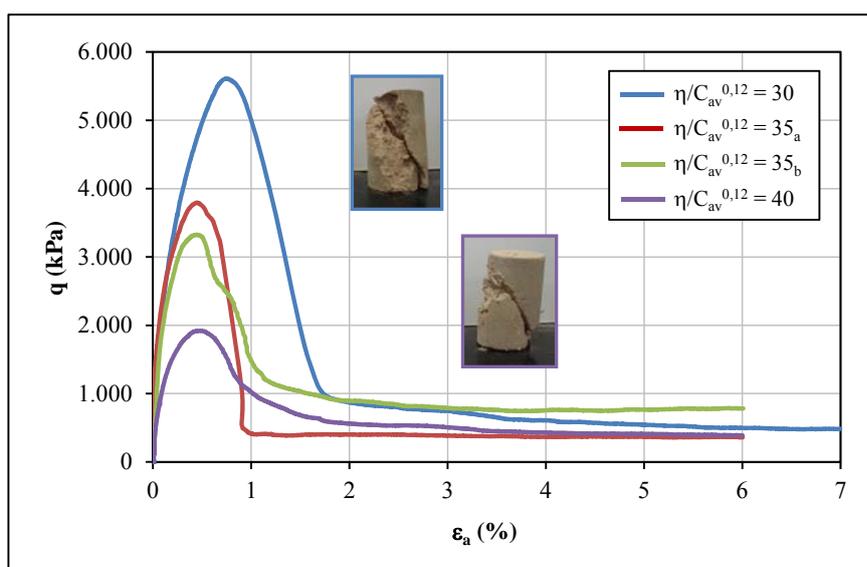


Figura 4.94: tensão-deformação para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%CV-CAL (90 dias de cura)

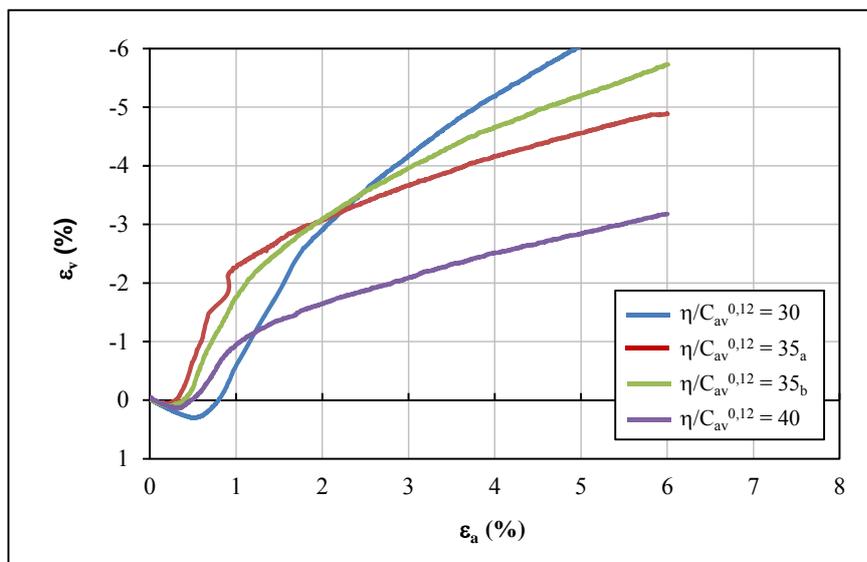


Figura 4.95: deformação volumétrica para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%CV-CAL (90 dias de cura)

As curvas tensão-deformação apresentadas identificam uma tendência geral. Um exame detalhado destas curvas mostra que, de forma geral, o comportamento tensão-deformação pode ser descrito como sendo muito rígido inicialmente, aparentemente linear, até um ponto de plastificação, a partir do qual o solo experimenta deformações plásticas crescentes até a ruptura. Comportamento semelhante foi encontrado por Carraro (1997). O comportamento pós-ruptura caracteriza-se por uma queda da tensão desvio, mais intensa e rápida nas amostras de maior tempo de cura e menor relação vazios/cal, e pela existência de um estado último, ao que tudo indica independente do grau de cimentação, onde a tensão desvio se aproxima de um valor estável com as deformações axiais crescentes. Observa-se ainda que as amostras com mesmo valor de relação vazios/cal apresentaram tensões de pico e comportamento semelhantes.

4.4.4.2 Efeito do Nível de Tensões Efetivas e Parâmetros de Resistência

As figuras 4.96 e 4.98 apresentam o comportamento tensão desvio versus deformação axial com 28 e 90 dias de cura, respectivamente, para um mesmo valor de relação vazios/cal, apresentado na forma de porosidade/teor volumétrico. As figuras 4.97 e 4.99 apresentam a deformação volumétrica versus deformação axial para 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Os resultados são referentes à $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ e tensões de confinamento de 20kPa, 200kPa e 400kPa.

Na figura 4.96, resultados para 28 dias de cura, nota-se que todos os ensaios apresentaram pico de ruptura, sendo menos pronunciado com o aumento da tensão confinante. Na figura 4.97, resultados para 28 dias de cura, observa-se que somente o ensaio com 20kPa apresentou compressão inicial seguida de uma expansão, os demais apresentaram somente compressão.

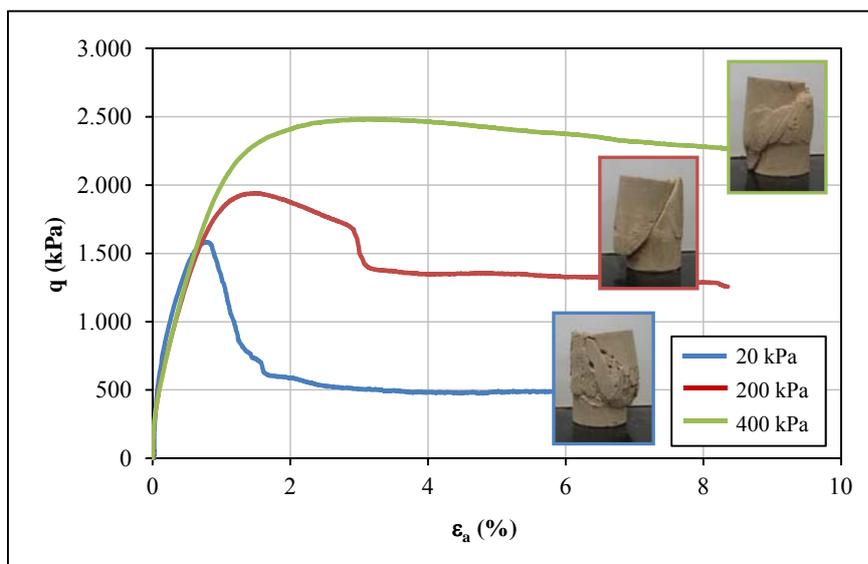


Figura 4.96: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%CV-CAL 28 dias de cura)

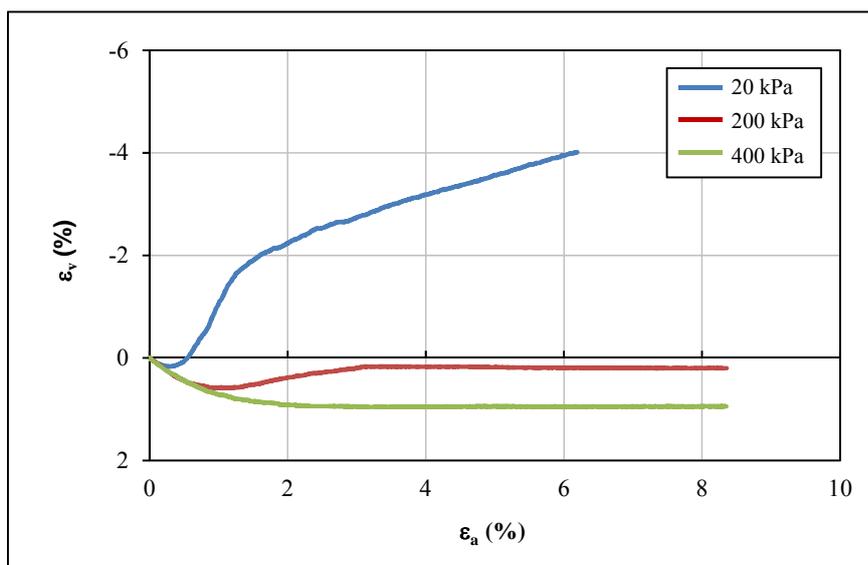


Figura 4.97: deformação volumétrica da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%CV-CAL 28 dias de cura)

Na figura 4.98, resultados para 90 dias de cura, ao contrário das amostras com 28 dias de cura, nota-se a presença de pico de ruptura em todos os ensaios. Na figura 4.99, resultados para 90 dias de cura, todos os ensaios apresentaram uma compressão inicial seguida de uma forte expansão, sendo menos pronunciado nos ensaios com 200kPa e 400kPa de confinamento.

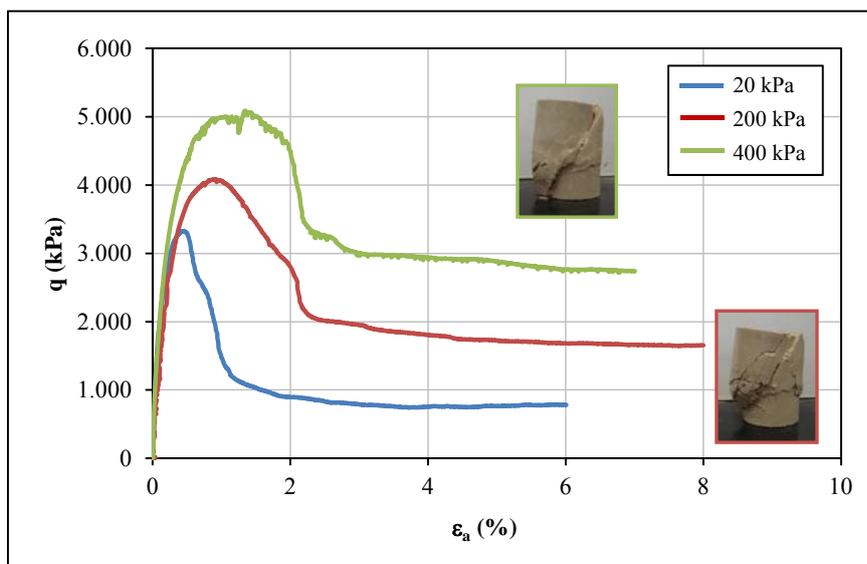


Figura 4.98: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%CV-CAL 90 dias de cura)

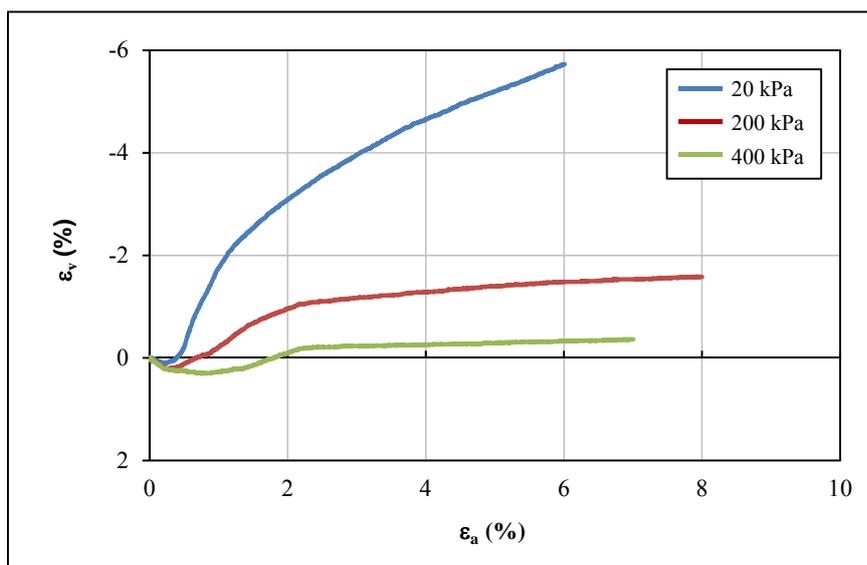


Figura 4.99: tensão-deformação da amostra com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400 kPa (SRAB-25%CV-CAL 90 dias de cura)

Pode-se observar com as curvas tensão-deformação, do solo-cal com adição de cinza volante em estudo, ganhos expressivos de resistência com o tempo de cura, as misturas com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$, apresentaram ruptura definida para todas as tensões de confinamento, isso mostra a efetividade das reações pozolânicas com a adição de cinza volante no solo-cal em estudo.

Na figura 4.100, são apresentadas as envoltórias de ruptura no espaço p' versus q , obtidas para 28 e 90 dias de cura e $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$.

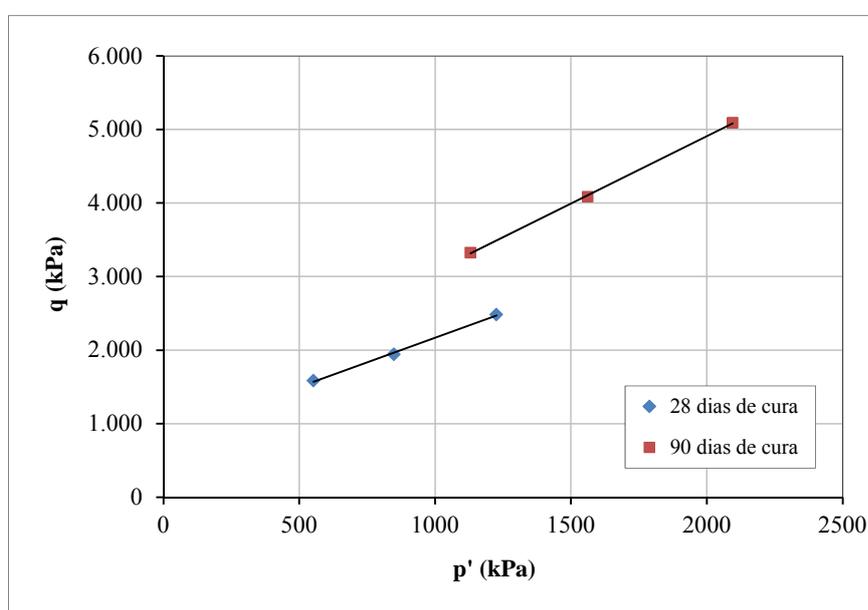


Figura 4.100: envoltórias de ruptura do SRAB-25%CV-CAL para 28 e 90 dias de cura e $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$

Para as amostras com 28 dias de cura foi obtido um intercepto coesivo de 404,3kPa e um ângulo de atrito de 33,2° e para 90 dias de cura foi obtido um intercepto coesivo de 668,3kPa e um ângulo de atrito de 44,6°.

Nota-se, diferentemente das misturas anteriores, as misturas com cinza volante apresentaram aumento nos valores do intercepto coesivo e do ângulo de atrito. Carraro (1997), ao estudar misturas de arenito Botucatu com cinza volante e cal de carbureto, observou, em ensaios drenados, um aumento considerável no ângulo de atrito nas misturas mais ricas, independente dos parâmetros de compactação.

4.4.4.3 Tensão Confinada x Tensão Não-Confinada

Na figura 4.101 são apresentadas as curvas tensão desvio versus vazios/cal, definido pela relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado, obtidas a partir das tensões desvio máximas sob confinamento efetivo de 20kPa e tempos de cura de 28 e 90 dias. Ainda na figura 4.101 são apresentadas as curvas resistência à compressão simples versus vazios/cal para 28 e 90 dias de cura. A elaboração destas curvas permitiu avaliar a influência das tensões de confinamento sobre a previsibilidade da resistência de um solo tratado com cal.

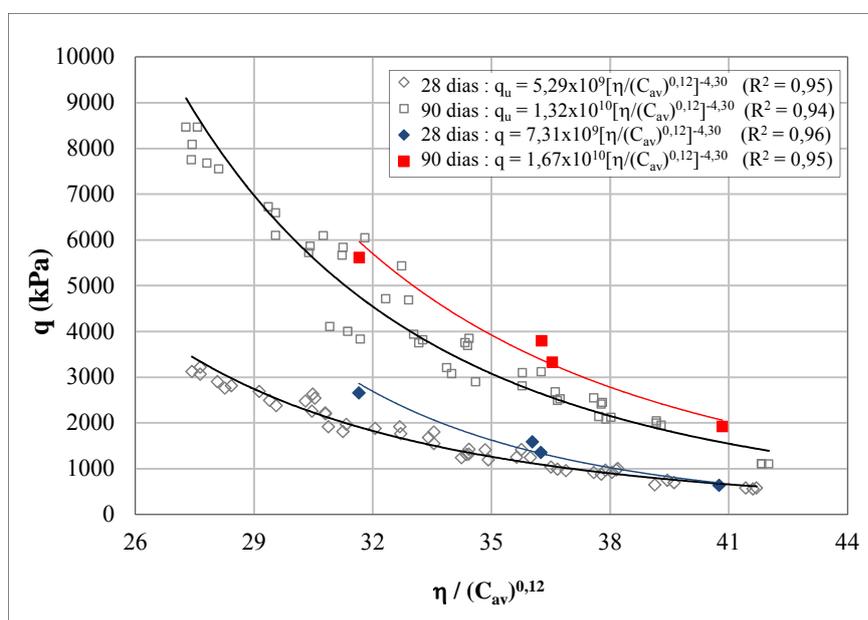


Figura 4.101: resistência confinada à 20kPa e não confinada versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%CV-CAL para 28 e 90 dias de cura

Observa-se nas curvas o ganho de resistência, para amostras de mesma relação vazios/cal, com o aumento da tensão confinante efetiva e com o aumento do tempo de cura. Para valores baixos de vazios/cal as reações pozolânicas entre a cal e solo são mais efetivas, já para valores altos de vazios/cal as curvas tendem ao paralelismo, pois a fraca cimentação inerente aos valores elevados de vazios/cal faz com que uma parte da resistência seja devida à componente friccional.

Ainda na figura 4.101, pode-se observar a existência de relações distintas e únicas para as tendências de cada tempo de cura e ensaio (confinado ou não confinado). Comparando as equações obtidas em cada tempo de cura, nota-se que as resistências tem um relacionamento

direto com a relação η/C_{av} (ajustado), tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito do tempo de cura e confinamento. Portanto, uma relação única pode ser conseguida relacionando a máxima tensão desvio com a porosidade, com o teor volumétrico de cal e com o tempo de cura.

Na figura 4.102 é apresentada essa relação obtida com os ensaios confinados comparando com os ensaios não confinados. No entanto, mesmo com a comprovação de uma relação entre as variáveis estudadas, as relações apresentadas na figura 4.102 é somente uma aproximação, baseada nos ensaios até aqui apresentados, pois com apenas dois pontos ainda não é possível definir um modelo para o SRAB-CV-CAL estudado.

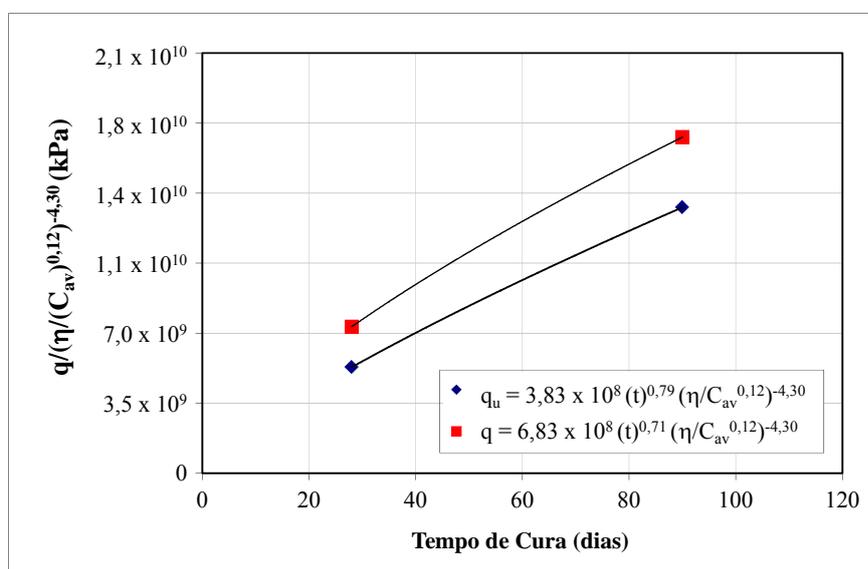


Figura 4.102: variação da resistência confinada à 20kPa e não confinada em relação a porosidade, teor de cal e tempo de cura do SRAB-25%CV-CAL

4.4.4.4 Análise da Rigidez

Nas figuras 4.103 e 4.104, são apresentadas as variações dos módulos secantes com as deformações axiais, para 28 e 90 dias de cura, respectivamente, para valores distintos de vazios/cal. Observa-se que o módulo secante aumenta com a diminuição da relação vazios/cal e que os valores de módulo secante para um mesmo valor da relação vazios/cal, obtidos de maneiras distintas, são muito próximos.

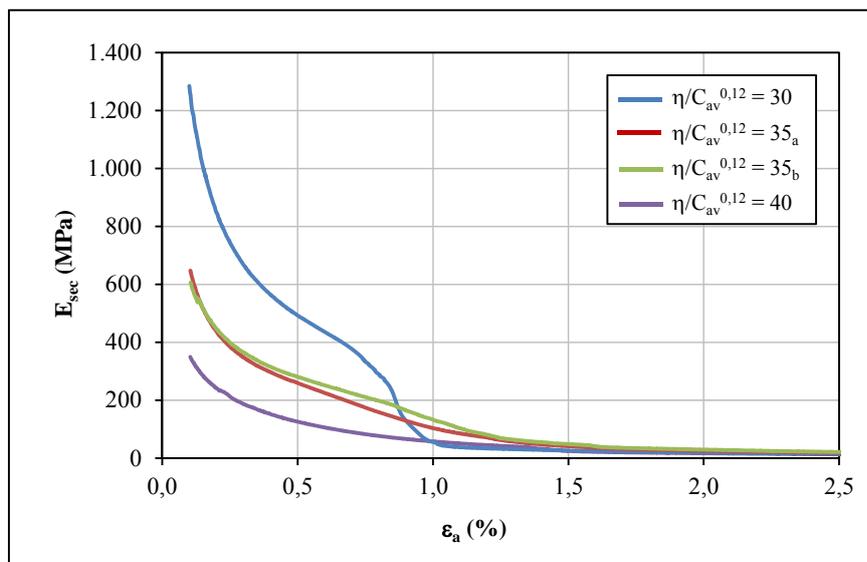


Figura 4.103: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%CV-CAL (28 dias de cura)

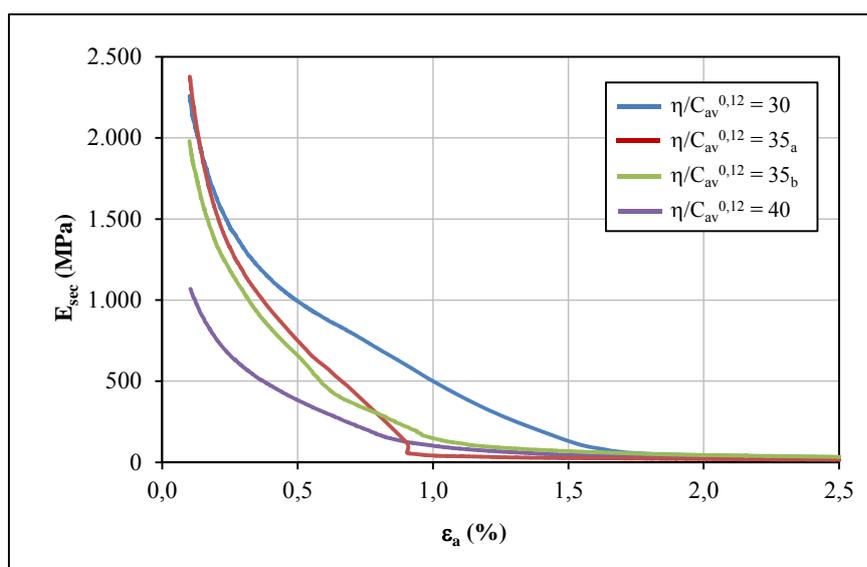


Figura 4.104: variação do módulo secante com a deformação axial para diferentes relações vazios/cal do SRAB-25%CV-CAL (90 dias de cura)

O tempo de cura influenciou consideravelmente a rigidez das amostras. Para $\eta/C_{av}^{0,12} = 30$, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 73% de 28 para 90 dias de cura. Para $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 261% de 28 para 90 dias de cura. Para $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 233% de 28 para 90 dias de cura. Para $\eta/C_{av}^{0,12} = 40$, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 214% de 28 para 90 dias de cura.

Nas figuras 4.105 e 4.106, são apresentadas as variações dos módulos secantes com as deformações axiais, para 28 e 90 dias de cura, respectivamente, $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ e 20, 200 e 400kPa de tensões de confinamento efetivo de ensaio.

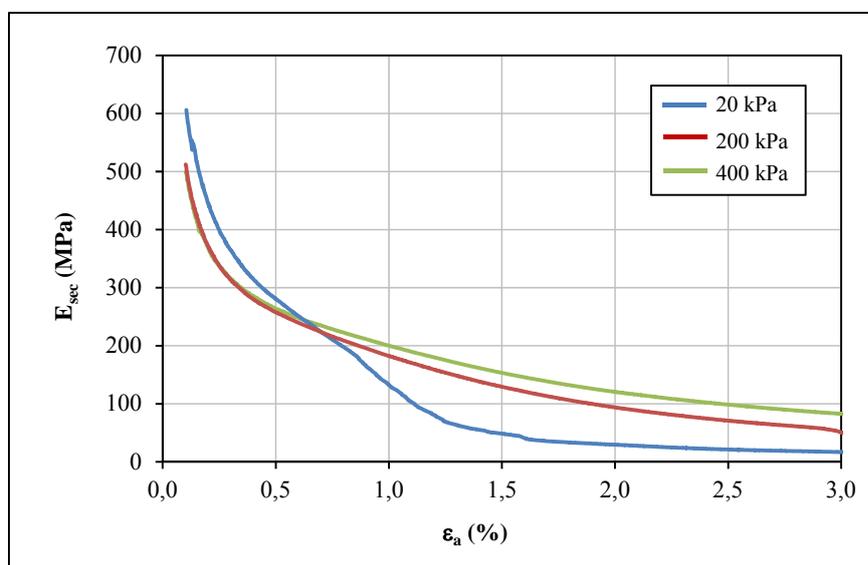


Figura 4.105: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%CV-CAL 28 dias de cura)

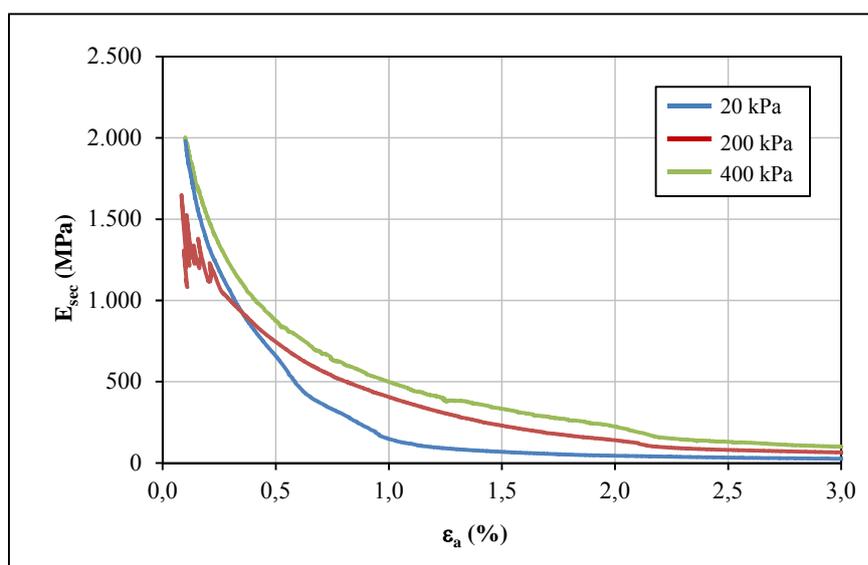


Figura 4.106: variação do módulo secante com a deformação axial com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%CV-CAL 90 dias de cura)

Observa-se que o tempo de cura tem uma influência significativa no módulo secante a 0,1% de deformação, para este nível de relação vazios/cal. Para 20kPa de confinamento efetivo de ensaios, o módulo secante a 0,1% de deformação aumentou 233% de 28 para 90 dias de cura. Para 200kPa, o módulo secante aumentou 154% de 28 para 90 dias de cura. Para 400kPa, o módulo secante aumentou 300% de 28 para 90 dias de cura.

