

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

**Melhoramento de um solo mole orgânico
com o uso de cimentação**

Daniel Winter

Porto Alegre
2013

DANIEL WINTER

**MELHORAMENTO DE UM SOLO MOLE ORGÂNICO COM
O USO DE CIMENTAÇÃO**

Dissertação 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 Mestre em
Engenharia.

Porto Alegre
2013

DANIEL WINTER

**MELHORAMENTO DE UM SOLO MOLE ORGÂNICO COM
O USO DE CIMENTAÇÃO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração 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, 21 de outubro de 2013.

Prof. Fernando Schnaid
Ph.D. pela University of Oxford
Orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli
Ph.D. pela Concordia University
Orientador

Prof. Armando Miguel Awruch
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Antonio Thomé (UPF)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Lucas Festugato (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador e amigo, Professor Nilo Cesar Consoli, pelo seu empenho, dedicação e companheirismo na elaboração deste trabalho, durante o curso e nos momentos de descontração. Um exemplo como pessoa, professor e pesquisador, sempre disposto a ajudar. Sua motivação, determinação e caráter me servem como exemplo do caminho que tenho que seguir.

Agradeço ao meu orientador e amigo, Professor Fernando Schnaid, pela ajuda que me foi prestada, não somente na área técnica, mas muitas vezes sobre a vida e decisões sobre a carreira. As suas aulas motivantes que me levaram a escolher este rumo.

Agradeço ao professor e amigo, Lucas Festugato, pelo apoio que me foi dado em laboratório e na elaboração deste trabalho. Nunca fui seu aluno, porém, admiro o quão competente é no cumprimento da sua função e também como pessoa.

Agradeço aos outros professores da Geotecnia, por todo o conhecimento que me foi passado e pela sua dedicação nas aulas e fora delas, sempre dispostos a sanar as minhas inúmeras dúvidas.

Agradeço à coordenação e aos funcionários do PPGEC, sem eles esta minha nova etapa não seria possível de ser concluída.

Agradeço a CAPES e ao CNPq, por possibilitarem o meu estudo com o fornecimento da bolsa.

Agradeço ao colega e amigo, Andry Soares Rilho, pelo companheirismo no estudo, nos velejos e na vida.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos que conheci durante o curso ou me acompanham desde a graduação.

Agradeço ao Sr. João Néilson, funcionário do LEGG e amigo, pelo seu apoio, principalmente nas tarefas mais árduas como a coleta, processamento e transporte do solo utilizado.

Agradeço ao amigo, bolsista Bernardo Consoli, sua contribuição foi essencial para a execução do meu programa experimental. Sempre disposto a ajudar.

Agradeço a todos os bolsistas e voluntários do LEGG que me ajudaram durante a execução do trabalho.

Agradeço à Professora Deborah Dick e ao pessoal do seu laboratório por me ensinarem e me permitirem executar o fracionamento da matéria orgânica do meu solo.

Agradeço ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) por todos os ensaios de caracterização que realizaram.

Agradeço ao Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) por realizarem a análise elementar do meu solo.

Agradeço a minha família, por sempre possibilitar os meus estudos e pelo carinho recebido durante esta fase.

Agradeço especialmente a minha namorada Karen, por ser a pessoa maravilhosa que é e por estar sempre ao meu lado.

Muito Obrigado...

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão
uma gota de água no mar. Mas com certeza o mar seria
menor se lhe faltasse uma gota.

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

WINTER, D. **Melhoramento de um solo mole orgânico com o uso de cimentação**. 2013. 103 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Este trabalho consiste em um estudo para viabilizar o melhoramento de um solo mole orgânico com o uso de cimentação. Foram avaliadas numerosas variáveis, como diferentes agentes cimentantes, distintos materiais juntamente com estes agentes e diferentes temperaturas de cura. Foi desenvolvida uma metodologia de processamento dessas misturas para viabilizar e otimizar a moldagem, cura, desmoldagem e ruptura dos elementos que foram analisados. Os agentes cimentantes utilizados foram a cal viva e o cimento de alta resistência inicial. Juntamente com os agentes cimentantes, foram empregados escória de aciaria, escória de forno panela, fosfogesso e gesso. As temperaturas de cura empregadas foram 20 graus Célsius e 50 graus Célsius. O solo utilizado neste estudo, uma argila mole orgânica com teor de umidade natural variando de 85% a 100%, obtido em Nova Santa Rita, Rio Grande do Sul, foi caracterizado química e fisicamente. Para caracterizá-lo quimicamente foram executados ensaios de perda ao fogo, análise elementar, difratograma de raio X e fracionamento da matéria orgânica. Na faixa de variáveis analisadas, o melhoramento deste material com o uso dos agentes cimentantes utilizados mostrou-se possível, o mais indicado para utilização é o cimento CP-V e quanto maior a dosagem adicionada maior foi a resistência obtida. Com a cal viva, observou-se um teor ótimo, a partir do qual um acréscimo de material gera uma diminuição no ganho de resistência, fato que pode em um projeto real ser prejudicial. As escórias de aciaria e de forno panela não se mostraram eficientes na avaliação do ganho de resistência quando utilizadas com os agentes cimentantes analisados neste material. O gesso e o fosfogesso proporcionaram um ganho de resistência considerável à mistura quando utilizados junto com o cimento CP-V, principalmente para altas dosagens, já com cal tiveram um efeito extremamente prejudicial, fazendo o ganho de resistência da mistura solo/cal viva cair em até 50%. A temperatura de cura mostrou-se eficaz na aceleração das reações pozolânicas tanto para a cal quanto para o cimento. Foi possível adaptar uma metodologia de dosagem em função do fator porosidade/teor volumétrico de cimento apenas para as misturas solo/cimento.

Palavras-chave: *solos orgânicos, melhoramento de solos, ácido húmico.*

ABSTRACT

WINTER, D. **Melhoramento de um solo mole orgânico com o uso de cimentação.** 2013. 103 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The focus of this study is enabling the improvement of an organic soft soil by means of pozzolanic reaction. A several variables were evaluated, such as type of stabilization, pure or mixed with other materials and two distinct curing temperatures. In order to facilitate and optimize the molding, curing, unmolding and rupture of the specimens, a methodology was developed for processing the mixtures. The binding agents used were cement and quicklime. Mixed with the binding agents, electric arch furnace slag, ladle furnace slag, gypsum and phosphoric gypsum were added. The used curing temperatures were 20 and 50 degrees Celsius. The soil used in this study is a very soft organic clay with natural moisture content ranging from 85% to 100% obtained in Nova Santa Rita, Rio Grande do Sul, Brazil. It was chemically and physically characterized. The chemical characterization consisted of loss of ignition tests, elemental analysis, X-ray diffraction and the fractionation of organic matter. The improvement of this material with the use of the previously mentioned binders proved possible within the range of variation of the analyzed variables. The best results were obtained when using cement, and the larger the content of cement the greater the added strength. As for the quicklime, an optimum lime content was observed. From this optimum point onwards any addition of quicklime will result in diminishment of the gained strength as such, when utilizing this method in a real project, one must be aware of this diminishment so as to avoid detrimental results. Utilized with the binding agents analyzed in this material, the electric arc furnace slag and the ladle slag were shown to be inefficient when evaluating the gain of strength. Gypsum and phosphoric gypsum led to considerable gain in strength when mixed with cement, especially in high dosages. When mixed with quicklime, however, the effect was a drop of up to 50% in the gain of strength. The curing temperature was effective in accelerating pozzolanic reactions for both the cement and the quicklime. It was possible to adapt a dosing methodology using the function porosity/volumetric cement content into soil/cement mixtures.

Key-words: *organic soil, soil improvement, humic acid.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2 SOLOS ORGÂNICOS.....	22
2.1 O CICLO DO CARBONO.....	22
2.2 A MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO.....	24
2.2.1 Composição dos solos orgânicos.....	24
2.2.2 Formação dos componentes dos solos orgânicos.....	28
2.2.3 Alguns tipos de solos orgânicos.....	29
2.2.4 Interação entre a matéria orgânica e os minerais do solo.....	31
2.3 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE MATERIAL ORGÂNICO NOS SOLOS.....	34
2.3.1 Quantidade de matéria orgânica total	34
2.3.2 Fracionamento da matéria orgânica.....	34
2.4 CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS COM MATÉRIA ORGÂNICA.....	35
2.4.1 Classificação de Von Post.....	36
2.4.1.1 Grau de humificação.....	36
2.4.1.2 Teor de umidade.....	37
2.4.1.3 Quantidade de fibras.....	38
2.4.1.4 Quantidade de raízes.....	38
2.4.1.5 Quantidade de restos de madeira.....	38
2.4.1.6 Apresentação da classificação.....	39
2.4.2 Classificação de Hoops.....	39
2.4.2.1 Teor de matéria orgânica.....	39
2.4.2.2 Resistência à tração.....	40
2.4.2.3 Odor.....	40

2.4.2.4 Plasticidade.....	41
2.4.2.5 Potencial de hidrogênio.....	41
2.4.2.6 Apresentação da classificação.....	41
3 REAÇÕES QUÍMICAS DOS AGENTES CIMENTANTES EM SOLOS.....	42
3.1 COM CIMENTO.....	42
3.2 COM CAL VIVA.....	44
4 MELHORAMENTO DE SOLOS ORGÂNICOS.....	48
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	66
5.1 MATERIAIS.....	66
5.1.1 O solo.....	66
5.1.2 Agentes cimentantes.....	72
5.1.2.1 Cal viva.....	72
5.1.2.2 Cimento ARI.....	73
5.1.3 Outros materiais adicionados à mistura.....	73
5.1.3.1 Escória de aciaria.....	73
5.1.3.2 Escória de forno panela.....	74
5.1.3.3 Gesso.....	75
5.1.3.4 Fosfo Gesso.....	76
5.2 METODOLOGIA.....	76
5.2.1 Programa experimental.....	76
5.2.1.1 Avaliação do ganho de resistência com o uso dos agentes cimentantes.....	77
5.2.1.2 Avaliação da adição de outros materiais na mistura.....	77
5.2.1.3 Avaliação da temperatura de cura.....	77
5.2.2 Processos de mistura.....	77
5.2.3 Processos de moldagem.....	78
5.2.4 Processo de cura.....	79
5.2.5 Ensaio de ruptura.....	80

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	83
6.1 UTILIZAÇÃO DO CIMENTO ARI.....	83
6.2 UTILIZAÇÃO DA CAL VIVA.....	85
6.3 OUTROS MATERIAS UTILIZADOS.....	87
6.3.1 Com cimento.....	87
6.3.2 Com cal viva.....	89
6.4 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA.....	91
6.4.1 Com cimento.....	91
6.4.2 Com cal viva.....	94
6.5 COMPARAÇÃO ENTRE O USO DA CAL E DO CIMENTO.....	96
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: ciclo do carbono.....	23
Figura 2.2: quantidade estimada de carbono no solo.....	24
Figura 2.3: representação esquemática dos componentes orgânicos dos solos.....	25
Figura 2.4: alguns ramos da cadeia carbônica dos componentes húmicos.....	26
Figura 2.5: exemplo de estrutura com os componentes de uma substância húmica.....	27
Figura 2.6: áreas polarizadas em uma cadeia carbônica.....	28
Figura 2.7: ciclo do carbono em solos secos com escala de tempo.....	29
Figura 2.8: diagrama da formação de solos orgânicos.....	31
Figura 2.9: interação entre a matéria orgânica e um argilo-mineral.....	32
Figura 2.10: diagrama do fracionamento da matéria orgânica.....	35
Figura 3.1: mecanismo de troca de cátions.....	45
Figura 3.2: mecanismo de estabilização solo-cal.....	46
Figura 4.1: identificação das zonas em que agentes cimentantes diferentes reagem.....	50
Figura 4.2: resistência à compressão simples das argilas de Ariake de Onitsuka.....	51
Figura 4.3: efeito do sal e do ácido húmico de Onitsuka.....	52
Figura 4.4: efeito do sal e do ácido húmico de Modmoltin.....	53
Figura 4.5: limite de liquidez x tempos de cura para duas argilas de Ariake.....	53
Figura 4.6: sal atuando na mistura solo orgânico, sal e cal.....	54
Figura 4.7: Su dos solos não tratados de Yunus.....	55
Figura 4.8: Su dos solos tratados de Yunus.....	55
Figura 4.9: perda de resistência ao longo do tempo de Yunus	56
Figura 4.10: ganhos de resistência para mistura cimento com materiais orgânicos por Tremblay.....	57
Figura 4.11: ácido húmico no entorno de uma partícula de solo.....	58
Figura 4.12: relação fator água ligante por resistência a compressão simples de Timoney.....	59

Figura 4.13: relação fator água ligante por grau de humificação de Timoney.....	60
Figura 4.14: ganho de resistência com variação do ácido húmico para diferentes argilo-minerais na composição.....	61
Figura 4.15: foto de microscopia eletrônica do solo composto por areia e bentonita cálcica sem tratamento.....	62
Figura 4.16: foto de microscopia eletrônica do solo composto por areia e bentonita cálcica tratado com cal e sem a presença de ácido húmico.....	62
Figura 4.17: foto de microscopia eletrônica do solo composto por areia e bentonita cálcica tratado com cal e com presença de ácido húmico.....	62
Figura 4.18: ganho de resistência com cimento em função da quantidade de matéria orgânica de Bujang.....	63
Figura 4.19: comparação do ganho de resistência com cimento entre solos orgânicos e outros solos de Bujang.....	64
Figura 4.20: ganho de resistência com cal hidratada em função da quantidade de matéria orgânica de Bujang.....	64
Figura 4.21: comparação do ganho de resistência com cal hidratada entre solos orgânicos e outros solos de Bujang.....	64
Figura 4.22: resistência a compressão simples em relação a temperatura de cura para 14 dias de Andersson	65
Figura 5.1: local de extração do solo.....	67
Figura 5.2: sondagem a percussão do local de extração.....	67
Figura 5.3: aparência do solo homogeneizado.....	68
Figura 5.4: curva granulométrica do solo utilizado.....	69
Figura 5.5: difratograma de raio x do solo.....	69
Figura 5.6: curva granulométrica da cal viva.....	72
Figura 5.7: curva granulométrica do cimento CPV.....	73
Figura 5.8: curva granulométrica a escória de aciaria.....	74
Figura 5.9: curva granulométrica da escória de forno panela.....	75
Figura 5.10: curva granulométrica do gesso.....	75
Figura 5.11: curva granulométrica do fosfogesso.....	76
Figura 5.12: molde utilizado.....	78

Figura 5.13: aparência do corpo de prova.....	79
Figura 5.14: cura dos corpos de prova com temperatura controlada.....	80
Figura 5.15: resistência à tração por compressão diâmetral.....	80
Figura 5.16: prensa utilizada nos ensaios de ruptura.....	81
Figura 5.17: corpos de prova rompidos.....	82
Figura 6.1: resistência à tração x teor de cimento para diferentes teores de umidade.....	83
Figura 6.2: resistência à tração x teor de umidade para diferentes quantidades de cimento adicionadas.....	84
Figura 6.3: resistência à tração x fator porosidade/teor volumétrico de cimento com temperatura de cura de 20 graus Célsius.....	85
Figura 6.4: resistência à tração x teor de cal viva para diferentes teores de umidade.....	86
Figura 6.5: resistência à tração x porcentagem de cal viva para diferentes teores de umidade.....	86
Figura 6.6: resistência à tração x teor de umidade para diversas porcentagens de cal viva.....	87
Figura 6.7: análise da resistência à tração da adição de misturas das escórias com cimento.....	88
Figura 6.8: análise da resistência à tração da adição de gesso e fosfo gesso com cal viva.....	89
Figura 6.9: análise da resistência à tração da adição de misturas das escórias com cal viva.....	90
Figura 6.10: análise da resistência à tração da adição de gesso e fosfo gesso com cal viva.....	91
Figura 6.11: verificação da influência da temperatura de cura com cimento e teor de umidade de 125% aos 28 dias de cura.....	92
Figura 6.12: verificação da influência da temperatura de cura com cimento e teor de umidade de 150% aos 28 dias de cura.....	92
Figura 6.13: verificação da influência da temperatura de cura com cimento e teor de umidade de 175% aos 28 dias de cura.....	93
Figura 6.14: resistência à tração x teor de umidade para diferentes quantidades de cimento adicionadas com temperatura de cura de 50 graus.....	94
Figura 6.15: verificação da influência da temperatura de cura com cal viva e teor de umidade de 125% aos 28 dias de cura.....	95

Figura 6.16: verificação da influência da temperatura de cura com cal viva e teor de umidade de 150% aos 28 dias de cura.....	95
Figura 6.17: verificação da influência da temperatura de cura com cal viva e teor de umidade de 175% aos 28 dias de cura.....	96
Figura 6.18: eficácia do melhoramento deste solo com um teor de umidade inicial de 125% com cal viva e cimento para as temperaturas de cura utilizadas.....	97
Figura 6.19: eficácia do melhoramento deste solo com um teor de umidade inicial de 150% com cal viva e cimento para as temperaturas de cura utilizadas.....	97
Figura 6.20: eficácia do melhoramento deste solo com um teor de umidade inicial de 175% com cal viva e cimento para as temperaturas de cura utilizadas.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: principais grupos funcionais encontrados nas substâncias húmicas.....	26
Tabela 2.2: quantidade de elementos por fração de substância húmica.....	27
Tabela 2.3: reações da matéria orgânica nos solos.....	33
Tabela 2.4: algumas classificações de solos orgânicos.....	36
Tabela 2.5: grau de humificação de Von Post.....	37
Tabela 2.6: classificação de Von Post quanto ao teor de umidade.....	37
Tabela 2.7: classificação quanto a quantidade de fibras.....	38
Tabela 2.8: classificação de Von Post quanto a quantidade de raízes.....	38
Tabela 2.9: classificação de Von Post quanto a quantidade de restos de madeira.....	39
Tabela 2.10: classificação de Hoops quanto ao teor de matéria orgânica.....	40
Tabela 2.11: classificação de Hoops quanto à resistência a tração.....	40
Tabela 2.12: classificação de Hoops quanto ao odor.....	40
Tabela 2.13: classificação de Hoops quanto ao potencial de hidrogênio.....	41
Tabela 4.1: agentes cimentantes, quantidade e tempos de cura utilizados no estudo de Kuno et al.....	48
Tabela 4.2: solos utilizados no estudo de Kuno.....	49
Tabela 4.3: indicação da qual agente cimentante se adequa as zonas.....	50
Tabela 4.4: características das argilas utilizadas por Onitsuka.....	51
Tabela 4.5: propriedade dos solos não tratados de Yunus.....	54
Tabela 4.6: características dos solos utilizados por Tremblay.....	56
Tabela 5.1: resultado da análise elementar.....	70
Tabela 5.2: quantidade aproximada das frações húmicas do solo.....	71

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

2θ – Ângulo de difração

A – Angstrom (unidade de medida)

C - Carbono

CAH – Aluminato de Cálcio Hidratado

CSH – Silicato de Cálcio Hidratado

H - Hidrogênio

N - Nitrogênio

pH – Potencial de Hidrogênio

Rt – Resistência a tração

S - Enxofre

Su – Resistência ao cisalhamento não drenado

Tc – Teor de agente cimentante

Wi – Teor de umidade inicial

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Solos moles orgânicos são materiais pouco estudados e bastante problemáticos para a construção civil. São extremamente compressíveis e possuem baixa capacidade de suporte. Normalmente, quando o solo de uma obra, seja esta rodoviária ou uma edificação é constituído ou possui uma camada deste material, uma alternativa é a remoção total e substituição dele. O que atualmente é um procedimento complexo principalmente tratando-se de grandes volumes devido a questões legais e ambientais. Pode-se também partir para a execução de fundações profundas apoiando a estrutura em uma camada competente abaixo desta, mesmo assim sempre se tendo o cuidado para evitar alguns efeitos indesejáveis causados pela camada de solo mole. Ambas as medidas geram um custo elevado e/ou possíveis atrasos no cronograma da obra a ser executada. Assim sendo existe a necessidade de se obter novas maneiras viáveis e confiáveis de execução dos projetos sobre este material.

Uma possibilidade para mitigar os efeitos indesejáveis dos solos orgânicos na sua utilização para obras de Engenharia é o seu melhoramento com o uso de cimentação. Prática esta, que, pode ser um tanto quanto complexa, já que nestes solos orgânicos existe uma gama enorme de substâncias que podem interferir nas reações de cimentação. Não existe um consenso sobre qual o melhor agente cimentante a ser utilizado para este melhoramento. Cada local se utiliza de um determinado produto com esta finalidade, porém não há uma metodologia consagrada para o tratamento que garanta que um determinado produto funcionará em um solo especificamente.

Para o melhoramento de um solo orgânico com cimentação ser utilizado com um bom grau de confiabilidade é necessário que se entenda melhor os solos orgânicos não só fisicamente, como normalmente são caracterizados para utilização em Engenharia, mas também quimicamente. Determinados compostos podem reagir com o agente cimentante ou então encapsular o solo, impedindo ou minimizando as reações cimentantes.

O solo utilizado para o estudo foi uma argila orgânica encontrada no município de Nova Santa Rita, já estudada anteriormente por outros pesquisadores desta instituição, Thomé (1994) e

Consoli et al. (1997), sendo que nestes estudos, a curtos períodos de tempo, não foram obtidas melhoras significativas nas propriedades desejáveis deste solo. No seu estado natural este material é encontrado em espessas camadas, chegando a 6 metros, com teores de umidade altos e consistência muito mole, o que o torna complexo para fins de engenharia.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho foi obter uma forma de melhorar um solo mole orgânico em um período de tempo determinado com a utilização de agentes cimentantes. Mostrando o comportamento das misturas solo cimento, conforme são alterados o índice de vazios do solo e a quantidade de material adicionado. Os agentes cimentantes utilizados foram a cal viva e o cimento Portland de alta resistência inicial. Estes agentes foram misturados ao solo em quantidades usualmente aplicadas em solos orgânicos.

Os objetivos específicos utilizados foram os seguintes:

- avaliar o aumento da efetividade das reações de cimentação para diferentes temperaturas de cura em um mesmo período de tempo;
- estudar o efeito da adição de dois resíduos industriais disponíveis, com a finalidade de fornecer material que possibilite as reações pozolânicas, sendo estes resíduos a escória de aciaria e a escória de forno panela;
- observar e descrever o comportamento do gesso e do fosfogesso quando misturados ao solo junto com os agentes cimentantes;
- quando possível adaptar uma metodologia de dosagem de agentes cimentantes para obter-se um determinado nível de resistência.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além da introdução, o presente trabalho possui um capítulo em que são caracterizados os solos orgânicos, citando diferentes tipos de matéria orgânica presente, formação e propriedades, buscando agregar conhecimentos de áreas interdisciplinares, como, agronomia, biologia e química orgânica.

As reações químicas que ocorrem com a adição dos agentes cimentantes estudados em solos serão brevemente citadas e explicadas no capítulo 3. Seguindo a estrutura do trabalho é feita uma revisão bibliográfica sobre as reações cimentantes em solos orgânicos, analisando resultados de outros autores que também trabalharam com melhoramento de solos orgânicos com o uso de cimentação, utilizando cal, cimento, resíduos e também a diferentes temperaturas.

No capítulo materiais e métodos são detalhadas as propriedades e características físicas e químicas do solo utilizado, bem como a caracterização dos outros materiais utilizados nas misturas. Na sequência a metodologia da pesquisa é descrita, contendo as misturas, processos de moldagem, procedimentos de cura, controles e definição de quais ensaios foram utilizados para avaliar as mudanças na resistência do material.

Posteriormente, os dados obtidos dos ensaios são expostos de maneira organizada comparando a efetividade das reações quanto ao ganho de resistência para as diferentes quantidades de misturas cimentantes, teores de umidade naturais, teores de escórias adicionadas, teores de gesso e fosfogesso adicionados e temperaturas de cura.

Com os dados em mãos, na conclusão são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho e nas sugestões para trabalhos futuros, apresenta-se um grande leque de possibilidades de estudos na área de melhoramento de solos moles orgânicos com o uso de cimentação, que como já citada anteriormente ainda não tem uma tecnologia consolidada.

2 SOLOS ORGÂNICOS.

A finalidade deste capítulo é fornecer informações para um melhor entendimento dos solos orgânicos, fazendo referência à sua formação, tipos de matérias orgânicas, composição e algumas propriedades.

Segundo Hartlén e Wolski (1996), solos orgânicos ou solos que contenham matéria orgânica são tratados com vários métodos diferentes por diversos engenheiros ao redor do mundo e têm diversas classificações, mas ainda não se tem uma definição sólida e totalmente válida sobre o assunto.

2.1 O CICLO DO CARBONO

Nieder e Benbi (2008) citam que boa parte do carbono existente no nosso planeta se encontra em um ciclo contínuo, sendo constantemente absorvido, solto e reconstituído. Isto se deve a ações climáticas, de plantas, de animais e da ação humana. Juntamente com o nitrogênio, o carbono compõe 95% da nossa biosfera.

Conforme é citado em U. S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE (2008), o ciclo global de carbono é dominado principalmente por processos biológicos de respiração e fotossíntese. Plantas e micróbios usam a energia do sol para transformar o gás carbônico da atmosfera em carbono orgânico. A maioria deste elemento gerado é rapidamente consumida pela respiração e retorna à atmosfera como seu gás de origem. Assim se dá o equilíbrio do ciclo do carbono, porém parte deste material fica absorvida em forma de biomassa e dentro de solos, no oceano ou em camadas de rochas.

A Figura 2.1, obtida da mesma publicação acima referida, apresenta de maneira prática o ciclo do carbono, sem levar em conta a parte absorvida consumida pelos oceanos, e com uma estimativa da quantidade de material envolvido em giga-toneladas.

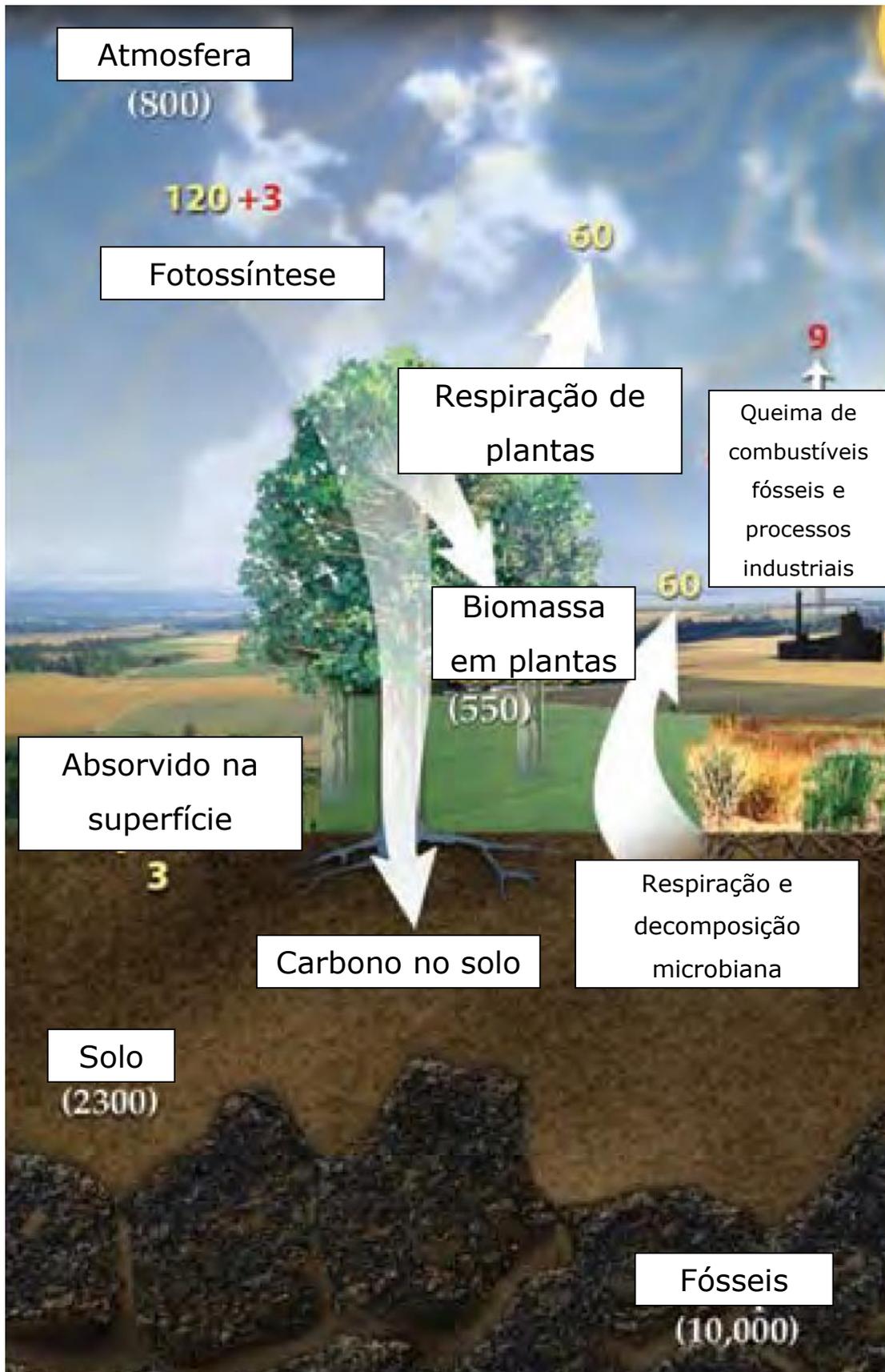


Figura 2.1: ciclo do carbono. (adaptado de U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OF SCIENCE, 2008)

As substâncias húmicas segundo o mesmo autor são misturas heterogêneas dos componentes orgânicos existentes e distribuídos nos solos, água e sedimentos. Estas substâncias são divididas nas seguintes porções:

- Ácidos fúlvicos: consistem na parcela da matéria orgânica húmica que se mantêm solúvel em água em qualquer pH, possuem coloração amarela podendo chegar até a coloração marrom.
- Ácidos húmicos: consistem na parcela de material que se mante solúvel em água somente em pH neutro ou alcalino, precipitam-se quando o pH da mistura se torna menor do que 2. Possuem coloração escura.
- Huminas: representam a parcela de matéria orgânica húmica que não é dissolvida em água em qualquer condição de pH. Possuem coloração escura. Devido à dificuldade de extração destes materiais do solo, eles são pouco estudados.

A Figura 2.3 ilustra esquematicamente como são os componentes orgânicos do solo, segundo Nieder e Benbi (2008).

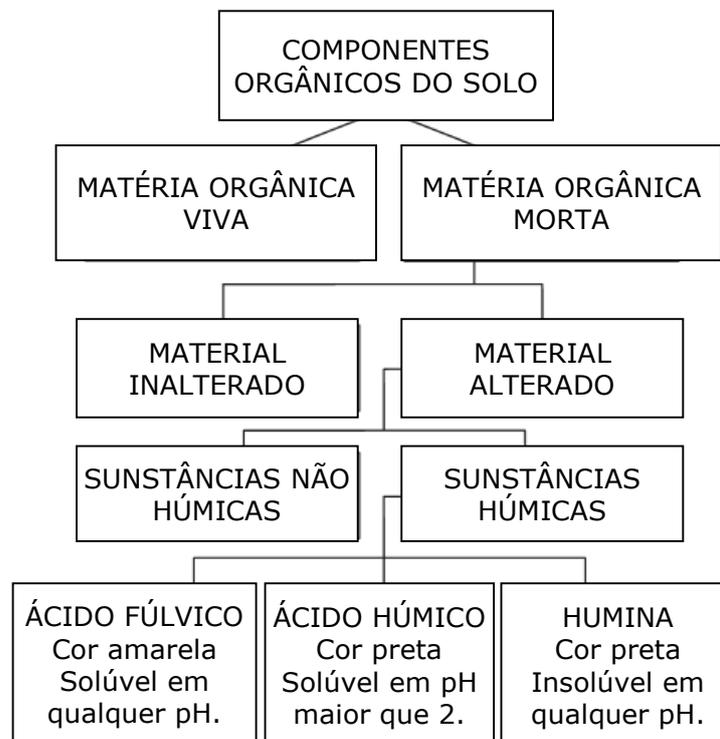


Figura 2.3: representação esquemática dos componentes orgânicos dos solos. (adaptado de NIEDER; BENBI, 2008)

As cadeias carbônicas presentes nestas substâncias húmicas são altamente variáveis. A Figura 2.4 ilustra alguns ramos das cadeias carbônicas presentes nestes componentes. (HAYES, 1991)

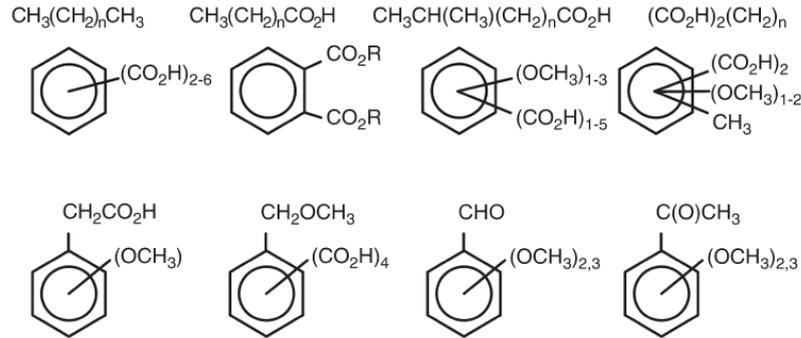


Figura 2.4: alguns ramos da cadeia carbônica dos componentes húmicos. (HAYES, 1991)

Segundo Dick et al. (2009) os principais grupos funcionais encontrados nas substâncias húmicas são os mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: principais grupos funcionais encontrados nas substâncias húmicas.

Grupo Funcional	Fórmula Estrutural
Carboxila	R-COOH
Enol	R-CH=CH-OH
OH fenólica	Ar-OH
Quinona	Ar=O
OH-alcoólico	R-CH ₂ -OH
Éter	R-CH ₂ -O-CH ₂ -R
Cetona	R-C=O(-R)
Aldeído	R-CH=O
Éster	R-C=O(-OR)
Amina	R-CH ₂ -NH ₂
Amida	R-C=O(-NH-R)
Alquila	-CH=, -CH ₂ -, -CH ₃
O-alquila	R-CH ₂ -O-R

(SPARKS, 1995 apud DICK et al. 2009)

Além de possuir uma menor quantidade de anéis de carbono, os ácidos fúlvicos possuem uma menor proporção de carbono que as outras substâncias húmicas. Este fato resulta da perda de

oxigênio das cadeias carbônicas, sendo que este ácido é um material que leva em torno de 10 vezes menos tempo para ser formado que o ácido húmico e a humina. A Tabela 2.2 ilustra a quantidade média de elementos em cada uma destas substâncias.

Tabela 2.2: quantidade de elementos por fração de substância húmica.

Fração	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
Ácidos fúlvicos	43-51	3,3-5,9	45-47	0,7-2,8
Ácidos húmicos	54-60	3,7-5,8	32-37	1,6-4,1
Humínas	55-56	5,5-6,0	32-34	4,6-5,1

(SCHNITZER; KHAN, 1972)

Segundo Dick et al. (2009), as substâncias húmicas são constituídas por uma grande gama de substâncias diferentes, não possuem uma forma molecular definida e contém os principais grupos funcionais do carbono, comportam-se como se fossem um macromolécula. Formam estruturas complexas como a ilustrada na Figura 2.5, onde as regiões I e II representam grandes espaços vazios que podem atrair e aprisionar cátions, principalmente em pHs mais elevados.

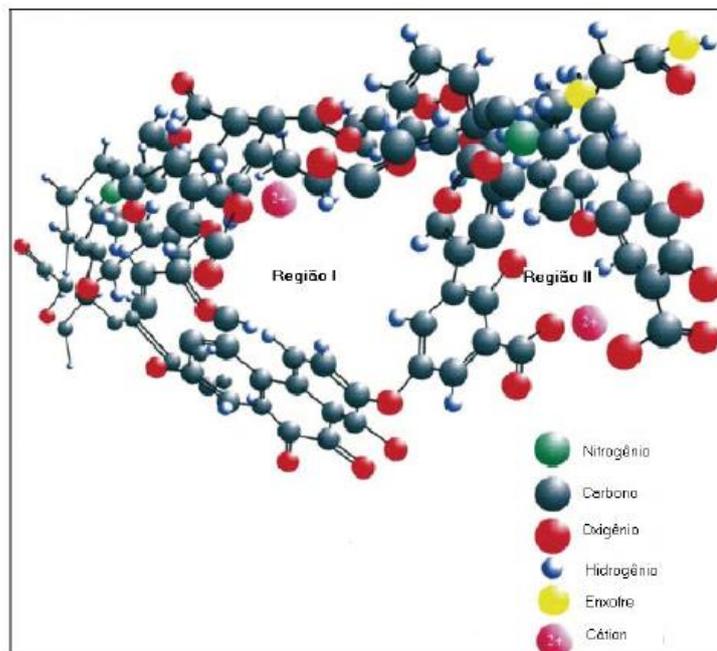


Figura 2.5: exemplo de estrutura com os componentes de uma substância húmica. (ENGBRETSON, WANDRUSZKA, 1994 apud DICK ET AL. 2009)

Como citado por Chykiala (2008), nestes espaços vazios existem regiões que podem ser polarizadas, sendo a carboxila o principal grupo funcional a tornar estes espaços polarizados. A Figura 2.6 adaptada de Johnston e Tombacz (2002) ilustra uma cadeia carbônica com áreas polarizadas.

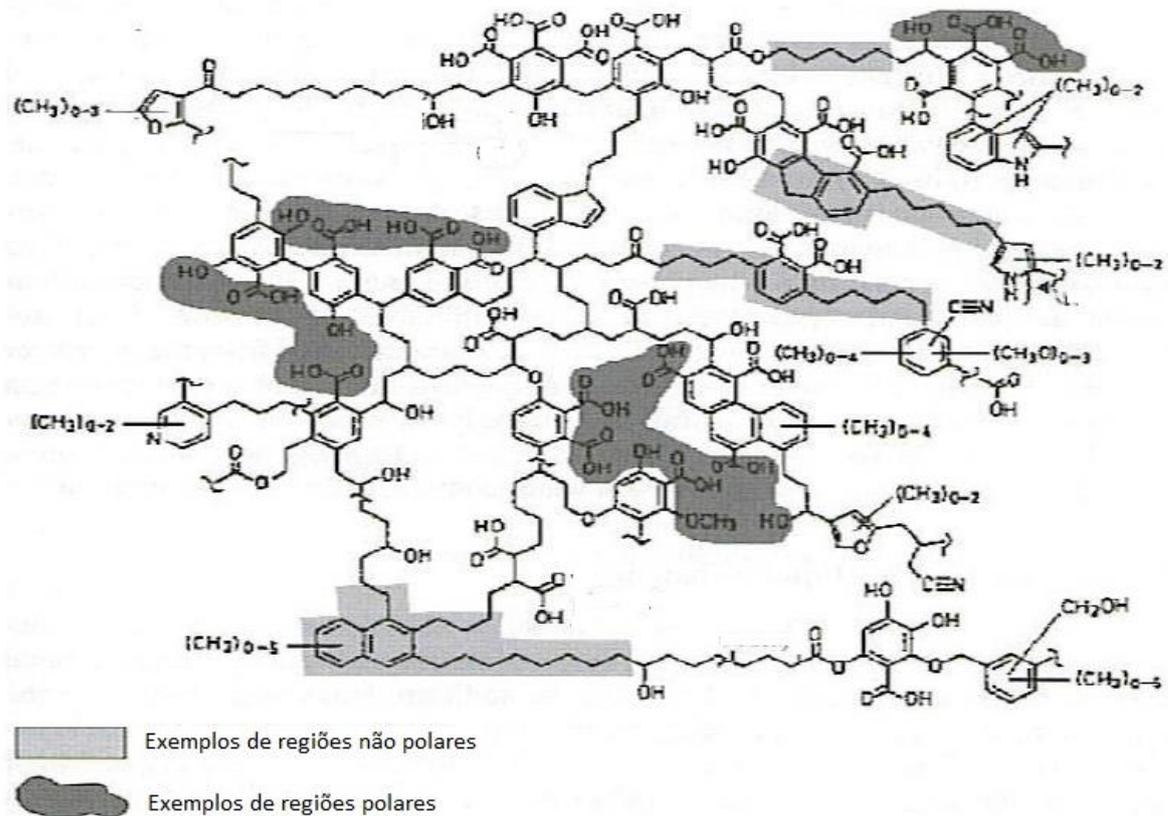


Figura 2.6: áreas polarizadas em uma cadeia carbônica.
(adaptado de JOHNSTON, TOMBACZ, 2002)

2.2.2 Formação dos componentes dos solos orgânicos

Segundo Nieder e Benbi (2008), a formação dos componentes orgânicos se dá de maneira diferente em solos secos e em solos de zonas saturadas, dependendo também das condições de drenagem. Em um solo argiloso a matéria orgânica tenderá a ficar retida nas camadas de solo, porem em um solo arenoso o material orgânico pode ser carregado para outros locais pela ação da água. A Figura 2.7 mostra como ocorre à formação dos componentes orgânicos em um solo seco na superfície, mostrando as fases com uma escala de tempo relacionada à sua formação.

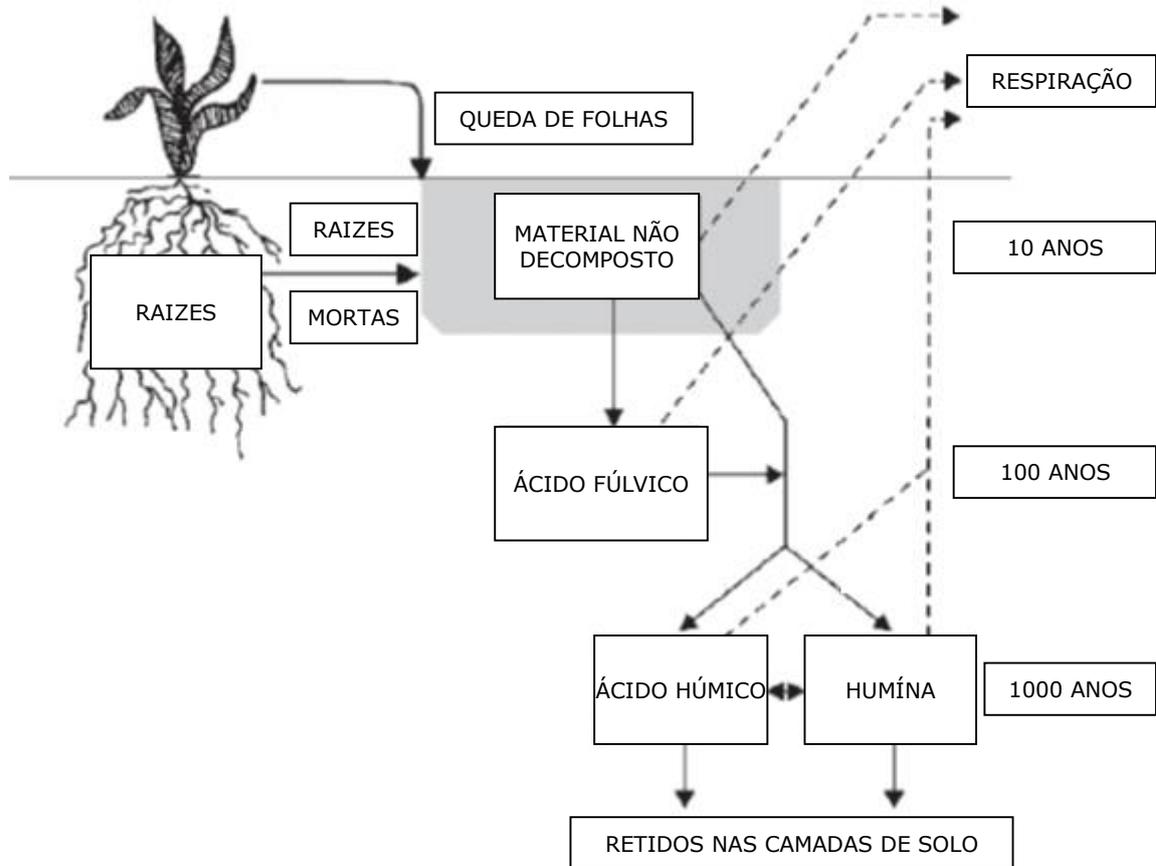


Figura 2.7: ciclo do carbono em solos secos com escala de tempo. (adaptado de HOLMEN, 2000)

2.2.3 Alguns tipos de solos orgânicos

Segundo Hartlén e Wolski (1996), solos orgânicos são formados durante a decomposição de animais e plantas. Esse processo ocorre de várias formas e em velocidades diferentes, dependendo da ação de bactérias e do clima e pode gerar materiais com características diferentes. Os principais tipos de solos orgânicos são citados a seguir:

- Lamas orgânicas (gyttjas) - Normalmente têm coloração verde, mas podem ter tons de marrom ou vermelho. Quando secas possuem uma coloração cinza e são materiais com comportamento frágil. Quando úmidas tem uma consistência de borracha e quando secas tendem a formar nódulos duros e com baixo peso específico. Podem ser encontradas junto com solos minerais de todas as

granulometrias e com outros tipos de solos orgânicos. São formados por plantas e animais ricos em gorduras e proteínas.

- *Dy-bearings* - São materiais densos, com coloração preta ou marrom, sendo que, quando secos, eles mantêm a coloração escura. São materiais inelásticos e de consistência mole. Dificilmente encontram-se na natureza com materiais argilosos. Alguns autores os citam como uma turfa no último grau de humificação.
- Turfas - São um tipo de solo marrom escuro ou preto, esponjoso e formado praticamente por matéria vegetal decomposta. Elas podem ter as seguintes formas:
 - a) fibrosa, com fibras aparentes, não plástica, com estrutura firme e ligeiramente alterada;
 - b) pseudo-fibrosa, turfa com uma aparência fibrosa muito mais suave e mais plástica que a turfa fibrosa. Ela é mais alterada devido a sua decomposição ocorrer em água com baixo nível de oxigênio;
 - c) amorfas, neste tipo de turfa, a decomposição destruiu as fibras originais, de modo que se transformou em uma argila orgânica.

A Figura 2.8 mostra as diferentes vias para a formação destes solos orgânicos.