Verifica-se ainda que o mecanismo de estabilização das amostras com cinza volante, mesmo apresentando ganhos expressivos de resistência, em relação aos outros compósitos, é influenciado pela tensão de confinamento. Nota-se nas figuras 4.105 e 4.106, uma tendência ao aumento da rigidez com o aumento da tensão confinante, para deformações axiais acima de 0,5%. Observa-se ainda, a necessidade de medidas a pequeníssimas deformações ($<10^{-2}$) para melhor verificação da degradação do módulo do material ao longo das deformações axiais.

4.4.4.5 Comportamento Tensão x Dilatância

Nas figuras 4.107 e 4.108, é apresentado o comportamento tensão-dilatância para 28 e 90 dias de cura, respectivamente, para valores distintos de vazios/cal. Pode-se constatar que para a mesma tensão de confinamento (20kPa), quanto menor a relação vazios/cal, maior é a razão q/p' e maior a dilatância máxima atingida pelas mesmas.

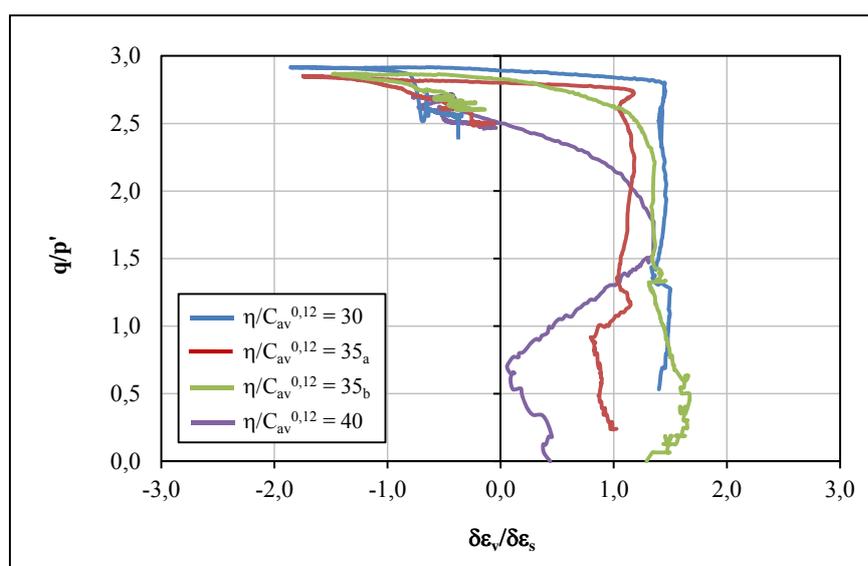


Figura 4.107: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-25%CV-CAL 28 dias de cura)

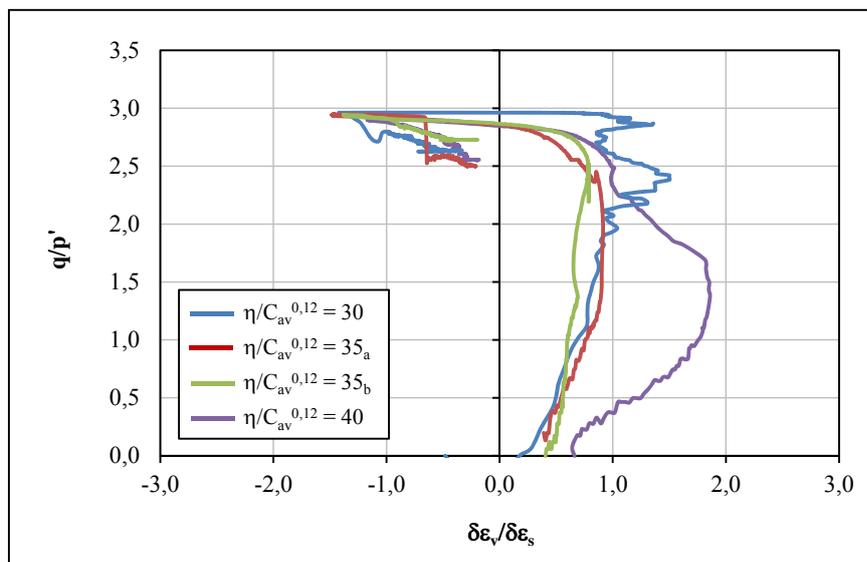


Figura 4.108: tensão-dilatância para diferentes relações vazios/cal (SRAB-25%CV-CAL 90 dias de cura)

Nos resultados, pode-se observar no plano q/p' x $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ um trecho inicial vertical, considerado elástico (aumento de q/p' e $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ constante), após este trecho temos a formação de um patamar (q/p' constante e $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ varia) e no trecho final ocorre uma queda na razão q/p' onde há uma variação da dilatância do material, tendendo atingir gradualmente seu estado último ou crítico, onde $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s = 0$.

Nas figuras 4.109 e 4.110, é apresentado o comportamento tensão-dilatância para 28 e 90 dias de cura, respectivamente, em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20kPa, 200kPa e 400kPa de tensão de confinamento efetivo de ensaio.

Verifica-se nos resultados de 28 dias de cura, que a cimentação não restringe a dilatância inicial do material para o nível de 400 kPa de confinamento. No entanto, nas demais amostras, pode-se observar comportamento típico de solos cimentados: um trecho inicial vertical, considerado elástico, a formação de um patamar, onde ocorre a plastificação e posterior ruptura. Nota-se ainda que para um mesmo valor da relação vazios/cal, quanto menor a tensão confinante, maior é a razão q/p' atingida pela amostra.

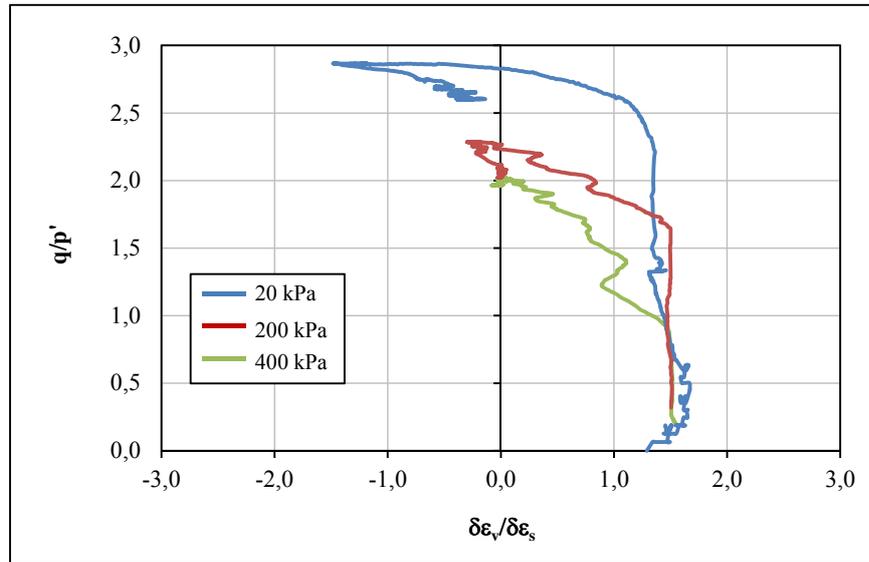


Figura 4.109: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%CV-CAL 28 dias de cura)

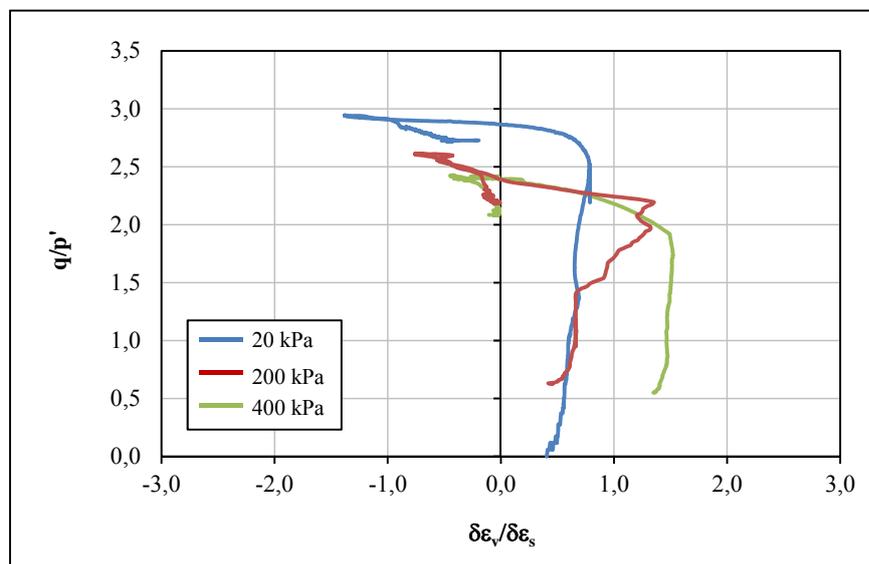


Figura 4.110: tensão-dilatância em amostras com $\eta/C_{av}^{0,12} = 35$ para 20, 200 e 400kPa (SRAB-25%CV-CAL 90 dias de cura)

4.5 MEDIDAS DE G_0

Com o objetivo de avaliar os efeitos dos teores de cal, porosidade das misturas, relação vazios/cal e tempo de cura no módulo cisalhante do solo-cal em estudo foi realizado uma série de medidas de G_0 , obtidas através da técnica de bender elements.

A tabela C.1 do apêndice “C”, apresenta as características de todos os corpos-de-prova ensaiados para o solo tratado somente com cal, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. A partir destes dados, foram elaboradas as figuras 4.114 a 4.136, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento solo-cal em estudo são evidenciados.

4.5.1 Leituras

Nas figuras 4.111, 4.112 e 4.113 são apresentadas leituras típicas de corpos-de-prova com 28, 90 e 180 dias de cura, respectivamente. Nota-se na figura 4.113 que não é possível identificar o início da onda recebida, por este motivo, não foram realizadas leituras com maiores tempos de cura. Fato atribuído principalmente porque o tempo de cura diminuiu o tempo de propagação da onda no interior dos corpos-de-prova e a altura de 10 cm das amostras parece não ser suficiente para se obter leituras adequadas para este nível de rigidez. Outro fator que deve-se levar em conta são os ruídos elétricos ambiente, que prejudicam as leituras, sendo necessários usos de filtros de sinal e isolamentos da instrumentação mais adequados.

O método utilizado para determinação do tempo de propagação de uma onda S foi o do intervalo de tempo entre pontos característicos dos sinais. O tempo de propagação de um impulso entre dois pontos no espaço pode ser medido pelo intervalo de tempo entre pontos (ou posições) característicos das ondas registradas nesses dois pontos, partindo do mesmo princípio de ondas de difusão planar e a ausência de ondas refratadas e/ou refletidas. As posições características mais usadas corretamente correspondem aos primeiros pontos de inflexão da onda, ou seja, o primeiro pico, o primeiro “vale” e, eventualmente as intersecções em zero. As figuras 4.111, 4.112 e 4.113 ilustram a aplicação deste método, para qual o tempo de propagação é definido pelo intervalo de tempo entre o primeiro “vale” de cada sinal.

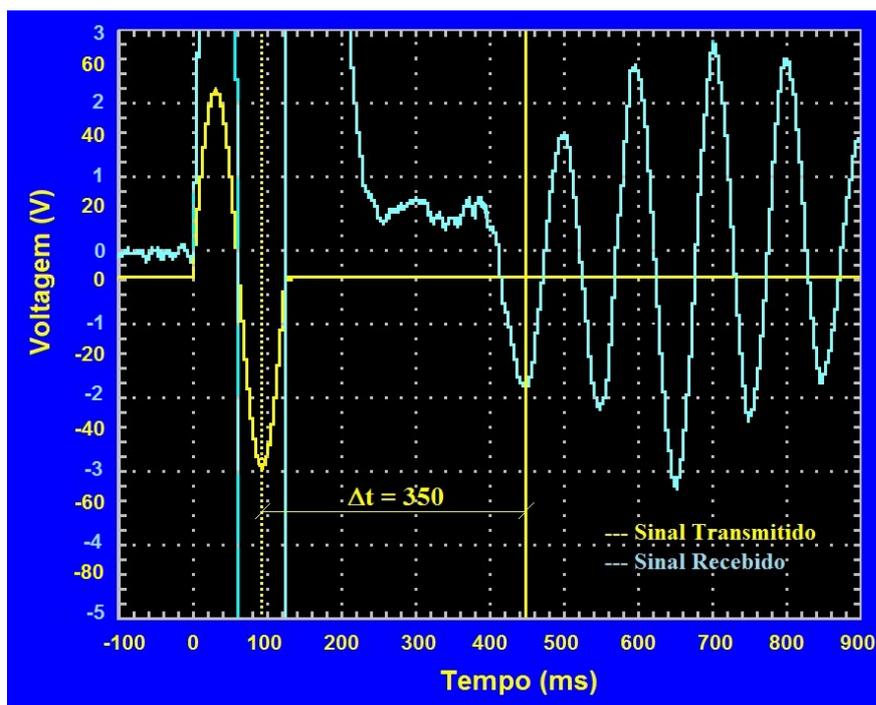


Figura 4.111: típico sinal recebido do ensaio com bender elements de um corpo de prova curado por 28 dias

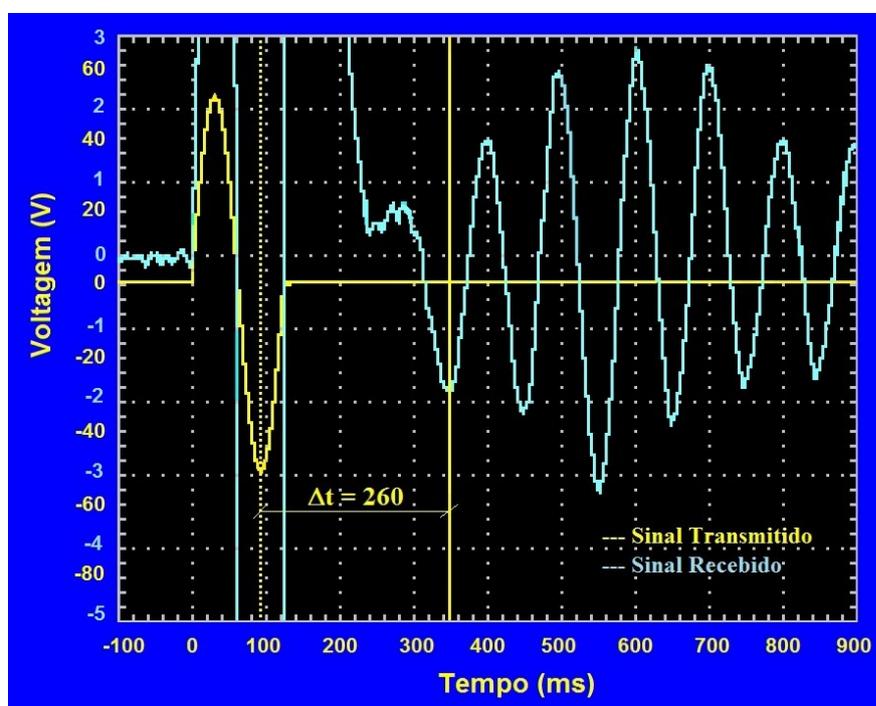


Figura 4.112: típico sinal recebido do ensaio com bender elements de um corpo de prova curado por 90 dias

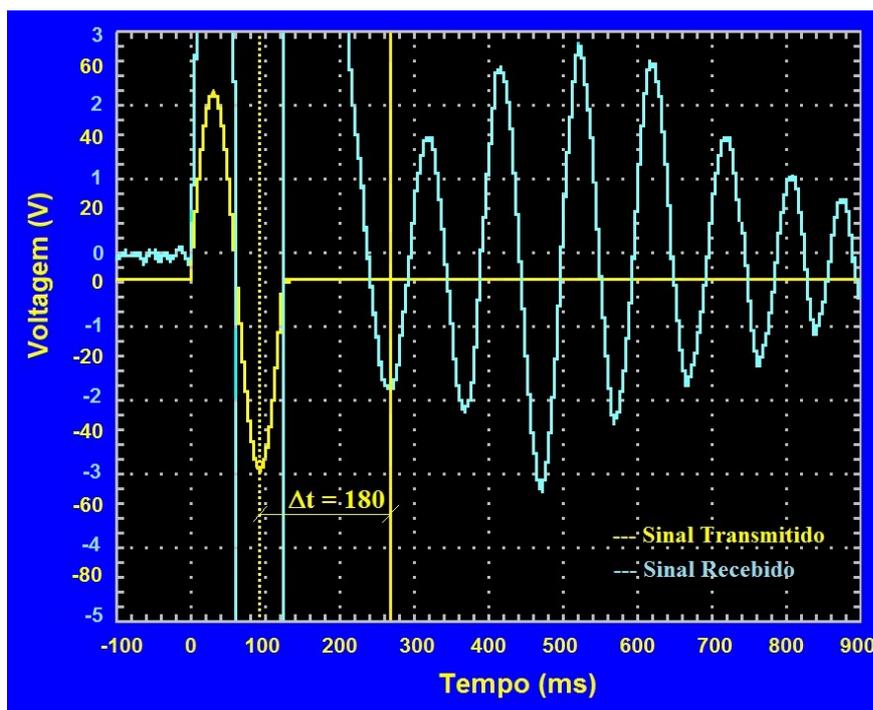


Figura 4.113: típico sinal recebido do ensaio com bender elements de um corpo de prova curado por 180 dias

Segundo Ferreira (2002) este método tem a vantagem de evitar subjetividade associada às determinações visuais, já que os pontos característicos podem ser identificados com precisão, de uma forma simples e fácil, mas tal método requer uma maior resolução de sinal, provavelmente conseguida com solos com menor amortecimento relativo às ondas sísmicas.

O método proposto por Jovicic et al. (1996) de excitação da onda de entrada à frequência de ressonância do elemento receptor, utiliza também este conceito de identificação de pontos característicos correspondentes em ambas as ondas para determinação do tempo de propagação. Neste caso, os autores sugerem a emissão de vários ciclos de ondas sinusoidais de igual frequência, sendo o tempo de propagação definido entre os pontos de pico correspondentes, associados à maior magnitude na onda de resposta.

A interpretação das ondas registradas no ensaio compreende, como já referido, alguma incerteza, sendo certo que por muito elementar que seja o sinal emitido, o sinal recebido será sempre muito mais complexo.

4.5.2 Efeito do Teor de Cal

Nas figuras 4.114 a 4.118, são apresentadas as curvas de ajuste da variação do módulo cisalhante inicial (G_0) em função da quantidade de cal para 7, 15, 28, 90 e 180 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$).

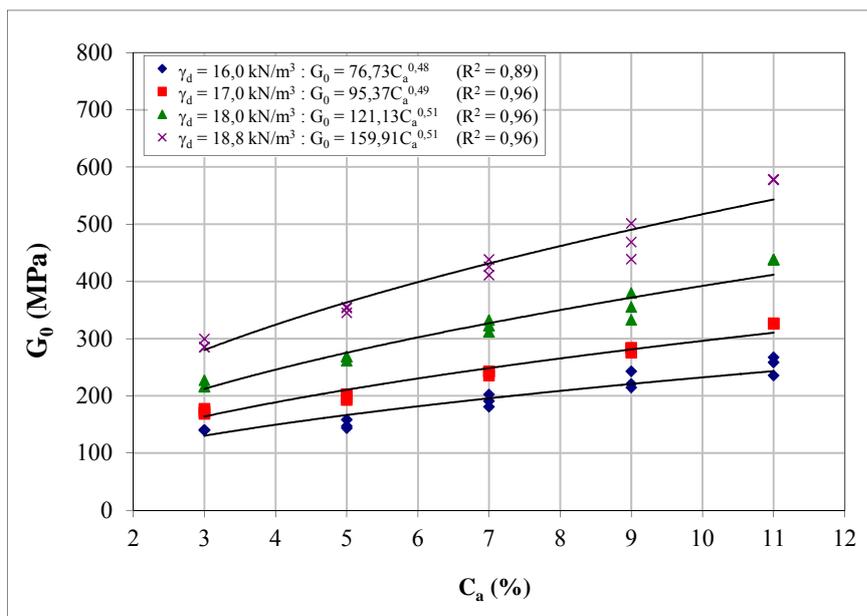


Figura 4.114: variação do G_0 em relação à quantidade de cal de amostras com 7 dias de cura

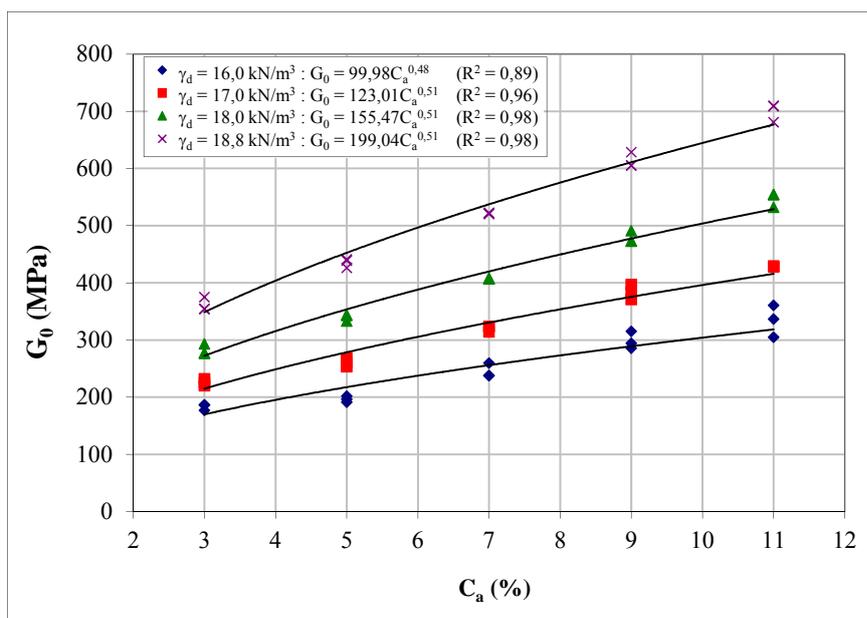


Figura 4.115: variação do G_0 em relação à quantidade de cal em amostras com 15 dias de cura

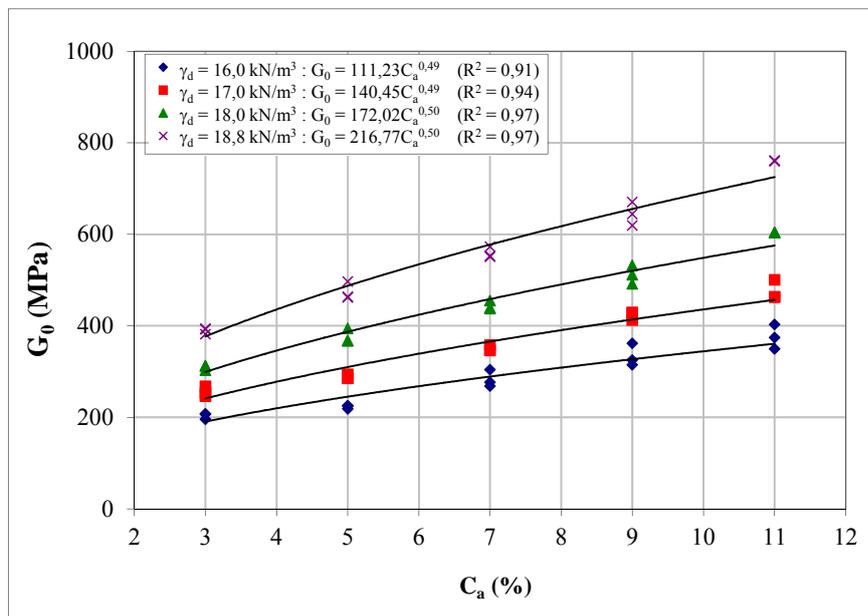


Figura 4.116: variação do G_0 em relação à quantidade de cal em amostras com 28 dias de cura

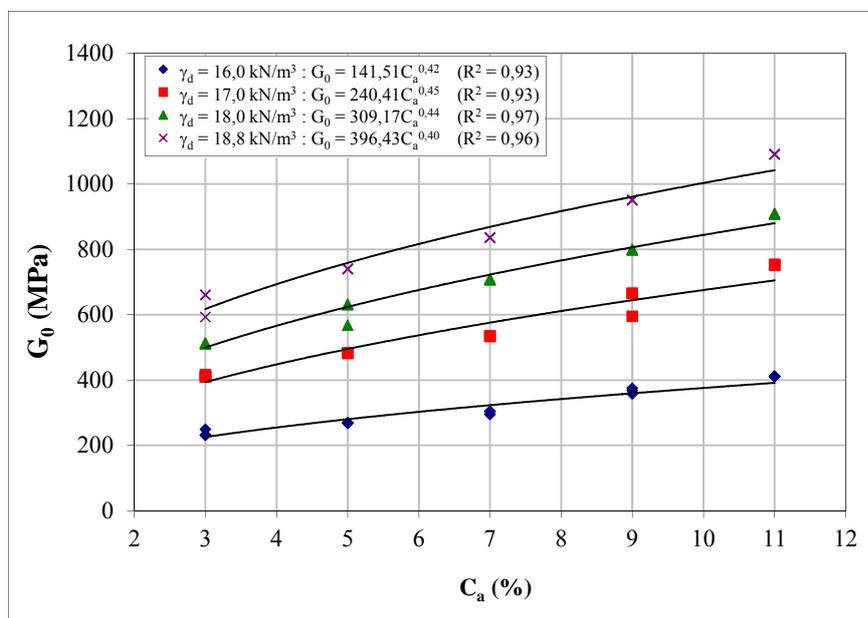


Figura 4.117: variação do G_0 em relação à quantidade de cal em amostras com 90 dias de cura

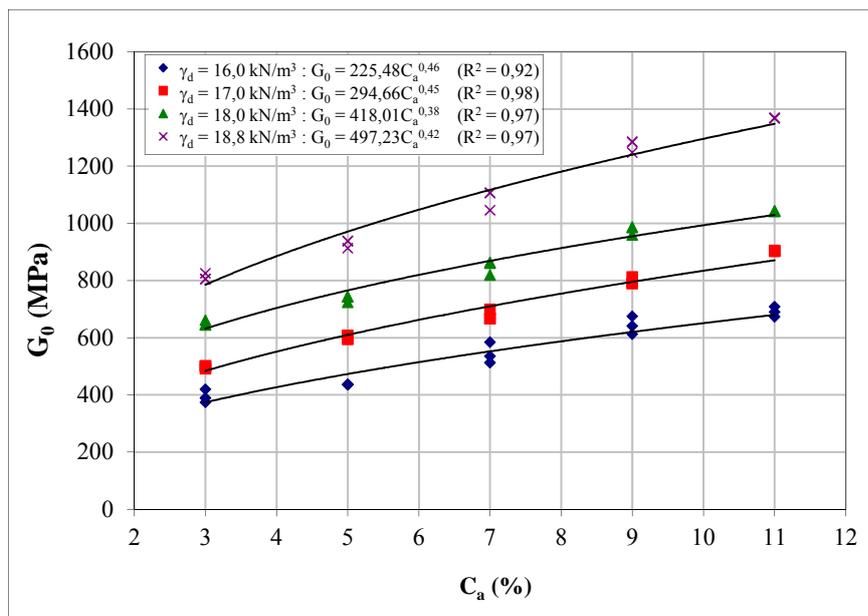


Figura 4.118: variação do G_0 em relação à quantidade de cal em amostras com 180 dias de cura

Pode-se observar que a quantidade de cal tem considerável efeito sobre o módulo cisalhante inicial, tanto para corpos-de-prova ensaiados a 7 dias como para corpos-de-prova ensaiados a 180 dias. Mesmo pequenas adições de cal são suficientes para aumentar o módulo. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 11%, o módulo cisalhante, em média, acresceu 90% em todos os casos.

Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, o aumento do módulo cisalhante com aumento da quantidade de cal não apresenta uma tendência linear, a mesma tende a suavizar com o acréscimo da quantidade de cal. Além disso, a taxa de aumento do módulo, representada pela inclinação das retas de ajuste, praticamente permanece a mesma com o aumento da massa específica aparente seca, para todos os tempos de cura.

Prietto (1996) observou que um dos aspectos mais notáveis do comportamento do solo residual de arenito, artificialmente cimentado com cimento pozolânico, foi o aumento da rigidez inicial com o grau de cimentação.

Já citados anteriormente, Chang e Woods (1992) verificaram que o módulo de cisalhamento sempre cresce com o incremento da cimentação, mas que está dependente das características do tipo de agente cimentante e do tipo de solo tratado.

4.5.3 Efeito da Porosidade

Nas figuras 4.119 a 4.123, são apresentadas as curvas de ajuste da variação do módulo cisalhante inicial em função da porosidade do solo-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 7, 15, 28, 90 e 180 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$).

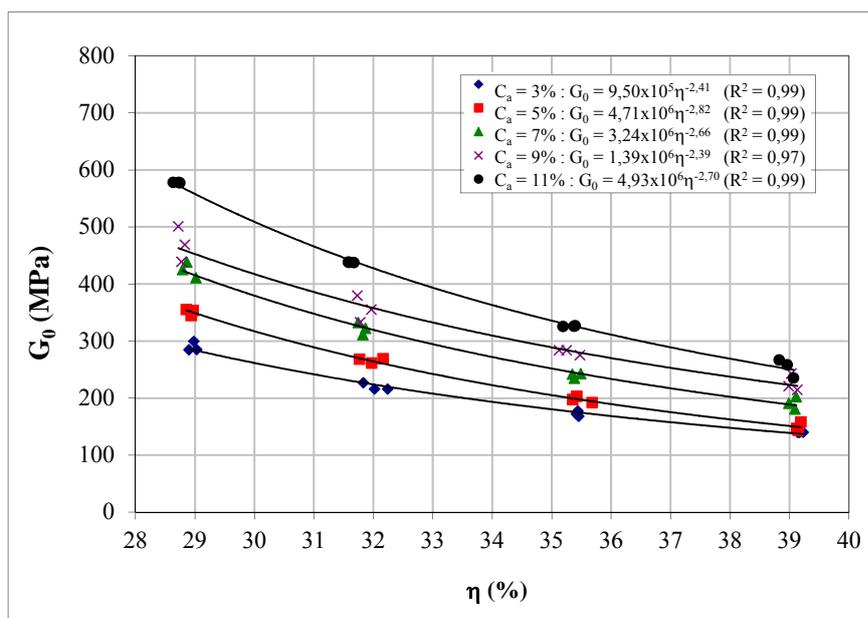


Figura 4.119: variação do G_0 em relação à porosidade de amostras com 7 dias de cura

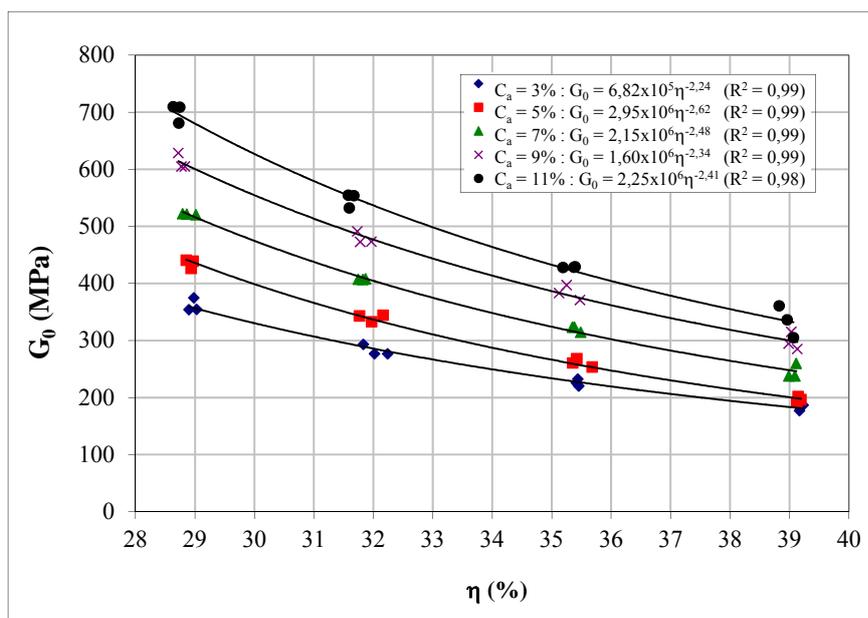


Figura 4.120: variação do G_0 em relação à porosidade de amostras com 15 dias de cura

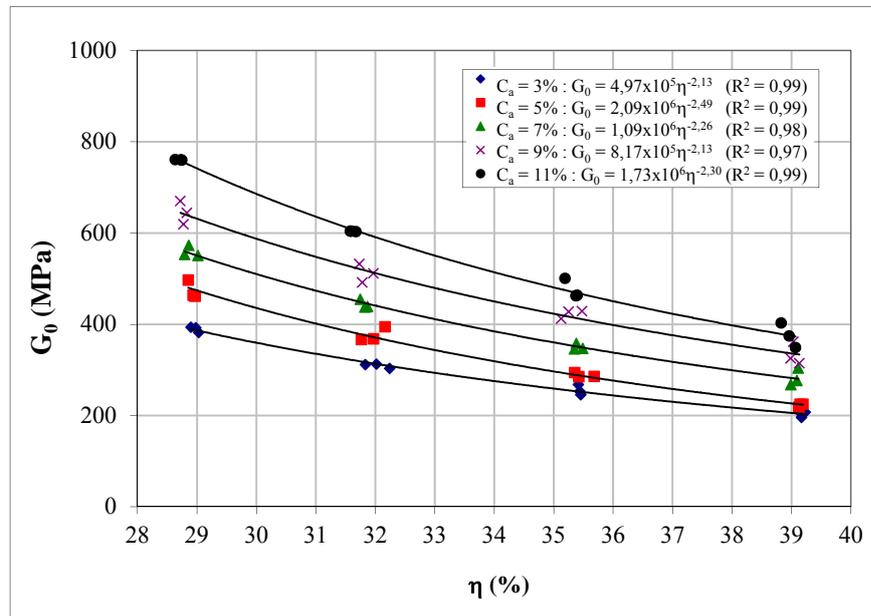


Figura 4.121: variação do G_0 em relação à porosidade de amostras com 28 dias de cura

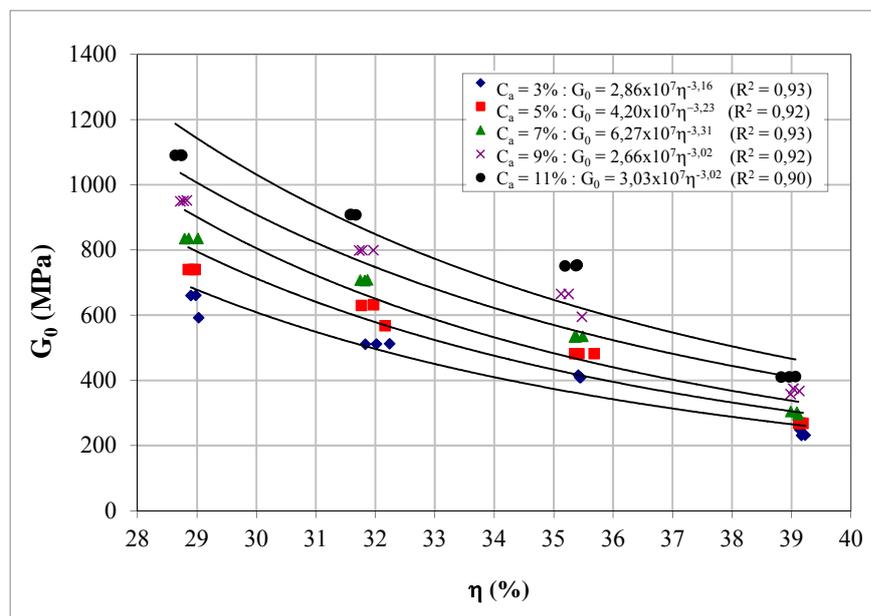


Figura 4.122: variação do G_0 em relação à porosidade de amostras com 90 dias de cura

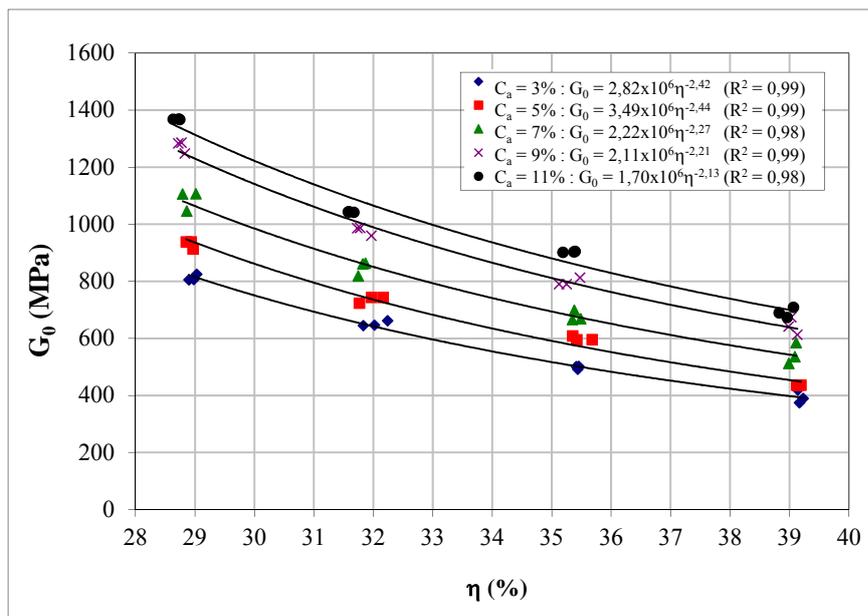


Figura 4.123: variação do G_0 em relação à porosidade de amostras com 180 dias de cura

Verifica-se que, de maneira contrária à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre o módulo cisalhante do solo-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove aumentos consideráveis no módulo. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material duplicou os valores de módulo cisalhante, para todos os tempos de cura.

4.5.4 Efeito da Relação Vazios/Cal

Nas figuras 4.124 a 4.128 são apresentados às correlações entre o módulo cisalhante inicial e a razão do volume total de vazios pelo volume total de cal para amostras com 7, 15, 28, 90 e 180 dias de cura, respectivamente, plotados pelo seu teor de cal. Pode-se observar uma dispersão dos pontos da mistura, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

Verifica-se claramente que pontos com mesma relação vazios/cal obtidos de modos diferentes (um por densificação e outro por aumento do teor de cal), apresentam módulos distintos, sendo que os pontos com menor porosidade e menor quantidade de cal atingem, sistematicamente, resistências maiores, fato ocorrido em todos os tempo de cura.

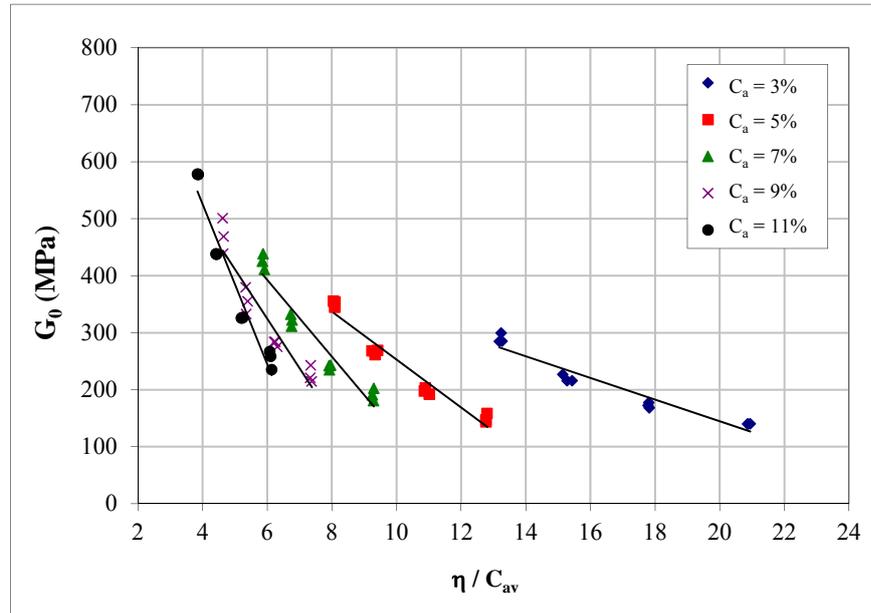


Figura 4.124: módulo cisalhante versus relação vazios/cal de amostras com 7 dias de cura

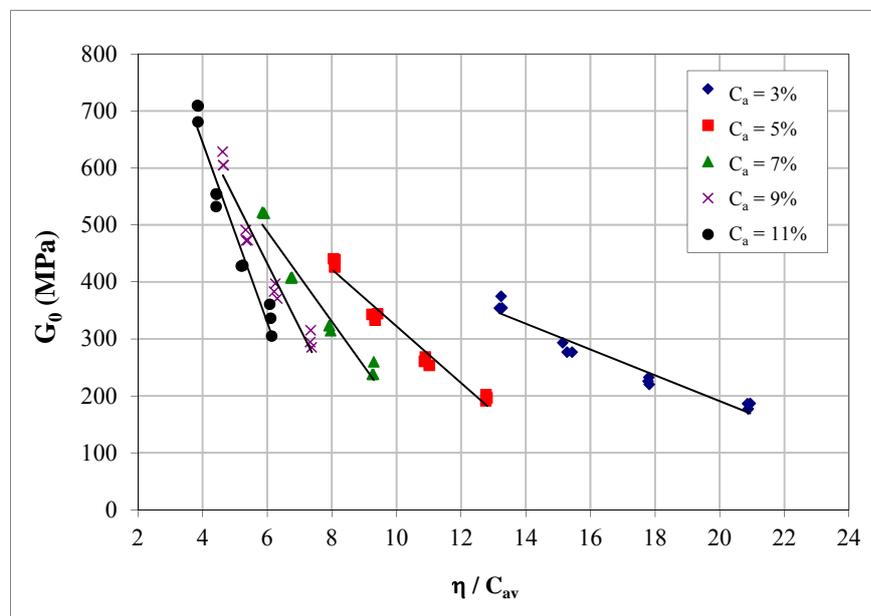


Figura 4.125: módulo cisalhante versus relação vazios/cal de amostras com 15 dias de cura

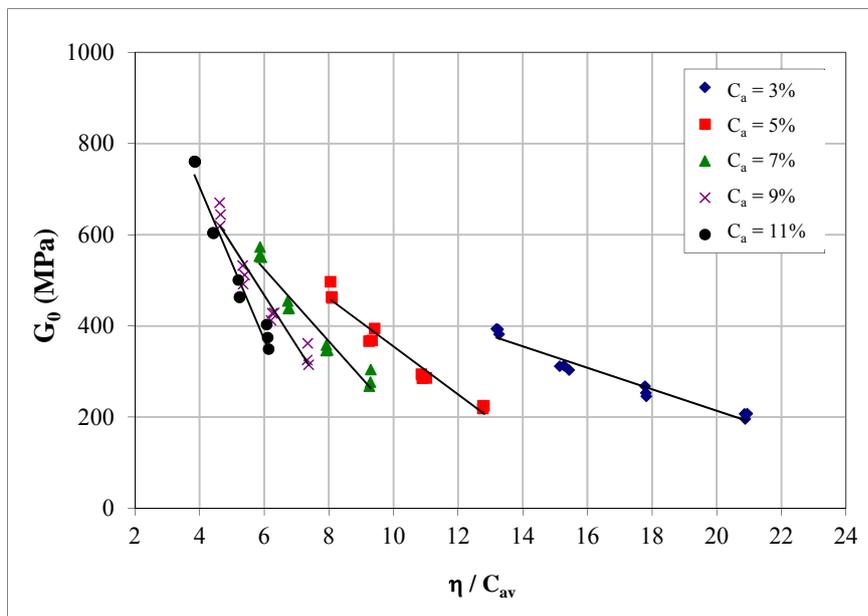


Figura 4.126: módulo cisalhante versus relação vazios/cal de amostras com 28 dias de cura

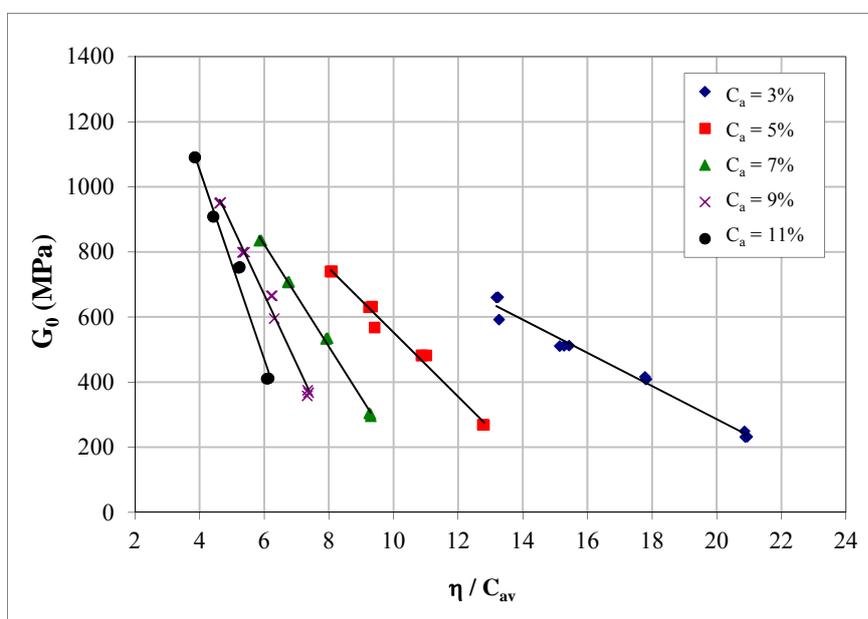


Figura 4.127: módulo cisalhante versus relação vazios/cal de amostras com 90 dias de cura

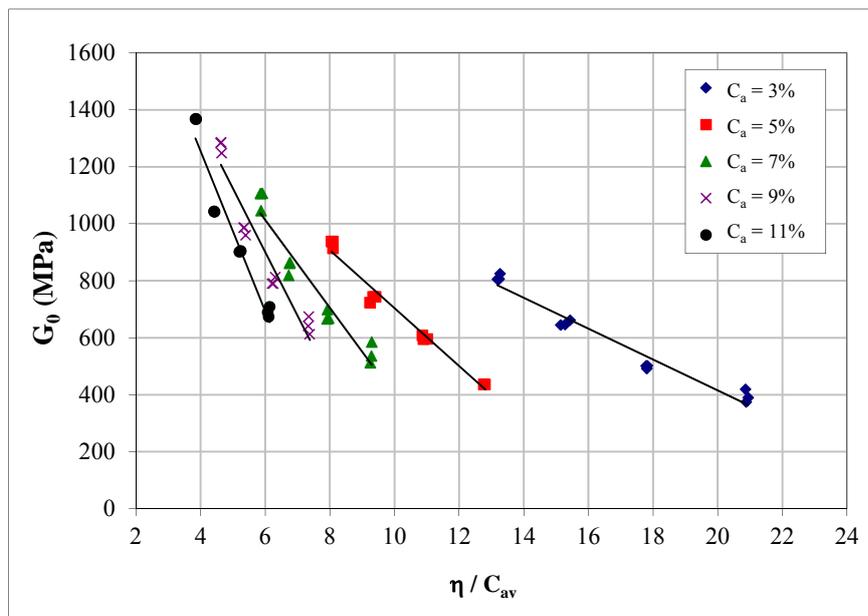


Figura 4.128: módulo cisalhante versus relação vazios/cal de amostras com 180 dias de cura

Pode-se observar que não existe uma correlação única entre o módulo cisalhante e a relação porosidade/teor volumétrico de cal, nota-se ainda, que iguais valores de porosidade/teor volumétrico de cal, obtidos de diferentes combinações de cal e porosidades, apresentam distintos módulos.

Uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas é através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Após diversas tentativas obteve-se que, aplicando uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro C_{av} , haveria uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, resultando num melhor ajuste para a relação vazios/cal.

Nas figuras 4.129 a 4.133, são apresentadas as curvas de variação do módulo cisalhante inicial em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,12, dos corpos-de-prova com 7, 15, 28, 90 e 180 dias de cura, respectivamente. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

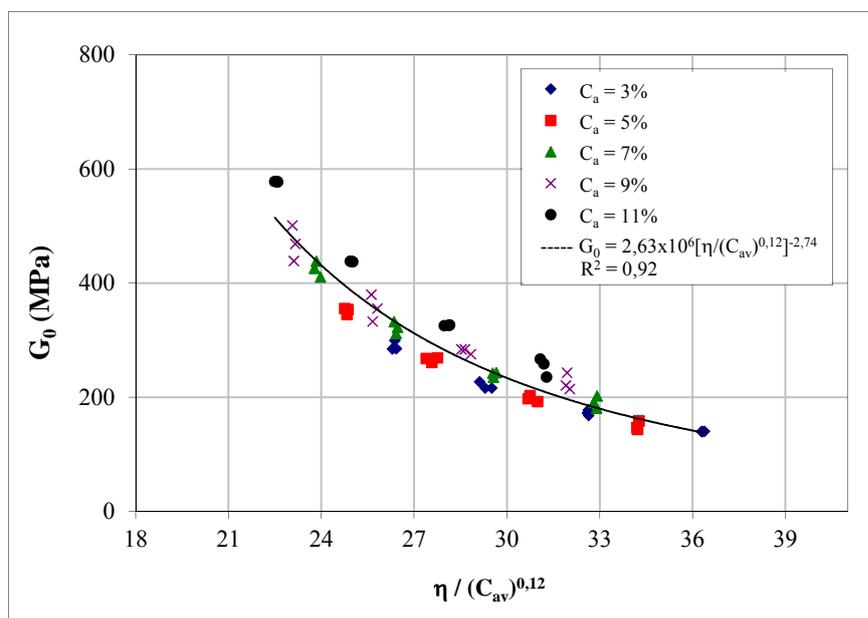


Figura 4.129: módulo cisalhante versus relação vazios/cal ajustado de amostras com 7 dias de cura

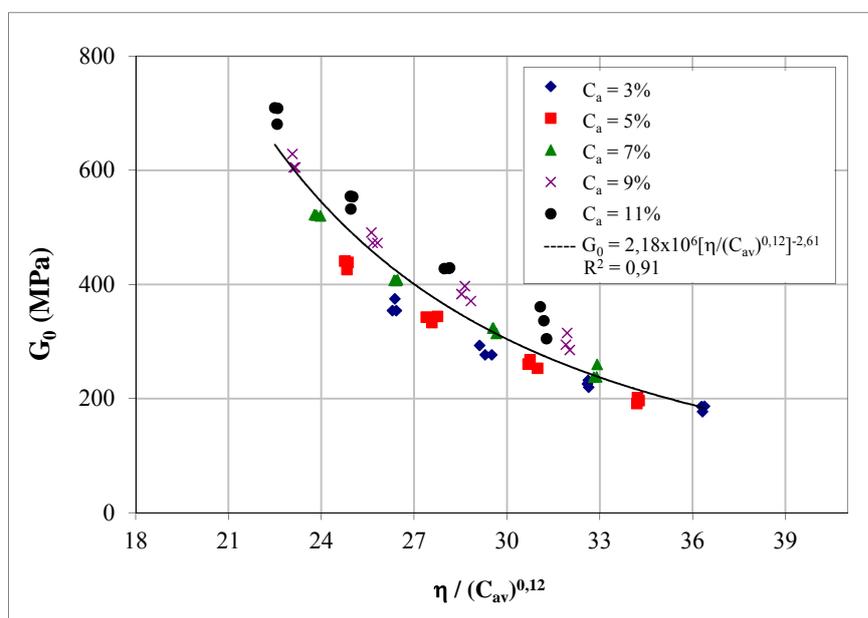


Figura 4.130: módulo cisalhante versus relação vazios/cal ajustado de amostras com 15 dias de cura