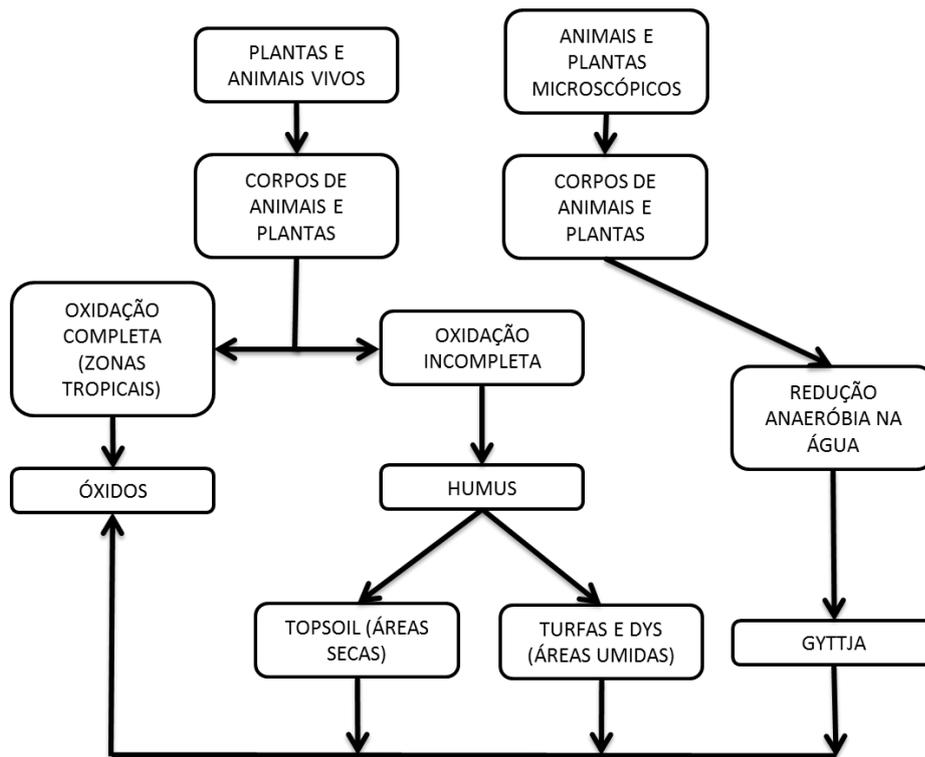


Figura 2.8: diagrama da formação de solos orgânicos.
(adaptado de HARTLÉM; WOLSKI, 1996)

2.2.4 Interação entre a matéria orgânica e os minerais do solo

A matéria orgânica nos solos e as partículas de solo siltoso e argiloso normalmente estão intimamente ligados. Para esta matéria orgânica estabilizar, deve haver reação com os metais presentes nas partículas dos solos, formando os organo-minerais, cuja estabilidade é função do pH em que se encontra a mistura. Uma adição de substância ácida ou básica pode alterar este equilíbrio. A Figura 2.9 mostra a composição de um organo-mineral, mostrando a ligação das cadeias carbônicas com o alumínio e outros componentes de uma partícula argilosa. (NIEDER; BENBI, 2008)

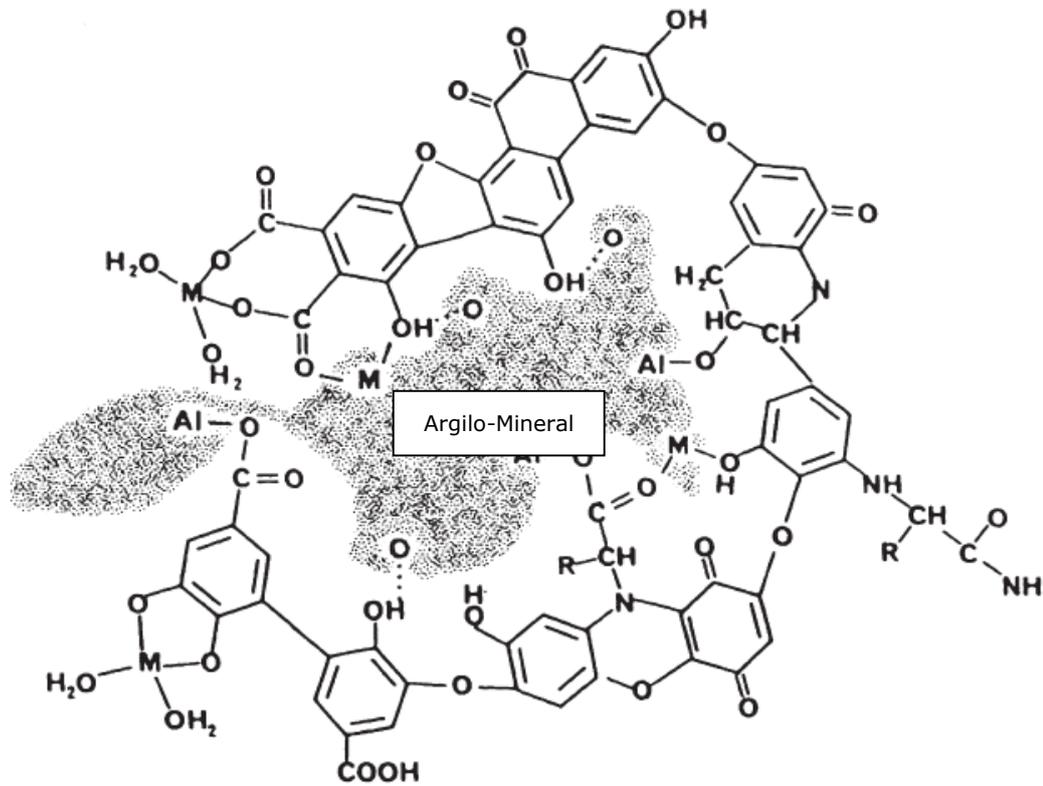


Figura 2.9: interação entre a matéria orgânica e um argilo-mineral.
(adaptado de KOSKINEN; HARPER, 1990)

As principais reações da matéria orgânica no solo, os principais grupos funcionais que geram essas reações, e os mecanismos correspondentes são detalhados na Tabela 2.3. (DICK ET AL., 2009)

Tabela 2.3: reações da matéria orgânica nos solos

	Reação	Principais grupos funcionais da MOS envolvidos	Reagente ou Grupo funcional com o qual interage	Mecanismo de reação
1	Reações de troca catiônica/ complexo esfera externa	R-COO- e R-fenol-O	Cátions na solução do solo	Interação eletrostática
2	Formação de complexos com metais/completo de esfera interna	R-C(H)=O, R-SH, R-NH ₂ , R-COOH e R-OH (fenólicas)	Metais de transição, Al e metais traços na solução do solo	Coordenação com cátions em solução
3	Interações de superfície com minerais			
3a	Troca catiônica	Grupos protonados R-NH ₂ , NH em ciclo alifático, N em anel aromático	Superfícies com cargas negativas	Interação eletrostática
3b	Troca aniônica	R-COO- e R-fenol-O-	Superfícies de cargas positivas de minerais de carga variável	Interação eletrostática
3c1	Sorção via ponte catiônica esfera externa	R-COO-, R-NH ₂ , R-C=O, R-fenol-O	Cátions trocáveis da superfície do mineral	Interação eletrostática (pontes de H ₂ O)
3c2	Sorção via ponte catiônica esfera interna	R-COOH, R-NH ₂ , R-C=O, R-OH	Cátions coordenados à superfícies	Coordenação com cátions coordenados à superfície
3d	Coordenação de superfície	R-COO- e R-fenol-O-	"-FeOH e -AlOH de superfície de minerais de carga variável"	Troca de ligantes
3e	Protonação	R-NH ₂ , R-NH-R, RC=O-R, R-COO	O-H de superfície	H da hidroxila de superfície protona Oxigênio ou nitrogênio da MOS sem desligar-se do mineral
3f	Ligação de H	R-NH ₂ , R-NH-R, RC=O-R, R-COOH, R-fenol-OH	Molécula de H ₂ O de hidratação do cátion de superfície ou da superfície hidratada	Ligação de hidrogênio
3g	Forças de van der Waals	Estruturas apolares da MOS (R-(CH) _n -R; Anéis aromáticos)	OH da superfície	Íon-dipolo
3h	Interação Hidrofóbica	Frações alifáticas e aromáticas hidrofóbicas	Superfícies hidrofóbicas de minerais	Mecanismo de "expulsão" das frações hidrofóbicas do meio hidrofílico
4	Reações com moléculas orgânicas			
4a	Troca catiônica	R-COOH e OH-fenol-R	Grupos nitrogenados protonados ou cátions orgânicos em solução do solo	Interação eletrostática
4b	Ligação de H	- COOH, -OH, R-HC=O, -NH ₂	Grupos C=O e amino	Ligação de hidrogênio
4c	Forças de Van der Waals	Estruturas polares e apolares da MOS	Estruturas apolares	Dipolo-diplo (induzido ou permanente)
4d	Interação Hidrofóbica	Frações alifáticas e aromáticas hidrofóbicas	Superfícies hidrofóbicas de moléculas orgânicas	Mecanismo de "expulsão" das frações hidrofóbicas do meio hidrofílico
4e	Transferência de carga	Estruturas quinonas (elétron aceptor)	Anéis aromáticos ou triazínicos (elétron doador)	Ligação covalente tipo π-π*

(DICK ET AL., 2009)

2.3 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE MATERIAL ORGÂNICO NOS SOLOS

Neste item serão abordadas as metodologias para a determinação da quantidade de material orgânico no solo e o fracionamento deste para a quantificação dos componentes húmicos.

2.3.1 Quantidade de matéria orgânica total

Segundo Germaine e Germaine (2009), a quantidade de matéria orgânica total pode ser determinada através de um processo de queima ou por oxidação química. Neste item será descrito o método de queima, que é o mais utilizado na prática de Engenharia. No método, o solo é pesado após secagem em um forno com a temperatura de 105°C, posteriormente recolocado no forno a uma temperatura de 440°C durante cinco horas, seguido de nova pesagem. A cinza restante é o material não orgânico deste solo, e a massa de cinza restante é comparada com a massa inicial para a determinação da porcentagem de solo mineral no solo estudado. A quantidade de matéria orgânica será a porcentagem restante. (GERMAINE; GERMAINE, 2009)

Este processo no Brasil é normatizado pela NBR 13600 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996).

2.3.2 Fracionamento da matéria orgânica.

Segundo Pilon et al. (2002), a matéria orgânica húmica do solo é facilmente extraída com a utilização de uma solução chamada de base forte. Geralmente é utilizado hidróxido de sódio, que desagrega a matéria orgânica quase em sua totalidade dos minerais do solo. Com esta extração completa, a diferença de solubilidade das três frações da matéria orgânica permite que estas sejam separadas. O material que não é solúvel em água é classificado como húmína, utilizando um ácido forte para baixar o pH do material se obtêm a precipitação do ácido húmico o restante do material é classificado como ácido fúlvico.

A Figura 2.10, obtida de Dick et al. (2009), mostra um diagrama deste procedimento já com as substâncias a serem adicionadas. Este procedimento foi executado para a caracterização do solo orgânico do presente trabalho e será descrito detalhadamente no capítulo materiais e métodos.

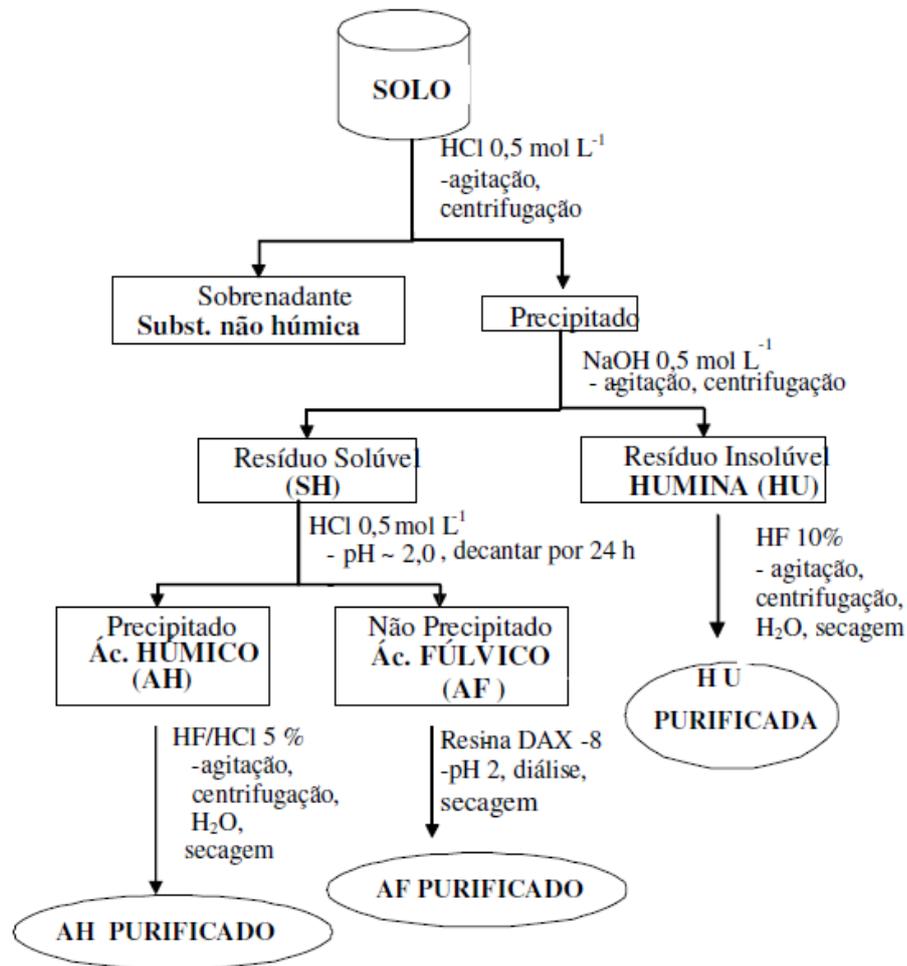


Figura 2.10: diagrama do fracionamento da matéria orgânica. (DICK ET AL., 2009)

Como encontrado em Dick et al. (2009), para a quantificação das diferentes frações húmicas conforme a Figura 2.9, separa-se as frações orgânicas do solos. O procedimento que foi utilizado é mostrado detalhadamente no capítulo de materiais e métodos:

2.4 CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS COM MATÉRIA ORGÂNICA

A diversidade dos materiais definidos como solos orgânicos, resulta na existência de distintas classificações. Com a experiência acumulada de cada autor ou um grupo de trabalho, em um determinado tipo de material, novas metodologias acabam sendo criadas ou validadas. A Tabela 2.4, de Hartlén e Wolski (1996), mostra algumas destas classificações e ressalta as suas diferenças. Na classificação, a quantidade de cinzas significa a porcentagem de material que permaneceu após o ensaio de perda ao fogo.

Tabela 2.4: algumas classificações de solos orgânicos.

Quantidade de cinza	0%	Turfas	Fortemente orgânicos	Turfas	Turfas	Pouca cinza	Turfas	Solos Calcáreos / Lamas orgânicas (Gyttja)					
	10%					Média cinza							
	20%					Muita cinza							
	30%	Solos turfosos		Solo orgânico turfoso	Sedimentos carbonáceos	Pouca cinza	Orgânicos		Média cinza	Solo turfoso			
	40%			Solo orgânico							Muita cinza	Muita cinza	Lama
	50%												
	60%	Medianamente orgânicos			Mineral								
	70%			Pouco orgânicos		Pouco orgânicos	Minerais		Mineral				
	80%	Mineral ou mineral com matéria orgânica			Minerais					Sedimentos minerais	Mineral		
	90%			Konvalov (1980)		Karlsson e Hansbo (1981)	Landva et al (1983)		Andrejko et al (1983)			Okruszko (1984)	
100%	União Soviética	Suécia	Canadá		Estados Unidos			Polônia					
Autor													
País de origem													

(adaptado de HARTLÉM; WOLSKI, 1996)

2.4.1 Classificação de Von Post

Von Post (1924) propõe uma classificação mais detalhada para o caso de turfas, que leva em conta o grau de humificação (H), o teor de humidade (B), quantidade de fibras (F), quantidade de raízes (R) e quantidade de restos de madeira (V).

2.4.1.1 Grau de humificação

O grau de humificação é determinado conforme a Tabela 2.5, levando em conta a quantidade de fibras aparentes e conteúdo de material amorfo. Para a classificação é utilizado um teste comprimindo certa quantidade de solo no interior da mão e analisando o material passante entre os dedos e o resíduo que permanece na palma da mão.

Tabela 2.5: grau de humificação de Von Post.

Grau de humificação	Decomposição	Pedaços de Plantas	Conteúdo de Material amorfo	Material extrudado ao apertar (passante entre os dedos)	Natureza do resíduo dentro da mão após apertar
H1	Nada	Facilmente identificáveis	Nenhum	Claro com água limpa	Não pastoso
H2	Insignificante	Facilmente identificáveis	Nenhum	Água amarelada	Não pastoso
H3	Muito fraca	Relativamente identificável	Leve	Água marrom, lama sem turfa	Não pastoso
H4	Fraca	Não facilmente identificável	Algum	Água marrom escura, lama com turfa	Medianamente pastoso
H5	Moderada	Reconhecíveis	Considerável	Lama com turfa	Fortemente pastoso
H6	Moderadamente forte	Indistintos	Considerável	Um terço da lama consiste em turfa	Fibras e raízes mais resistentes a decomposição
H7	Forte	Pouco reconhecíveis	Alto	Metade da lama consiste em turfa	Fibras e raízes mais resistentes a decomposição
H8	Muito Forte	Muito indistintos	Alto	Dois terços da lama consiste em turfa	Fibras e raízes mais resistentes a decomposição
H9	Quase completa	Quase irreconhecível	Altíssimo	Praticamente tudo turfa em uma massa uniforme	Não há resíduo
H10	Completa	Não discernível	Altíssimo	Tudo turfa em uma massa uniforme	Não há resíduo

(adaptado de HARTLÉM; WOLSKI, 1996)

2.4.1.2 Teor de umidade

A Tabela 2.6 ilustra a classificação em função do teor de umidade, facilmente obtida através da pesagem e secagem de material.

Tabela 2.6: classificação de Von Post quanto ao teor de umidade.

Classificação	Descrição	Teor de umidade
B1	Seca	Seca
B2	Relativamente seca	< 500%
B3	Teor de umidade normal	500% - 1000%
B4	Muito úmida	1000% - 2000%
B5	Em grande parte água livre	> 2000%

(adaptado de HARTLÉM; WOLSKI, 1996)

2.4.1.3 Quantidade de fibras

A Tabela 2.7 ilustra a classificação em função da quantidade de fibras, classificadas visualmente. Raízes são excluídas desta classificação.

Tabela 2.7: classificação quanto à quantidade de fibras.

Classificação	Definição
F0	Não fibrosa
F1	Pouco fibrosa
F2	Altamente fibrosa
F3	Puramente fibrosa

(adaptado de HARTLÉM; WOLSKI, 1996)

2.4.1.4 Quantidade de raízes

A Tabela 2.8 descreve a classificação em função da quantidade de raízes, classificação esta obtida visualmente.

Tabela 2.8: classificação de Von Post quanto à quantidade de raízes.

Classificação	Definição
R0	Sem raízes
R1	Com poucas raízes
R2	Com muita raízes
R3	Puramente raízes

(adaptado de HARTLÉM; WOLSKI, 1996)

2.4.1.5 Quantidade de restos de madeira

Na Tabela 2.9 é descrita a classificação em função da quantidade de restos de madeira. Como nos últimos itens, também esta classificação é obtida visualmente.

Tabela 2.9: classificação de Von Post quanto à quantidade de restos de madeira.

Classificação	Definição
V0	Sem restos de madeira
V1	Com pouco resto de madeira
V2	Com muito resto de madeira
V3	Puramente resto de madeira

(adaptado de HARTLÉM; WOLSKI, 1996)

2.4.1.6 Apresentação da classificação

A classificação do solo a partir dos resultados destes ensaios é apresentada na Equação 2.1.

$$H_n B_n F_n R_n V_n \quad (\text{Equação 2.1})$$

Tome-se o exemplo de uma turfa que ao ser executado o procedimento descrito para determinar o grau de humificação, obtem-se um material totalmente turfoso e uniforme entre os dedos, não sobrando nada na palma da mão, com um teor de umidade de 1500%, sem fibras, sem raízes e com poucos restos de madeira. Como mostrado na Equação 2.2 a sua classificação segundo Von Post seria:

$$H_{10} B_4 F_0 R_0 V_1 \quad (\text{Equação 2.2})$$

2.4.2 Classificação de Hoops

Na classificação de Hoops (1986) os parâmetros descritos por Von Post (1924) são mantidos, são acrescentados o teor de matéria orgânica (N), a resistência à tração vertical (Tv) e horizontal (Th), odor (A), plasticidade (P) e potencial de hidrogênio (pH).

2.4.2.1 Teor de matéria orgânica

A classificação quanto à quantidade de matéria orgânica é obtida através de ensaios de perda ao fogo. A Tabela 2.10 mostra esta classificação.

Tabela 2.10: classificação de Hoobs quanto ao teor de matéria orgânica.

Classificação	Perda ao fogo
N0	0% - 20%
N1	20% - 40%
N2	40% - 60%
N3	60% - 80%
N4	80% - 95%
N5	> 95%

(adaptado de HARTLÉM; WOLSKI, 1996)

2.4.2.2 Resistência à tração

Este parâmetro classifica as turfas em faixas de variação de resistência à tração, na vertical e na horizontal, medidos aplicando forças em uma amostra de solo com uma determinada seção, carregando até a ruptura. A Tabela 2.11 mostra a classificação.

Tabela 2.11: classificação de Hoobs quanto à resistência a tração.

Classificação	Definição	Resistência a tração
T0	Sem resistência	Nula
T1	Baixa resistência	< 2kN/m ²
T2	Moderada resistência	2kN/m ² - 10kN/m ²
T3	Alta resistência	> 10kN/m ²

(adaptado de HARTLÉM; WOLSKI, 1996)

2.4.2.3 Odor

Esta classificação pode indicar uma decomposição anaeróbia. Consiste simplesmente na avaliação do odor do solo. A Tabela 2.12 descreve a classificação.

Tabela 2.12: classificação de Hoobs quanto ao odor.

Classificação	Odor
A0	Nulo
A1	Fraco
A2	Moderado
A3	Forte

(adaptado de HARTLÉM; WOLSKI, 1996)

2.4.2.4 Plasticidade

Classificação que leva em conta a possibilidade ou não de poder ser obtido através de ensaios convencionais o índice de plasticidade do solo. Usando o seguinte critério, P1 se for possível e P0 se não for possível.

2.4.2.5 Potencial de hidrogênio

Divide as turfas em ácidas, alcalinas e neutras. A Tabela 2.13 ilustra esta divisão.

Tabela 2.13: classificação de Hoobs quanto ao potencial de hidrogênio.

Classificação	pH
pHL	< 7
pHN	7
pHH	> 7

(adaptado de HARTLÉM; WOLSKI, 1996)

2.4.2.6 Apresentação da classificação

Após esta análise e utilizando esta classificação juntamente com a classificação de Von Post, como mostrado na equação 2.3, um solo é descrito segundo a expressão:

$$H_n B_n F_n R_n V_n / N_n T V_n T H_n A_n P_n p H_x \quad (\text{Equação 2.3})$$

Usando o exemplo anterior da turfa que ao ser executado o procedimento para determinar o grau de humificação, saiu um material totalmente turfoso e uniforme entre os dedos, não sobrando nada na palma da mão, com um teor de umidade de 1500%, sem fibras, sem raízes, com poucos restos de madeira, com 50% de perda ao fogo, resistência a tensão vertical de 3kN/m², horizontal de 1kN/m², odor moderado, foi possível seu índice de plasticidade e com o pH 4. Como mostrado na equação 2.4, sua classificação segundo Hoobs e Von Post seria:

$$H_{10} B_4 F_0 R_0 V_1 / N_2 T V_2 T H_1 A_2 P_1 p H_L \quad (\text{Equação 2.4})$$

3 REAÇÕES QUÍMICAS DOS AGENTES CIMENTANTES EM SOLOS

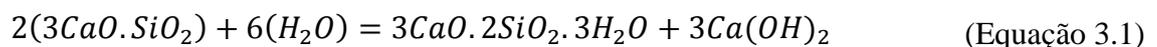
Neste capítulo são brevemente descritas e explicadas as reações químicas que ocorrem quando há a adição de cal viva ou cimento em um solo.