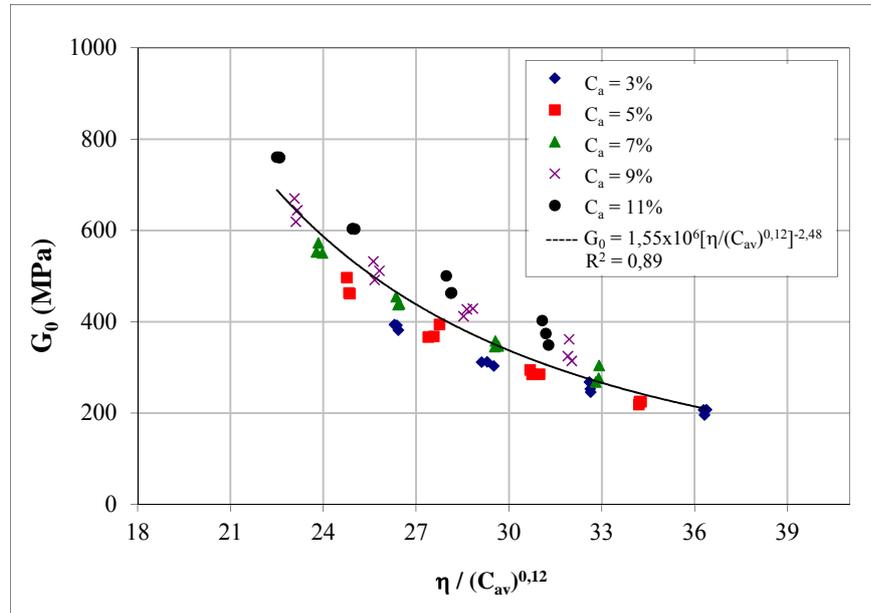


Figura 4.131: módulo cisalhante versus relação vazios/cal ajustado de amostras com 28 dias de cura

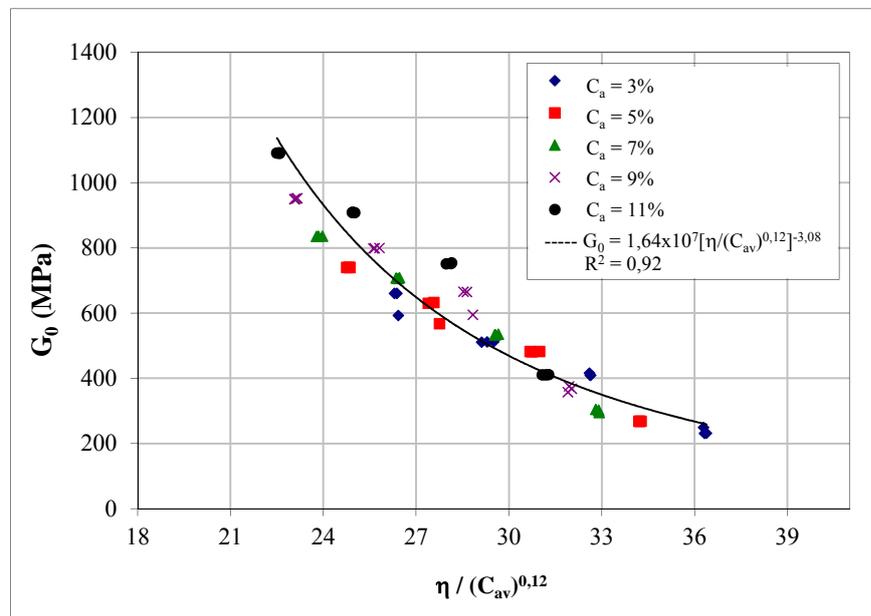


Figura 4.132: módulo cisalhante versus relação vazios/cal ajustado de amostras com 90 dias de cura

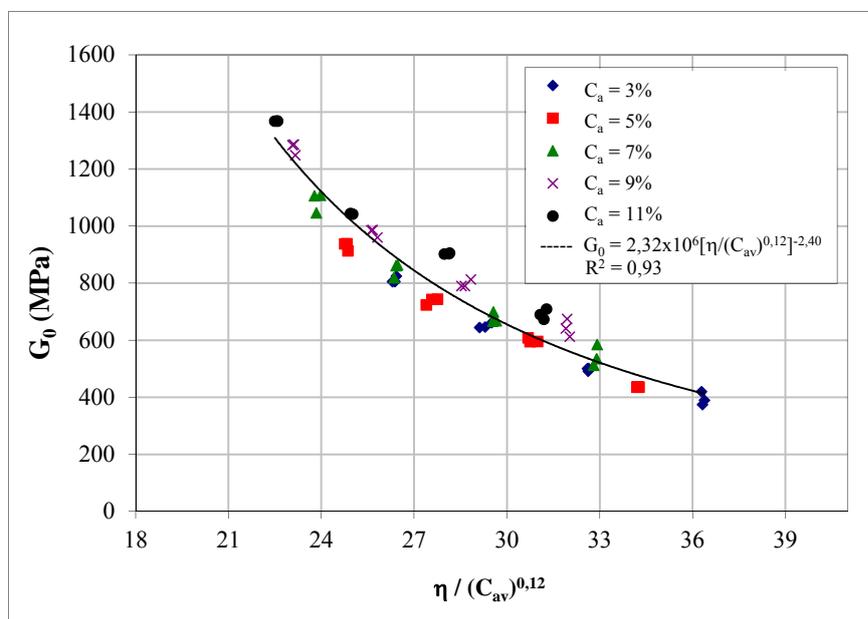


Figura 4.133: módulo cisalhante versus relação vazios/cal ajustado de amostras com 180 dias de cura

4.5.5 Efeito do Tempo de Cura

Na figura 4.134 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustado) pelo módulo cisalhante inicial para todos os tempos de cura. Pode-se notar que o expoente de ajuste da relação η/C_{av} que define a tendência exponencial da curva é o mesmo.

Ainda na figura 4.134, pode-se observar a existência de relações distintas e únicas para as tendências de cada tempo de cura. Comparando as equações obtidas em cada tempo de cura, nota-se que o módulo cisalhante inicial tem um relacionamento direto com a relação η/C_{av} (ajustado) para todos os tempos de cura, tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito do tempo de cura. Portanto, uma relação única pode ser conseguida relacionando o módulo cisalhante inicial com a porosidade, com o teor volumétrico de cal e com o tempo de cura, como apresentado na figura 4.135.

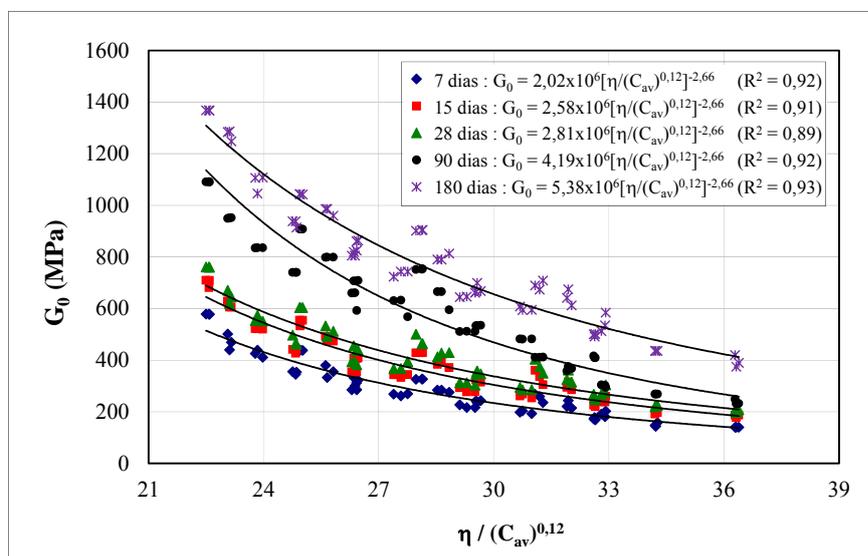


Figura 4.134: módulo cisalhante versus relação vazios/cal ajustado (todas as amostras)

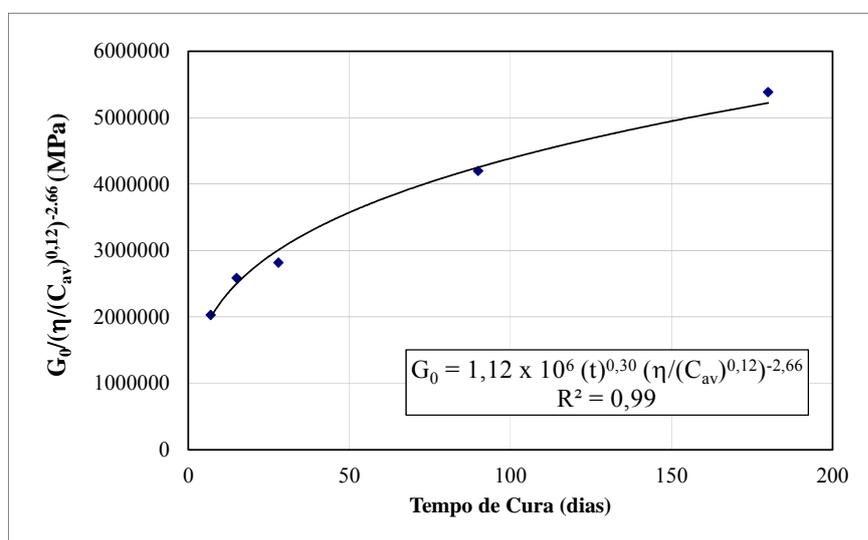


Figura 4.135: variação do G_0 em relação à porosidade, teor de cal e tempo de cura

4.5.6 Correlação com a Resistência à Compressão Simples

Observa-se nos resultados das correlações de G_0 com a relação vazios/cal, que a tendência das curvas são as mesmas se comparadas com os resultados de compressão simples. Através das figuras 4.12 e 4.132, e as respectivas equações das tendências geradas, pode-se utilizar a relação vazio/cal para correlacionar a resistência à compressão simples com o módulo cisalhante inicial.

Na figura 4.136 é apresentado o resultado obtido do relacionamento direto da resistência à compressão simples e o módulo cisalhante com a relação η/C_{av} (ajustado), para amostras com 90 dias de cura.

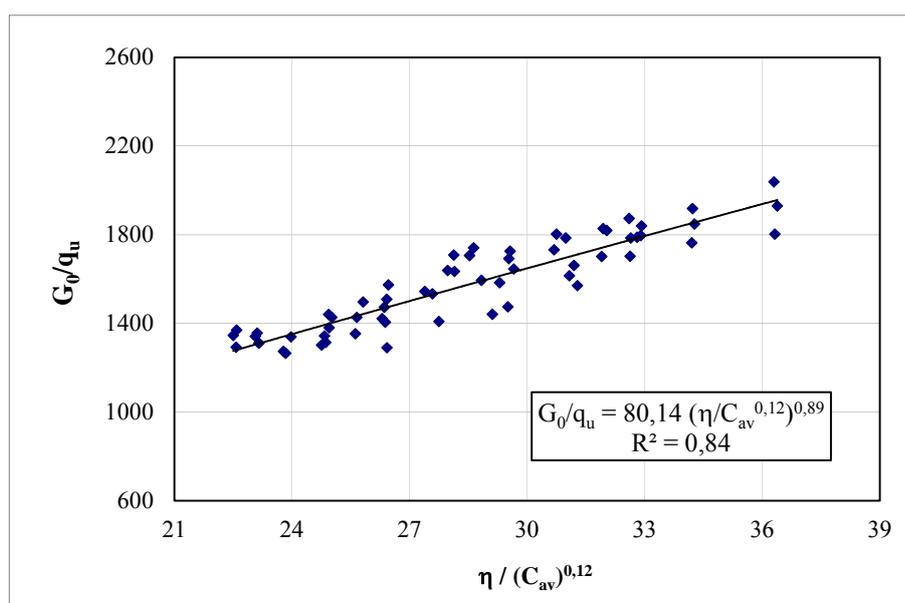


Figura 4.136: razão G_0/q_u versus relação vazios/cal ajustado de amostras com 90 dias de cura

4.6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO PARA A RELAÇÃO VAZIOS/CAL

O exemplo aqui apresentado pretende fornecer um roteiro básico através do qual, a utilização da relação vazios/cal pode contribuir significativamente na racionalização de projetos geotécnicos. Vamos considerar o problema da determinação da capacidade de

suporte de uma fundação superficial assente sobre uma camada tratada com cimento (figura 4.134).

Como apresentado no capítulo dois, Thomé et al. (2005) fornece um método semi-empírico de dimensionamento de fundações superficiais apoiadas sobre uma camada de solo resistente, a qual se encontra assente sobre um solo residual de baixa resistência. Os parâmetros de entrada necessários, referentes aos materiais, são a coesão da camada cimentada (c'_1), a coesão (c'_2), o ângulo de atrito interno (ϕ'_2) e o módulo de elasticidade da camada não cimentada (E_2) (ver equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4).

Apesar da metodologia proposta por Thomé et al. (2005) ser simples e de fácil aplicação, a determinação dos parâmetros acima citados pode tornar-se dispendiosa, tanto em termos de custo quanto de tempo, na medida que ensaios triaxiais seriam necessários.

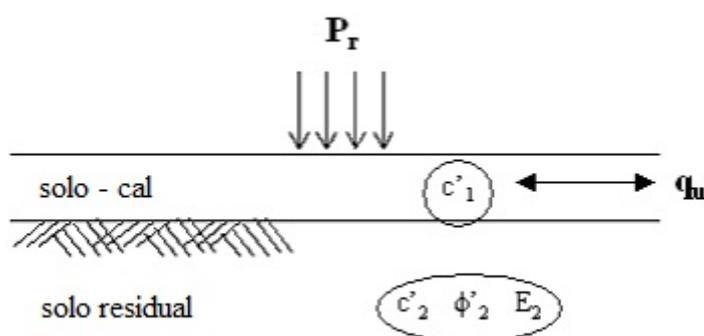


Figura 4.137: camada de solo-cal assente sobre o solo residual – determinação da capacidade de suporte

A alternativa proposta consiste no uso da resistência à compressão simples como fator representativo da resistência da camada cimentada ao invés da coesão. Os parâmetros representativos do solo natural poderiam, também, ser avaliados a partir de correlações com o valor de NSPT (Standard Penetration Test), corriqueiramente disponíveis.

Como apresentado por diversos autores, a coesão de solos cimentados com cal pode ser adequadamente correlacionada com a resistência à compressão simples (CARRARO, 1997; LOPES JUNIOR, 2007; DALLA ROSA, 2009a). Essa adaptação poderia facilmente ser feita nas equações apresentadas por Thomé et al. (2005).

Assim, a capacidade de suporte seria calculada em função da resistência à compressão simples do solo cimentado e dos parâmetros do solo não cimentado, obtidos através de correlações com o NSPT. Isso implicaria numa razoável economia de tempo e recursos financeiros.

Calculada a capacidade de suporte necessária do sistema, resta dosar a camada cimentada para que atinja a resistência à compressão simples requerida. Como foi visto anteriormente, a relação vazios/cal pode ser usada para estimar com boa precisão a resistência à compressão simples do solo-cal compactado.

Para obtenção da relação vazios/cal versus resistência à compressão simples, o seguinte procedimento experimental pode ser adotado:

- Obter as curvas de compactação do solo natural para as duas energias de compactação limite do equipamento disponível em campo;
- Em função das curvas de compactação, definir um teor de umidade de maneira que se obtenha uma boa trabalhabilidade do material na compactação em campo em termos de mistura, homogeneização e compactação;
- Posicionar os pontos de moldagem dos corpos-de-prova dentro do limite das curvas de compactação estabelecidas e em um mesmo teor de umidade (ver figura 4.138);
- Escolher teores de cal de modo que se obtenham pelo menos três pontos com distintos valores de relação vazios/cal;
- Realizar ensaios de compressão simples (em triplicata) dos corpos-de-prova dosados anteriormente.

Uma vez estabelecida a relação, verifica-se no gráfico qual a relação vazios/cal que corresponde à resistência à compressão simples de projeto (Figura 4.139). A partir disso, o projetista poderá escolher a densidade no qual a mistura deve ser compactada e a quantidade de cimento a utilizar, de forma a minimizar os custos.

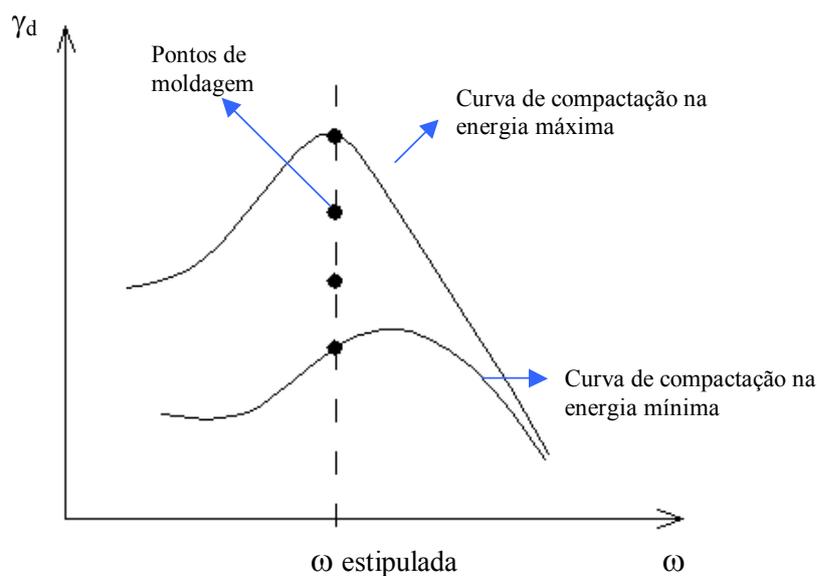


Figura 4.138: posicionamento dos pontos de moldagem

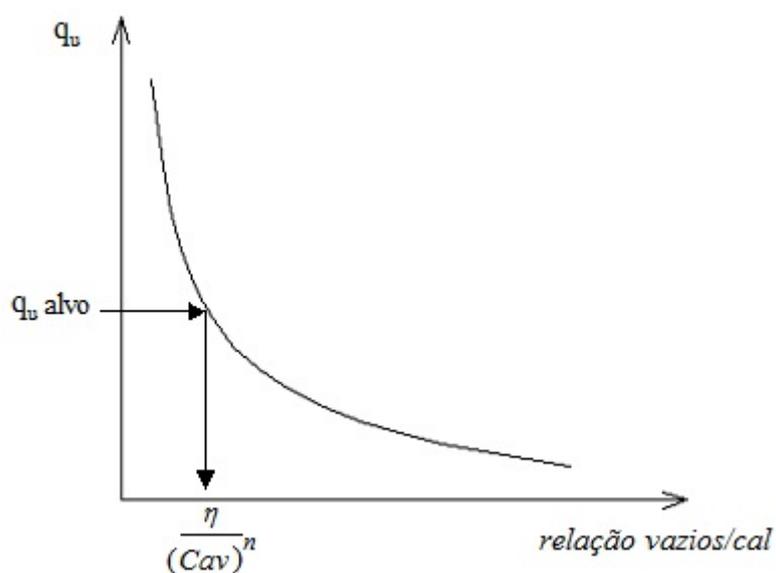


Figura 4.139: determinação da relação vazios/cal para dosagem da mistura

A relação vazios/cal também pode ser muito útil no controle da execução da camada cimentada. É sabido que poderão ocorrer diferenças entre a densidade projetada para a camada e a realmente obtida no local. Uma vez constatada uma compactação deficiente, o projetista poderá calcular a relação vazios/cal realmente atingido em campo e estimar com confiabilidade a perda da resistência decorrente deste fato. Consequentemente poderá tomar

medidas corretivas, como por exemplo, o reforço da camada ou ainda, a redução do carregamento transmitido.

Pelo exposto acima, ficou demonstrado que a utilização da relação vazios/cal pode constituir-se numa ferramenta muito útil no projeto e execução de camadas de solo-cal.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A partir da análise e discussão dos resultados, bem como da avaliação da influência das variáveis investigadas (quantidade de cal, porosidade, teor de umidade de moldagem, relação água/cal, relação vazios/cal e tempo de cura) sobre o comportamento mecânico de um solo arenoso artificialmente cimentado com e sem adições foram estabelecidas, dentro das condições e limites específicos deste estudo, as seguintes conclusões:

a) Quanto ao potencial de reatividade dos materiais

O potencial de reatividade dos agregados, através do método químico, mostrou que o solo tem menos sílica dissolvida que o resíduo de britagem, e este, por sua vez, têm menos que a cinza volante. Consequentemente, amostras tratadas com cinza volante e cal formam mais géis de silicatos hidratados de cálcio (com subsequente cristalização), os quais proporcionaram maiores resistências do que as amostras com e sem resíduo de britagem.

b) Quanto à resistência não confinada:

A adição de cal, mesmo em pequenas quantidades, promoveu ganhos de resistência nos três compósitos estudados (solo-cal, solo-RBR-cal e solo-CV-cal). Na faixa de teores estudados (3% até 11%), a resistência à compressão simples aumentou não-linearmente com o aumento da quantidade de cal. A taxa de ganho de resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, não alterou consideravelmente com o aumento da massa específica aparente seca. Independentemente da quantidade de cal adicionada, a redução na porosidade do material compactado promoveu ganhos substanciais de resistência. Verificou-se que a resistência à compressão simples aumentou potencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

Foram encontradas relações distintas e únicas entre a resistência à compressão simples e a relação vazios/cal: $\left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,12}} \right]^{-3,00}$, para o solo cal, $\left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,12}} \right]^{-3,50}$, para solo-cal com resíduo de britagem e $\left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,12}} \right]^{-4,00}$, para o solo-cal com cinza volante. Mesmo usando composições e tempos de cura diferentes, o expoente de ajuste 0,12 é único, evidenciando que este fator está ligado primeiramente ao tipo de agente cimentante utilizado e em segundo a matriz de solo.

A variação do teor de umidade de moldagem não influenciou consideravelmente a resistência à compressão simples do solo-cal com resíduo de britagem, independentemente do tempo de cura. A relação água/cal não é um parâmetro adequado para previsão de resistência mecânica em solos no estado não saturado.

c) Quanto à compressão triaxial:

Quanto maior a cimentação, tensão confinante efetiva de ensaio, tempo de cura e menor o valor da relação vazios/cal das amostras, maior a tensão desvio atingida, para todos os compósitos estudados.

Devido a fraca cimentação, as amostras de solo-cal e solo-cal com resíduo de britagem, curadas por 28 e 90 dias, com 200kPa e 400kPa de tensão de confinamento, apresentaram um comportamento dúctil e compressivo, não demonstrando uma ruptura bem definida. Todas as amostras ensaiadas com 20kPa de tensão confinante apresentaram um comportamento frágil e dilatante, com ruptura bem definida. O comportamento pós-pico de todas as amostras sugerem a existência de um estado último onde a tensão desvio e a deformação volumétrica tendem a valores estáveis com a deformação axial. As amostras com mesmo valor da relação vazios/cal tiveram um comportamento muito semelhante, tanto em termos de comportamento tensão-deformação quanto em termos de variação volumétrica.

Em termos de parâmetros de resistência, para todos os compósitos estudados, o tempo de cura afetou muito mais os valores de coesão obtidos do que os valores de ângulo de atrito.

Quanto menor a relação vazios/cal, maior a rigidez das amostras, para todos os compósitos estudados. A rigidez é praticamente a mesma para amostras com mesmo valor da relação vazios/cal. O aumento da tensão de confinamento efetivo de ensaio tende a aumentar a rigidez das amostras, com exceção das amostras sem adições e com baixo tempo de cura, as quais apresentaram degradação da cimentação durante a fase de adensamento, consequentemente diminuição da rigidez com o aumento da tensão confinante.

As amostras de solo-cal, ensaiadas com 200kPa e 400kPa, não apresentaram dilatação. Para este nível de tensões, constatou-se com a progressiva desestruturação, um comportamento de material não cimentado. No entanto, nas amostras com 20 kPa de confinamento e nas amostras com adições, pode-se observar comportamento típico de solos cimentados: um trecho inicial vertical, considerado elástico, a formação de um patamar, onde ocorre a plastificação e posterior ruptura.

Quanto menor o valor da relação vazios/cal, maior é o valor da razão q/p' atingido pelas amostras nas curvas tensão-dilatância. Os corpos-de-prova com mesma relação vazios/cal apresentaram um comportamento dilatante muito semelhante, não sendo influenciado pelo diferente teor de cal ou porosidade.

d) Compressão confinada x compressão não confinada:

As relações distintas e únicas encontradas para previsão da resistência não confinada são as mesmas encontradas para a previsão da compressão confinada, tendo apenas um escalar devido ao efeito do tempo de cura e confinamento.

Abaixo são apresentadas as equações obtidas relacionando a resistência à compressão simples e a máxima tensão desvio (para tensão de confinamento igual a 20kPa) com a porosidade, com o teor volumétrico de cal e com o tempo de cura, para cada material estudado:

Solo-cal:

$$q_u = 4,89 \times 10^5 (t)^{0,64} \left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,12}} \right]^{-3,00}, \quad q_{20kPa} = 5,78 \times 10^5 (t)^{0,64} \left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,12}} \right]^{-3,00}$$

Solo-RBR-cal:

$$q_u = 1,13 \times 10^7 (t)^{0,53} \left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,12}} \right]^{-3,50}, \quad q_{20kPa} = 1,39 \times 10^7 (t)^{0,54} \left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,12}} \right]^{-3,50}$$

Solo-CV-cal:

$$q_u = 3,83 \times 10^8 (t)^{0,79} \left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,12}} \right]^{-4,00}, \quad q_{20kPa} = 6,83 \times 10^8 (t)^{0,71} \left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,12}} \right]^{-4,00}$$

e) Quanto ao módulo cisalhante

O módulo cisalhante foi medido através da técnica de bender elements nas amostras tratadas com cal, com o objetivo de avaliar os efeitos das variáveis estudadas na rigidez máxima do solo-cal em estudo.

A adição de cal, mesmo em pequenas quantidades, promoveu aumento substancial dos valores medidos de módulo cisalhante. Na faixa de teores estudados (3% até 11%), o módulo cisalhante tende a aumentar não-linearmente com o aumento da quantidade de cal. A taxa de aumento do módulo cisalhante, representada pela inclinação das retas de ajuste, não variou consideravelmente com o aumento da massa específica aparente seca do material compactado. Entretanto, a redução na porosidade do material compactado promoveu aumentos substanciais do módulo cisalhante. Verificou-se que o módulo cisalhante aumentou potencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada, efeito observado em todos os tempos de cura estudados (7, 15, 28, 90 e 180 dias).

Verificou-se que, para a utilização da relação vazios/cal na previsão do módulo cisalhante, é necessária a adoção de uma potência para compatibilizar as taxas de variação das grandezas envolvidas (quantidade de cal e porosidade). Após diversas tentativas obteve-se que, aplicando uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro C_{av} , haveria uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, resultando num melhor ajuste para a relação vazios/cal.

Observou-se a existência de relações distintas e únicas entre o módulo cisalhante e a relação: $\left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,12}} \right]^{-2,66}$, tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito do tempo de cura.

Portanto, abaixo é apresentada a equação resultante da correlação do módulo cisalhante com a porosidade, com o teor volumétrico de cal e com o tempo de cura:

$$G_0 = 1,12 \times 10^6 (t)^{0,30} \left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,12}} \right]^{-2,66}$$

f) Correlação entre módulo cisalhante e resistência à compressão simples

Verificou-se a existência um relacionamento direto da resistência à compressão simples e o módulo cisalhante das amostras tratadas somente com cal, se analisarmos amostras com o mesmo tempo de cura (nesse caso 90 dias), temos como resultante a equação abaixo:

$$\frac{G_0}{q_u} = 80,14 \left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,12}} \right]^{0,89}$$

g) Relação vazios/cal

Verificou-se que a relação vazios/cal, ajustado por um expoente, é um parâmetro eficaz na previsão de comportamento mecânico de solos tratados com cal. Em termos práticos, o projetista pode, utilizando a relação vazios/cal, escolher adequadamente a quantidade de cal e a energia de compactação para proporcionar uma mistura que atenda à resistência e deformabilidade requerida para o projeto ao menor custo possível. A relação vazios/cal pode ser também de extrema utilidade no controle da execução da camada tratada com cal, na medida em que, constatada uma compactação inferior à prescrita, poderá se estimar com confiabilidade a perda da resistência decorrente deste fato e conseqüentemente medidas corretivas poderão ser tomadas como, por exemplo, o reforço da camada ou ainda, a redução do carregamento transmitido.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a dar prosseguimento ao trabalho realizado nesta tese e ampliar o conhecimento sobre o comportamento de solos artificialmente cimentados, o autor sugere os seguintes tópicos de pesquisa:

- A verificação da validade da relação vazios/cal para solos mais argilosos e também para solos mais arenosos do que o utilizado;
- A verificação da relação vazios/cal para outros tempos de cura;
- A verificação do efeito do método de compactação (dinâmico *versus* estático) sobre a relação da resistência com o fator vazios/cal;
- Verificar o efeito da trajetória de tensões sobre a relação vazios/cal e sobre o comportamento de corpos-de-prova com mesmo fator vazios/cal;
- Execução de fotomicroscopia e difração por raios-x, para melhor compreensão dos mecanismos de reações entre o solo e a cal;
- Análise da rigidez e medições de G_0 para o solo-cal com adições;
- Verificar o efeito da temperatura na curva vazios/cal e sobre o comportamento de solos tratados com cal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM C 289-07: Standard test method for potential alkali-silica reactivity for aggregates (chemical method). Philadelphia, 2010.

_____ ASTM C 618-98: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. Philadelphia, 1998.

_____ ASTM D 5102: Standard test method for unconfined compressive strength of compacted soil-lime mixtures. Philadelphia, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Solo – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 1986.

_____ NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. 1984.

_____ NBR 6508: Solo – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. 1984.

_____ NBR 7175: Cal – Cal hidratada para argamassas – Requisitos. 2003.

_____ NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. 1988.

_____ NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. 1984.

_____ NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. 1986.

_____ NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. 2001.

ATKISON, J. H.. An introduction to the mechanics of soils and foundations: through critical state soil mechanics. McGraw-Hill. London. 337p. 1993.

ATKINSON, J. H. Non-linear soil stiffness in routine design. *Géotechnique*, London, v.50, n.5, p.487-508, 2000.

ATTOH-OKINE, N. O. Lime Treatment of laterite soils and gravels – revisited. *Construction and Building Material*, v.9, n.5, p.283-287. 1995.

AKOTO, B. K. A.; SINGH, G. Behaviour of Lime Stabilized Laterite Under Repeated Loading. *Australian Road Research*, Victoria. v.16, p.259-267, 1986.

BELL, F. G. Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. *Engineering Geology*, n.42, p.223-237. 1996.

BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J. I.; TODRES, H. A. Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime – A Critical Review of Literature. PCA R&D Serial N°2066, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 60p., 2003.

BRESSANI, L.A. Experimental studies of an artificially bonded soil. 1990. 459p. Thesis (Ph.D.) – Imperial College of Science and Medicine, University of London, London.

BRITISH STANDARD METHODS OF TEST. BS 1377: Soil for civil engineering purposes – Part 8. Shear strength tests (effective stress). 1990.

BURLAND, J. B. Small is beautiful – the stiffness of soils at small strains. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v.26, p.499-516, 1989.

CARRARO, J. A. H. Utilização de Resíduos Industriais na Estabilização de um Solo Residual de Arenito. 1997. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CASTRO, F. J. C. de O. Contribuição ao Conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquixídicos Utilizando o Hidróxido de Cálcio: Aplicação ao Processo de Geopolimerização (Estabilização). 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CECCONI, M.; VIGGIANI, G.; RAMPELLO, S. An experimental investigation of the mechanical behaviour of a pyroclastic soft rock – In: EVANGELISTA; PICARELLI (Eds.) *The Geotechnics of Hard Soils – Soft Rocks*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1998, p.473-482.

CERATTI, J. A. P. Efeitos da Adição de Cal e Cinza Volante nas Propriedades de um Solo Residual Compactado. 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

CHANDLER, R.J.; CRILLY, M.S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. *Proceedings of the Institute of Civil Engineering*, UK: v.92, n.2, p.82-89, 1992.

CHANG, T.; WOODS, R.D. Effect of particle contact bond on shear modulus. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.118, n.8, p.1216-1233, 1992.

CINCOTTO, M.A. Utilização de sub-produtos e resíduos na indústria da construção civil. In: *Tecnologia de Edificações*. São Paulo, Pini/IPT, 1988 p.71-74.

CLAYTON, C.R.I.; KHATRUSH, S.A.; BICA, A.V.D.; SIDDIQUE, A. The use of hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation. *Geotechnical Testing Journal*, Philadelphia: ASTM, v.12, n.1, p.69-76, 1989.

CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, N. S. Cemented Sands Under Static Loading. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, New York: ASCE, v.107, n.GT6, p.799-817, 1981.

CLOUGH, G.W.; KÜCK, W.M.; KASALI, G. Silicate-stabilized sands. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, New York, v.105, n.1, p.65-82, 1979.

CONSOLI, N.C.; THOMÉ, A.; CERATTI, J.A.P. Engineering properties of organic soft soil-lime mixtures. *Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*, Balkema, v.1, p.217-222. 1997.

CONSOLI, N.C.; ROTTA, G.V.; PRIETTO, P.D.M. The influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soils. *Technical Note. Géotechnique*, London, vol.50, n.1, p.99-105, 2000.

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*, New York: ASCE, 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 – ASCE*, V.133, n.2, p.197-205, 2007.

CONSOLI, N. C. ; LOPES JUNIOR, L. 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, 2009a.

CONSOLI, N.C.; LOPES JUNIOR, L.; FOPPA, D.; HEINECK, K. S. Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils. *Geotechnical Engineering – ICE*, V. 162, p.111-118, 2009b.

COOP, M. R.; WILLSON, S. M. Behavior of hydrocarbon reservoir sand and sanstones. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Reston – Virginia – USA, v.129, n.11, p1010-1019, 2003.

CRUZ, P. T. Compacted Soils – A Particular Case of Non Saturated Material. In: 4º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 2001, Porto alegre. Anais. Rio Grande do Sul: Wai Ying Yuk Gehling e Fernando Schnaid, 2001. p.113-133.

CRUZ, R. C. Influência de Parâmetros Fundamentais na Rigidez, Resistência e Dilatância de uma Areia Artificialmente Cimentada. 2008. 218p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CUCCOVILLO, T.; COOP, M. R.. On the mechanics of structured sands. *Géotechnique*, London, v.49, n.6, p.741-760, 1999.

DALLA ROSA, A. Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal. 198p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009a.

DALLA ROSA, F. Estudo do estado de tensões de cura no comportamento de uma areia artificialmente cimentada. 191p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009b.

DALLA ROSA, F.; CONSOLI, N. C. ; BAUDET, B. A. An experimental investigation of the behaviour of artificially cemented soil cured under stress. *Geotechnique*, v. 58, p. 675-679, 2008.

DALLA ROSA, F. Comportamento mecânico de um solo cimentado curado sob tensão em ensaios triaxiais. 2006. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DYVIK, R.; MADSHUS, C. Laboratory measurements of G_{max} using bender elements. In: *ASCE Annual Convention: Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions*, 1985, Detroit. Proceedings... New York: American Society of Civil Engineers, 1985.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A Quicktest to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization. *Highway Research Record*, Washington, D.C., n.139, p.61-72. 1966.

FEUERHARMEL, C. Aspectos do Comportamento Não Saturado de dois Solos Coluvionares – Gasoduto Bolívia – Brasil. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 128p.

FERREIRA, C.M. F. Implementação e Aplicação de Transdutores Piezoelétricos na Determinação de Velocidades de Ondas Sísmicas em Provetes. Avaliação da Qualidade de Amostragem em Solos Residuais. Dissertação de mestrado. FEUP- Universidade do Porto, Portugal. 2003.

FOPPA, D. Análise de Variáveis-chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados. 2005. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GUIMARÃES, J. E. P. Estabilização de Solos – Nova e importante aplicação da cal – Seus conceitos e suas vantagens. *Boletim nº1*. São Paulo: ABPC, 1971.

GUIMARÃES, J. E. P. *A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil*. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2002.

GREENING, P.D.; NASH, D.F.T. Frequency domain determination of G_0 using bender elements. *ASTM Journal of Geotechnical Testing*. 2004.

HEINECK, K, S. Estudo da Influência de Cimentações Introduzidas sob Tensão. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 118p.

HERRIN, M.; MITCHELL, H. Lime-soil Mixtures. Highway Research Board Bulletin, Washington, D.C., v.304, p.99-121, 1961.

HIGHT, D.W.; JARDINE, R.J. Small-strain stiffness and strength characteristics of hard London tertiary clays. In: ANAGNASTOPOULOS et al. (Eds) Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks. Rotterdam: A.A. Balkema, p.533-552. 1993.

HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. Lime Fixation in Clayey Soils. Highway Research Board, Washington, D.C., n.262, p.20-32. 1960.

HORPIBULSUK, S.; MIURA, N.; NAGARAJ, T. S. Assessment of Strength Development in Cement-Admixed High Water Content Clays with Abram's Law as a Basis. Géotechnique, London, v.53, n.4, p.439-444, 2003.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Levantamento de Recursos Naturais. Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. v.33, Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 796p.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. Soil Stabilization – Principles and Practice. Sidney: Butterworths, 1972. 374p.

ISMAIL, M. A.; JOER, H. A.; SIM, W. H.; RANDOLPH, M. F. Effect of Cement Type on Shear Behavior of Cemented Calcareous Soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128 (6), 520-529. 2002.

JARDINE, R.J.; POTTS, D.M.; FOURIE, A.B.; BURLAND, J.B. Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction. Géotechnique, London, v.36, n.3, p.377-396, 1986.

JOVICIC, V.; COOP, M.R.; SIMIC, M. Objective criteria for determining Gmax from bender element tests. Technical Note. Géotechnique, London, v.46, n.2, p.357-362, 1996.

KÉZDI, Á. Stabilized Earth Roads. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1979. 327p.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Soil Mechanics, SI version. New York: John Wiley & Sons Inc., 1979, 553p.

LA ROCHELLE, P.; LEROUEIL, S.; TRAK, B. BLAIS-LEROUX, L.; TAVENAS, F. Observational approach to membrane and area correction in triaxial tests. In: Symposium on

advanced triaxial testing of soil and rock, Louisville: Proceedings... Philadelphia: American Society of Testing and Materials, p715-731. 1988.

LAUTENSCHLÄGER, C. E. R. Influência Da Relação Vazios/Cimento nos Parâmetros de Resistência de um Solo Artificialmente Cimentado. Trabalho de Diplomação. DECIV/EE/UFRGS, Porto Alegre, 91p, 2007.

LEROUEIL, S.; VAUGHAN, P. R.. The general and congruent effects of structure in the natural soil and weak rocks. *Géotechnique*, London, vol. 40. n.3, p.467-488. 1990.

LITTLE, D. N. Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates. Volume 1: Summary of Findings. Prepared for The National Lime Association, 1999.

LO, S.R.; WARDANI, S.P.R.. Strength and dilatancy of a silt stabilized by cement and fly as mixture. *Canadian Geotechnical Journal*. Ottawa, v.39, n.1, p.77-89, 2002.

LOPES JUNIOR, L.S. Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada. 2007. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOVATO, R. S. Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação. 2004. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MÁNTARAS, F.M.; SCHNAID, F.. Cylindrical cavity expansion in dilatant cohesive-frictional materials. *Géotechnique*, London, v. 52, n.5, p. 337-348, 2002.

MARINHO, F. A. M. A técnica do Papel Filtro para Medição da Sucção. In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 1995, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: CPGEC/CNPQ/FINEP/FAPERGS/ABMS, 1995, 2v, v.1, p.111-125.

MARINHO, F. A. M.; SILVA, R. M. Relation Between Undrained Shear Strength and Suction for Some Brazilian Soils. In: 4º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 2001, Porto alegre. Anais... Rio Grande do Sul: Wai Ying Yuk Gehling e Fernando Schnaid, 2001. p.149-158.

MARTINS, F. B. Automatização do equipamento triaxial visando o estudo de solos tropicais cimentados. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MATEOS, M. Soil Lime Research at Iowa State University. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions*. ASCE, New York, v.90, p.127-153, 1964.

NÚÑEZ, W. P. Estabilização Físico-química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação. 1991. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ORMSBY, W. C.; KINTER, E. B. Effects of Dolomitic and Calcitic Limes on Strength Development in Mixtures with Two Clay Minerals. *Public Roads*. v.37, n.4, p.149-160. 1973.

OSINUBI, K. J. Influence of Compactive Efforts and Compaction Delays on Lime-Treated Soil. *Journal of Transportation Engineering*. Março/Abril. 1998.

PRUSINSKI, J.R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. *Transportation Research Record*, Washington, D.C., nº 1652, p.215-227, 1999.

PRIETTO, P. D. M. Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Artificialmente Cimentado. 1996. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.

PRIETTO, P. D. M.. Resistência e dilatância de solos cimentados: uma abordagem teórico-experimental. Tese (Doutorado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. Porto Alegre, 230p. 2004.

RIGHETTO, G.L. Validação do fator vazios/água cimentante na análise da resistência mecânica de um solo tratado com cal, cimento e resíduo de britagem de rocha. Trabalho de Diplomação. DECIV/EE/UFRGS, Porto Alegre, 93p, 2008.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S.; ROFF, T. E. J. Lime Modification of Clay Soils for Construction Expediency. *Geotechnical Engineering*, London, v.125, p.242-249. 1997.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. Lime Requirement for Stabilization. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. 79TH ANNUAL MEETING, 2000, Washington, D.C.

ROTTA, G.V.; CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M. Influência da formação da matriz cimentante no comportamento tensão-deformação de solos cimentados. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 1998, Brasília. Anais... São Paulo: ABMS/ABGE/UNB, 1998. P.1125-1132.

ROTTA, G. V. Cimentação Introduzida sob Tensão: Compreendendo a Importância do Índice de Vazios de Formação da Estrutura no Comportamento Mecânico de Solos Cimentados. 2000. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.

ROWE, P.W. The stress-dilatancy for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proceedings of the Royal Society*. London, v.269A, p. 500-527, 1962.

ROWE, P.W. Osborne Reynolds and dilatancy. *Géotechnique*, London, v.19, n.1, p. 1-5, 1969a.

ROWE, P.W. The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct shear. *Géotechnique*, London, v.19, n.1, p. 75-86, 1969b.

ROWE, P.W.; OATES, D.B.; SKERMER, N.A. The stress-dilatancy performance of two clays. In: Laboratory Shear Testing of Soils. Special Technical Publication. N. 361. Philadelphia: ASTM, p. 134-143. 1963.

SANDRONI, S.S.; CONSOLI, N.C. Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com dois Solos Difíceis: os Extremamente Moles e os Expansivos. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Gramado. Anais Eletrônicos: 8ª Palestra (PA08). 2010.

SCHNAID, F.; PRIETTO, P.D.M.; CONSOLI, N.C. Prediction of Cemented Sand Behavior in Triaxial Compression. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.127, n.10, p.857-868, 2001.

SCHNAID, F.; MÁNTARAS, F.M.. Cavity expansion in cemented materials: structure degradation effects. Géotechnique, London, 2004.

SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. Delay in Compaction and Importance of the Lime Fixation Point on the Strength and Compaction Characteristics of Soil. Ground Improvement, n.2, p.27-32. 1998.

SKEMPTON, A. W. The pore-pressure coefficients A and B. Géotechnique, London, v.4, p.113-147, 1954.

TATSUOKA, F.; KOHATA, Y. Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications. In: SHIBUYA, S.; MITACHI, T.; MIURA, S. (Eds.) Pre-failure deformation of geomaterials. Rotterdam: A.A. Balkema, 1994. p. 947-1063.

TATSUOKA, F.; JARDINE, R.J.; LO PRESTI, D.; DI BENEDETTO, H.; KODAKA, T. Characterising the pre-failure deformation properties of geomaterials – theme lecture. In: International conference on soil mechanics and foundation engineering, 14., Hamburg, Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, p. 2129-2164, 1999.

THOMÉ, A. Estudo do Comportamento de um Solo Mole Tratado com Cal, Visando seu Uso em Fundações Superficiais. 1994. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

THOMÉ, A. Melhoramento de Solos com Uso de Resíduos Industriais: A Experiência Brasileira. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Búzios. Anais Eletrônicos: 2ª Conferência (CC02). 2008.

THOMÉ, A.; SCHNEIDER, I.A.H.; DALLA ROSA, F.; CONSOLI, N.C. Caracterização Geotécnica de um Resíduo da Indústria de Pedras Semipreciosas e Viabilidade de seu uso em Estabilização de Solos. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 2002, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS, 2002. v.1, p.229-236.

THOMÉ, A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. Circular Footings on a Cemented Layer Above Weak Foundation Soil. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa-Canada, v.42, n.6, p.1569-1584, 2005.

THOMPSON, M. R. Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils. Highway Research Record, Washington, D.C. v.92, p.69-82. 1965.

THOMPSON, M. R. Lime Reactivity of Illinois Soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, v.92, p.67-92.1966.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Lime-fly Ash-stabilized Bases and Subbases. Washington, D.C., 1976, 66p.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Lime Stabilization, reactions, properties, design and construction. Washington: TRB, 1987. 58p. (State of the art report, 5).

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. Soil stabilization for pavements. Technical Manual, Nº 5-822-14, Washington, D. C., 1994.

USBR – U.S. Department of the Interior – Bureau of Reclamation. Earth Manual. Third Edition, Denver, Colorado, 1998.

WOOD, D. M. Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics. Cambridge. 462p. 1990.

**APÊNDICE A – DADOS DOS CORPOS-DE-PROVA ENSAIADOS À
COMPRESSÃO SIMPLES**

Tabela A.1: dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-CAL com 90 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{r,f} (%)	Sucção (KPa)
A1-1	3,0	1,88	16,05	0,642	39,1	14,22	197,5	77,2	3,71	4,88	20,8	36,3	122	123	58,4	75,0	17
A1-2	3,0	1,88	16,08	0,639	39,0	14,24	197,0	76,8	3,71	4,89	20,7	36,1	128		58,7	x	x
A1-3	3,0	1,87	16,02	0,646	39,2	14,50	197,4	77,4	3,70	4,98	20,9	36,4	120		59,2	x	x
A1-4	5,0	3,06	15,98	0,647	39,3	14,30	198,2	77,8	6,06	3,00	12,8	34,4	152	146	58,2	x	x
A1-5	5,0	3,06	16,02	0,643	39,1	14,49	197,3	77,2	6,04	3,04	12,8	34,2	140		59,3	72,8	25
A1-6	5,0	3,07	16,07	0,638	39,0	14,35	197,0	76,7	6,05	3,01	12,7	34,0	145		59,2	x	x
A1-7	7,0	4,23	16,09	0,635	38,8	14,50	196,5	76,3	8,30	2,22	9,2	32,7	160	166	60,1	x	x
A1-8	7,0	4,21	16,03	0,640	39,0	14,25	197,6	77,1	8,32	2,18	9,3	32,8	168		58,6	69,7	19
A1-9	7,0	4,19	15,94	0,650	39,4	14,45	198,3	78,1	8,31	2,21	9,4	33,2	170		58,5	x	x
A1-10	9,0	5,30	15,98	0,644	39,2	14,47	197,8	77,5	10,48	1,75	7,4	32,1	202	206	59,0	x	x
A1-11	9,0	5,32	16,04	0,638	39,0	14,41	197,2	76,8	10,48	1,75	7,3	31,9	205		59,3	71,2	28
A1-12	9,0	5,30	16,00	0,642	39,1	14,48	197,8	77,3	10,49	1,75	7,4	32,0	210		59,2	x	x
A1-13	11,0	6,42	16,14	0,626	38,5	13,84	197,1	75,9	12,66	1,40	6,0	30,8	262	254	58,0	77,0	22
A1-14	11,0	6,41	16,10	0,630	38,6	13,93	197,3	76,3	12,65	1,41	6,0	30,9	247		58,0	x	x
A1-15	11,0	6,39	16,06	0,634	38,8	13,77	198,1	76,9	12,66	1,39	6,1	31,1	254		57,0	x	x
A1-16	3,0	1,98	16,95	0,555	35,7	14,47	198,2	70,7	3,93	4,97	18,0	32,9	222	230	68,8	74,1	31
A1-17	3,0	1,99	17,01	0,549	35,4	14,45	197,5	70,0	3,93	4,96	17,8	32,6	229		69,4	x	x
A1-18	3,0	1,98	16,96	0,554	35,6	14,45	198,1	70,6	3,93	4,96	18,0	32,8	240		68,8	x	x
A1-19	5,0	3,24	16,94	0,554	35,7	14,48	198,2	70,7	6,42	3,04	11,0	31,0	270	272	68,8	72,5	19
A1-20	5,0	3,28	17,14	0,536	34,9	14,49	195,9	68,4	6,42	3,04	10,6	30,3	278		71,2	x	x
A1-21	5,0	3,28	17,14	0,536	34,9	14,21	196,3	68,5	6,43	2,98	10,6	30,3	267		69,8	x	x
A1-22	7,0	4,49	17,08	0,540	35,1	13,51	198,1	69,5	8,89	2,06	7,8	29,3	315	316	65,8	x	x
A1-23	7,0	4,48	17,05	0,542	35,1	13,60	198,5	69,8	8,90	2,08	7,8	29,4	325		66,0	71,6	27
A1-24	7,0	4,49	17,10	0,538	35,0	13,60	198,0	69,3	8,90	2,08	7,8	29,2	309		66,5	x	x

Tabela A.1 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-CAL com 90 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{r,f} (%)	Sucção (KPa)
A1-25	9,0	5,62	16,94	0,551	35,5	14,49	198,3	70,4	11,14	1,75	6,3	28,9	373	382	69,1	69,2	42
A1-26	9,0	5,63	16,99	0,546	35,3	14,43	197,9	69,9	11,15	1,75	6,3	28,7	382		69,4	x	x
A1-27	9,0	5,64	17,00	0,545	35,3	14,20	198,0	69,9	11,17	1,72	6,3	28,7	390		68,5	x	x
A1-28	11,0	6,81	17,11	0,534	34,8	14,04	197,1	68,6	13,42	1,42	5,1	27,7	440	453	69,0	73,5	32
A1-29	11,0	6,85	17,21	0,525	34,4	13,69	196,5	67,7	13,46	1,38	5,0	27,3	458		68,4	x	x
A1-30	11,0	6,82	17,13	0,532	34,7	13,88	197,1	68,4	13,44	1,40	5,1	27,6	461		68,5	x	x
A1-31	3,0	2,11	18,00	0,464	31,7	13,74	196,7	62,3	4,14	4,72	15,0	29,0	323	341	78,0	x	x
A1-32	3,0	2,10	17,95	0,469	31,9	13,63	197,5	63,0	4,15	4,68	15,2	29,2	354		76,7	73,1	27
A1-33	3,0	2,10	17,97	0,467	31,8	13,61	197,3	62,8	4,15	4,67	15,1	29,1	347		76,8	x	x
A1-34	5,0	3,44	17,97	0,465	31,7	13,65	197,3	62,6	6,78	2,87	9,2	27,4	412	408	77,4	x	x
A1-35	5,0	3,45	18,03	0,460	31,5	13,72	196,3	61,8	6,77	2,88	9,1	27,1	408		78,6	x	x
A1-36	5,0	3,42	17,90	0,471	32,0	14,01	197,3	63,2	6,75	2,94	9,4	27,6	403		78,3	71,8	47
A1-37	7,0	4,73	18,02	0,459	31,5	13,67	196,7	61,9	9,31	2,09	6,6	26,1	468	466	78,2	x	x
A1-38	7,0	4,72	17,96	0,464	31,7	13,62	197,3	62,6	9,31	2,08	6,7	26,3	450		77,1	73,2	52
A1-39	7,0	4,71	17,93	0,467	31,8	13,76	197,3	62,8	9,30	2,10	6,8	26,4	480		77,5	x	x
A1-40	9,0	5,95	17,94	0,464	31,7	13,71	197,3	62,6	11,74	1,66	5,3	25,6	560	561	77,6	x	x
A1-41	9,0	5,96	17,96	0,462	31,6	13,92	196,7	62,2	11,72	1,69	5,3	25,5	534		79,1	70,4	48
A1-42	9,0	5,96	17,98	0,461	31,6	13,62	197,1	62,2	11,75	1,65	5,3	25,5	590		77,6	x	x
A1-43	11,0	7,16	17,99	0,459	31,5	13,84	196,5	61,8	14,07	1,40	4,4	24,8	636	642	79,1	x	x
A1-44	11,0	7,17	18,00	0,458	31,4	13,60	196,7	61,8	14,10	1,37	4,4	24,8	631		78,0	72,7	33
A1-45	11,0	7,13	17,91	0,465	31,8	13,74	197,5	62,7	14,08	1,39	4,5	25,1	658		77,5	x	x
A1-46	3,0	2,19	18,70	0,409	29,0	14,03	197,1	57,3	4,31	4,82	13,3	26,4	464	464	90,4	69,9	39
A1-47	3,0	2,19	18,76	0,405	28,8	13,69	197,1	56,8	4,33	4,70	13,1	26,2	470		89,1	x	x
A1-48	3,0	2,19	18,73	0,407	28,9	13,71	197,3	57,1	4,32	4,71	13,2	26,3	459		88,9	x	x