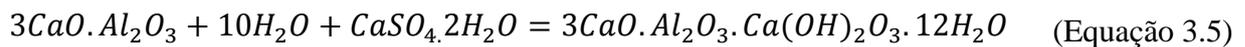
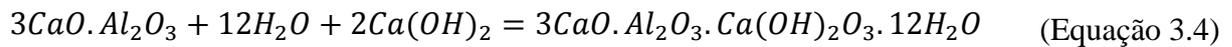
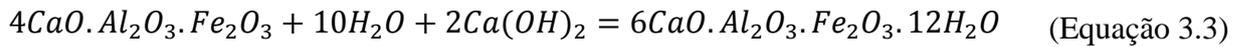
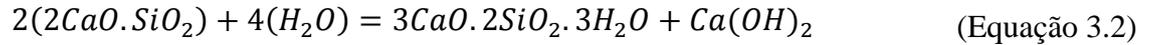
3.1 COM CIMENTO

O melhoramento de solos com o uso de cimento Portland é um assunto bastante estudado e bem difundido na literatura. Autores como Nunez (1991), Vendruscolo (2003) e Foppa (2005), na revisão bibliográfica de suas teses ou dissertações, citam diversas referências sobre o assunto. Para o presente trabalho foi dada prioridade para a parte química das reações que ocorrem na mistura solo/cimento.

Segundo Nunez (1991), o mecanismo que ocorre na combinação de solos granulares com cimento é similar ao mecanismo que ocorre na utilização do cimento no concreto. Quanto às reações da mistura em solos argilosos, Herzog e Mitchel (1963), citam que, nestes materiais, o processo de endurecimento, se deve a cimentação de partículas de argila pelos produtos da hidratação do cimento e pelos produtos das reações secundárias, que consistem em reações entre a cal liberada pela hidratação do cimento e os argilo-minerais do solo.

Como citado por Lea (1956), o cimento Portland consiste de diferentes substâncias, sendo as substâncias responsáveis pelo ganho de resistência: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e aluminato tetracalcico ferrite (C_4AF). Segundo Bergado et al. (1996), quanto estas substâncias entram em contato com a água presente no solos, rapidamente ocorre a sua hidratação, formado-se os silicatos hidratados de cálcio (CSH), os aluminatos hidratados de cálcio (CAH) e cal hidratada ($Ca(OH)_2$). As principais reações químicas que ocorrem com a água do solo são descritas nas equações 3.1 a 3.5.





Segundo o mesmo autor, os compostos formados pela hidratação do cimento nas Equações 3.1 e 3.2, géis de tobermolita e cal hidratada, são os principais responsáveis pelo ganho de resistência das misturas solo/cimento. As reações que ocorrem ao longo do tempo com o silicato tricálcico são mostradas nas Equações 3.6 a 3.9, sendo que, a Equação 3.6 representa as reações primárias, a Equação 3.7 mostra a desassociação dos íons de cálcio e as Equações 3.8 e 3.9 mostram as reações secundárias. Estas reações secundárias necessitam de componentes do solo (silica e alumina em estado amorfo) para ocorrerem.





Segundo Mindess et al. (2003), as reações de hidratação do cimento nos primeiros dias ocorrem em intensidade nos seguintes elementos, em ordem decrescente: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$. Com a liberação de cal, posteriormente, se houver sílica ou alumina em estado amorfo, ocorrem às reações secundárias.

3.2 COM CAL VIVA

Assim como para as misturas solo/cimento, as misturas solo/cal estão muito bem descritas na literatura. Autores como Nuñez (1991), Thomé (1994), Lopes Junior (2011) e Johann (2013) em suas teses ou dissertações citam diversas referências sobre o assunto. No presente trabalho foi dada prioridade para as reações químicas que ocorrem na mistura solo/cal. Ao contrário do cimento, para a cal viva reagir existe a necessidade de haver sílica e alumina em estado amorfo na mistura, para que ocorram as reações pozolânicas.

Como citado em Thomé (1994), ocorrem diversas reações químicas ao ser executada a mistura solo/cal, algumas imediatas e outras ao longo do tempo. As principais reações que ocorrem são:

Floculação – consiste no aumento e estabilização das partículas argilosas e ocorre devido a três fatores: troca catiônica, aumento da capacidade de troca catiônica dependente do pH e aumento da concentração de eletrólitos na água dos poros;

Carbonatação – é a reação da cal com o dióxido de carbono do ar atmosférico, geram cristais de $CaCO_3$ e ocorrem imediatamente após a exposição da cal ao ar;

Adsorção química das moléculas da cal – íons de cálcio são liberados na mistura;

Reações pozolânicas – reação do cálcio da cal com a sílica e alumina do solo gerando os silicatos e aluminatos hidratados de cálcio, responsáveis pela maior parte do ganho de resistência das misturas solo/cal.

Segundo Castro (1995), quando a cal é adicionada a um solo fino, com a presença de água, ocorrem simultaneamente algumas reações químicas, que podem ser caracterizadas por duas etapas distintas, uma etapa inicial rápida que dura de horas a dias e outra mais lenta, que pode levar meses a anos. A etapa inicial rápida consiste em: troca catiônica, floculação, compressão da dupla camada elétrica, adsorção da cal e reações químicas. A etapa lenta consiste nas reações pozolânicas e na carbonatação.

Prusinski e Bhattacharja (1999) afirmam que para neutralizar a deficiência de cargas do argilo-mineral, cátions e moléculas que se encontram dissolvidos na água são atraídos para as superfícies carregadas negativamente, iniciando assim rapidamente as trocas catiônicas. Segundo Harrin e Mitchel (1961), a ordem de adsorção preferencial dos cátions é a seguinte: $Na^+ < Ca^{++} < Mg^{++} < Al^{+++}$, ou seja, cátions de menor valência são substituídos por cátions de maior valência. A figura 3.1 adaptada de Prusinski e Bhattacharja (1999), mostra o mecanismo de troca dos cátions.

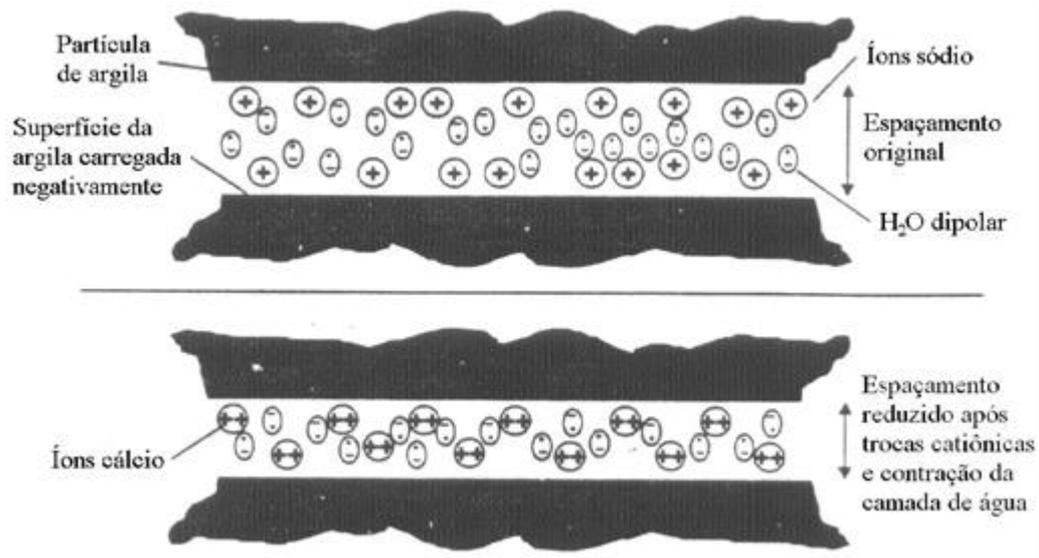


Figura 3.1: mecanismo de troca de cátions. (adaptado de PRUSINSKI, BHATTACHARJA, 1999)

Segundo Johann (2013), 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. Como citado por 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 do solo. Essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio. Conforme Ingles & 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 ilustrado na Figura 3.2.

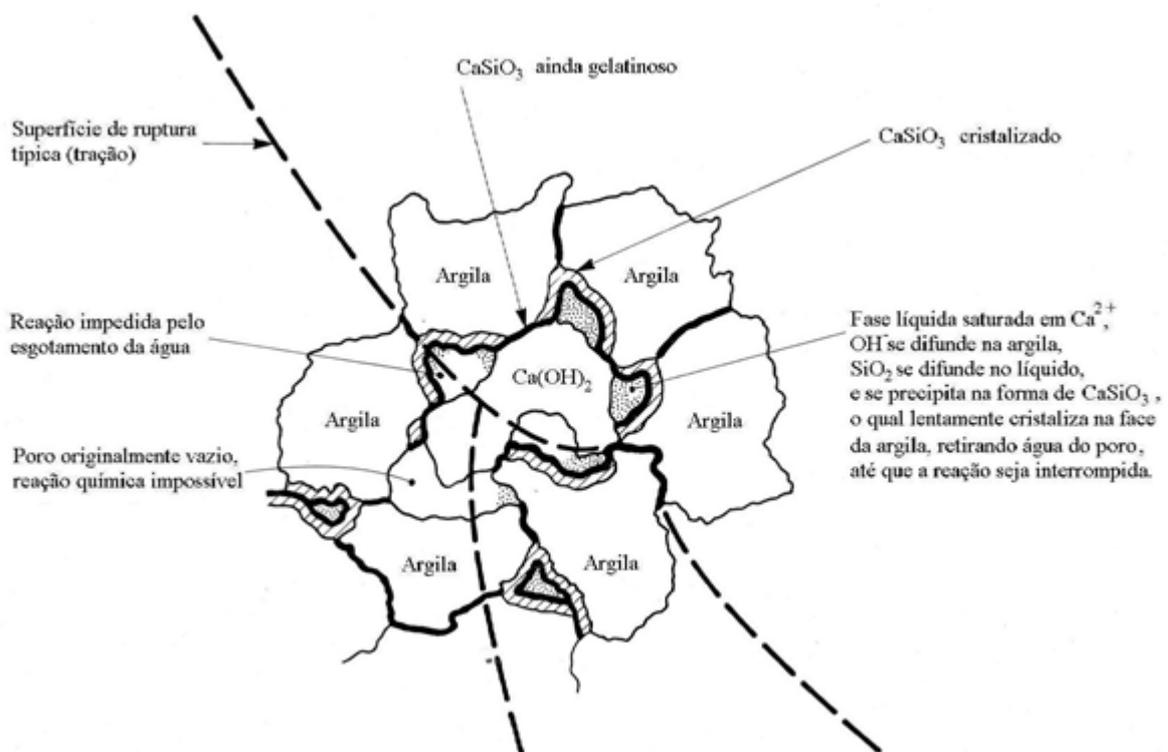
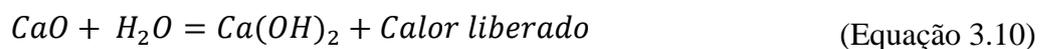
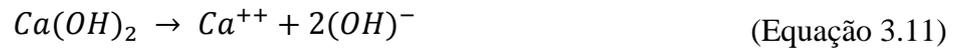


Figura 3.2: mecanismo de estabilização solo-cal .
(adaptado de INGLES , METCALF, 1972)

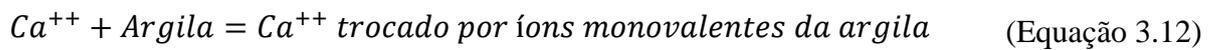
Segundo Bergado et al. (1996), as equações das reações químicas da cal, simplificadas, quando misturada com o solo são mostradas nas Equações 3.10 a 3.15. Onde a Equação 3.10 representa a hidratação da cal viva, onde a cal viva em contato com água se transforma em cal hidratada e libera calor.



A Equação 3.11 mostra a dissociação dos íons da cal.



A Equação 3.12 mostra esquematicamente as trocas catiônicas.



As Equações 3.13 e 3.14 mostram de maneira simplificada as reações pozolânicas.



A Equação 3.15 mostra também de maneira simplificada a carbonatação.



4 MELHORAMENTO DE SOLOS ORGÂNICOS.

Este capítulo tem por objetivo fornecer uma visão geral das características e propriedades dos agentes cimentantes utilizados quando adicionados a solos orgânicos, buscando elucidar as reações que ocorrem nos processos de cimentação neste tipo de mistura. Agentes como a cal viva e o cimento de alta resistência inicial, escolhidos para este trabalho devido a sua ampla utilização na construção civil e principalmente na prática mundial para a estabilização de solos moles orgânicos.

Diversos autores apontam para distintas direções quando o assunto é a escolha do agente estabilizador de solos moles orgânicos. Conforme visto anteriormente, o material é extremamente heterogêneo e existem diversas práticas locais onde em cada material diferente é aconselhável um tipo de agente cimentante. Neste item serão abordados diferentes trabalhos de diversas localidades, mostrando as suas diferenças e semelhanças.

Kuno et al. (1989), com a finalidade de examinar a eficácia da adição de diferentes tipos de agentes estabilizadores em solos com diferentes porcentagens de ácidos húmicos e teores de umidade natural, efetuaram uma pesquisa com 35 tipos diferentes de solos moles orgânicos obtidos no Japão. Os agentes cimentantes, suas porcentagens e períodos de cura são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: agentes cimentantes, quantidade e tempos de cura utilizados no estudo de Kuno et al. (1989).

Agente cimentante	Quantidade de agente cimentante (Kg/m ³)	Períodos de cura (dias)
Cimento Portland	80	1, 3, 7 e 28
Cal Hidratada	80	1, 3, 7 e 28
Cal Viva	80	1, 3, 7 e 28
Cimento Portland e Gesso (9:1) (em massa)	80	1, 3, 7 e 28
Cal Viva e Gesso (8:2) (em massa)	80	1, 3, 7 e 28

(Adaptado de KUNO ET AL., 1989)

Os solos utilizados pelos autores são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: solos utilizados no estudo de Kuno. (1989).

Amostra de solo	Granulometria (%)			Limites de Aterberg (%)			Gs	w (%)	pH	MO (%)	AH (%)
	Areia	Silte	Argil	LL	LP	IP					
Lama de fundo da Lagoa Shinobazu (1) amostra 1	14	69	17	163	65	98	2,374	336	7,1	20,6	1,62
Lama de fundo da Lagoa Shinobazu (1) amostra 2	14	69	17	163	65	98	2,374	204,1	7,1	20,6	1,62
Lama de fundo da Lagoa Shinobazu (2) amostra 1	16	58	26	173	82	91	2,431	312,2	6,2	15,3	0,89
Lama de fundo da Lagoa Shinobazu (2) amostra 2	16	58	26	173	82	91	2,431	192,8	6,2	15,3	0,89
Lama de fundo da Lagoa Shinobazu (3) amostra 1	4	72	24	202	83	119	2,425	438,1	7,3	16,6	0,74
Lama de fundo da Lagoa Shinobazu (3) amostra 2	4	72	24	202	83	119	2,425	276,3	7,3	16,6	0,74
Lama de fundo do Lago Kasumigaura (1) 1	4	56	40	228	79	149	2,404	502,5	6,5	10,1	0,83
Lama de fundo do Lago Kasumigaura (1) 2	4	56	40	228	79	149	2,404	296,2	6,5	10,1	0,83
Lama de fundo do Lago Kasumigaura (2) 1	5	66	29	120	52,8	67,2	2,598	208	5,1	5,5	0,57
Lama de fundo do Lago Kasumigaura (2) 2	5	66	29	120	52,8	67,2	2,598	160,3	5,1	5,5	0,57
Lama de fundo domar de Ariake 1	0,5	71,5	28	181	56,9	124	2,6	238,8	7,3	5,7	0,15
Lama de fundo domar de Ariake 2	0,5	71,5	28	181	56,9	124	2,6	184,4	7,3	5,7	0,15
Argila de Matsue	0	61	39	121	40	81	2,451	119,5	4,8	10,4	2,41
Argila do Rio Nekona	17	42	41	108	47	61	2,545	81,6	5,5	7,8	1,17
Argila de Haneda	0	56	44	130	52	78	2,608	140,9	8,1	9,7	0,04
Argila da Baía de Tokio	13	63	24	94	39	55	2,713	107,1	8	4,8	0,07
Argila de Ozu	9	55	36	66	30	36	2,714	55,8	5,9	4,3	0,41
Argila de Yokohama	28	36	36	70	29	41	2,619	55,1	9	8,2	0,07
Argila do Rio Ibo 1	25	48	27	83	33	50	2,555	126,4	7,7	5,7	0,66
Argila do Rio Ibo 2	25	48	27	83	33	50	2,555	86,1	7,7	5,7	0,66
Argila do Rio Tama	23	62	15	51	27	24	2,663	83,2	7,5	3,8	0,05
Argila do Rio Tsurumi	23	46	31	52	27	25	2,658	54,6	7,6	3	0,05
Argila de Teradomari 1	21	39	40	226	81	145	2,385	192,7	5,9	16,4	1,54
Argila de Teradomari 2	21	39	40	226	81	145	2,385	136,4	5,9	16,4	1,54
Argila de Shirane	0	26	74	241	80	161	2,37	198	5,2	19,7	3,57
Argila de Kanazuka	5	66	29	100	50	50	2,551	90,9	5	8,7	1,8
Argila de Tsubame	7	60	33	83	38	45	2,651	79,4	6,1	4,9	0,63
Argila de Fukushimaagata	0	33	67	99	50	49	2,583	101,1	6,6	4,5	0,64
Argila de Yoshida	2	34	64	89	36	53	2,662	65	6,5	3,6	0,32
Argila de Kogaya	14	54	32	62	39	23	2,615	49,7	5,3	3,4	0,43
Argila do porto velhode Iwabune	11	57	32	46	25	21	2,696	35	4,5	2,2	0,16
Argila de Arai	18	41	41	61	30	31	2,626	43,9	5,5	3,1	0,12
Argila do centro de distribuição Niigata	46	34	20	51	24	27	2,68	32,6	5,2	2	0,1
Argila de Yoneyama	6	29	65	131	40	91	2,768	60,3	4,8	1,2	0
Argila de Tochio	3	52	45	84	36	48	2,722	49,7	5,5	0,5	0

(adaptado de KUNO ET AL., 1989)

Nas suas conclusões, Kuno et al. (1989), propõe a Figura 4.1, onde existem zonas na relação teor de ácido húmico e teor de umidade e em cada uma destas zonas indica-se qual o melhor agente cimentante a ser utilizado.

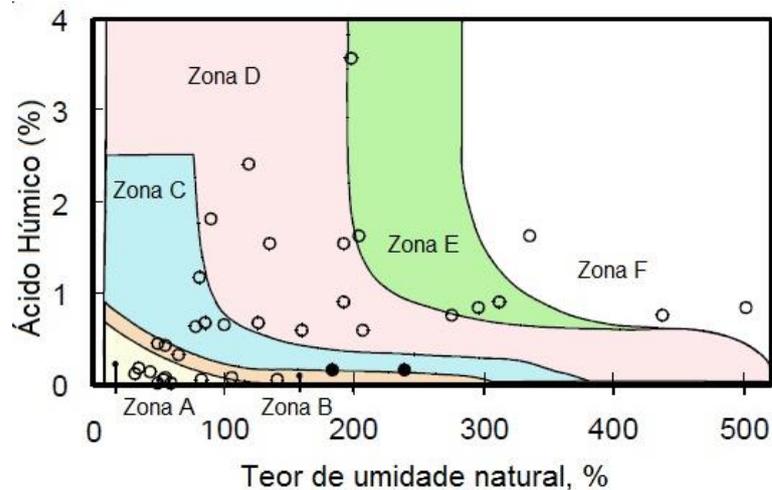


Figura 4.1: identificação das zonas em que agentes cimentantes diferentes reagem. (Adaptado de KUNO ET AL., 1989)

Na Tabela 4.3 são recomendados os agentes cimentantes com eficácia para cada uma das zonas indicadas pelo autor.

Tabela 4.3: indicação da qual agente cimentante se adequa as zonas.

Zona	Cal Hidratada	Cal Viva	Cal Viva + Gesso	Cimento Portland	Cimento Portland + Gesso
A	CP	CP	CP	CP	CP
B	LP	LP	CP	CP	CP
C	X	LP	LP	CP	CP
D	X	X	X	CP	CP
E	X	X	X	X	LP
F	X	X	X	X	X
CP - GANHO DE RESISTÊNCIA A CURTO PRAZO					
LP - GANHO DE RESISTÊNCIA A CURTO PRAZO					
X - NÃO INDICADO					

(Adaptado de KUNO ET AL., 1989)

Onitsuka et al. (2003) efetuaram um estudo onde foi avaliada a influência da quantidade de ácido húmico no melhoramento de solos orgânicos, juntamente com a concentração de sal na mistura. Os autores utilizaram cal viva e cimento como agentes cimentantes. As argilas utilizadas foram todas da baía de Ariake (Japão) extraídas de locais distintos. A Tabela 4.4 ilustra as características destas argilas.

Tabela 4.4: características das argilas utilizadas por Onitsuka.

Amostra	Local de extração	Profundidade (m)	w (%)	LL (%)	IP (%)	pH	Concentração de sal g/l	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	MO (%)	AH (%)	AF (%)
Argila 1	Okawa	1	185	143	90	6	0,7	3	52	45	8	1,6	0,3
Argila 2	Ashikari	3	150	133	71	7,6	15,4	1	44	55	7,3	0,3	1,4
Argila 3	Isahaya	3	170	150	88	8	23,1	0	19	81	10	0,3	2

(Adaptado de ONITSUKA ET AL., 2003)

Sendo as características dessas argilas observadas, percebe-se a semelhança entre elas em quase todos os quesitos. A principal diferença está na maior concentração de ácido húmico na argila 1 em relação as outras.

Onitsuka et al. (2003) adicionaram nestes materiais quatro teores de cal e cimento diferentes e utilizaram três tempos de cura distintos. A Figura 4.2 mostra o resultado destes ensaios quanto à resistência à compressão simples, para o mesmo teor de umidade em todas as argilas, 185%.

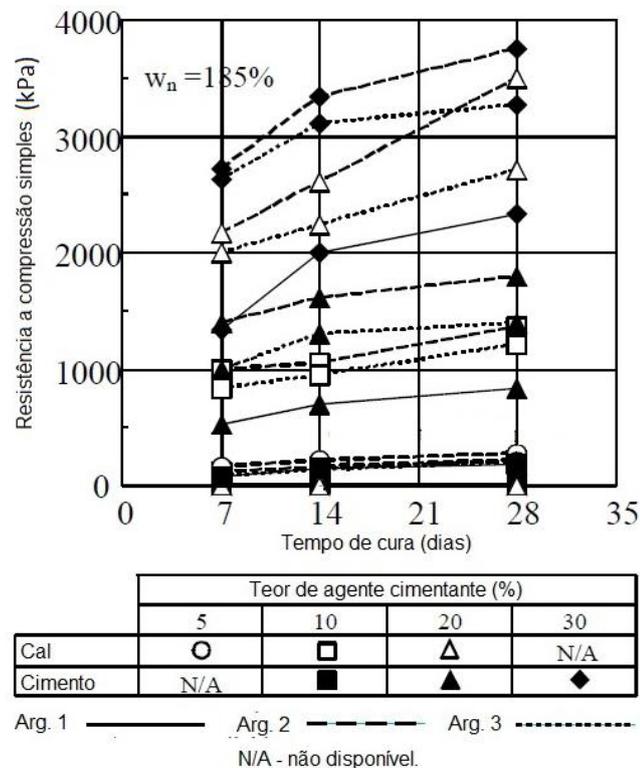


Figura 4.2: resistência a compressão simples das argilas de Ariake de Onitsuka. (Adaptado de ONITSUKA ET AL., 2003)

É observado pelos autores que na argila 1, não houve ganho significativo de resistência com o uso de cal, enquanto, nos demais materiais, o ganho com cal foi maior que o ganho com o cimento. Na argila 1, que teve um comportamento diferente das outras, foi analisada também a influência da concentração de sal junto com a variação da concentração de ácido húmico. A Figura 4.3 mostra a perda de resistência em relação à quantidade de ácido húmico presente na argila 1 para diferentes concentrações de sal, para um teor de agente cimentante adicionado de 20% e um teor de umidade inicial de 150%. (ONITSUKA ET AL., 2003)

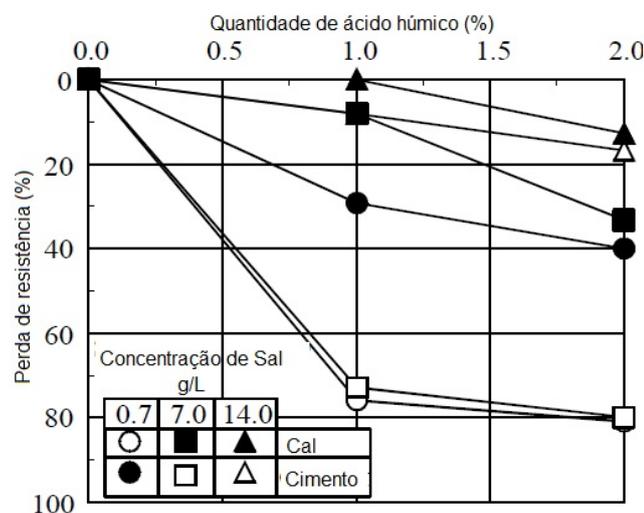


Figura 4.3: efeito do sal e do ácido húmico de Onitsuka.
(Adaptado de ONITSUKA ET AL., 2003)

Os autores explicitam que, com a utilização de cal, o efeito do ácido húmico é mitigado pela concentração de sal, já com cimento as conclusões quanto ao uso de sal não foram objetivas devido ao fato de a perda de resistência ser maior para uma concentração intermediária de sal.