Tabela A.1 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-CAL com 90 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{r,f} (%)	Sucção (KPa)
A1-49	5,0	3,57	18,67	0,410	29,1	14,01	197,5	57,4	7,05	2,94	8,1	24,9	551	561	90,0	x	x
A1-50	5,0	3,60	18,80	0,400	28,6	13,77	196,5	56,2	7,07	2,89	7,9	24,5	563		90,6	79,4	37
A1-51	5,0	3,60	18,80	0,400	28,6	13,83	196,5	56,2	7,07	2,90	7,9	24,5	568		91,0	x	x
A1-52	7,0	4,90	18,65	0,410	29,1	14,10	197,5	57,4	9,68	2,15	5,9	24,0	624	646	90,4	x	x
A1-53	7,0	4,94	18,79	0,400	28,6	13,72	196,7	56,2	9,71	2,10	5,8	23,6	655		90,2	76,1	27
A1-54	7,0	4,92	18,74	0,403	28,7	13,79	197,1	56,7	9,70	2,11	5,8	23,7	660		89,9	x	x
A1-55	9,0	6,20	18,70	0,405	28,8	13,74	197,5	56,9	12,25	1,66	4,6	23,2	701	712	89,1	76,6	28
A1-56	9,0	6,24	18,81	0,397	28,4	13,72	196,5	55,8	12,26	1,66	4,6	22,8	726		90,9	x	x
A1-57	9,0	6,22	18,77	0,400	28,6	13,92	196,7	56,2	12,24	1,69	4,6	22,9	708		91,5	x	x
A1-58	11,0	7,46	18,75	0,399	28,5	13,65	197,1	56,3	14,71	1,38	3,8	22,4	796	817	89,7	75,4	46
A1-59	11,0	7,46	18,73	0,401	28,6	13,64	197,3	56,5	14,71	1,38	3,8	22,5	810		89,3	x	x
A1-60	11,0	7,43	18,67	0,406	28,9	13,92	197,5	57,0	14,68	1,40	3,9	22,7	844		90,0	x	x

Tabela A.2: dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-CAL com 360 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{r,f} (%)	Sucção (KPa)
A2-1	3,0	1,89	16,13	0,633	38,8	13,68	195,4	75,8	3,69	4,70	20,5	35,9	410	407	56,9	x	x
A2-2	3,0	1,88	16,08	0,639	39,0	13,63	196,0	76,4	3,69	4,68	20,7	36,1	415		56,2	77,1	32
A2-3	3,0	1,88	16,08	0,639	39,0	13,86	195,8	76,3	3,68	4,76	20,7	36,1	396		57,2	x	x
A2-4	5,0	3,07	16,06	0,639	39,0	14,05	195,6	76,3	6,01	2,95	12,7	34,1	512	493	57,8	76,8	21
A2-5	5,0	3,07	16,03	0,642	39,1	13,83	196,3	76,8	6,02	2,91	12,8	34,2	454		56,7	x	x
A2-6	5,0	3,07	16,06	0,639	39,0	13,81	196,0	76,4	6,02	2,90	12,7	34,1	514		56,8	x	x
A2-7	7,0	4,22	16,06	0,637	38,9	13,97	195,8	76,2	8,26	2,14	9,2	32,8	570	572	57,6	76,2	47
A2-8	7,0	4,22	16,08	0,636	38,9	13,80	195,8	76,1	8,27	2,11	9,2	32,7	560		57,1	x	x
A2-9	7,0	4,23	16,10	0,633	38,8	13,84	195,4	75,7	8,27	2,12	9,2	32,6	585		57,5	x	x
A2-10	9,0	5,31	16,02	0,639	39,0	13,76	196,5	76,7	10,44	1,67	7,3	31,9	592	600	56,5	x	x
A2-11	9,0	5,35	16,14	0,628	38,6	13,63	195,4	75,3	10,45	1,65	7,2	31,5	614		57,0	78,3	53
A2-12	9,0	5,32	16,03	0,639	39,0	13,79	196,3	76,5	10,44	1,67	7,3	31,9	594		56,7	x	x
A2-13	11,0	6,40	16,09	0,631	38,7	13,67	196,0	75,8	12,55	1,38	6,0	31,0	701	675	56,8	x	x
A2-14	11,0	6,39	16,06	0,634	38,8	13,69	196,2	76,1	12,54	1,38	6,1	31,1	670		56,7	75,9	55
A2-15	11,0	6,39	16,05	0,636	38,9	13,77	196,3	76,3	12,54	1,39	6,1	31,1	655		56,9	x	x
A2-16	3,0	1,98	16,97	0,553	35,6	13,77	197,1	70,2	3,91	4,73	17,9	32,8	575	604	65,6	76,8	43
A2-17	3,0	1,99	17,05	0,545	35,3	13,82	196,2	69,2	3,91	4,74	17,7	32,5	609		66,8	x	x
A2-18	3,0	1,99	17,04	0,546	35,3	13,72	196,3	69,4	3,91	4,71	17,7	32,5	628		66,2	x	x
A2-19	5,0	3,25	17,02	0,547	35,4	13,76	196,5	69,5	6,40	2,89	10,9	30,7	755	730	66,2	x	x
A2-20	5,0	3,24	16,94	0,554	35,7	13,95	197,1	70,3	6,39	2,93	11,0	31,0	733		66,2	x	x
A2-21	5,0	3,26	17,04	0,545	35,3	13,88	196,2	69,2	6,39	2,91	10,8	30,6	704		67,1	77,4	29
A2-22	7,0	4,47	17,02	0,545	35,3	13,88	196,3	69,3	8,78	2,12	7,9	29,5	837	826	67,0	x	x
A2-23	7,0	4,45	16,93	0,554	35,6	14,04	197,1	70,3	8,77	2,15	8,0	29,8	822		66,7	79,0	33
A2-24	7,0	4,47	17,03	0,545	35,3	13,71	196,5	69,3	8,79	2,10	7,9	29,5	818		66,2	x	x

Tabela A.2 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-CAL com 360 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{r,f} (%)	Sucção (KPa)
A2-25	9,0	5,64	17,00	0,545	35,3	13,85	196,5	69,3	11,08	1,68	6,3	28,7	905	942	66,8	x	x
A2-26	9,0	5,64	17,02	0,543	35,2	13,60	196,7	69,3	11,10	1,65	6,2	28,6	949		65,7	72,4	47
A2-27	9,0	5,64	17,02	0,544	35,2	13,72	196,5	69,2	11,09	1,66	6,2	28,6	973		66,3	x	x
A2-28	11,0	6,75	16,95	0,548	35,4	13,71	197,3	69,9	13,31	1,38	5,2	28,2	1080	1092	65,7	73,5	44
A2-29	11,0	6,77	17,00	0,544	35,2	13,87	196,5	69,2	13,30	1,40	5,2	28,0	1135		66,9	x	x
A2-30	11,0	6,78	17,04	0,540	35,1	13,65	196,3	68,9	13,31	1,38	5,2	27,9	1060		66,3	x	x
A2-31	3,0	2,10	17,93	0,470	32,0	13,86	197,3	63,1	4,14	4,76	15,2	29,3	861	923	77,7	x	x
A2-32	3,0	2,10	17,96	0,467	31,8	13,88	196,9	62,7	4,14	4,77	15,2	29,1	978		78,3	74,0	63
A2-33	3,0	2,10	17,97	0,466	31,8	13,90	196,7	62,6	4,14	4,77	15,1	29,1	932		78,6	x	x
A2-34	5,0	3,43	17,94	0,467	31,8	13,77	197,3	62,8	6,77	2,89	9,3	27,5	966	1077	77,6	73,1	77
A2-35	5,0	3,44	18,01	0,462	31,6	13,69	196,7	62,2	6,78	2,87	9,2	27,2	1094		78,0	x	x
A2-36	5,0	3,45	18,04	0,459	31,5	13,67	196,3	61,8	6,77	2,87	9,1	27,1	1172		78,4	x	x
A2-37	7,0	4,74	18,03	0,459	31,4	13,79	196,3	61,7	9,30	2,11	6,6	26,1	1339	1266	79,0	71,9	28
A2-38	7,0	4,72	17,96	0,464	31,7	13,99	196,7	62,4	9,28	2,14	6,7	26,3	1215		79,3	x	x
A2-39	7,0	4,72	17,96	0,464	31,7	13,70	197,1	62,5	9,30	2,09	6,7	26,3	1244		77,6	x	x
A2-40	9,0	5,94	17,93	0,465	31,8	13,85	197,3	62,7	11,73	1,68	5,3	25,6	1412	1426	78,2	x	x
A2-41	9,0	5,97	17,99	0,460	31,5	13,69	196,9	62,0	11,75	1,66	5,3	25,4	1443		78,2	69,8	35
A2-42	9,0	5,97	18,00	0,459	31,5	13,75	196,7	61,9	11,74	1,67	5,3	25,4	1422		78,7	x	x
A2-43	11,0	7,15	17,97	0,461	31,5	13,76	197,1	62,2	14,10	1,39	4,4	24,9	1485	1497	78,3	x	x
A2-44	11,0	7,12	17,90	0,466	31,8	14,02	197,3	62,7	14,06	1,41	4,5	25,1	1499		78,9	74,0	48
A2-45	11,0	7,13	17,91	0,465	31,7	13,87	197,3	62,6	14,07	1,40	4,5	25,1	1506		78,3	x	x
A2-46	3,0	2,20	18,80	0,402	28,7	13,53	196,7	56,4	4,33	4,64	13,0	26,1	1050	1080	88,8	x	x
A2-47	3,0	2,19	18,76	0,405	28,8	13,65	196,9	56,7	4,32	4,69	13,1	26,2	1101		88,9	75,7	52
A2-48	3,0	2,19	18,70	0,409	29,0	13,66	197,5	57,4	4,32	4,69	13,3	26,4	1087		88,0	x	x

Tabela A.2 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-CAL com 360 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{r,f} (%)	Sucção (KPa)
A2-49	5,0	3,59	18,75	0,404	28,8	13,69	196,9	56,6	7,06	2,87	8,0	24,7	1305	1295	89,2	76,7	54
A2-50	5,0	3,59	18,79	0,401	28,6	13,51	196,9	56,4	7,08	2,84	8,0	24,6	1261		88,6	x	x
A2-51	5,0	3,58	18,72	0,407	28,9	13,66	197,5	57,1	7,07	2,87	8,1	24,8	1320		88,5	x	x
A2-52	7,0	4,94	18,79	0,400	28,6	13,60	196,7	56,2	9,71	2,08	5,8	23,6	1497	1525	89,5	x	x
A2-53	7,0	4,92	18,72	0,404	28,8	13,90	196,7	56,7	9,68	2,12	5,9	23,8	1536		90,4	74,8	68
A2-54	7,0	4,91	18,70	0,406	28,9	13,78	197,5	57,1	9,71	2,11	5,9	23,9	1543		89,2	x	x
A2-55	9,0	6,20	18,69	0,406	28,9	13,73	197,7	57,0	12,25	1,66	4,7	23,2	1654	1626	89,0	x	x
A2-56	9,0	6,22	18,77	0,400	28,6	13,64	196,9	56,2	12,26	1,65	4,6	22,9	1606		89,6	75,7	42
A2-57	9,0	6,24	18,82	0,396	28,4	13,58	196,7	55,8	12,28	1,64	4,5	22,8	1618		90,1	x	x
A2-58	11,0	7,46	18,74	0,400	28,6	13,51	197,5	56,5	14,73	1,36	3,8	22,5	1705	1741	88,6	76,2	37
A2-59	11,0	7,43	18,66	0,406	28,9	13,81	197,7	57,1	14,68	1,39	3,9	22,7	1742		89,2	x	x
A2-60	11,0	7,47	18,77	0,398	28,5	13,82	196,7	56,0	14,70	1,40	3,8	22,4	1776		91,1	x	x

Tabela A.3: dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 28 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rF} (%)	Sucção (KPa)
A3-1	3,0	1,89	16,12	0,704	41,3	13,80	197,3	81,5	3,72	4,74	21,9	38,3	204	197	53,8	x	x
A3-2	3,0	1,90	16,20	0,694	41,0	13,74	196,3	80,5	3,72	4,72	21,6	38,0	192		54,3	69,4	9
A3-3	3,0	1,89	16,20	0,695	41,0	13,74	196,3	80,5	3,72	4,72	21,6	38,0	194		54,3	x	x
A3-4	5,0	3,09	16,18	0,694	41,0	13,85	196,3	80,4	6,08	2,91	13,2	35,8	223	231	54,7	x	x
A3-5	5,0	3,09	16,16	0,696	41,0	13,83	196,5	80,7	6,07	2,90	13,3	35,8	231		54,4	x	x
A3-6	5,0	3,09	16,17	0,694	41,0	13,72	196,5	80,5	6,08	2,88	13,2	35,8	238		54,2	70,3	7
A3-7	7,0	4,24	16,12	0,696	41,0	13,68	197,1	80,9	8,35	2,09	9,7	34,5	252	250	53,7	x	x
A3-8	7,0	4,23	16,09	0,700	41,2	13,76	197,3	81,2	8,34	2,10	9,7	34,6	248		53,8	68,8	5
A3-9	7,0	4,23	16,11	0,698	41,1	13,66	197,3	81,1	8,35	2,09	9,7	34,6	250		53,5	x	x
A3-10	9,0	5,35	16,12	0,693	40,9	13,62	197,3	80,8	10,55	1,65	7,7	33,5	260	264	53,6	x	x
A3-11	9,0	5,34	16,10	0,696	41,0	13,89	197,1	80,9	10,52	1,68	7,7	33,6	265		54,5	70,5	24
A3-12	9,0	5,35	16,13	0,693	40,9	13,73	197,1	80,7	10,54	1,66	7,7	33,5	267		54,1	x	x
A3-13	11,0	6,41	16,10	0,693	40,9	13,79	197,3	80,8	12,64	1,39	6,4	32,8	284	282	54,2	70,2	18
A3-14	11,0	6,40	16,08	0,695	41,0	13,98	197,3	80,9	12,63	1,41	6,4	32,8	279		54,8	x	x
A3-15	11,0	6,44	16,17	0,685	40,7	13,74	196,5	79,9	12,65	1,39	6,3	32,5	282		54,7	x	x
A3-16	3,0	1,99	17,01	0,614	38,1	14,16	197,9	75,3	3,94	4,86	19,1	35,0	318	330	63,3	x	x
A3-17	3,0	1,99	17,03	0,612	38,0	13,93	198,1	75,2	3,95	4,78	19,1	34,9	337		62,5	x	x
A3-18	3,0	2,01	17,15	0,601	37,5	13,75	197,1	74,0	3,95	4,72	18,7	34,5	335		62,8	76,4	20
A3-19	5,0	3,27	17,11	0,602	37,6	13,85	197,3	74,2	6,46	2,91	11,5	32,6	359	355	63,0	x	x
A3-20	5,0	3,26	17,05	0,608	37,8	14,09	197,5	74,7	6,44	2,96	11,6	32,8	352		63,5	x	x
A3-21	5,0	3,27	17,12	0,601	37,5	13,80	197,3	74,1	6,46	2,90	11,5	32,6	354		62,9	76,5	26
A3-22	7,0	4,49	17,10	0,600	37,5	13,97	197,1	73,9	8,86	2,14	8,3	31,3	376	380	63,7	x	x
A3-23	7,0	4,49	17,08	0,601	37,5	13,96	197,3	74,1	8,86	2,13	8,4	31,3	379		63,5	x	x
A3-24	7,0	4,50	17,12	0,598	37,4	13,64	197,5	73,9	8,88	2,09	8,3	31,2	386		62,4	76,9	24
A3-25	9,0	5,64	17,01	0,605	37,7	14,15	197,9	74,6	11,16	1,71	6,7	30,6	403	409	63,8	x	x
A3-26	9,0	5,68	17,13	0,594	37,3	13,75	197,1	73,5	11,20	1,67	6,6	30,3	410		63,2	x	x
A3-27	9,0	5,64	17,00	0,606	37,7	13,92	198,1	74,7	11,17	1,69	6,7	30,7	415		62,7	74,7	27

Tabela A.3 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 28 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rF} (%)	Sucção (KPa)
A3-28	11,0	6,77	17,01	0,602	37,6	14,11	197,9	74,4	13,40	1,42	5,6	29,9	432	429	63,9	x	x
A3-29	11,0	6,77	17,02	0,602	37,6	13,91	198,1	74,4	13,42	1,40	5,5	29,9	430		63,0	x	x
A3-30	11,0	6,79	17,06	0,597	37,4	13,73	197,9	74,0	13,44	1,39	5,5	29,7	425		62,6	74,7	27
A3-31	3,0	2,10	17,99	0,526	34,5	14,18	197,7	68,2	4,16	4,87	16,4	31,5	473	479	74,0	x	x
A3-32	3,0	2,11	18,02	0,523	34,4	14,09	197,5	67,9	4,16	4,84	16,3	31,4	478		73,9	x	x
A3-33	3,0	2,12	18,09	0,518	34,1	13,73	197,3	67,3	4,18	4,71	16,1	31,2	485		72,8	75,2	27
A3-34	5,0	3,45	18,05	0,518	34,1	13,94	197,5	67,4	6,82	2,93	9,9	29,4	529	528	73,7	x	x
A3-35	5,0	3,44	18,01	0,522	34,3	14,03	197,9	67,9	6,82	2,95	10,0	29,6	512		73,7	78,9	67
A3-36	5,0	3,46	18,09	0,515	34,0	13,73	197,5	67,2	6,83	2,88	9,8	29,3	544		73,0	x	x
A3-37	7,0	4,74	18,03	0,517	34,1	13,90	197,9	67,5	9,38	2,12	7,2	28,3	563	569	73,5	80,7	70
A3-38	7,0	4,73	18,02	0,518	34,1	14,14	197,5	67,4	9,35	2,16	7,2	28,3	575		74,6	x	x
A3-39	7,0	4,75	18,08	0,513	33,9	13,67	197,7	67,0	9,39	2,09	7,1	28,1	570		72,9	x	x
A3-40	9,0	5,96	17,98	0,519	34,2	14,22	197,9	67,6	11,80	1,72	5,7	27,6	616	608	74,8	x	x
A3-41	9,0	5,97	18,01	0,516	34,0	14,17	197,5	67,2	11,80	1,72	5,7	27,5	597		75,0	80,4	67
A3-42	9,0	6,00	18,10	0,509	33,7	13,65	197,5	66,6	11,85	1,65	5,6	27,2	611		73,3	x	x
A3-43	11,0	7,16	18,00	0,514	34,0	13,73	198,1	67,3	14,19	1,39	4,7	26,8	653	644	72,7	x	x
A3-44	11,0	7,17	18,01	0,513	33,9	13,67	198,1	67,2	14,20	1,38	4,7	26,8	628		72,6	x	x
A3-45	11,0	7,15	17,96	0,517	34,1	13,88	198,5	67,7	14,19	1,40	4,8	26,9	650		73,1	80,9	70
A3-46	3,0	2,20	18,80	0,461	31,5	13,64	198,1	62,5	4,36	4,68	14,3	28,7	580	597	81,3	x	x
A3-47	3,0	2,20	18,77	0,463	31,6	13,62	198,5	62,8	4,36	4,68	14,4	28,8	592		80,8	x	x
A3-48	3,0	2,18	18,66	0,472	32,0	13,78	199,5	63,9	4,35	4,73	14,7	29,2	619		80,2	x	x
A3-49	5,0	3,58	18,72	0,464	31,7	13,65	198,9	63,0	7,12	2,87	8,9	27,2	667	652	80,6	x	x
A3-50	5,0	3,60	18,81	0,457	31,3	13,78	197,7	62,0	7,11	2,89	8,7	26,9	638		82,7	x	x
A3-51	5,0	3,59	18,78	0,459	31,5	13,70	198,3	62,4	7,12	2,88	8,8	27,0	650		81,7	x	x
A3-52	7,0	4,93	18,77	0,457	31,4	13,64	198,5	62,3	9,79	2,09	6,4	25,9	682	690	81,6	x	x
A3-53	7,0	4,91	18,67	0,465	31,7	13,76	199,1	63,2	9,77	2,10	6,5	26,2	691		80,9	x	x
A3-54	7,0	4,91	18,70	0,463	31,6	14,16	198,3	62,7	9,74	2,16	6,4	26,1	696		83,7	x	x

Tabela A.3 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 28 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A3-55	9,0	6,19	18,66	0,463	31,7	13,73	199,1	63,0	12,32	1,66	5,1	25,4	699	705	80,9	x	x
A3-56	9,0	6,21	18,73	0,457	31,4	13,64	198,7	62,4	12,35	1,65	5,1	25,2	706		81,4	x	x
A3-57	9,0	6,21	18,72	0,458	31,4	13,76	198,5	62,4	12,32	1,67	5,1	25,2	711		82,0	x	x
A3-58	11,0	7,46	18,73	0,455	31,3	13,61	198,9	62,2	14,83	1,37	4,2	24,6	752	768	81,6	x	x
A3-59	11,0	7,44	18,70	0,458	31,4	13,70	199,3	62,6	14,83	1,38	4,2	24,7	772		81,5	x	x
A3-60	11,0	7,43	18,67	0,459	31,5	13,86	199,1	62,7	14,80	1,40	4,2	24,7	781		82,2	x	x
A3-61	3,0	2,12	18,10	0,517	34,1	9,72	197,3	67,2	4,18	3,34	16,1	31,1	500	490	51,6	x	x
A3-62	3,0	2,12	18,11	0,516	34,0	9,82	197,1	67,1	4,18	3,37	16,1	31,1	473		52,2	x	x
A3-63	3,0	2,12	18,13	0,515	34,0	10,00	196,7	66,8	4,17	3,43	16,0	31,0	497		53,4	74,5	70
A3-64	5,0	3,46	18,08	0,516	34,0	10,11	196,9	67,0	6,81	2,12	9,8	29,3	541	544	53,7	x	x
A3-65	5,0	3,45	18,03	0,520	34,2	10,00	197,7	67,6	6,82	2,10	9,9	29,5	529		52,7	72,9	43
A3-66	5,0	3,45	18,03	0,520	34,2	9,94	197,9	67,7	6,82	2,09	9,9	29,5	560		52,4	x	x
A3-67	7,0	4,76	18,10	0,511	33,8	10,06	196,9	66,6	9,36	1,54	7,1	28,1	602	587	53,8	x	x
A3-68	7,0	4,74	18,03	0,517	34,1	9,73	198,1	67,5	9,39	1,49	7,2	28,3	570		51,5	x	x
A3-69	7,0	4,74	18,05	0,516	34,0	10,08	197,3	67,1	9,36	1,54	7,2	28,2	590		53,5	x	x
A3-70	9,0	5,99	18,06	0,512	33,9	9,89	197,5	66,9	11,83	1,20	5,7	27,3	616	612	52,8	x	x
A3-71	9,0	6,00	18,09	0,509	33,7	9,80	197,3	66,6	11,84	1,19	5,6	27,2	611		52,5	74,7	57
A3-72	9,0	5,97	18,02	0,515	34,0	9,83	198,1	67,4	11,84	1,19	5,7	27,4	609		52,1	x	x
A3-73	11,0	7,18	18,05	0,510	33,8	9,74	197,9	66,8	14,22	0,98	4,7	26,6	638	641	52,1	x	x
A3-74	11,0	7,21	18,11	0,505	33,5	9,86	197,1	66,1	14,21	0,99	4,7	26,5	650		53,2	x	x
A3-75	11,0	7,17	18,01	0,513	33,9	9,88	198,1	67,2	14,20	1,00	4,7	26,8	636		52,5	75,8	49
A3-76	3,0	2,11	18,01	0,525	34,4	12,08	197,9	68,1	4,17	4,15	16,3	31,5	483	479	63,2	x	x
A3-77	3,0	2,11	18,03	0,523	34,3	11,91	197,9	67,9	4,17	4,09	16,3	31,4	485		62,6	76,8	29
A3-78	3,0	2,10	18,00	0,526	34,5	11,86	198,3	68,3	4,17	4,07	16,4	31,5	468		61,9	x	x
A3-79	5,0	3,45	18,05	0,518	34,1	11,96	197,5	67,4	6,82	2,51	9,9	29,4	519	514	63,3	x	x
A3-80	5,0	3,45	18,04	0,519	34,2	11,71	198,1	67,7	6,84	2,46	9,9	29,4	500		61,9	x	x
A3-81	5,0	3,44	18,00	0,522	34,3	11,81	198,3	68,0	6,83	2,48	10,0	29,6	524		62,0	77,2	58

Tabela A.3 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 28 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A3-82	7,0	4,74	18,04	0,516	34,0	11,86	197,9	67,4	9,38	1,81	7,2	28,2	553	552	62,9	x	x
A3-83	7,0	4,75	18,08	0,513	33,9	11,82	197,5	67,0	9,38	1,81	7,1	28,1	548		63,0	x	x
A3-84	7,0	4,75	18,07	0,514	33,9	11,98	197,3	67,0	9,37	1,83	7,1	28,1	556		63,8	x	x
A3-85	9,0	5,99	18,08	0,510	33,8	11,97	197,3	66,7	11,83	1,45	5,6	27,3	614	598	64,0	x	x
A3-86	9,0	5,96	17,98	0,518	34,1	12,05	198,1	67,6	11,81	1,46	5,7	27,5	587		63,5	x	x
A3-87	9,0	5,99	18,07	0,511	33,8	11,87	197,5	66,8	11,84	1,44	5,6	27,3	594		63,5	x	x
A3-88	11,0	7,18	18,03	0,511	33,8	12,18	197,3	66,8	14,16	1,23	4,7	26,7	633	632	64,9	x	x
A3-89	11,0	7,20	18,09	0,507	33,6	11,91	197,1	66,3	14,19	1,20	4,7	26,5	624		64,0	80,0	70
A3-90	11,0	7,22	18,15	0,502	33,4	11,65	196,9	65,8	14,23	1,18	4,6	26,4	638		63,3	x	x
A3-91	3,0	2,10	17,99	0,526	34,5	15,74	198,3	68,4	4,17	5,40	16,4	31,5	507	500	82,1	x	x
A3-92	3,0	2,11	18,04	0,522	34,3	15,66	197,9	67,9	4,18	5,38	16,3	31,4	510		82,4	x	x
A3-93	3,0	2,10	17,97	0,528	34,6	15,76	198,1	68,5	4,16	5,41	16,4	31,6	483		82,0	x	x
A3-94	5,0	3,44	17,99	0,523	34,3	15,72	198,1	68,1	6,82	3,30	10,0	29,6	527	527	82,3	x	x
A3-95	5,0	3,44	17,98	0,524	34,4	15,68	198,3	68,2	6,82	3,29	10,0	29,6	522		82,0	x	x
A3-96	5,0	3,44	17,97	0,525	34,4	15,74	198,1	68,2	6,81	3,30	10,0	29,7	534		82,2	x	x
A3-97	7,0	4,72	17,98	0,522	34,3	15,89	198,1	67,9	9,36	2,43	7,3	28,5	565	566	83,3	x	x
A3-98	7,0	4,72	17,96	0,523	34,3	15,83	198,3	68,1	9,36	2,42	7,3	28,5	570		82,8	x	x
A3-99	7,0	4,72	17,97	0,522	34,3	15,78	198,3	68,0	9,36	2,41	7,3	28,5	563		82,6	x	x
A3-100	9,0	5,97	18,00	0,517	34,1	15,95	197,9	67,5	11,81	1,93	5,7	27,5	585	597	84,2	x	x
A3-101	9,0	5,96	17,96	0,520	34,2	15,88	198,3	67,8	11,81	1,92	5,7	27,6	602		83,4	x	x
A3-102	9,0	5,96	17,98	0,518	34,1	15,81	198,1	67,6	11,81	1,92	5,7	27,6	604		83,3	x	x
A3-103	11,0	7,15	17,97	0,517	34,1	15,82	198,3	67,6	14,18	1,60	4,8	26,9	626	628	83,4	x	x
A3-104	11,0	7,15	17,97	0,517	34,1	15,94	197,9	67,4	14,15	1,61	4,8	26,9	619		84,0	x	x
A3-105	11,0	7,15	17,97	0,517	34,1	15,78	198,3	67,6	14,18	1,59	4,8	26,9	638		83,2	x	x