Foi dada continuidade a este estudo por Modmoltin et al. (2004) que mostraram o efeito do sal na mitigação dos problemas causados pelo ácido húmico, nas três argilas anteriores, nas reações pozolânicas. Posteriormente as misturas tiveram a sua microestrutura avaliada. Na Figura 4.4, do mesmo autor, é mostrado o efeito do sal na mistura quanto ao ganho de resistência para as três argilas com o teor de umidade de 150%, o teor de cal adicionado de 20% e um período de cura de 7 dias.

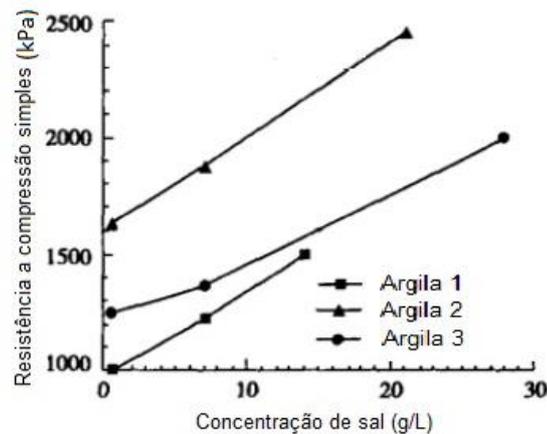


Figura 4.4: efeito do sal e do ácido húmico de Modmoltin. (Adaptado de MODMOLTIN ET AL., 2004)

Um indício de que as reações pozolânicas não ocorreram ou ocorreram com pouca intensidade é visto na Figura 4.5, onde foram comparados os limites de liquidez das argilas 1 e 2 para diferentes tempos de cura com a adição de 10% de cal. A mudança no limite de liquidez na argila 2 mostra que sua estrutura foi modificada. Enquanto a argila 1, com a mesma adição de material, continua com o mesmo limite de liquidez, ou seja, não há indícios de que a sua estrutura foi modificada. O ácido húmico é tido como o responsável por impedir ou minimizar as reações cimentantes. (MODMOLTIN ET AL., 2004)

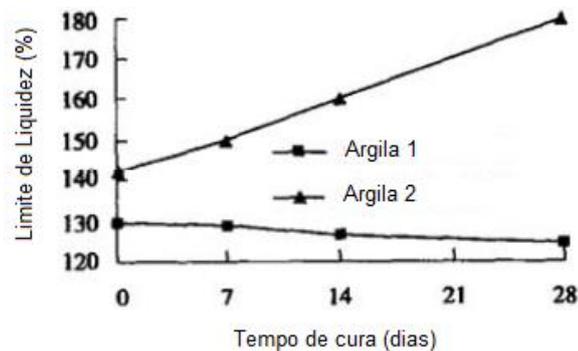


Figura 4.5: limite de liquidez x tempos de cura para duas argilas de Ariake. (Adaptado de MODMOLTIN ET AL., 2004)

Analisando micro estruturalmente as reações pozolânicas nestas argilas com a presença de ácido húmico e sal, Modmoltin et al. (2004), chegaram a conclusão que o sal aproxima as partículas do solo, facilitando assim a cal de reagir com a sílica e alumina amorfa presente no material. A Figura 4.6 representa esquematicamente este efeito.

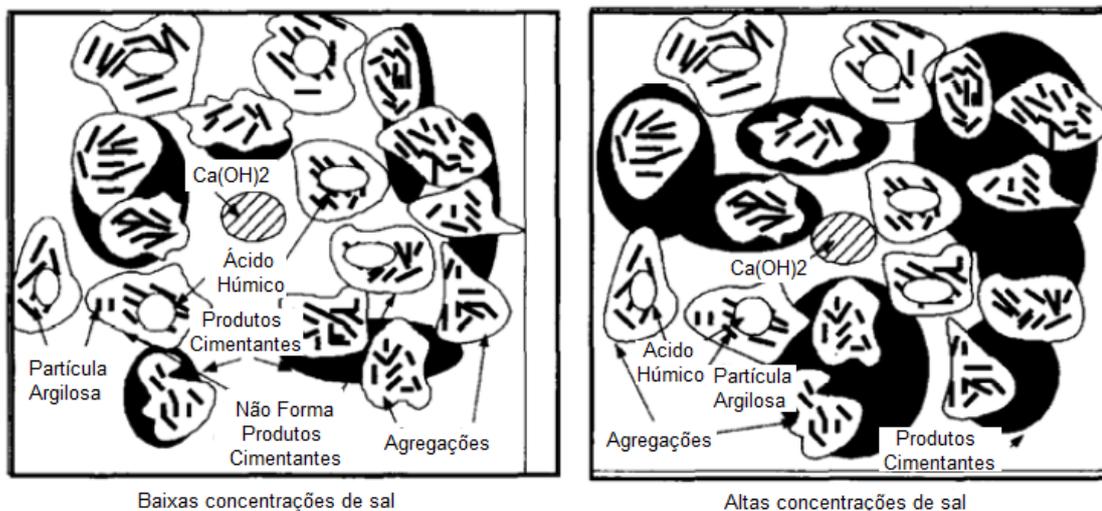


Figura 4.6: sal atuando na mistura solo orgânico, sal e cal.
(Adaptado de MODMOLTIN ET AL., 2004)

Segundo Yunus et al. (2011), as reações pozolânicas na adição de cal em solos orgânicos são afetadas por dois fatores, a presença do ácido húmico e os altíssimos teores de umidade. O ácido húmico interage com as partículas do solo não permitindo a reação com o cálcio, que tem uma afinidade para reagir com a matéria orgânica, dificultando assim duplamente o ganho de resistência. Já o alto teor de umidade acaba afastando as partículas do solo dificultando também as reações. Em seu estudo, foram adicionadas diferentes quantidades de ácido húmico em um caulim, formando assim um solo orgânico artificial com diferentes proporções deste ácido. Posteriormente foi feita uma caracterização onde foram verificadas a microestrutura e as propriedades destes solos. A Tabela 4.5 mostra as propriedades dos solos criados antes do tratamento.

Tabela 4.5: propriedade dos solos não tratados de Yunus 2011.

	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Gs	pH
Caulim	65,4	30,4	35	2,61	5,52
Caulim + 0,5% AH	64,4	33	31,4	2,53	5,34
Caulim + 1,5% AH	63,3	33,8	29,5	2,51	5,16
Caulim + 3,0% AH	61	34,5	26,5	2,47	5,07

(Adaptado de YUNUS ET AL., 2011)

Segundo os autores, conforme aumenta o teor de ácido húmico adicionado diminui o limite de liquidez, o índice de plasticidade, o peso específico real dos grãos e o pH. Já o limite de plasticidade aumenta. A resistência ao cisalhamento não drenada dos materiais não tratados

pode ser observada na Figura 4.7, percebendo-se claramente que o solo perde resistência ao cisalhamento não drenado ao ser adicionado ácido húmico, neste caso atingindo só aproximadamente 44% da resistência do material sem a presença deste ácido.

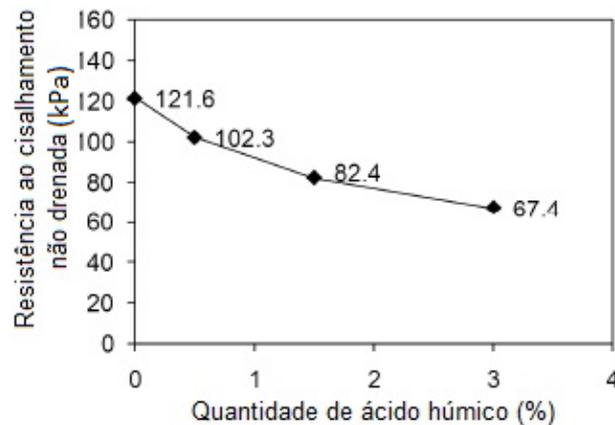


Figura 4.7: Su dos solos não tratados de Yunus.
(Adaptado de YUNUS ET AL., 2011)

Com a adição de cal, Yunus et al. (2011) observaram que quanto maior a adição de ácido húmico, menor a resistência do solo para o mesmo teor de cal e o mesmo tempo de cura, como mostrado na Figura 4.8 para 7 dias de cura. A dosagem ótima de cal para todas as situações situa-se em torno de 5%.

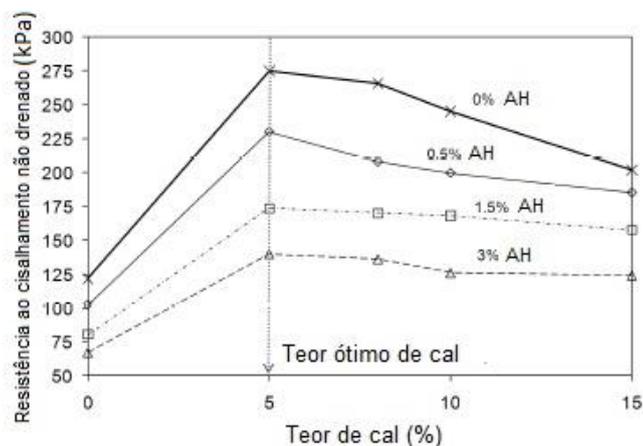


Figura 4.8: Su dos solos tratados de Yunus.
(Adaptado de YUNUS ET AL., 2011)

Outro comportamento observado pelos mesmos autores foi a perda de resistência ao longo do tempo para estes solos, sendo mais acentuada para maiores concentrações de ácido húmico, como mostrado na Figura 4.9.

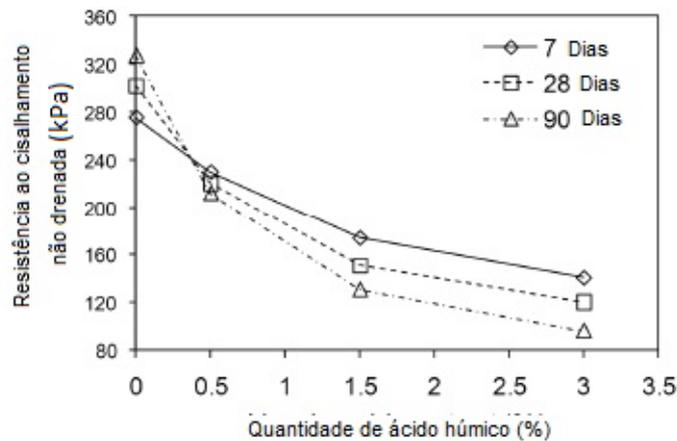


Figura 4.9: perda de resistência ao longo do tempo de Yunus. (Adaptado de YUNUS ET AL., 2011)

Na análise micro estrutural verifica-se que após a ruptura dos corpos de prova não tratados a quantidade de fissuras nas moléculas aumenta conforme aumenta a quantidade de ácido húmico, pois as partículas ficam mais frágeis. Já no caso do solo tratado com cal, há um aumento significativo do espaço entre os produtos formados conforme ocorre o aumento da concentração de ácido húmico. (YUNUS ET AL., 2011)

Tremblay et al. (2002) executaram um estudo onde foram adicionados diversos componentes orgânicos diferentes, não se limitando somente a verificar a influência do ácido húmico, em dois solos distintos. Utilizou-se na pesquisa 10% do componente orgânico e 10% de cada cimento em relação à massa seca de solo, para um teor de umidade específico para cada solo e dois tempos de cura, 7 e 28 dias. As características de cada um dos solos utilizados são mostradas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: características dos solos utilizados por Tremblay.

Solo	LL (%)	LP (%)	IP (%)	MO (%)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Área específica (m ² /g)
St-Alban	44	18	26	1	48	47	5	50
Trois-Rivières	22	15	7	< 1	20	46	34	21

(Adaptado de TREMBLAY ET AL., 2002)

A resistência ao cisalhamento não drenado obtida neste experimento para as diferentes misturas de componentes orgânicos e cimento Portland convencional é mostrada na Figura

4.10. Para um dos solos alguns materiais proporcionaram até um ganho de resistência e não foi somente o ácido húmico que impossibilitou as reações cimentantes de ocorrerem.

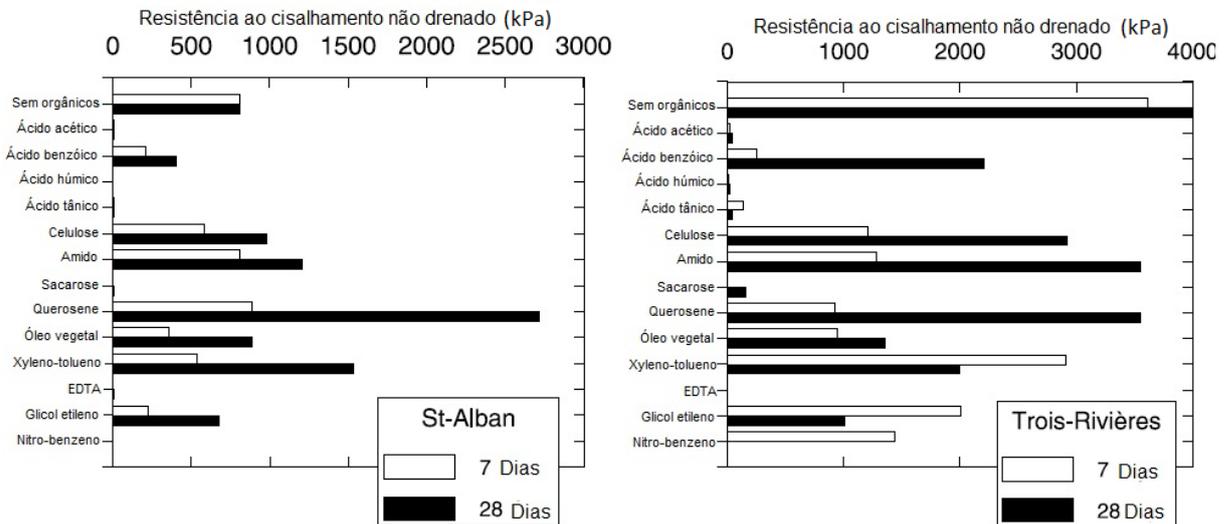


Figura 4.10: ganhos de resistência para mistura de cimento com materiais orgânicos por Tremblay. (Adaptado de TREMBLAY ET AL., 2002)

Com a finalidade de estudar a micro-estrutura das misturas após o tempo de cura de 28 dias, Tremblay et al. (2002) executaram um estudo de microscopia eletrônica e dentre as mistura analisadas está a Figura 4.11, que mostra as cadeias carbônicas do ácido húmico no entorno de uma partícula de solo, fato este que pode ter causado interferência no ganho de resistência do material.

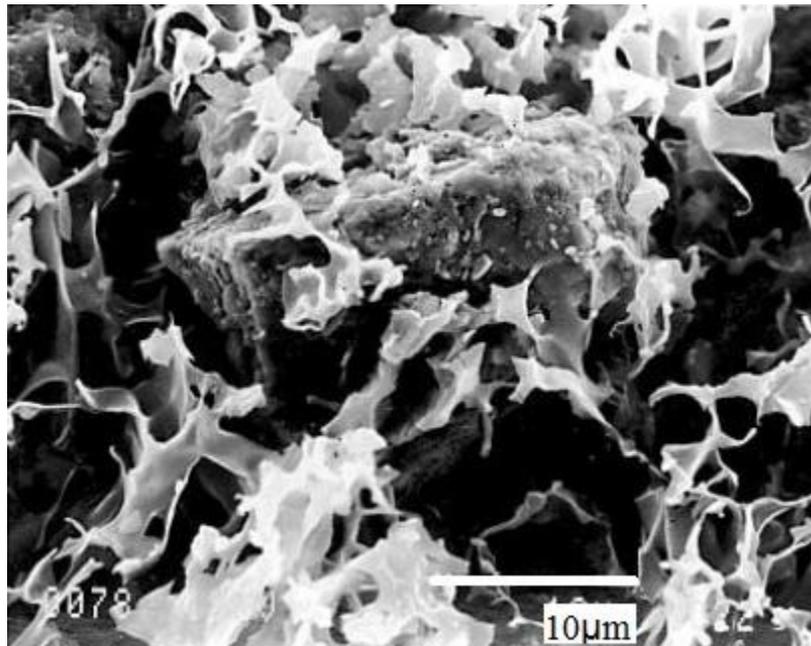


Figura 4.11: ácido húmico no entorno de uma partícula de solo.
(Adaptado de TREMBLAY ET AL., 2002)

Segundo Johansson et al. (2006), quando um material está saturado e com os íons da solução aquosa não estando em equilíbrio com os minerais do solo durante uma possível estabilização com um agente cimentante, para haver o equilíbrio os íons irão se juntar com este agente impedindo assim as reações de cimentação.

Ainda, segundo os mesmos autores, nas *gytjas*, devido à matéria orgânica estar ligada aos minerais do solo, os agentes cimentantes não conseguem reagir com a sílica e alumina amorfa. Quando se trata deste tipo de material, o autor cita que com pHs altos a parte orgânica pode se desassociar do solo, assim possibilitando a ocorrência de reações, porém com uma grande quantidade de material adicionado.

Nas turfas, o que impede as reações pozolânicas são dois fatores, o primeiro é a falta de sílica e alumina em estado amorfo, já que, às vezes praticamente todo o material é constituído por fibras ou outros materiais orgânicos e no caso de haver os materiais necessários para que ocorram as reações pozolânicas no solo, o ácido húmico reage com o agente estabilizador formando produto insolúveis e não permitindo que a cimentação ocorra com eles. (JOHANSSON ET AL., 2006)

Timoney et al. (2011) compilaram um banco de dados de diversos casos de melhoramentos de solos orgânicos com a finalidade de entender melhor o comportamento destes materiais

quando misturados com diferentes agentes cimentantes. Entre outros assuntos, na tentativa de obter um padrão de comportamento para solos orgânicos, foram desenvolvidos gráficos comparando o fator água/ligante, que consiste na razão entre a massa de água por volume e o teor de agente cimentante por volume, com a resistência à compressão simples. A Figura 4.12 mostra o fator água/ligante em relação à compressão simples para um tempo de cura de 28 dias sendo separados por tipo de ligante. Neste gráfico, claramente não se vê algum padrão racional e, segundo o autor, em alguns solos, pode haver uma grande quantidade de ligante que não gerou cimentação, invalidando assim a eficiência da metodologia.

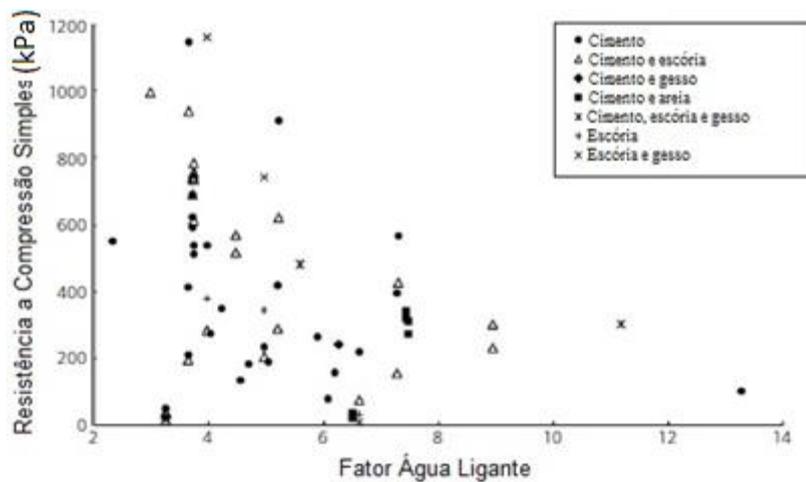


Figura 4.12: relação fator água/ligante por resistência a compressão simples de Timoney. (Adaptado de TIMONEY ET AL., 2011)

Timoney et al. (2011) plotaram essa relação fator água/ligante por resistência à compressão simples separando os solos pelo grau de humificação, conforme ilustrado na Figura 4.13. Onde novamente uma metodologia de dosagem não pode ser determinada, porém observa-se que existe uma tendência de que quanto maior o grau de humificação do solo, menor a resistência à compressão simples para um mesmo teor de agente cimentante e teor de umidade.

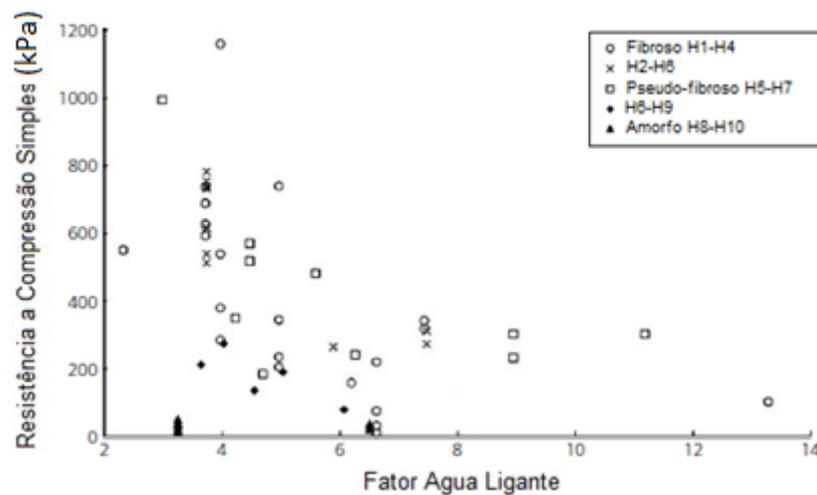


Figura 4.13: relação fator água ligante por grau de humificação de Timoney. (Adaptado de TIMONEY ET AL., 2011)

Axelsson et al. (2000) em seu estudo avaliaram o ganho de resistência para duas *gytjas* e três turfas quando tratadas com diferentes tipos de agentes cimentantes para diferentes temperaturas e tempos de cura. Em suas conclusões, os autores citam que é possível estabilizar estes solos com um agente cimentante, dependendo do agente a ser utilizado.

Quanto ao ganho de resistência, os materiais apresentaram diferentes ganhos para diferentes agentes, houve solos que reagiram melhor com uma substância que outros. Já em uma das turfas não houve ganho de resistência significativo com nenhum agente cimentante, justificada pelos autores como devido à falta de água para hidratação. A influência da temperatura de cura também variou conforme o solo e o agente cimentante adicionado. (AXELSSON ET AL., 2009)

Harris et al. (2009) executaram um informe para o Governo do Estado do Texas (EUA) com o intuito de avaliar a mitigação dos efeitos negativos da matéria orgânica em solos estabilizados. Os autores verificam a influência do ácido húmico no melhoramento de um solo com a adição de cal, utilizando um solo constituído por 60% de areia e 40% de argila, sendo que para esta fração argila são utilizado 3 diferentes tipos de argilo-minerais, caulinita, bentonita cálcica e bentonita sódica, com diferentes quantidades de ácido húmico. A Figura 4.14 mostra a comparação entre os ganhos de resistência com a adição de cal (6%) a solos cujas partes argilosas foram constituídas por bentonita cálcica ou sódica com diferentes quantidades de ácido húmico.

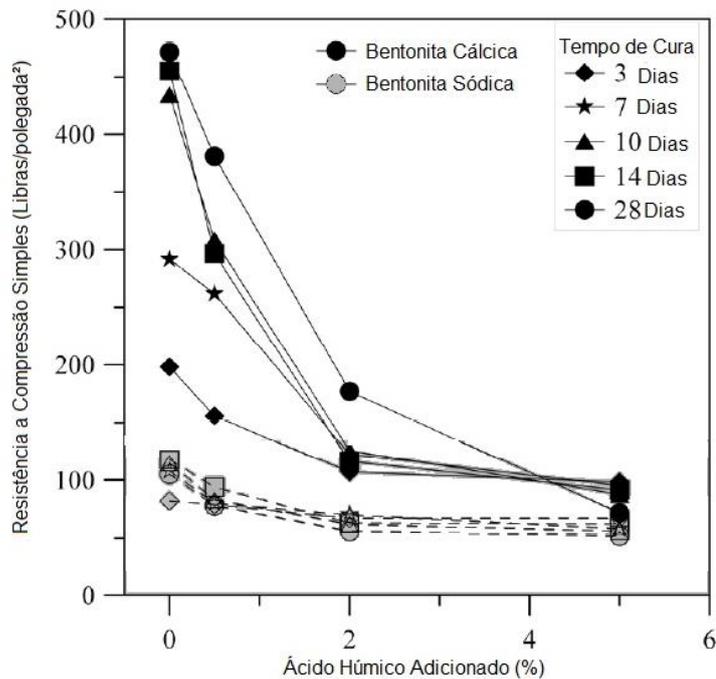


Figura 4.14: ganho de resistência com variação do ácido húmico para diferentes argilo-minerais na composição. (Adaptado de HARRIS ET AL., 2009)

Com a Figura anterior, percebe-se que a bentonita sódica não é tão suscetível ao melhoramento quanto à bentonita cálcica, mesmo sem a presença de ácido húmico, mas com a adição deste o ganho de resistência para os dois materiais tende a se igualar.

Os mesmos autores apresentam fotos de microscopia eletrônica para comparar a estrutura da bentonita cálcica sem tratamento, com tratamento com cal e com tratamento com cal e a presença de ácido húmico. As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram estas fotos apresentadas por Harris et al. (2009), onde percebe-se a inibição da formação de cristais através das reações pozolônicas com a presença de ácido húmico.

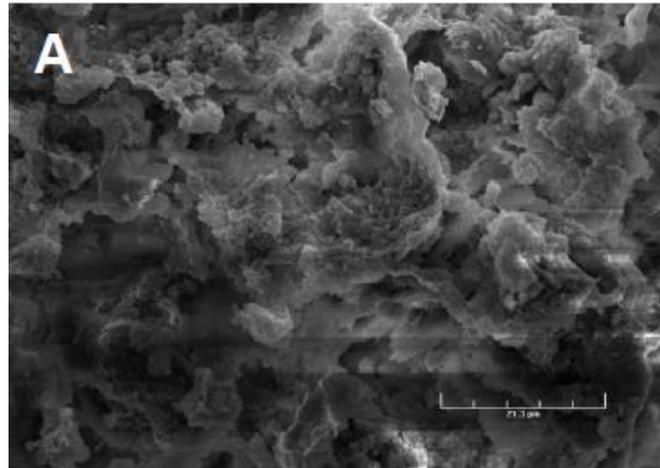


Figura 4.15: foto de microscopia eletrônica do solo composto por areia e bentonita cálcica sem tratamento. (Adaptado de HARRIS ET AL., 2009)

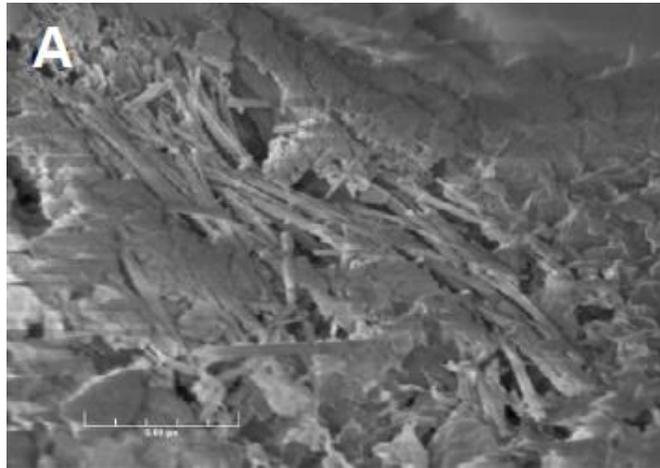


Figura 4.16: foto de microscopia eletrônica do solo composto por areia e bentonita cálcica tratado com cal e sem a presença de ácido húmico. (Adaptado de HARRIS ET AL., 2009)

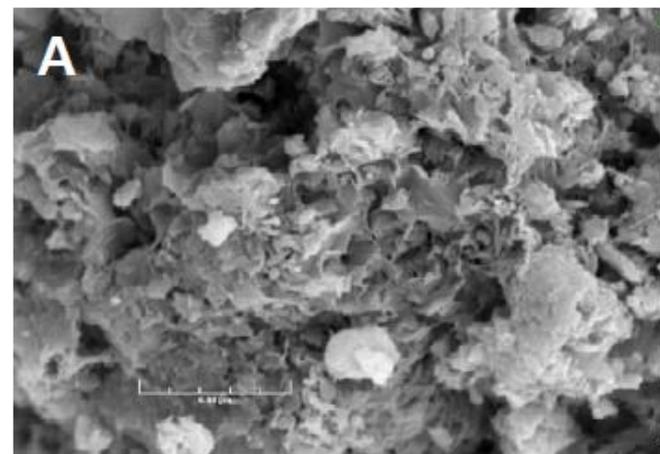


Figura 4.17: foto de microscopia eletrônica do solo composto por areia e bentonita cálcica tratado com cal e com a presença de ácido húmico. (Adaptado de HARRIS ET AL., 2009)

Harris et al. (2009) ainda citam que o método proposto por Eades e Grim (1966) para a determinação da quantidade mínima de cal necessária para ocorrerem às reações pozolânicas não se aplica a solos com a presença de ácido húmico, uma vez que esta quantidade mínima para as reações pozolânicas ocorrerem não varia conforme a adição de ácido húmico, sendo que a resistência obtida varia.

Thomé (1994), em seu estudo focado no melhoramento de um solo semelhante com a utilização de cal, chegou à conclusão que o método de Eades e Grim (1966) também não é aplicável a ele, não tendo ocorrido com o mínimo teor de cal reações de cimentação.

Bujang et al. (2005) avaliaram o ganho de resistência de diferentes solos orgânicos com a adição de agentes cimentantes. A Figura 4.18 mostra o ganho de resistência para diferentes quantidades de cimento adicionado em materiais com diferentes quantidades de matéria orgânica e diferentes graus de humificação para um período de cura de 28 dias.

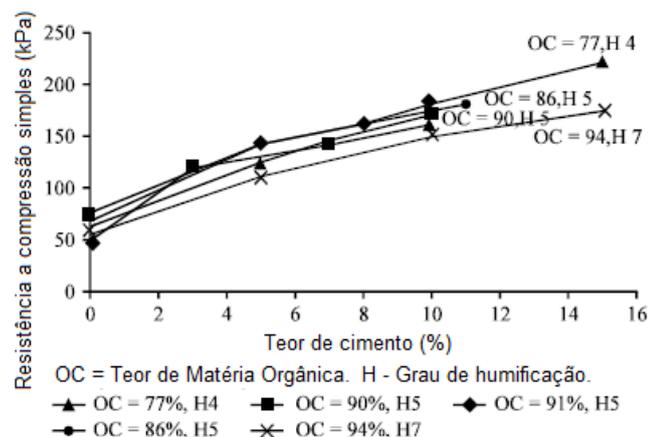


Figura 4.18: ganho de resistência com cimento em função da quantidade de matéria orgânica de Bujang. (Adaptado de BUJANG ET AL., 2005)

Como citam os autores, com cimento, é possível obter um melhoramento das propriedades destes solos, porém se comparados com a mesma quantidade de cimento adicionados a outros solos, sem matéria orgânica, como mostrado na Figura 4.19, este ganho é muito baixo.

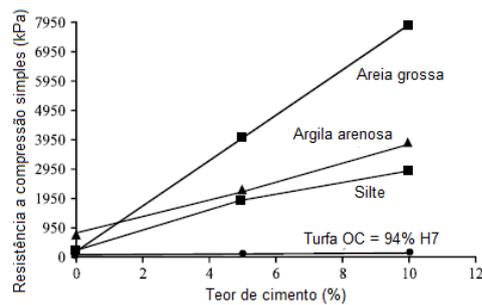


Figura 4.19: comparação do ganho de resistência com cimento entre solos orgânicos e outros solos de Bujang. (Adaptado de BUJANG ET AL., 2005)

Os autores também falam sobre o ganho de resistência de diferentes solos orgânicos misturados com diferentes teores de cal hidratada para 28 dias de cura, mencionando que o melhoramento com esta cal é possível, como mostram os resultados na Figura 4.20.

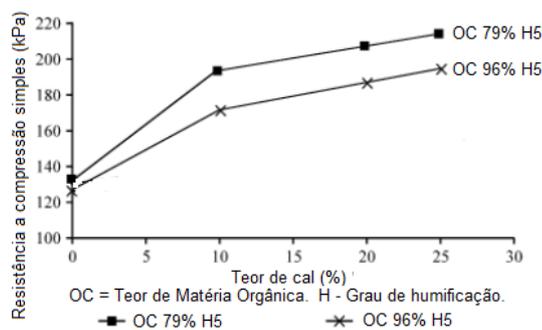


Figura 4.20: ganho de resistência com cal hidratada em função da quantidade de matéria orgânica de Bujang. (Adaptado de BUJANG ET AL., 2005)

Para comparar o ganho de resistência destes materiais com solos inorgânicos, os autores executaram os mesmos ensaios para uma argila e uma areia argilosa. Esta comparação é mostrada na Figura 4.21, mostrando que o ganho de resistência para os solos orgânicos é muito menor.

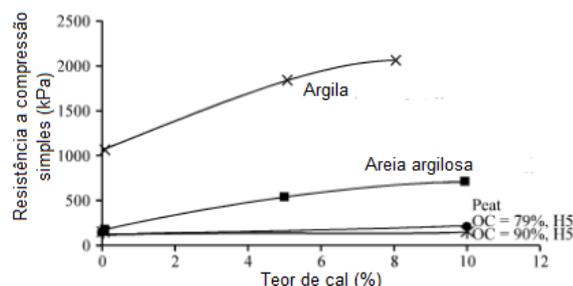


Figura 4.21: comparação do ganho de resistência com cal hidratada entre solos orgânicos e outros solos de Bujang. (Adaptado de BUJANG ET AL., 2005)

Andersson et al. (2000), utilizaram três tipos diferentes de agente cimentante em um solo orgânico com a finalidade de avaliar o melhoramento proporcionado ao material original com esta mistura. O agente cimentante CM1 foi constituído por cimento de alta resistência inicial e escória de alto forno, o agente cimentante CM2 de cimento e escória de alto forno e o agente cimentante CM3 de cimento de alta resistência inicial e cal. Todas as misturas de agentes foram na proporção 1:1. Para todas as hipóteses foram adicionados 100 kg/m³ de solo destes agentes. Foi avaliada a temperatura de cura.

Os autores concluíram que o melhoramento do solo estudado com estas misturas é possível e citam que as misturas CM1 e CM2 se mostraram mais eficientes. A Figura 4.22 mostra a resistência à compressão simples das misturas obtidas com relação à temperatura de cura, para 100 kg/m³ de agente cimentante inserido e tempo de cura de 14 dias.

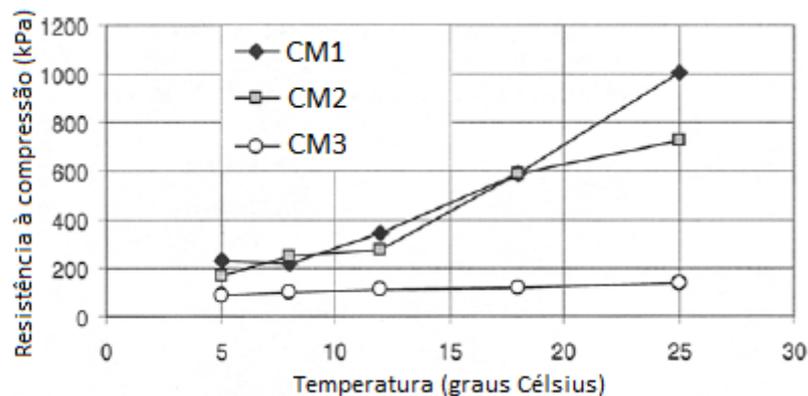


Figura 4.22: resistência a compressão simples em relação a temperatura de cura para 14 dias de Andersson. (Adaptado de ANDERSSON ET AL., 2000)

Ahmed et al. (2012), avaliaram a utilização de gesso reciclado juntamente com cal para o melhoramento de um solo mole orgânico. Obtiveram resultados expressivos, principalmente para curtos períodos de cura. Os resultados de resistência não foram comparados com resultados do mesmo solo, nas mesmas condições com somente cal nas mesmas proporções adicionadas.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo visa primeiramente fornecer as características do solo utilizado na pesquisa, onde foi obtido, como foi coletado, procedimentos realizados para sua caracterização e homogeneização, além de suas propriedades físicas e químicas. Posteriormente os agentes cimentantes utilizados são apresentados, mostrando-se suas propriedades e características. As características dos materiais utilizados com a finalidade de otimizar as reações, as escórias e os gessos, são descritos na continuidade do capítulo.

Ao final, é apresentado o plano experimental utilizado, com todas as misturas que foram executadas, como e por que elas foram utilizadas e o ensaio usado para mensurar os ganhos de resistência.

5.1 MATERIAS

5.1.1 O solo

O solo estudado foi retirado de uma espessa camada de argila mole orgânica encontrada no município de Nova Santa Rita, RS. Para evitar a presença de raízes e outros materiais recentemente depositados, com a utilização de uma retroescavadeira, foi executada uma escavação de aproximadamente três metros de profundidade e desta cota que o material foi retirado. Com a finalidade de não se ter uma perda excessiva de água, logo após ser coletado, o solo foi colocado em recipientes fechados e transportado até o laboratório. Nas amostras o teor de umidade natural varia entre 85% a 100%. O peso específico real dos grãos foi medido através de picnometria e o resultado obtido foi de $25,54 \text{ kN/m}^3$, que é um valor condizente com solos orgânicos. A Figura 5.1 ilustra o local de extração deste material.

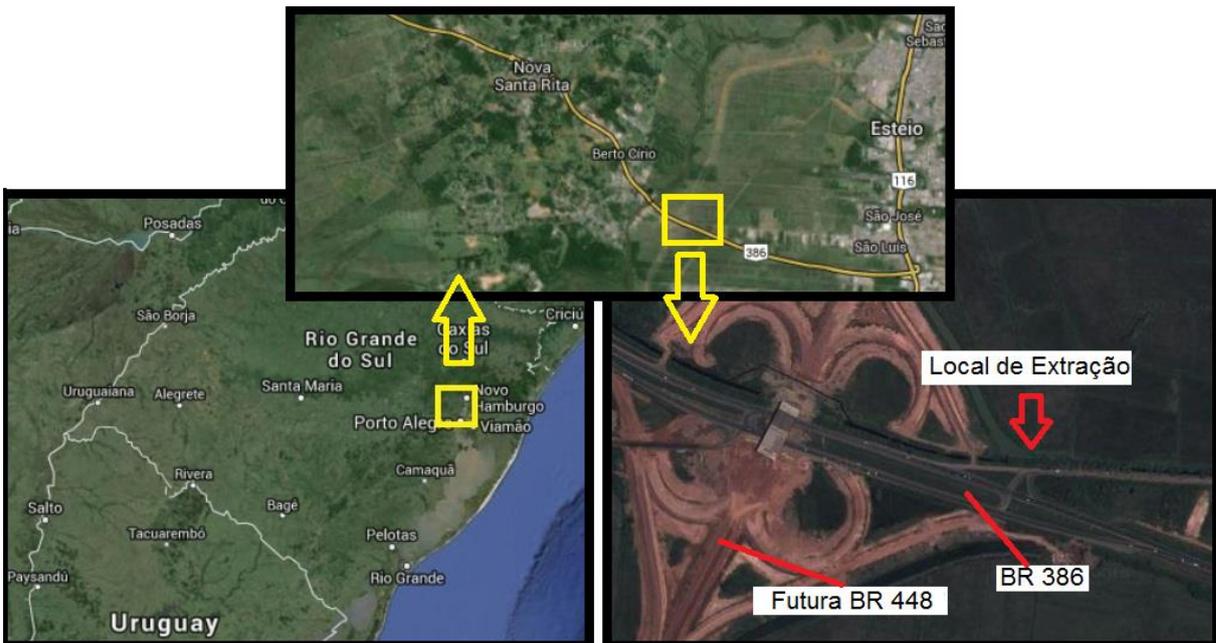


Figura 5.1: local de extração do solo. (Elaborada pelo autor)

A Figura 5.2 mostra os resultados de uma sondagem à percussão executada nas proximidades do local de extração, onde se observa uma camada de solo mole, com NSPT variando de 2 a 4 golpes, na cota onde o material foi extraído.

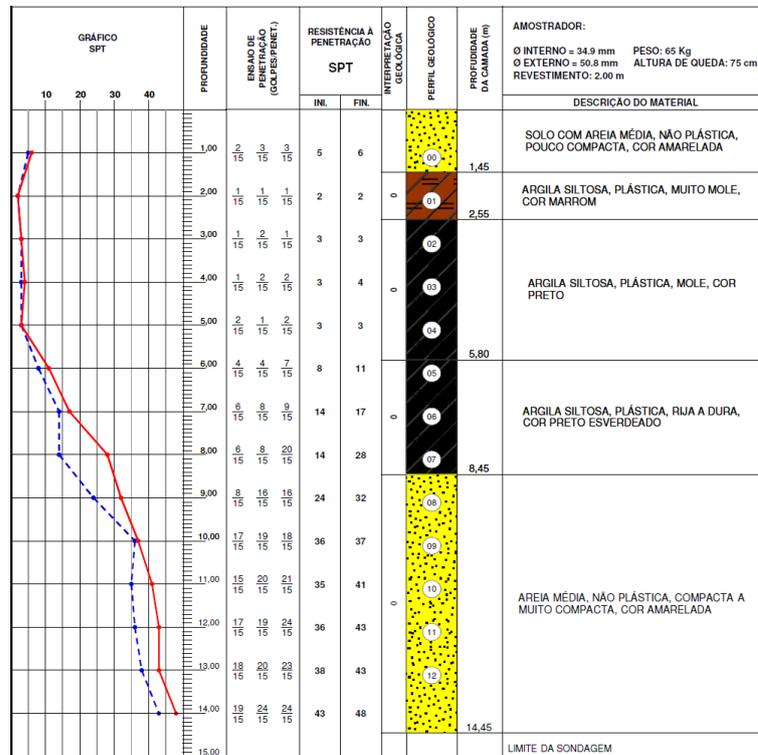


Figura 5.2: sondagem a percussão do local de extração.

Com o objetivo de minorar os efeitos da heterogeneidade do material, característico de depósitos naturais, toda a quantidade necessária para o estudo foi homogeneizada em uma grande betoneira até ser obtida uma massa de solo uniforme, sendo este armazenado em um único recipiente vedado, com um volume total de aproximadamente quatrocentos litros. A aparência do solo homogeneizado é mostrada na Figura 5.3.



Figura 5.3: aparência do solo homogeneizado. (Elaborada pelo autor)

Posteriormente foram retiradas seis pequenas amostras da mistura e realizados três ensaios de teor de umidade com temperatura máxima de 60 graus Célsius, constatando que a mistura estava com um teor de umidade homogêneo de 110% e de três de granulometria a laser utilizando um equipamento CILAS 1180, onde as curvas granulométricas mostram a homogeneidade do material. Para a determinação da quantidade de matéria orgânica foram feitos ensaios de perda ao fogo como descrito na NBR 13600 (ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 1996); esta perda representou, em massa, 11,3% do solo seco. A Figura 5.4 mostra os resultados dos ensaios de granulometria, indicando uma granulometria predominantemente siltosa.

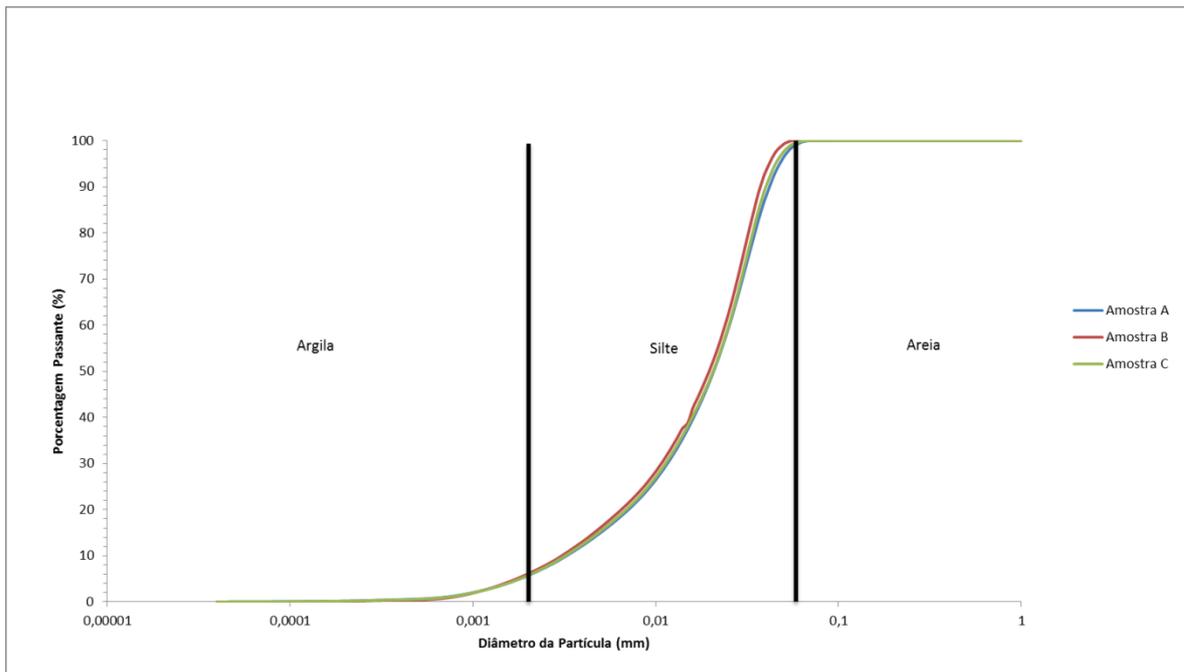


Figura 5.4: curva granulométrica do solo utilizado. (Elaborada pelo autor)

Os limites de Atterberg foram obtidos conforme as normas NBR 6459 (ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 1984a) e a NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 1984b). O limite de liquidez obtido foi de 58%, o limite de plasticidade de 35%, resultando em um índice de plasticidade de 23%.

A mineralogia do solo foi determinada através de um difratograma de Raio. A Figura 5.5 mostra os principais picos de minerais em estado cristalino encontrados na amostra.