Tabela A.4: dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 90 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rF} (%)	Sucção (KPa)
A4-1	3,0	1,87	15,98	0,719	41,8	13,84	198,3	82,9	3,71	4,75	22,4	38,8	301	294	52,9	x	x
A4-2	3,0	1,87	16,01	0,715	41,7	14,42	196,9	82,1	3,69	4,95	22,3	38,7	289		55,4	x	x
A4-3	3,0	1,88	16,06	0,709	41,5	13,82	197,1	81,8	3,70	4,74	22,1	38,5	294		53,5	72,9	16
A4-4	5,0	3,07	16,05	0,708	41,4	13,87	197,3	81,8	6,06	2,91	13,5	36,2	420	410	53,7	x	x
A4-5	5,0	3,06	15,99	0,713	41,6	14,44	196,9	82,0	6,02	3,03	13,6	36,4	400		55,5	x	x
A4-6	5,0	3,08	16,11	0,701	41,2	13,63	196,9	81,2	6,07	2,86	13,4	36,0	410		53,2	71,9	24
A4-7	7,0	4,23	16,09	0,700	41,2	13,59	197,1	81,1	8,34	2,08	9,7	34,6	444	442	53,1	x	x
A4-8	7,0	4,20	15,99	0,710	41,5	14,49	196,9	81,8	8,27	2,21	9,9	35,0	427		55,8	73,0	11
A4-9	7,0	4,22	16,06	0,703	41,3	14,44	196,2	80,9	8,28	2,21	9,8	34,7	456		56,2	x	x
A4-10	9,0	5,30	15,99	0,708	41,4	14,45	197,3	81,8	10,46	1,75	7,8	33,9	536	542	55,7	x	x
A4-11	9,0	5,30	16,00	0,707	41,4	14,02	197,9	82,0	10,50	1,70	7,8	33,9	548		54,2	x	x
A4-12	9,0	5,32	16,05	0,701	41,2	14,25	196,7	81,1	10,47	1,73	7,7	33,7	543		55,5	73,7	18
A4-13	11,0	6,36	15,97	0,707	41,4	13,58	198,9	82,4	12,64	1,37	6,5	33,2	512	521	52,4	x	x
A4-14	11,0	6,34	15,92	0,712	41,6	14,08	198,5	82,5	12,58	1,42	6,6	33,3	516		53,9	71,4	28
A4-15	11,0	6,38	16,03	0,701	41,2	13,83	197,7	81,5	12,61	1,40	6,5	33,0	536		53,8	x	x
A4-16	3,0	1,98	16,93	0,621	38,3	13,99	198,5	76,1	3,93	4,80	19,4	35,3	485	497	61,8	x	x
A4-17	3,0	1,97	16,88	0,626	38,5	13,91	199,5	76,8	3,94	4,77	19,5	35,5	519		61,0	x	x
A4-18	3,0	1,98	16,92	0,623	38,4	14,33	198,3	76,1	3,92	4,92	19,4	35,4	488		63,2	75,2	43
A4-19	5,0	3,24	16,95	0,616	38,1	13,82	198,7	75,8	6,44	2,90	11,8	33,1	607	632	61,4	x	x
A4-20	5,0	3,26	17,05	0,607	37,8	13,87	197,5	74,6	6,44	2,91	11,6	32,8	638		62,6	76,0	20
A4-21	5,0	3,26	17,03	0,609	37,8	13,59	198,1	75,0	6,45	2,85	11,6	32,8	650		61,2	x	x
A4-22	7,0	4,44	16,88	0,620	38,3	14,28	198,9	76,1	8,82	2,18	8,6	32,0	682	691	63,0	75,5	16
A4-23	7,0	4,48	17,06	0,603	37,6	13,98	197,3	74,3	8,84	2,14	8,4	31,4	699		63,4	x	x
A4-24	7,0	4,46	16,98	0,611	37,9	14,04	197,9	75,0	8,83	2,15	8,5	31,7	691		62,9	x	x
A4-25	9,0	5,63	16,98	0,608	37,8	13,66	198,7	75,1	11,19	1,65	6,7	30,7	783	797	61,4	x	x
A4-26	9,0	5,60	16,88	0,617	38,2	14,06	199,3	76,1	11,16	1,70	6,8	31,0	791		62,2	x	x
A4-27	9,0	5,61	16,92	0,614	38,0	14,21	198,5	75,5	11,14	1,72	6,8	30,9	817		63,2	x	x

Tabela A.4 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 90 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A4-28	11,0	6,75	16,95	0,608	37,8	14,33	197,9	74,8	13,36	1,45	5,6	30,1	851	848	64,3	78,2	45
A4-29	11,0	6,72	16,87	0,615	38,1	14,46	198,7	75,7	13,34	1,46	5,7	30,3	849		64,0	x	x
A4-30	11,0	6,73	16,90	0,613	38,0	14,20	198,7	75,5	13,37	1,43	5,6	30,2	844		63,2	x	x
A4-31	3,0	2,10	17,96	0,528	34,6	13,97	198,3	68,6	4,17	4,79	16,5	31,6	925	915	72,6	x	x
A4-32	3,0	2,11	18,02	0,524	34,4	13,76	198,1	68,1	4,18	4,73	16,3	31,4	900		72,1	75,7	67
A4-33	3,0	2,10	17,94	0,531	34,7	14,16	198,3	68,8	4,16	4,86	16,5	31,7	919		73,2	x	x
A4-34	5,0	3,44	17,98	0,524	34,4	13,90	198,3	68,2	6,82	2,92	10,0	29,7	1102	1101	72,7	76,9	54
A4-35	5,0	3,43	17,93	0,528	34,6	14,08	198,5	68,6	6,81	2,96	10,1	29,8	1113		73,1	x	x
A4-36	5,0	3,44	17,97	0,525	34,4	13,99	198,3	68,3	6,81	2,94	10,0	29,7	1088		73,0	x	x
A4-37	7,0	4,73	18,01	0,519	34,2	13,86	198,1	67,7	9,37	2,12	7,2	28,3	1184	1188	73,1	x	x
A4-38	7,0	4,72	17,97	0,522	34,3	13,98	198,3	68,0	9,36	2,14	7,3	28,5	1193		73,2	74,2	35
A4-39	7,0	4,73	18,02	0,518	34,1	13,73	198,3	67,7	9,39	2,10	7,2	28,3	1188		72,5	x	x
A4-40	9,0	5,95	17,95	0,521	34,3	14,02	198,5	68,0	11,81	1,70	5,8	27,7	1259	1256	73,4	x	x
A4-41	9,0	5,96	17,98	0,519	34,1	13,91	198,3	67,7	11,82	1,68	5,7	27,6	1264		73,2	75,8	39
A4-42	9,0	5,97	17,99	0,518	34,1	13,88	198,3	67,6	11,83	1,68	5,7	27,5	1246		73,2	x	x
A4-43	11,0	7,14	17,93	0,520	34,2	13,82	199,1	68,1	14,21	1,39	4,8	27,0	1339	1342	72,4	x	x
A4-44	11,0	7,14	17,94	0,519	34,2	14,09	198,5	67,9	14,17	1,42	4,8	27,0	1360		73,9	77,3	59
A4-45	11,0	7,13	17,91	0,521	34,3	13,90	199,1	68,2	14,20	1,40	4,8	27,1	1328		72,7	x	x
A4-46	3,0	2,18	18,67	0,470	32,0	13,85	199,3	63,8	4,35	4,76	14,6	29,1	1050	1045	80,8	84,4	42
A4-47	3,0	2,19	18,72	0,467	31,8	13,67	199,5	63,5	4,37	4,69	14,5	29,0	1046		80,4	x	x
A4-48	3,0	2,19	18,76	0,463	31,7	13,81	198,7	62,9	4,36	4,74	14,4	28,8	1038		81,8	x	x
A4-49	5,0	3,58	18,74	0,462	31,6	14,01	198,8	62,9	7,12	2,94	8,8	27,1	1293	1276	83,0	x	x
A4-50	5,0	3,58	18,74	0,463	31,6	13,77	199,3	63,0	7,14	2,89	8,8	27,1	1269		81,6	84,6	62
A4-51	5,0	3,59	18,77	0,460	31,5	14,02	198,3	62,5	7,12	2,94	8,8	27,0	1266		83,5	x	x
A4-52	7,0	4,92	18,72	0,461	31,6	13,81	199,3	62,9	9,80	2,11	6,4	26,1	1361	1384	81,9	x	x
A4-53	7,0	4,93	18,76	0,458	31,4	14,01	198,7	62,4	9,79	2,14	6,4	26,0	1400		83,6	x	x
A4-54	7,0	4,91	18,70	0,463	31,6	14,19	198,9	62,9	9,77	2,17	6,4	26,1	1390		83,9	x	x

Tabela A.4 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 90 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A4-55	9,0	6,20	18,71	0,459	31,5	13,81	199,1	62,6	12,35	1,67	5,1	25,3	1510	1523	82,1	x	x
A4-56	9,0	6,20	18,71	0,459	31,5	13,86	199,3	62,7	12,36	1,68	5,1	25,3	1539		82,4	x	x
A4-57	9,0	6,22	18,77	0,455	31,3	13,93	198,3	62,0	12,34	1,69	5,0	25,1	1520		83,7	x	x
A4-58	11,0	7,42	18,65	0,461	31,6	14,47	198,9	62,8	14,77	1,46	4,3	24,8	1627	1631	85,5	x	x
A4-59	11,0	7,44	18,68	0,459	31,4	14,04	199,1	62,6	14,81	1,42	4,2	24,7	1620		83,4	x	x
A4-60	11,0	7,47	18,76	0,453	31,2	13,96	198,5	61,8	14,82	1,41	4,2	24,5	1647		84,1	x	x
A4-61	3,0	2,11	18,01	0,525	34,4	9,90	198,1	68,2	4,17	3,40	16,3	31,5	939	949	51,8	x	x
A4-62	3,0	2,10	17,99	0,526	34,5	9,82	198,3	68,4	4,17	3,37	16,4	31,5	958		51,2	72,8	41
A4-63	3,0	2,11	18,03	0,523	34,3	9,69	198,1	68,0	4,18	3,33	16,3	31,4	951		50,9	x	x
A4-64	5,0	3,42	17,90	0,531	34,7	9,73	199,7	69,3	6,83	2,04	10,1	29,9	1138	1142	50,2	70,4	50
A4-65	5,0	3,45	18,02	0,521	34,2	9,94	197,9	67,8	6,82	2,09	9,9	29,5	1167		52,3	x	x
A4-66	5,0	3,43	17,93	0,529	34,6	9,87	199,1	68,9	6,83	2,07	10,1	29,8	1121		51,2	x	x
A4-67	7,0	4,71	17,93	0,525	34,4	10,24	198,3	68,3	9,34	1,57	7,3	28,6	1361	1362	53,3	x	x
A4-68	7,0	4,74	18,03	0,517	34,1	9,94	197,3	67,3	9,35	1,52	7,2	28,3	1380		52,6	72,6	25
A4-69	7,0	4,73	17,99	0,521	34,2	9,79	198,5	68,0	9,38	1,50	7,2	28,4	1344		51,4	x	x
A4-70	9,0	5,96	17,98	0,518	34,1	9,59	198,9	67,9	11,86	1,16	5,7	27,5	1412	1426	50,6	x	x
A4-71	9,0	5,96	17,98	0,518	34,1	9,63	198,7	67,8	11,85	1,17	5,7	27,5	1426		50,8	69,7	75
A4-72	9,0	5,99	18,06	0,512	33,9	9,63	198,1	67,1	11,86	1,17	5,7	27,3	1439		51,4	x	x
A4-73	11,0	7,16	17,98	0,516	34,0	9,83	198,5	67,6	14,20	0,99	4,8	26,9	1502	1493	51,9	71,6	84
A4-74	11,0	7,17	18,02	0,512	33,9	9,62	198,5	67,2	14,24	0,97	4,7	26,7	1485		51,2	x	x
A4-75	11,0	7,18	18,03	0,511	33,8	9,64	198,3	67,1	14,23	0,97	4,7	26,7	1494		51,4	x	x
A4-76	3,0	2,12	18,09	0,518	34,1	11,84	197,5	67,4	4,18	4,06	16,1	31,2	1016	997	62,8	x	x
A4-77	3,0	2,10	17,97	0,528	34,5	11,85	198,5	68,6	4,17	4,07	16,4	31,6	966		61,7	x	x
A4-78	3,0	2,10	17,97	0,528	34,5	11,70	198,9	68,7	4,18	4,02	16,4	31,6	1009		60,9	75,4	38
A4-79	5,0	3,45	18,03	0,520	34,2	11,90	198,1	67,8	6,83	2,50	9,9	29,5	1164	1161	62,7	x	x
A4-80	5,0	3,45	18,07	0,517	34,1	11,80	197,9	67,4	6,84	2,48	9,9	29,4	1157		62,5	78,7	54
A4-81	5,0	3,45	18,03	0,520	34,2	12,24	197,5	67,6	6,81	2,57	9,9	29,5	1162		64,5	x	x

Tabela A.4 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 90 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A4-82	7,0	4,74	18,04	0,516	34,0	11,95	197,7	67,3	9,37	1,83	7,2	28,2	1244	1258	63,3	75,0	47
A4-83	7,0	4,73	17,99	0,520	34,2	11,90	198,5	67,9	9,38	1,82	7,2	28,4	1266		62,6	x	x
A4-84	7,0	4,73	18,02	0,518	34,1	12,10	197,9	67,6	9,37	1,85	7,2	28,3	1264		63,9	x	x
A4-85	9,0	5,98	18,04	0,514	33,9	12,11	197,5	67,0	11,81	1,47	5,7	27,4	1378	1360	64,3	76,6	34
A4-86	9,0	5,96	17,96	0,520	34,2	12,13	198,3	67,9	11,81	1,47	5,7	27,6	1358		63,7	x	x
A4-87	9,0	5,96	17,97	0,519	34,2	12,00	198,5	67,8	11,83	1,45	5,7	27,6	1344		63,1	x	x
A4-88	11,0	7,15	17,96	0,518	34,1	11,91	198,7	67,8	14,20	1,20	4,8	26,9	1395	1413	62,7	x	x
A4-89	11,0	7,15	17,96	0,517	34,1	12,15	198,1	67,5	14,16	1,23	4,8	26,9	1407		64,0	73,4	58
A4-90	11,0	7,15	17,95	0,518	34,1	12,03	198,5	67,7	14,18	1,21	4,8	27,0	1436		63,3	x	x
A4-91	3,0	2,10	17,93	0,531	34,7	15,77	198,9	69,0	4,17	5,41	16,5	31,7	936	947	81,5	74,3	37
A4-92	3,0	2,12	18,13	0,515	34,0	15,57	197,1	67,0	4,18	5,35	16,0	31,1	949		83,0	x	x
A4-93	3,0	2,10	17,94	0,530	34,7	15,93	198,1	68,7	4,16	5,47	16,5	31,7	956		82,5	x	x
A4-94	5,0	3,43	17,93	0,528	34,6	15,97	198,3	68,5	6,80	3,35	10,1	29,8	1079	1081	82,9	x	x
A4-95	5,0	3,44	17,97	0,525	34,4	15,66	198,5	68,3	6,82	3,29	10,0	29,7	1092		81,8	77,6	48
A4-96	5,0	3,45	18,02	0,521	34,3	15,69	197,7	67,7	6,81	3,29	9,9	29,5	1073		82,5	x	x
A4-97	7,0	4,71	17,91	0,527	34,5	15,86	198,9	68,7	9,36	2,42	7,3	28,7	1144	1155	82,3	x	x
A4-98	7,0	4,71	17,94	0,525	34,4	15,72	198,7	68,4	9,37	2,40	7,3	28,6	1153		82,0	75,5	32
A4-99	7,0	4,73	18,02	0,518	34,1	15,68	197,9	67,5	9,37	2,40	7,2	28,3	1169		82,8	x	x
A4-100	9,0	5,94	17,90	0,525	34,4	15,75	199,3	68,6	11,83	1,91	5,8	27,8	1244	1243	81,9	78,6	63
A4-101	9,0	5,95	17,94	0,522	34,3	15,89	198,5	68,0	11,81	1,93	5,8	27,7	1252		83,2	x	x
A4-102	9,0	5,94	17,91	0,524	34,4	15,92	198,7	68,3	11,80	1,93	5,8	27,8	1232		82,9	x	x
A4-103	11,0	7,14	17,94	0,520	34,2	15,80	198,7	67,9	14,19	1,59	4,8	27,0	1288	1316	82,9	76,1	52
A4-104	11,0	7,16	17,99	0,515	34,0	15,70	198,1	67,4	14,18	1,58	4,8	26,9	1335		83,0	x	x
A4-105	11,0	7,14	17,94	0,519	34,2	15,86	198,5	67,9	14,17	1,60	4,8	27,0	1325		83,2	x	x

Tabela A.5: dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 360 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rF} (%)	Sucção (KPa)
A5-1	3,0	1,88	16,10	0,705	41,4	13,67	197,3	81,6	3,72	4,69	22,0	38,3	444	489	53,2	x	x
A5-2	3,0	1,88	16,11	0,705	41,3	13,98	196,9	81,4	3,71	4,80	21,9	38,3	505		54,5	74,2	42
A5-3	3,0	1,88	16,04	0,712	41,6	13,80	197,9	82,3	3,71	4,74	22,2	38,6	519		53,2	x	x
A5-4	5,0	3,07	16,07	0,705	41,4	14,07	196,9	81,4	6,05	2,95	13,5	36,1	856	814	54,7	73,6	24
A5-5	5,0	3,08	16,10	0,702	41,3	13,85	197,1	81,3	6,07	2,91	13,4	36,0	791		54,0	x	x
A5-6	5,0	3,07	16,06	0,706	41,4	13,63	197,9	81,9	6,08	2,86	13,5	36,2	793		52,9	x	x
A5-7	7,0	4,21	16,01	0,708	41,5	14,04	197,7	82,0	8,32	2,15	9,9	34,9	927	971	54,2	74,5	28
A5-8	7,0	4,21	16,03	0,706	41,4	13,84	197,9	81,9	8,34	2,12	9,8	34,8	958		53,6	x	x
A5-9	7,0	4,24	16,15	0,694	41,0	13,79	196,5	80,5	8,34	2,11	9,7	34,4	1029		54,4	x	x
A5-10	9,0	5,32	16,05	0,701	41,2	14,32	196,7	81,1	10,47	1,73	7,7	33,7	1063	1107	55,8	76,3	39
A5-11	9,0	5,31	16,02	0,704	41,3	14,22	197,3	81,5	10,48	1,72	7,8	33,8	1157		55,1	x	x
A5-12	9,0	5,33	16,07	0,699	41,1	13,68	197,7	81,4	10,54	1,66	7,7	33,7	1101		53,4	x	x
A5-13	11,0	6,42	16,14	0,689	40,8	13,93	196,3	80,1	12,61	1,41	6,3	32,6	1160	1203	55,1	x	x
A5-14	11,0	6,43	16,15	0,688	40,8	13,64	196,7	80,2	12,64	1,38	6,3	32,6	1274		54,0	77,1	56
A5-15	11,0	6,41	16,11	0,692	40,9	13,74	196,9	80,5	12,63	1,39	6,4	32,7	1177		54,1	x	x
A5-16	3,0	1,99	17,05	0,610	37,9	13,96	197,5	74,8	3,94	4,79	19,0	34,9	784	738	62,8	x	x
A5-17	3,0	2,00	17,11	0,605	37,7	13,83	197,1	74,3	3,94	4,75	18,8	34,7	667		62,7	74,9	22
A5-18	3,0	2,00	17,13	0,603	37,6	13,65	197,1	74,1	3,95	4,69	18,8	34,6	762		62,2	x	x
A5-19	5,0	3,27	17,07	0,605	37,7	14,04	197,1	74,3	6,44	2,95	11,5	32,7	1492	1462	63,6	x	x
A5-20	5,0	3,25	16,97	0,615	38,1	14,12	198,1	75,4	6,43	2,97	11,7	33,0	1400		63,0	71,6	36
A5-21	5,0	3,27	17,11	0,602	37,6	13,67	197,3	74,1	6,46	2,87	11,5	32,6	1494		62,2	x	x
A5-22	7,0	4,49	17,10	0,600	37,5	13,88	197,1	73,9	8,85	2,12	8,3	31,3	1589	1546	63,3	75,2	39
A5-23	7,0	4,47	17,03	0,606	37,7	13,71	198,1	74,8	8,86	2,10	8,4	31,5	1533		61,9	x	x
A5-24	7,0	4,49	17,10	0,599	37,5	13,56	197,5	74,0	8,88	2,07	8,3	31,3	1516		61,9	x	x
A5-25	9,0	5,62	16,96	0,610	37,9	13,84	198,9	75,4	11,18	1,68	6,7	30,8	1502	1642	61,9	x	x
A5-26	9,0	5,66	17,06	0,600	37,5	13,75	197,7	74,2	11,19	1,66	6,6	30,5	1713		62,5	x	x
A5-27	9,0	5,67	17,10	0,597	37,4	13,58	197,5	73,8	11,20	1,64	6,6	30,3	1713		62,2	78,0	27

Tabela A.5 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 360 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rF} (%)	Sucção (KPa)
A5-28	11,0	6,77	17,02	0,601	37,5	13,67	198,3	74,5	13,44	1,38	5,5	29,8	1756	1810	62,0	70,0	68
A5-29	11,0	6,75	16,97	0,606	37,7	13,97	198,3	74,8	13,40	1,41	5,6	30,0	1868		62,9	x	x
A5-30	11,0	6,78	17,05	0,599	37,5	13,60	198,1	74,2	13,44	1,37	5,5	29,8	1805		61,9	x	x
A5-31	3,0	2,10	17,92	0,532	34,7	14,18	198,5	69,0	4,16	4,87	16,6	31,8	1075	1054	73,2	72,3	86
A5-32	3,0	2,10	17,96	0,529	34,6	14,04	198,3	68,6	4,17	4,82	16,5	31,6	1048		72,9	x	x
A5-33	3,0	2,11	18,02	0,524	34,4	13,53	198,5	68,2	4,18	4,64	16,3	31,4	1038		70,9	x	x
A5-34	5,0	3,42	17,89	0,531	34,7	14,03	198,9	69,0	6,81	2,95	10,1	29,9	1802	1853	72,3	x	x
A5-35	5,0	3,44	17,98	0,524	34,4	13,86	198,3	68,2	6,82	2,91	10,0	29,6	1904		72,5	73,5	54
A5-36	5,0	3,45	18,03	0,520	34,2	13,61	198,3	67,8	6,84	2,86	9,9	29,5	1853		71,8	x	x
A5-37	7,0	4,71	17,93	0,525	34,4	13,99	198,7	68,4	9,36	2,14	7,3	28,6	2072	2107	72,9	x	x
A5-38	7,0	4,73	18,00	0,520	34,2	13,81	198,3	67,8	9,38	2,11	7,2	28,4	2081		72,7	72,5	66
A5-39	7,0	4,71	17,94	0,524	34,4	13,79	198,9	68,4	9,38	2,11	7,3	28,6	2169		71,9	x	x
A5-40	9,0	5,95	17,94	0,521	34,3	14,19	198,1	67,9	11,79	1,72	5,8	27,7	2297	2250	74,3	x	x
A5-41	9,0	5,97	17,99	0,517	34,1	14,04	198,3	67,6	11,83	1,70	5,7	27,5	2239		74,1	77,1	54
A5-42	9,0	5,99	18,05	0,512	33,9	13,59	198,1	67,1	11,86	1,65	5,7	27,3	2215		72,4	x	x
A5-43	11,0	7,13	17,91	0,521	34,3	14,22	198,5	68,0	14,15	1,43	4,8	27,1	2411	2441	74,3	x	x
A5-44	11,0	7,14	17,93	0,520	34,2	14,08	198,5	67,9	14,17	1,42	4,8	27,0	2431		73,8	74,5	72
A5-45	11,0	7,19	18,07	0,508	33,7	13,61	197,9	66,7	14,23	1,37	4,7	26,6	2481		73,0	x	x
A5-46	3,0	2,20	18,79	0,462	31,6	13,51	198,7	62,8	4,37	4,64	14,4	28,7	1447	1472	80,4	x	x
A5-47	3,0	2,20	18,79	0,461	31,6	13,58	198,5	62,7	4,36	4,66	14,4	28,7	1482		80,9	74,3	51
A5-48	3,0	2,19	18,75	0,464	31,7	13,65	198,9	63,1	4,36	4,69	14,5	28,9	1488		80,7	x	x
A5-49	5,0	3,60	18,80	0,457	31,4	13,53	198,7	62,4	7,15	2,84	8,7	26,9	2551	2528	81,0	x	x
A5-50	5,0	3,60	18,80	0,457	31,4	13,58	198,5	62,3	7,14	2,85	8,7	26,9	2493		81,4	75,6	32
A5-51	5,0	3,59	18,75	0,461	31,6	13,65	198,9	62,8	7,13	2,87	8,8	27,1	2539		81,1	x	x
A5-52	7,0	4,92	18,74	0,459	31,5	13,68	198,9	62,6	9,79	2,09	6,4	26,0	2876	2911	81,4	x	x
A5-53	7,0	4,93	18,77	0,457	31,4	13,55	198,9	62,4	9,81	2,07	6,4	25,9	2981		81,1	75,5	25
A5-54	7,0	4,92	18,72	0,461	31,6	13,73	198,7	62,7	9,77	2,10	6,4	26,1	2876		81,4	x	x