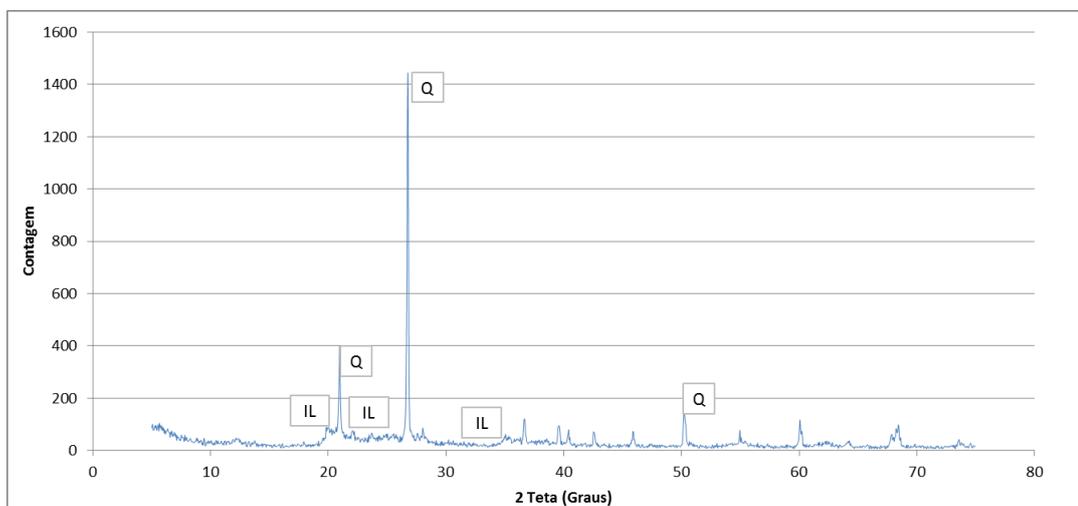


Figura 5.5: difratograma de Raio X do solo. (Elaborada pelo autor)

Não foi executado nenhum ensaio quantitativo para a determinação da porção de cada mineral que o solo possui. Os principais minerais em estado cristalino identificados foram o quartzo representado no gráfico com a letra Q com os picos $2\theta = 26,775$ (3,33 Å), $2\theta = 20,975$ (4,23 Å) e $2\theta = 50,225$ (1,81 Å) e a illita que é representada no gráfico pela sigla IL com os picos $2\theta = 20,025$ (4,43 Å), $2\theta = 35,075$ (2,56 Å) e $2\theta = 24,275$ (3,66 Å). Os outros picos pronunciados constaram como quartzo ou alumino-silicatos.

Para a determinação da quantidade dos componentes químicos na fração orgânica do solo foi realizada uma análise elementar, conforme norma ASTM D5373-02 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007). A Tabela 5.1 mostra a quantidade de cada um dos componentes orgânicos do solo sendo que a quantidade de oxigênio não foi determinada.

Tabela 5.1: resultado da análise elementar.

Elemento	N2	C	H2	S
Porcentagem em massa	0,09	1,35	1,34	0,52

(Elaborada pelo autor)

A relação C/N, que é chamada de grau de humificação, resultou em 15, que segundo Dick et al. (2009) é representativo de materiais húmicos cujo valor situa-se entre 10 e 22. A relação H/C, que segundo o mesmo autor dá uma ideia do formato das cadeias carbônicas, resultou em aproximadamente 1, o que mostra que o material é proporcionalmente alifático e aromático.

Com a finalidade de se obter as quantidades de cada uma das frações da parte orgânica do solo, foi executado seu fracionamento, (o processo utilizado é mostrado nos próximos parágrafos).

Primeiramente o solo foi seco a uma temperatura controlada para não haver a perda de matéria orgânica. Com ele seco destorroado, foi separada uma massa determinada e colocada em um recipiente. Para a separação da parte orgânica não húmica do solo, foi utilizada uma solução de 0,5 mol/L de HCl. Com esta solução, a mistura solo mais a solução, foram agitadas durante três horas e posteriormente centrifugadas por seis minutos a 2500 rpm. Foi separado o sobrenadante em um recipiente. Repetiu-se a operação até o sobrenadante sair claro e sem partículas em suspensão. Mediu-se o volume de líquido gerado pela coleta do sobrenadante.

Para a separação da parte húmica solúvel, foi executado um processo similar ao anteriormente citado, porém, com uma solução de 0,5 mol/L de NaOH. Com o sobrenadante retirado, foi medido o volume deste. O sobrenadante contém os ácidos húmicos e fúlvicos que estavam presentes no solo.

Para a separação dos ácidos húmicos e fúlvicos, foi novamente adicionada uma solução de 0,5 mol/L de HCl. O ácido foi adicionado até a mistura ter um pH menor do que 2. A seguir, deixou-se o líquido precipitar por 24 horas. No sobrenadante ficou concentrado o ácido fúlvico e no precipitado o ácido húmico. Separou-se o sobrenadante e foi medido o seu volume.

Mediu-se a concentração de carbono em cada um destes sobrenadantes através de cromatografia, obtendo-se assim uma relação da quantidade de carbono encontrada em certa massa de sólido em cada fração húmica. A concentração de carbono em substâncias não húmicas foi obtida a partir da primeira separação. A concentração de carbono em ácido fúlvico foi obtida a com a terceira separação. Já a concentração de ácido húmico foi obtida comparando-se a concentração da segunda separação com a terceira separação. Tendo-se a concentração de carbono total, obtida através de uma análise elementar e diminuindo desta as concentrações obtidas no fracionamento, foi obtida a concentração de carbono na humina.

A quantidade de cada fração obtida é mostrada na Tabela 5.2. E com as informações constantes na Tabela 2.2, anteriormente citada, obtêm-se aproximadamente a quantidade de cada uma destas frações no solo.

Tabela 5.2: quantidade aproximada das frações húmicas do solo.

Fração	Ac. Fúlvico	Ac. Húmico	Húmina
Concentração no solo seco (mg/g)	2,03	11,16	11,40
Porcentagem em relação ao solo seco (%)	0,20	1,12	1,24

(Elaborada pelo autor)

5.1.2 Agentes cimentantes

Os agentes cimentantes utilizados para a pesquisa foram a cal viva e o cimento ARI. Para evitar alguma diferença nos resultados devido a variação destes materiais, todas as amostras foram moldadas com produtos do mesmo lote. As propriedades obtidas de cada um destes são expostas a seguir.

5.1.2.1 Cal viva

A cal viva utilizada foi a da marca Santa Massa, adquirida no comércio de Porto Alegre – RS em Novembro de 2012. Consiste em uma cal dolomítica extraída no Município de Almirante Tamandaré no Estado do Paraná. Segundo laudo emitido pelo fabricante esta cal é composta por 53,70% de óxido de cálcio e 38,6% de óxido de magnésio, além de outros componentes em menor quantidade.

Para definir o peso específico real dos grãos desta cal, foi utilizada picnometria com gás hélio, devido ao fato de que na picnometria convencional é utilizada água destilada, o que acabaria ocasionando a hidratação da cal e conseqüentemente mudanças nesta propriedade. O peso específico real dos grãos obtido foi de 26,50 kN/m³.

A curva granulométrica do material foi obtida através de granulometria a laser utilizando um equipamento CILAS 1180 e é mostrada na Figura 5.6.

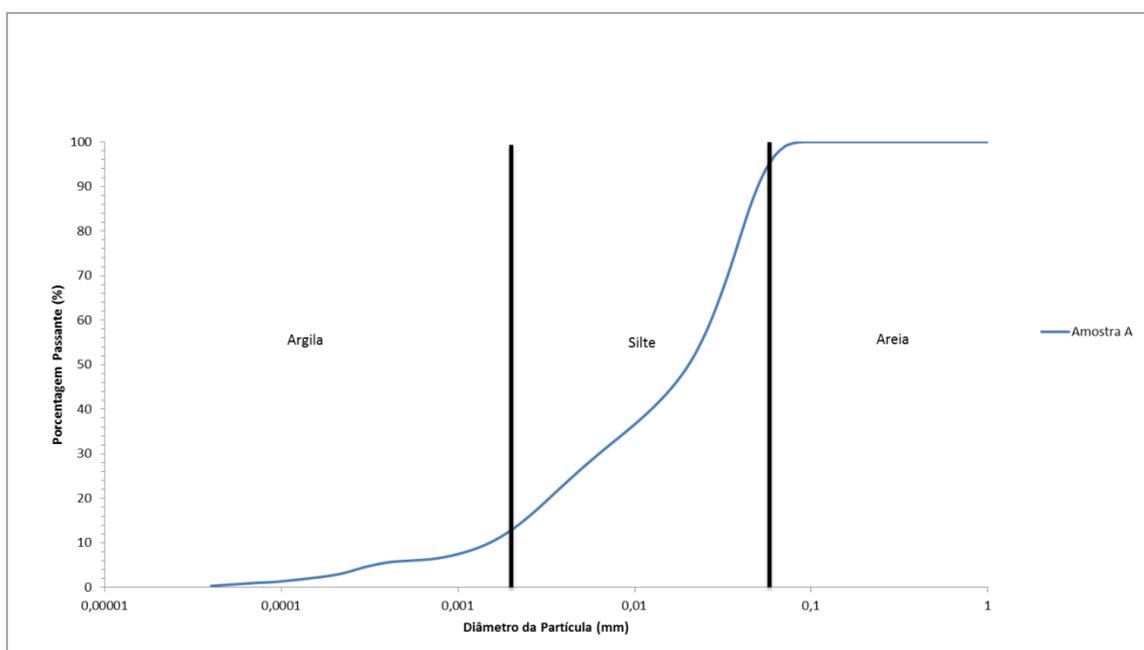


Figura 5.6: curva granulométrica da cal viva. (Elaborada pelo autor)

5.1.2.2 Cimento ARI

O cimento utilizado foi um cimento de alta resistência inicial (CP-V) da marca Votorantim, adquirido no comércio de Canoas-RS em Janeiro de 2013. Segundo laudo do fabricante a concentração mínima de silicatos de cálcio é de 80%. (Não foram obtidos dados de onde este material foi produzido).

O peso específico real dos grãos obtido através de picnometria com gás hélio foi de 31,70 kN/m³. A curva granulométrica do material foi obtida através de granulometria a laser utilizando um equipamento CILAS 1180 e é mostrada na Figura 5.7.

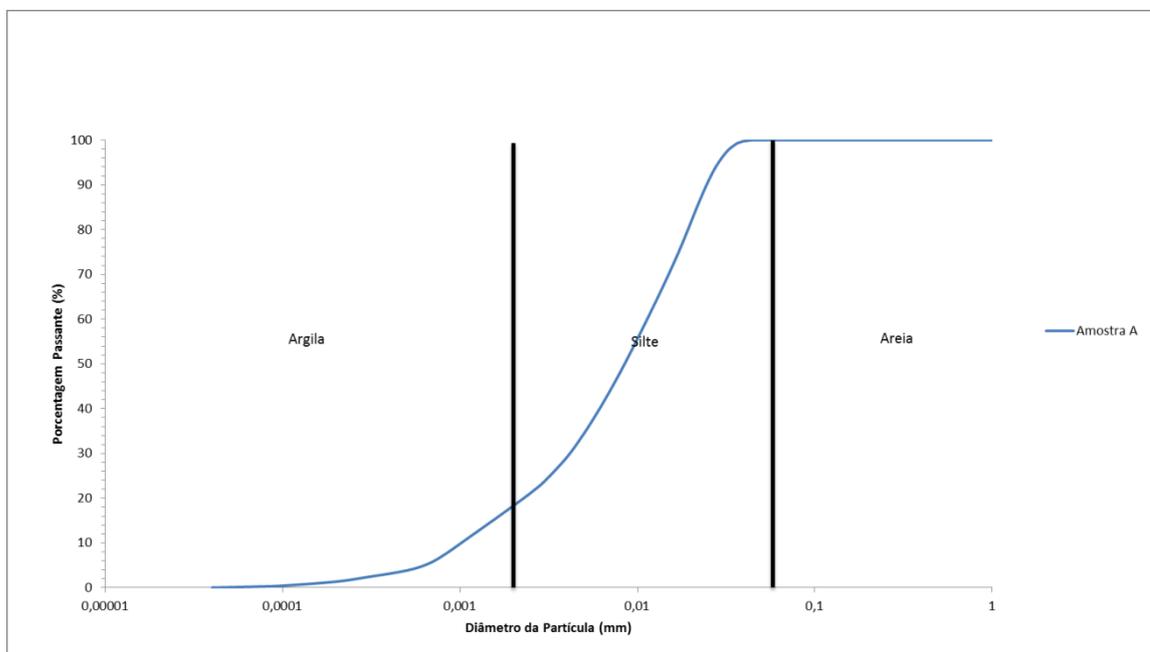


Figura 5.7: curva granulométrica do cimento CPV. (Elaborada pelo autor)

5.1.3 Outros materiais adicionados à mistura

5.1.3.1 Escória de aciaria

A escória de aciaria é um resíduo formado em uma unidade da empresa siderúrgica Gerdau localizada no município de Charqueadas - RS. Gerada nos fornos de arco elétrico. A grande quantidade produzida diariamente é britada e é vendida para diversas finalidades, como para agregado graúdo de concreto e pavimentação de vias não urbanas. É composta essencialmente de óxidos de cálcio, ferro, silício, magnésio, manganês, alumínio, fósforo e enxofre. Para a inserção deste na mistura o material britado foi moído em um moinho de bolas.

O peso específico real dos grãos é 34,00 kN/m³.

A curva granulométrica do material moído foi obtida através de granulometria a laser utilizando um equipamento CILAS 1180 é mostrada na Figura 5.8.

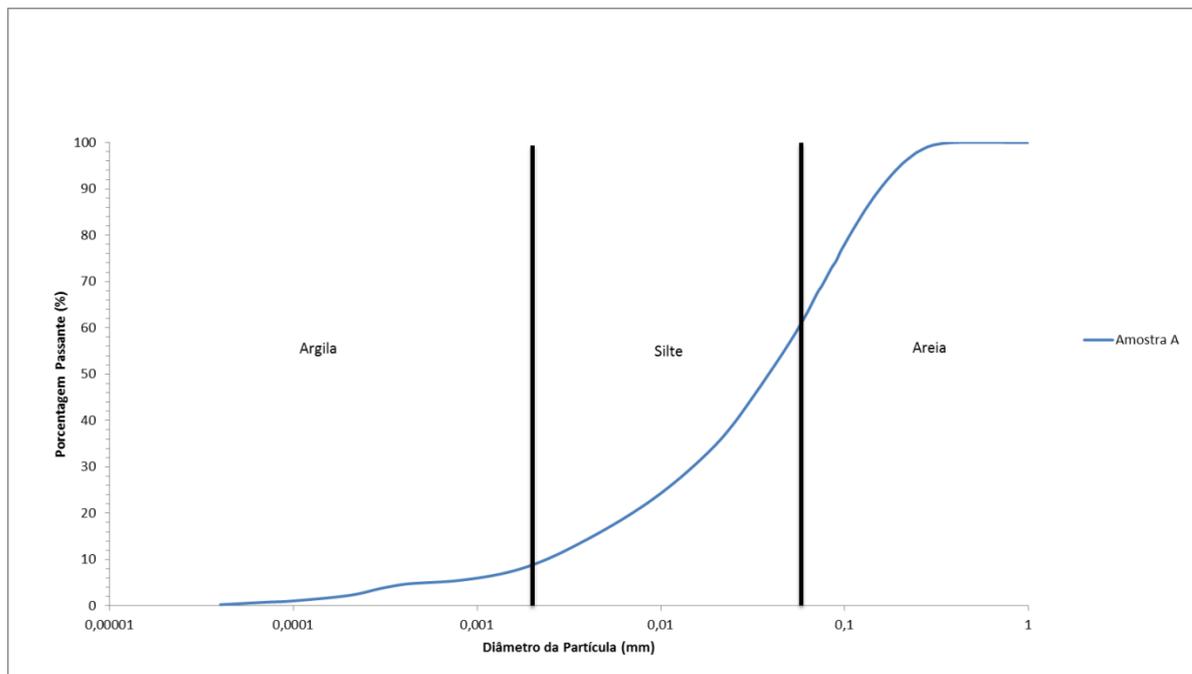


Figura 5.8: curva granulométrica a escória de aciaria. (Elaborada pelo autor)

5.1.3.2 Escória de forno panela

A escória de forno panela é um resíduo formado em uma unidade da empresa Gerdau localizada no município de Charqueadas no Rio Grande do Sul. Gerada em fornos do tipo panela. Todo este material produzido é depositado em aterros sanitários devido a algumas propriedades indesejadas, como a expansibilidade. Os componentes químicos deste material são semelhantes aos da escória de aciaria. Para a inserção deste na mistura o material foi moído em um moinho de bolas.

O peso específico real dos grãos é 33,50 kN/m³.

A curva granulométrica do material moído foi obtida através de granulometria a laser utilizando um equipamento CILAS 1180 e é mostrada na Figura 5.9.

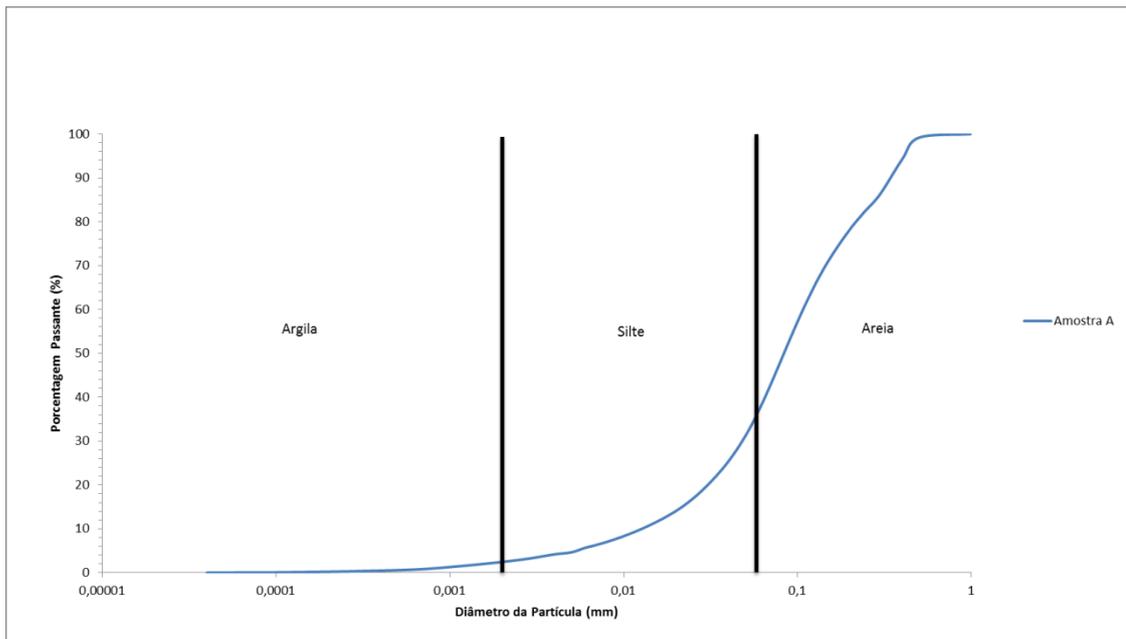


Figura 5.9: curva granulométrica da escória de forno panela. (Elaborada pelo autor)

5.1.3.3 Gesso

O gesso utilizado no experimento foi da marca Santa Massa, comprado no comércio de Porto Alegre. Os ensaios de caracterização realizados foram os de peso específico real dos grãos e o de granulometria a laser. O peso específico real dos grãos encontrado foi de $27,90 \text{ kN/m}^3$ e a curva granulométrica é mostrada na Figura 5.10.

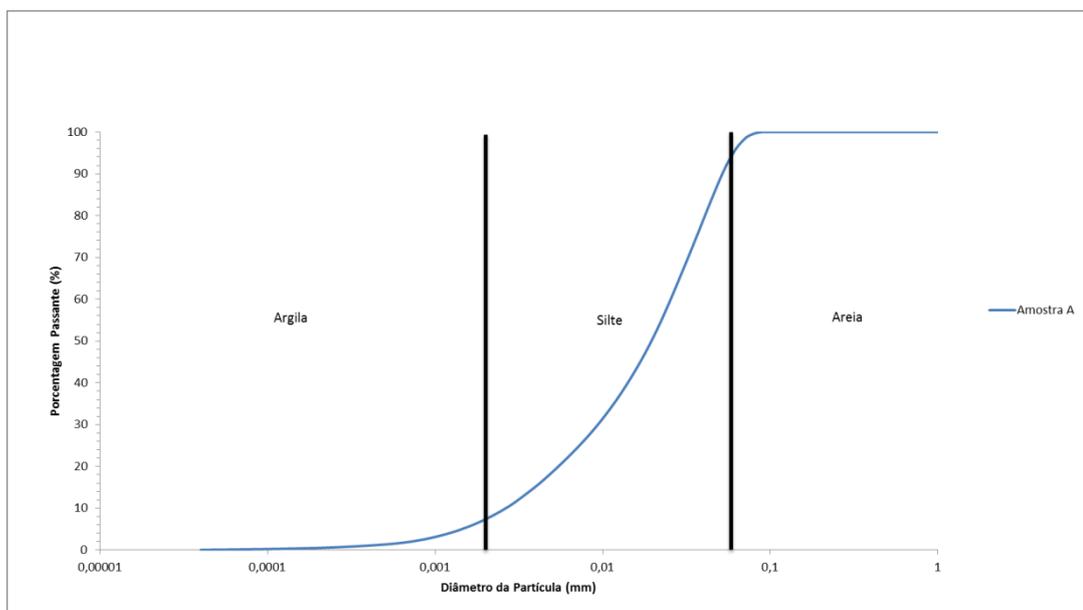


Figura 5.10: curva granulométrica do gesso. (Elaborada pelo autor)

5.1.3.4 Fosfogesso

Este material é um resíduo gerado na produção de um adubo químico conhecido como fosfato de amônio. Devido ao alto grau de impurezas, inclusive alguns minerais expansivos, não é utilizado como gesso. Foi utilizado no trabalho com duas temperaturas de secagem distintas, uma a 60 graus Célsius e outra a 150 graus Célsius. Os ensaios de caracterização feitos neste material foram os de peso específico real dos grãos e de granulometria a laser. O peso específico real dos grãos obtido foi de 28,20 kN/m³ e a curva granulométrica do material destorroado é mostrada na Figura 5.11.

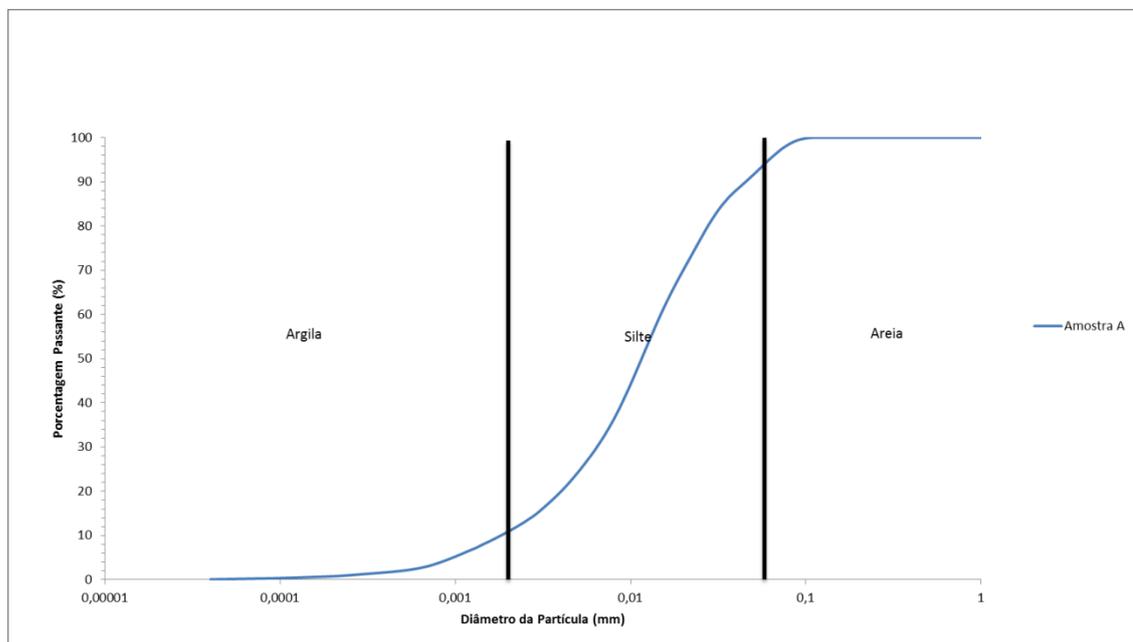


Figura 5.11: curva granulométrica do fosfo gesso. (Elaborada pelo autor)

5.2 METODOLOGIA

Neste item são abordados o programa experimental, os processos de mistura e moldagem dos corpos de prova, as condições de cura e os ensaios de ruptura.