Tabela A.5 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 360 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rF} (%)	Sucção (KPa)
A5-55	9,0	6,21	18,72	0,458	31,4	13,80	198,7	62,4	12,34	1,67	5,1	25,2	3132	3217	82,2	78,3	54
A5-56	9,0	6,23	18,79	0,453	31,2	13,59	198,5	61,9	12,37	1,65	5,0	25,0	3272		81,9	x	x
A5-57	9,0	6,21	18,72	0,458	31,4	13,76	198,7	62,4	12,34	1,67	5,1	25,2	3248		82,0	x	x
A5-58	11,0	7,45	18,72	0,456	31,3	13,76	198,9	62,3	14,82	1,39	4,2	24,6	3446	3492	82,3	x	x
A5-59	11,0	7,47	18,77	0,452	31,1	13,54	198,7	61,9	14,84	1,37	4,2	24,5	3504		81,6	77,3	33
A5-60	11,0	7,47	18,77	0,452	31,1	13,63	198,7	61,9	14,84	1,37	4,2	24,5	3527		82,1	x	x
A5-61	3,0	2,11	18,03	0,523	34,3	9,62	198,1	68,0	4,18	3,30	16,3	31,4	1174	1174	50,5	x	x
A5-62	3,0	2,11	18,07	0,519	34,2	9,55	197,9	67,7	4,18	3,28	16,2	31,3	1147		50,5	73,3	37
A5-63	3,0	2,11	18,05	0,521	34,3	9,51	198,1	67,9	4,18	3,27	16,2	31,3	1201		50,1	x	x
A5-64	5,0	3,44	18,00	0,523	34,3	9,71	198,3	68,1	6,83	2,04	10,0	29,6	1975	1969	50,9	x	x
A5-65	5,0	3,45	18,02	0,520	34,2	9,53	198,5	67,9	6,84	2,00	9,9	29,5	1982		50,2	73,9	69
A5-66	5,0	3,45	18,06	0,517	34,1	9,60	197,9	67,5	6,84	2,02	9,9	29,4	1950		50,8	x	x
A5-67	7,0	4,71	17,93	0,525	34,4	10,20	198,3	68,3	9,34	1,56	7,3	28,6	2159	2121	53,1	74,8	51
A5-68	7,0	4,72	17,95	0,523	34,4	10,08	198,1	68,1	9,35	1,54	7,3	28,5	2108		52,7	x	x
A5-69	7,0	4,71	17,94	0,525	34,4	10,22	197,9	68,1	9,33	1,56	7,3	28,6	2096		53,3	x	x
A5-70	9,0	5,97	18,02	0,515	34,0	9,75	198,1	67,4	11,84	1,18	5,7	27,4	2246	2253	51,7	79,0	28
A5-71	9,0	5,98	18,05	0,513	33,9	9,70	197,9	67,1	11,84	1,17	5,7	27,4	2280		51,6	x	x
A5-72	9,0	5,97	18,01	0,516	34,0	9,98	197,7	67,3	11,81	1,21	5,7	27,5	2232		52,9	x	x
A5-73	11,0	7,18	18,04	0,511	33,8	9,57	198,1	67,0	14,22	0,97	4,7	26,7	2513	2481	51,0	x	x
A5-74	11,0	7,19	18,06	0,509	33,7	9,75	197,5	66,6	14,20	0,98	4,7	26,6	2443		52,2	78,1	70
A5-75	11,0	7,17	18,02	0,512	33,9	9,96	197,5	66,9	14,17	1,01	4,7	26,7	2489		53,0	x	x
A5-76	3,0	2,10	17,96	0,529	34,6	11,80	198,5	68,7	4,17	4,05	16,5	31,6	796	821	61,2	x	x
A5-77	3,0	2,10	17,92	0,532	34,7	11,98	198,5	68,9	4,16	4,11	16,6	31,8	863		61,8	77,4	34
A5-78	3,0	2,11	18,02	0,524	34,4	11,55	198,3	68,2	4,18	3,96	16,3	31,4	803		60,5	x	x
A5-79	5,0	3,45	18,02	0,521	34,2	11,52	198,5	68,0	6,84	2,42	9,9	29,5	1599	1581	60,6	76,9	39
A5-80	5,0	3,45	18,02	0,521	34,2	11,76	198,1	67,9	6,83	2,47	9,9	29,5	1529		61,9	x	x
A5-81	5,0	3,46	18,09	0,515	34,0	11,57	197,7	67,2	6,84	2,43	9,8	29,3	1614		61,6	x	x

Tabela A.5 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova do SOLO-RBR-CAL com 360 dias de cura

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	a / c _a	V _v / V _{ca}	η/(C _{av}) ^{0,12}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A5-82	7,0	4,74	18,06	0,515	34,0	11,62	197,9	67,3	9,39	1,78	7,2	28,2	1840	1839	61,8	76,8	29
A5-83	7,0	4,74	18,02	0,517	34,1	11,91	197,7	67,4	9,36	1,82	7,2	28,3	1823		63,0	x	x
A5-84	7,0	4,74	18,02	0,518	34,1	11,63	198,3	67,6	9,39	1,78	7,2	28,3	1855		61,5	x	x
A5-85	9,0	5,98	18,03	0,515	34,0	11,65	198,1	67,3	11,84	1,41	5,7	27,4	2049	2030	61,8	x	x
A5-86	9,0	5,95	17,93	0,522	34,3	11,64	199,1	68,3	11,84	1,41	5,8	27,7	2003		60,8	77,8	27
A5-87	9,0	5,94	17,93	0,523	34,3	11,81	198,9	68,3	11,82	1,43	5,8	27,7	2037		61,6	x	x
A5-88	11,0	7,18	18,03	0,512	33,8	11,76	198,1	67,1	14,22	1,19	4,7	26,7	2245	2277	62,6	75,8	28
A5-89	11,0	7,18	18,03	0,511	33,8	11,57	198,3	67,1	14,23	1,17	4,7	26,7	2272		61,7	x	x
A5-90	11,0	7,15	17,97	0,517	34,1	11,87	198,5	67,7	14,19	1,20	4,8	26,9	2315		62,6	x	x
A5-91	3,0	2,10	17,97	0,528	34,5	15,69	198,9	68,7	4,18	5,39	16,4	31,6	822	852	81,7	x	x
A5-92	3,0	2,10	17,94	0,531	34,7	15,56	199,5	69,2	4,19	5,34	16,5	31,7	861		80,5	x	x
A5-93	3,0	2,10	17,97	0,528	34,5	15,65	198,9	68,7	4,18	5,37	16,4	31,6	873		81,4	78,7	59
A5-94	5,0	3,44	18,00	0,522	34,3	15,50	198,7	68,2	6,84	3,26	10,0	29,6	1554	1570	81,3	77,6	36
A5-95	5,0	3,44	18,01	0,522	34,3	15,61	198,5	68,0	6,84	3,28	10,0	29,6	1588		82,0	x	x
A5-96	5,0	3,43	17,95	0,527	34,5	15,84	198,7	68,6	6,82	3,33	10,1	29,8	1569		82,4	x	x
A5-97	7,0	4,73	18,01	0,519	34,2	15,73	198,5	67,8	9,39	2,41	7,2	28,4	1693	1709	82,9	76,6	66
A5-98	7,0	4,73	18,02	0,518	34,1	15,56	198,7	67,8	9,41	2,38	7,2	28,3	1710		82,1	x	x
A5-99	7,0	4,73	17,99	0,520	34,2	15,63	198,7	68,0	9,39	2,39	7,2	28,4	1723		82,2	x	x
A5-100	9,0	5,97	17,99	0,518	34,1	15,57	198,9	67,8	11,87	1,89	5,7	27,5	1882	1875	82,1	x	x
A5-101	9,0	5,94	17,92	0,524	34,4	15,50	199,7	68,6	11,87	1,88	5,8	27,8	1887		80,8	75,8	54
A5-102	9,0	5,93	17,89	0,526	34,5	15,76	199,5	68,8	11,83	1,91	5,8	27,8	1857		81,8	x	x
A5-103	11,0	7,16	18,00	0,514	34,0	15,57	198,7	67,5	14,23	1,57	4,7	26,8	2012	2136	82,5	x	x
A5-104	11,0	7,16	17,99	0,515	34,0	15,60	198,9	67,7	14,24	1,57	4,8	26,9	2201		82,5	76,8	68
A5-105	11,0	7,16	17,99	0,515	34,0	15,54	198,9	67,6	14,24	1,57	4,7	26,8	2194		82,2	x	x

**APÊNDICE B – DADOS DOS CORPOS-DE-PROVA ENSAIADOS À
COMPRESSÃO TRIAXIAL**

Tabela B.1: dados gerais dos corpos-de-prova ensaiados à compressão triaxial do SOLO-CAL

Corpo-de-prova	Cura (dias)	σ_3 (kPa)	C_a (%)	C_{av} (%)	γ_d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V_{cp} (cm ³)	V_v (cm ³)	V_{ca} (cm ³)	V_v/V_{ca}	$\eta / (C_{av})^{0,12}$	q (KPa)
<i>BI-1₂₈</i>	28	20	10,0	6,92	19,8	0,359	26,4	13,55	198,9	52,5	13,77	3,8	20,94	517
<i>BI-2₂₈</i>	28	20	9,0	5,75	18,1	0,487	32,8	13,87	197,5	64,7	11,35	5,7	26,56	282
<i>BI-3₂₈</i>	28	20	5,0	3,20	17,5	0,543	35,2	13,65	196,0	69,0	6,27	11,0	30,61	186
<i>BI-4₂₈</i>	28	20	7,0	3,90	15,5	0,739	42,5	13,62	197,7	84,0	7,70	10,9	36,10	108
<i>BI-5₂₈</i>	28	200	7,0	3,90	15,5	0,737	42,4	14,34	196,3	83,3	7,66	10,9	36,02	447
<i>BI-6₂₈</i>	28	400	7,0	3,92	15,6	0,730	42,2	13,54	196,9	83,1	7,71	10,8	35,83	907
<i>BI-1₉₀</i>	90	20	10,0	6,89	19,7	0,366	26,8	13,54	199,9	53,5	13,77	3,9	21,24	1007
<i>BI-2₉₀</i>	90	20	9,0	5,69	17,9	0,502	33,4	13,85	197,1	65,9	11,22	5,9	27,13	649
<i>BI-3₉₀</i>	90	20	5,0	3,19	17,4	0,550	35,5	13,51	196,9	69,8	6,27	11,1	30,86	398
<i>BI-4₉₀</i>	90	20	7,0	3,93	15,6	0,725	42,0	13,91	195,8	82,3	7,69	10,7	35,66	238
<i>BI-5₉₀</i>	90	200	7,0	3,91	15,6	0,731	42,2	14,21	196,0	82,8	7,67	10,8	35,86	538
<i>BI-6₉₀</i>	90	400	7,0	3,92	15,6	0,727	42,1	14,01	195,8	82,4	7,68	10,7	35,73	1054
<i>BI-1₃₆₀</i>	360	20	10,0	6,95	19,9	0,353	26,1	13,57	198,3	51,8	13,79	3,8	20,69	2604
<i>BI-2₃₆₀</i>	360	20	9,0	5,69	17,9	0,503	33,5	13,66	197,3	66,1	11,22	5,9	27,18	1492
<i>BI-3₃₆₀</i>	360	20	5,0	3,18	17,3	0,554	35,7	13,65	197,3	70,4	6,27	11,2	31,05	1221
<i>BI-4₃₆₀</i>	360	20	7,0	3,90	15,5	0,740	42,5	13,99	197,3	83,9	7,69	10,9	36,12	627
<i>BI-5₃₆₀</i>	360	200	7,0	3,90	15,5	0,735	42,4	13,72	197,1	83,5	7,70	10,9	35,99	905
<i>BI-6₃₆₀</i>	360	400	7,0	3,91	15,5	0,735	42,3	13,60	197,3	83,6	7,71	10,8	35,96	1115

Tabela B.2: dados gerais dos corpos-de-prova ensaiados à compressão triaxial do SOLO-RBR-CAL

Corpo-de-prova	Cura (dias)	σ_3 (kPa)	C_a (%)	C_{av} (%)	γ_d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V_{cp} (cm ³)	V_v (cm ³)	V_{ca} (cm ³)	V_v/V_{ca}	$\eta / (C_{av})^{0,12}$	q (KPa)
B2-1 ₂₈	28	20	9,0	5,87	18,5	0,509	33,7	13,60	198,7	67,0	11,66	5,7	27,28	805
B2-2 ₂₈	28	20	5,0	3,30	18,0	0,551	35,5	13,85	196,5	69,8	6,49	10,8	30,77	517
B2-3 ₂₈	28	20	10,0	6,01	17,2	0,621	38,3	14,18	196,3	75,2	11,80	6,4	30,88	510
B2-4 ₂₈	28	20	7,0	4,06	16,2	0,728	42,1	13,56	196,7	82,9	8,00	10,4	35,61	309
B2-5 ₂₈	28	200	7,0	4,04	16,1	0,737	42,4	13,64	197,3	83,7	7,98	10,5	35,87	664
B2-6 ₂₈	28	400	7,0	4,04	16,0	0,740	42,5	13,76	197,3	83,9	7,97	10,5	35,96	1085
B2-1 ₉₀	90	20	9,0	5,88	18,5	0,505	33,6	13,53	198,3	66,6	11,67	5,7	27,14	1485
B2-2 ₉₀	90	20	5,0	3,31	18,1	0,548	35,4	13,59	196,9	69,7	6,51	10,7	30,67	1014
B2-3 ₉₀	90	20	10,0	6,01	17,2	0,620	38,3	13,59	197,1	75,5	11,85	6,4	30,87	1031
B2-4 ₉₀	90	20	7,0	4,04	16,1	0,739	42,5	13,79	197,3	83,9	7,97	10,5	35,95	578
B2-5 ₉₀	90	200	7,0	4,08	16,2	0,720	41,9	13,60	195,6	81,8	7,99	10,2	35,35	914
B2-6 ₉₀	90	400	7,0	4,05	16,1	0,733	42,3	13,68	196,9	83,3	7,98	10,4	35,77	1538
B2-1 ₃₆₀	360	20	9,0	5,90	18,6	0,501	33,4	13,89	197,3	65,9	11,64	5,7	26,98	2918
B2-2 ₃₆₀	360	20	5,0	3,29	18,0	0,556	35,7	14,10	196,7	70,3	6,47	10,9	30,98	2417
B2-3 ₃₆₀	360	20	10,0	6,01	17,2	0,622	38,3	14,18	196,7	75,4	11,82	6,4	30,92	2196
B2-4 ₃₆₀	360	20	7,0	4,06	16,1	0,729	42,2	13,90	196,3	82,8	7,98	10,4	35,64	1341
B2-5 ₃₆₀	360	200	7,0	4,07	16,2	0,725	42,0	13,62	196,3	82,5	8,00	10,3	35,51	1718
B2-6 ₃₆₀	360	400	7,0	4,05	16,1	0,732	42,3	13,96	196,5	83,1	7,97	10,4	35,74	2020

Tabela B.3: dados gerais dos corpos-de-prova ensaiados à compressão triaxial do SOLO-CV-CAL

Corpo-de-prova	Cura (dias)	σ_3 (kPa)	C_a (%)	C_{av} (%)	γ_d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V_{ep} (cm ³)	V_v (cm ³)	V_{ca} (cm ³)	V_v/V_{ca}	$\eta / (C_{av})^{0,12}$	q (KPa)
B3-1 ₂₈	28	20	5,0	3,04	16,6	0,567	36,2	13,58	198,7	71,9	6,05	11,9	31,65	2657
B3-2 ₂₈	28	20	3,0	1,78	15,9	0,636	38,9	13,75	197,1	76,6	3,52	21,8	36,25	1355
B3-3 ₂₈	28	20	7,0	3,78	15,0	0,732	42,3	13,51	196,9	83,3	7,45	11,2	36,04	1583
B3-4 ₂₈	28	200	7,0	3,76	15,0	0,741	42,6	13,83	197,3	84,0	7,43	11,3	36,30	1940
B3-5 ₂₈	28	400	7,0	3,80	15,1	0,724	42,0	13,57	195,8	82,2	7,44	11,0	35,77	2483
B3-6 ₂₈	28	20	9,0	4,26	13,4	0,942	48,5	13,63	196,0	95,0	8,34	11,4	40,76	636
B3-1 ₉₀	90	20	5,0	3,04	16,6	0,567	36,2	13,66	198,7	71,9	6,05	11,9	31,66	5611
B3-2 ₉₀	90	20	3,0	1,78	15,9	0,636	38,9	13,71	198,9	77,3	3,55	21,8	36,27	3795
B3-3 ₉₀	90	20	7,0	3,75	14,9	0,749	42,8	13,87	198,3	84,9	7,43	11,4	36,54	3326
B3-4 ₉₀	90	200	7,0	3,74	14,9	0,752	42,9	13,98	198,3	85,1	7,42	11,5	36,63	4084
B3-5 ₉₀	90	400	7,0	3,75	14,9	0,749	42,8	14,05	197,9	84,8	7,41	11,4	36,55	5090
B3-6 ₉₀	90	20	9,0	4,25	13,4	0,945	48,6	13,59	196,5	95,5	8,36	11,4	40,84	1919

**APÊNDICE C – DADOS DOS CORPOS-DE-PROVA ENSAIADOS COM
BENDER ELEMENTS**

Tabela C.1: dados gerais dos corpos-de-prova ensaiados com bender elements

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v / V _{ca}	η / (C _{av}) ^{0,12}	G ₀ 7 dias (MPa)	G ₀ 15 dias (MPa)	G ₀ 28 dias (MPa)	G ₀ 90 dias (MPa)	G ₀ 180 dias (MPa)
C1-1	3,0	1,88	16,0	0,643	39,1	13,69	196,5	76,9	3,69	20,9	36,3	139,77	186,19	206,86	248,62	418,92
C1-2	3,0	1,88	16,0	0,644	39,2	13,73	196,3	76,9	3,68	20,9	36,3	139,48	176,63	195,71	230,70	373,70
C1-3	3,0	1,87	16,0	0,646	39,2	13,77	196,7	77,2	3,69	20,9	36,4	139,95	186,43	207,13	231,47	388,96
C1-4	5,0	3,06	16,0	0,643	39,1	13,75	196,5	76,9	6,02	12,8	34,2	146,71	191,00	218,45	268,03	435,38
C1-5	5,0	3,06	16,0	0,643	39,1	13,70	196,7	77,0	6,03	12,8	34,2	143,34	201,58	224,93	268,37	435,94
C1-6	5,0	3,06	16,0	0,645	39,2	13,86	196,5	77,0	6,02	12,8	34,3	158,19	196,03	224,62	268,00	435,33
C1-7	7,0	4,21	16,0	0,642	39,1	13,95	196,3	76,8	8,26	9,3	32,9	201,95	259,68	303,99	294,27	584,28
C1-8	7,0	4,21	16,0	0,642	39,1	13,75	196,5	76,8	8,27	9,3	32,9	180,53	237,73	276,32	301,69	534,89
C1-9	7,0	4,22	16,0	0,639	39,0	13,70	196,3	76,6	8,28	9,3	32,8	190,70	237,54	267,68	303,93	511,97
C1-10	9,0	5,30	16,0	0,643	39,1	14,14	196,3	76,8	10,41	7,4	32,0	214,25	285,09	314,31	367,34	611,96
C1-11	9,0	5,31	16,0	0,640	39,0	13,67	196,7	76,8	10,45	7,3	31,9	242,69	314,79	361,37	374,63	674,15
C1-12	9,0	5,31	16,0	0,639	39,0	13,79	196,3	76,6	10,44	7,3	31,9	220,64	294,15	324,83	357,36	641,00
C1-13	11,0	6,36	16,0	0,641	39,1	13,89	196,7	76,9	12,52	6,1	31,3	235,27	304,69	348,95	411,34	708,59
C1-14	11,0	6,37	16,0	0,638	39,0	13,89	196,3	76,5	12,52	6,1	31,2	258,38	336,24	373,92	410,38	672,87
C1-15	11,0	6,39	16,1	0,635	38,8	13,60	196,3	76,2	12,54	6,1	31,1	266,97	360,55	402,52	410,23	689,34
C2-16	3,0	1,99	17,0	0,548	35,4	13,81	196,3	69,5	3,91	17,8	32,6	172,18	225,37	267,54	415,71	500,21
C2-17	3,0	1,99	17,0	0,549	35,5	13,85	196,5	69,7	3,91	17,8	32,6	168,07	219,69	245,51	408,76	501,04
C2-18	3,0	1,99	17,0	0,549	35,4	13,80	196,5	69,7	3,91	17,8	32,6	177,02	232,04	252,66	408,73	490,93
C2-19	5,0	3,24	16,9	0,555	35,7	14,10	196,9	70,3	6,38	11,0	31,0	192,20	253,10	285,21	482,00	595,06
C2-20	5,0	3,25	17,0	0,547	35,4	13,65	196,7	69,6	6,40	10,9	30,7	197,40	260,36	293,92	481,56	607,95
C2-21	5,0	3,25	17,0	0,549	35,4	13,71	196,7	69,7	6,40	10,9	30,8	202,89	268,05	284,80	481,30	594,20
C2-22	7,0	4,47	17,0	0,547	35,4	13,84	196,5	69,5	8,78	7,9	29,5	241,87	323,10	345,37	532,85	665,60
C2-23	7,0	4,46	17,0	0,550	35,5	13,80	197,1	70,0	8,79	8,0	29,7	242,74	313,88	346,61	534,76	667,99
C2-24	7,0	4,46	17,0	0,548	35,4	13,75	196,7	69,6	8,78	7,9	29,6	234,78	323,35	357,67	533,27	698,62

Tabela C.1 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova ensaiados com bender elements

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v / V _{ca}	η / (C _{av}) ^{0,12}	G ₀ 7 dias (MPa)	G ₀ 15 dias (MPa)	G ₀ 28 dias (MPa)	G ₀ 90 dias (MPa)	G ₀ 180 dias (MPa)
C2-25	9,0	5,62	16,9	0,550	35,5	13,92	196,9	69,9	11,07	6,3	28,8	275,11	370,68	428,74	594,74	812,51
C2-26	9,0	5,64	17,0	0,544	35,3	13,85	196,3	69,2	11,07	6,2	28,6	283,48	396,90	427,42	664,71	789,37
C2-27	9,0	5,65	17,0	0,541	35,1	13,70	196,3	69,0	11,10	6,2	28,5	283,65	383,09	411,99	665,11	789,85
C2-28	11,0	6,75	17,0	0,547	35,4	14,12	196,5	69,5	13,27	5,2	28,1	325,91	428,05	462,29	751,50	902,54
C2-29	11,0	6,77	17,0	0,543	35,2	13,90	196,3	69,1	13,29	5,2	28,0	325,53	427,56	500,21	750,63	901,49
C2-30	11,0	6,75	17,0	0,548	35,4	13,75	197,1	69,8	13,30	5,2	28,1	326,71	429,11	463,42	753,35	904,75
C3-31	3,0	2,10	17,9	0,471	32,0	13,76	197,5	63,3	4,14	15,3	29,3	215,69	276,56	312,21	511,52	645,78
C3-32	3,0	2,10	18,0	0,467	31,8	13,61	197,1	62,8	4,14	15,1	29,1	226,78	292,85	311,44	510,26	644,18
C3-33	3,0	2,09	17,9	0,476	32,2	13,94	197,7	63,8	4,13	15,4	29,5	215,77	276,66	302,79	511,71	660,79
C3-34	5,0	3,42	17,9	0,470	32,0	13,64	197,7	63,2	6,77	9,3	27,6	261,12	332,85	367,56	631,84	742,91
C3-35	5,0	3,43	18,0	0,466	31,8	13,61	197,1	62,6	6,77	9,2	27,4	267,88	342,75	366,39	629,82	723,01
C3-36	5,0	3,42	17,9	0,474	32,2	13,80	197,9	63,7	6,76	9,4	27,8	268,90	344,06	394,04	567,42	743,35
C3-37	7,0	4,71	17,9	0,467	31,8	13,79	197,1	62,7	9,29	6,8	26,4	311,27	406,56	437,24	705,87	860,16
C3-38	7,0	4,71	17,9	0,468	31,9	13,77	197,5	63,0	9,30	6,8	26,5	322,25	407,85	438,62	708,11	862,89
C3-39	7,0	4,72	17,9	0,465	31,7	13,62	197,3	62,6	9,31	6,7	26,4	332,23	407,23	454,64	707,03	818,51
C3-40	9,0	5,94	17,9	0,466	31,8	13,66	197,5	62,8	11,74	5,3	25,7	332,50	472,68	491,40	798,83	986,21
C3-41	9,0	5,93	17,9	0,470	32,0	13,99	197,5	63,1	11,71	5,4	25,8	355,09	472,75	511,33	798,95	959,52
C3-42	9,0	5,95	17,9	0,465	31,7	13,71	197,3	62,6	11,73	5,3	25,6	379,63	491,00	531,89	798,17	985,40
C3-43	11,0	7,14	17,9	0,464	31,7	13,84	197,1	62,4	14,07	4,4	25,0	437,53	553,75	602,95	907,26	1041,50
C3-44	11,0	7,15	18,0	0,462	31,6	13,60	197,3	62,3	14,10	4,4	24,9	438,09	554,45	603,71	908,42	1042,82
C3-45	11,0	7,14	18,0	0,462	31,6	13,62	197,3	62,3	14,10	4,4	25,0	438,05	532,01	603,67	908,35	1042,75
C4-46	3,0	2,19	18,7	0,406	28,9	13,61	197,5	57,1	4,33	13,2	26,3	284,70	353,99	393,38	659,68	804,46
C4-47	3,0	2,19	18,7	0,408	29,0	13,62	197,7	57,3	4,33	13,2	26,4	299,17	374,61	392,17	660,28	805,18
C4-48	3,0	2,19	18,7	0,409	29,0	13,83	197,5	57,3	4,32	13,3	26,4	284,87	354,20	381,59	592,10	824,61

Tabela C.1 (continuação): dados gerais dos corpos-de-prova ensaiados com bender elements

Corpo-de-prova	C _a (%)	C _{av} (%)	γ _d (kN/m ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v / V _{ca}	η / (C _{av}) ^{0,12}	G ₀ 7 dias (MPa)	G ₀ 15 dias (MPa)	G ₀ 28 dias (MPa)	G ₀ 90 dias (MPa)	G ₀ 180 dias (MPa)
C4-49	5,0	3,58	18,7	0,407	28,9	13,63	197,7	57,2	7,07	8,1	24,8	344,67	426,05	463,12	739,89	937,80
C4-50	5,0	3,58	18,7	0,408	29,0	13,85	197,5	57,2	7,06	8,1	24,9	353,46	438,54	461,46	739,57	913,05
C4-51	5,0	3,58	18,7	0,406	28,9	13,65	197,5	57,0	7,07	8,1	24,8	355,10	440,58	496,70	739,43	937,22
C4-52	7,0	4,90	18,7	0,409	29,0	13,88	197,7	57,4	9,70	5,9	24,0	410,63	520,08	550,57	835,28	1106,74
C4-53	7,0	4,92	18,7	0,404	28,8	13,64	197,5	56,9	9,72	5,9	23,8	425,37	522,05	552,66	834,53	1105,74
C4-54	7,0	4,91	18,7	0,406	28,9	13,63	197,7	57,1	9,72	5,9	23,8	438,36	521,04	572,61	835,30	1045,71
C4-55	9,0	6,20	18,7	0,404	28,8	13,64	197,7	56,9	12,27	4,6	23,1	438,81	604,91	619,04	950,66	1285,37
C4-56	9,0	6,20	18,7	0,405	28,8	13,61	197,9	57,1	12,27	4,7	23,2	468,52	604,87	644,01	951,59	1247,64
C4-57	9,0	6,21	18,7	0,403	28,7	13,60	197,5	56,7	12,26	4,6	23,1	501,01	628,34	670,05	949,17	1283,36
C4-58	11,0	7,44	18,7	0,403	28,7	13,77	197,5	56,8	14,70	3,9	22,6	577,30	708,50	759,40	1089,74	1366,97
C4-59	11,0	7,45	18,7	0,401	28,6	13,62	197,5	56,6	14,72	3,8	22,5	578,15	709,55	760,52	1090,00	1367,30
C4-60	11,0	7,44	18,7	0,403	28,7	13,65	197,7	56,8	14,72	3,9	22,6	577,99	680,70	760,31	1091,04	1368,60