5.2.1 Programa experimental

Para garantir confiabilidade nos resultados, cada uma das misturas foi executada separadamente com três corpos de prova para cada mistura. Foram definidos três teores de umidade para avaliação ganho de resistência: 125, 150 e 175%, teores escolhidos devido à trabalhabilidade do material nestas condições e por esses valores se assemelharem às

condições reais em que solos orgânicos são encontrados na natureza. No total foram executados 420 corpos de prova. O tempo de cura selecionado foi sempre de 28 dias.

5.2.1.1 Avaliação do ganho de resistência com o uso dos agentes cimentantes

Para cada mistura foram utilizados dois agentes cimentantes, a cal viva e cimento de alta resistência inicial (CP-V). Para dosagem, o limite superior foi o máximo usualmente determinado em campo para materiais muito moles, de duzentos e cinquenta quilogramas de adição em um metro cúbico de solo natural. Foram adicionadas ao solo as quantidades de 50, 100, 150, 200 e 250 kg/m³ de agente cimentante, condizente com as quantidades encontradas na literatura. No experimento foram utilizadas dosagens em massa por volume, devido a ser esta a metodologia utilizada pela maioria dos autores de estudos com solos orgânicos e possibilitada devido ao material estar saturado.

5.2.1.2 Avaliação da adição de outros materiais na mistura

A influência da adição de outros materiais foi analisada utilizando sempre a mesma quantidade destes materiais e de agentes cimentantes, totalizando as quantidades de 100 e 200 kg/m³ de mistura cimentante no solo, ou seja, 50kg/m³ de agente cimentante mais 50kg/m³ de outros materiais e 100kg/m³ de agente cimentante mais 100kg/m³ de outros materiais.

5.2.1.3 Avaliação da temperatura de cura

Para analisar o efeito a temperatura de cura foram utilizadas duas temperaturas diferentes durante o processo, 20 e 50 graus Célsius. O efeito da temperatura foi somente analisado para as misturas com os agentes cimentantes.

5.2.2 Processos de mistura

A quantidade de solo necessária para a execução de cada análise era separada dois dias antes da mistura, era medido seu teor de umidade e ela era homogeneizada mecanicamente em um recipiente. Posteriormente, para o solo se encontrar em diferentes teores de umidade, o volume era separado em três partes e a quantidade de água para que este teor de umidade fosse alcançado era adicionada e cada mistura homogeneizada. Para cada situação foi tomado um volume de controle de 1 litro de solo no teor de umidade requerido e neste foi adicionada a massa de agente ou mistura cimentante para chegar ao equivalente a quantidade necessitada

em kg/m^3 . A mistura foi homogeneizada úmida, mecanicamente e imediatamente moldada em tubos de PVC.

5.2.3 Processos de moldagem

Devido à dificuldade de moldagem de materiais argilosos com altos teores de umidade, a moldagem dos corpos de prova foi feita em moldes de PVC cilíndricos de 50mm dividido em duas peças, uma de 10 e outra de 5 centímetros de altura unidas por uma fita adesiva e tampadas no fundo também através de fita adesiva. A divisão em duas partes do molde foi pensada com a finalidade de eliminar algum tipo de contaminação do corpo de prova. Após o período de cura a parte superior (5 cm) era serrada e o corpo de prova dentro dela descartado. O corpo de prova restante na peça de 10 cm após o fundo de fita adesiva ser removida era extrudado. A Figura 5.12 mostra alguns moldes utilizados para a elaboração dos corpos de prova.



Figura 5.12: molde utilizado. (Elaborada pelo autor)

A aparência final do corpo de prova, após cortado e retirado do molde é mostrada na Figura 5.13.



Figura 5.13: aparência do corpo de prova. (Elaborada pelo autor)

5.2.4 Processo de cura

O processo de cura foi totalmente executado com os corpos de prova completamente submersos para evitar algum efeito de sucção ou falta de água para a hidratação. A temperatura ambiente foi controlada em 20 graus Célsius, com exceção dos corpos de prova curados a temperatura de 50 graus Célsius. Para a cura sob temperatura foi elaborado um banho-maria utilizando um tonel de 200 litros, uma resistência de 2000W, 220V e um termostato a óleo. Este sistema pode manter a temperatura da água entre 20 e 120 graus Célsius, com uma precisão de 2 graus Célsius para mais ou para menos. A Figura 5.14 mostra alguns corpos de prova sendo curados neste sistema.



Figura 5.14: cura dos corpos de prova com temperatura controlada. (Elaborada pelo autor)

5.2.5 Ensaios de ruptura

Para minimizar alguma interferência nos resultados dos ensaios de ruptura para análise do ganho de resistência, devido a efeitos de borda ou algum vazio dentro do corpo de prova, o ensaio escolhido foi o de tração por compressão diametral. Ensaio este definido na norma NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). A Figura 5.15 mostra esquematicamente o ensaio.

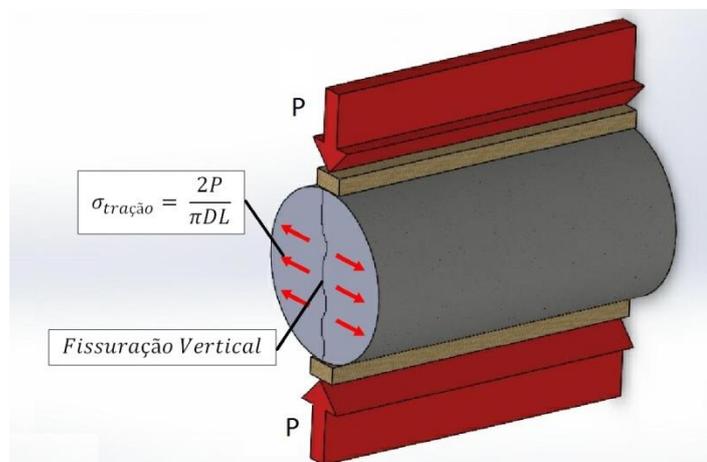


Figura 5.15: resistência à tração por compressão diametral. (Elaborada pelo autor)

A prensa utilizada possui velocidade controlada. As medidas de resistência foram feitas com um anel dinamométrico com capacidade para 10kN. A Figura 5.16 mostra os equipamentos utilizados para a ruptura.



Figura 5.16: prensa utilizada nos ensaios de ruptura. (Elaborada pelo autor)

Os corpos de prova cuja ruptura fugisse do padrão, devido a não romper longitudinalmente ou estar com um comprimento inadequado em relação aos demais foram descartados. A Figura 5.17 mostra uma série de corpos de prova rompidos.



Figura 5.17: corpos de prova rompidos.
(Elaborada pelo autor)

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos através do programa experimental são descritos e discutidos neste capítulo.

6.1 UTILIZAÇÃO DO CIMENTO ARI

Os ganhos de resistência deste solo com a utilização de cimento CP-V foram exatamente como se esperava para a mistura. No intervalo de adição de materiais testado, para o tempo e condições de cura utilizados, quanto maior a adição de agente cimentante maior foi à resistência obtida. Este comportamento é similar aos obtidos por Onitsuka et al. (2003) e Bujang et al. (2005) em outros solos orgânicos. A influência da matéria orgânica nas reações não pode ser avaliada, pois para isto seria necessário variar a quantidade desta e observar a variação no ganho de resistência. A Figura 6.1 mostra o ganho de resistência em relação à quantidade de cimento adicionado ao solo, para os diferentes teores de umidade com o tempo de cura de 28 dias.

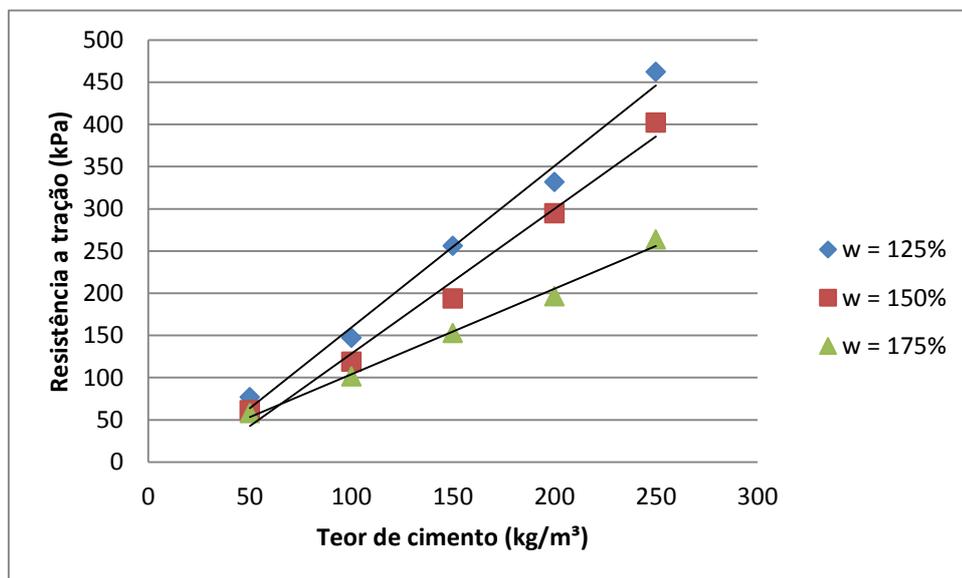


Figura 6.1: resistência à tração x teor de cimento para diferentes teores de umidade. (Elaborada pelo autor)

Quanto maior o teor de umidade inicial menor a resistência obtida com uma mesma dosagem volumétrica de cimento. E quanto menor o teor de umidade inicial, menor será a variação do ganho de resistência para diferentes dosagens volumétricas de cimento adicionadas, ou seja,

um aumento na adição de cimento tem maior efeito no ganho de resistência neste solo com menor índice de vazios inicial. A Figura 6.2 mostra o ganho de resistência em relação ao teor de umidade para as diferentes quantidades de cimento adicionado ao solo aos 28 dias de cura.

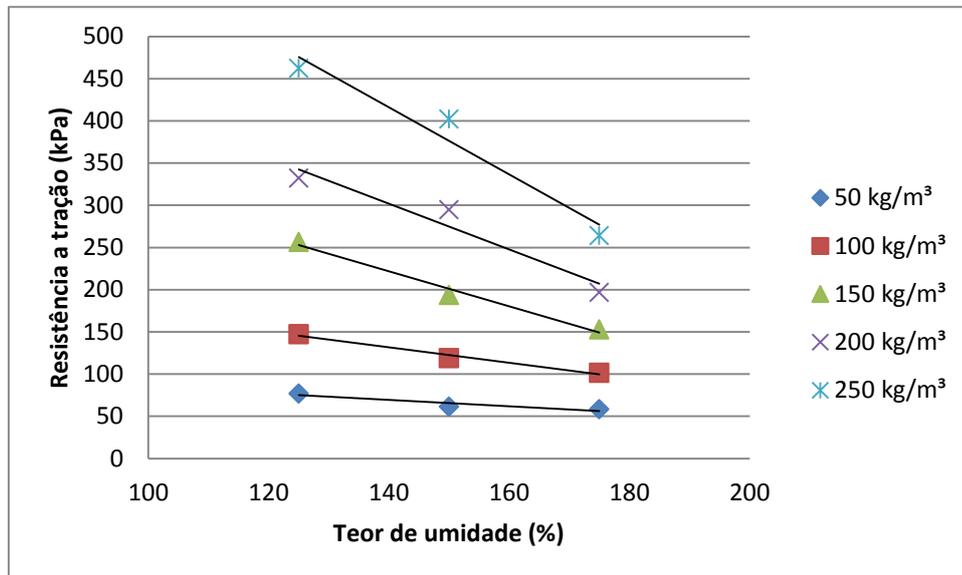


Figura 6.2: resistência à tração x teor de umidade para diferentes quantidades de cimento adicionadas. (Elaborada pelo autor)

Com a adição de cimento CP-V, é possível adaptar uma metodologia de dosagem para o tempo de cura de 28 dias, como utilizado em Foppa (2005) e Consoli et al. (2007), onde a resistência do material artificialmente cimentado é função da porosidade inicial da mistura (solo e agente cimentante) e do teor volumétrico de agente cimentante adicionado (no caso destes trabalhos citados foram utilizados ensaios de compressão simples para a avaliação dos ganhos de resistência). Nesta metodologia de dosagem, para um melhor ajuste da equação obtida, pode ser utilizado um expoente no teor volumétrico de cimento, no caso do presente trabalho, este expoente foi 0,1. A Figura 6.3 mostra o gráfico resistência à tração versus fator porosidade inicial da mistura dividida pelo teor volumétrico de cimento com o expoente de ajuste. No gráfico também se encontra a equação com este comportamento.

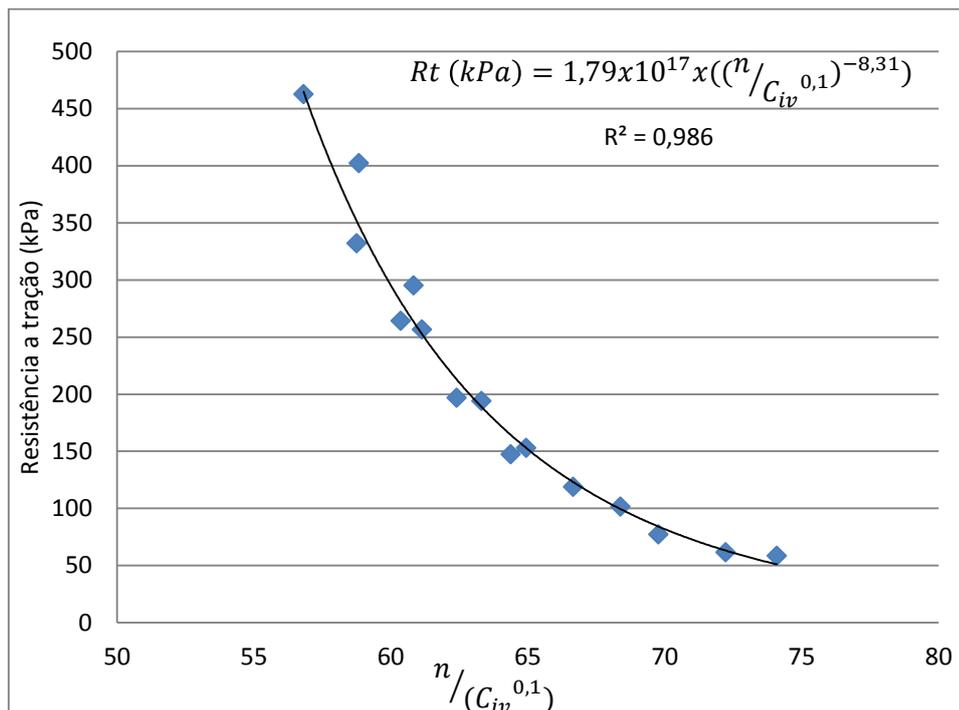


Figura 6.3: resistência à tração x fator porosidade/teor volumétrico de cimento com temperatura de cura de 20 graus Célsius. (Elaborada pelo autor)

6.2 UTILIZAÇÃO DA CAL VIVA

Os ganhos de resistência para este solo com a adição de cal viva crescem conforme aumenta a adição do agente cimentante, até o ponto ótimo. Com a concentração deste agente passando deste ponto ótimo ocorre uma perda de resistência, devido principalmente à quantidade de sílica e alumina no estado amorfo que se encontra disponível no solo. Parte da cal adicionada não gera reação pozolânica devido à falta de elementos químicos para que esta ocorra, para este tempo e estas condições de cura. Este comportamento também foi obtido por Yunus et al. (2011) e Axelsson et al. (2000) para outros solos com matéria orgânica. A influência da matéria orgânica nas reações não pode ser avaliada, pois seria necessário variar a quantidade desta e observar a variação do ganho de resistência. A Figura 6.4 mostra o ganho de resistência em relação à quantidade de cal viva adicionado ao solo para os diferentes teores de umidade aos 28 dias de cura.

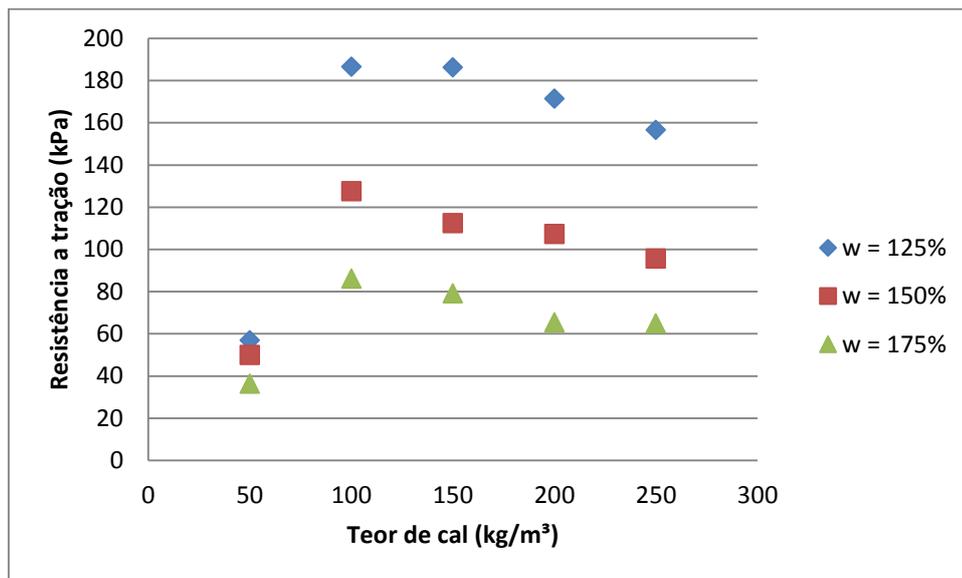


Figura 6.4: Resistência à tração x teor de cal viva para diferentes teores de umidade. (Elaborada pelo autor)

Devido ao grande teor de umidade do solo, estes teores de cal representam porcentagens altas dos sólidos da mistura. A Figura 6.5 mostra o ganho de resistência em relação a porcentagem de cal viva em relação aos sólidos da mistura para os diferentes teores de umidade do solo aos 28 dias de cura, onde pode ser percebido que o teor ótimo de cal viva se encontra em torno de 15 a 20% da massa dos sólidos da mistura. Para os maiores teores adicionados, a massa de cal chega a passar da metade da massa de solo seco.

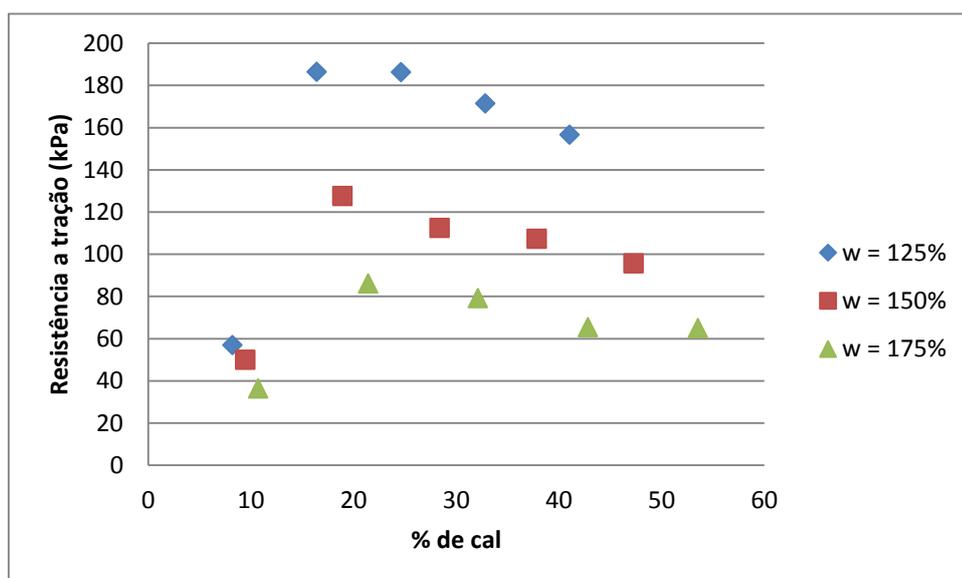


Figura 6.5: Resistência à tração x porcentagem de cal viva para diferentes teores de umidade. (Elaborada pelo autor)

A Figura 6.6 mostra o ganho de resistência em relação ao teor de umidade para as diferentes quantidades de cal viva adicionada ao solo, sendo observado novamente que após a dosagem ótima de cal com a adição de mais agente cimentante ocorre a perda de resistência aos 28 dias de cura, e também, quanto menor o teor de umidade inicial maior a diferença do ganho de resistência para diferentes teores volumétricos de cal adicionados.

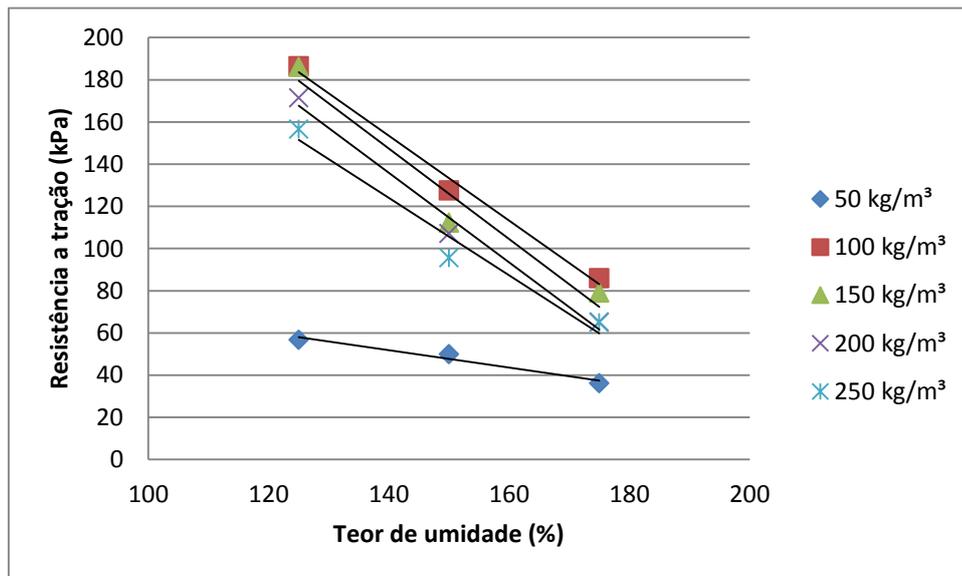


Figura 6.6 Resistência à tração x teor de umidade para diversos teores de cal viva. (Elaborada pelo autor)

6.3 OUTROS MATERIAS UTILIZADOS

6.3.1 Com cimento

As escórias utilizadas no experimento, quando adicionadas ao solo juntamente com cimento, não proporcionaram ganhos de resistência se comparados com somente a mesma quantidade de cimento adicionada, ou seja, 100 kg/m³ de escória mais 100 kg/m³ de cimento adicionados ao solo geram para estas condições e período de cura a mesma resistência que somente 100 kg/m³ de cimento adicionado ao mesmo solo. Não foram encontrados na literatura estudos sobre a utilização destas escórias no melhoramento de solos moles orgânicos, somente sobre escória de alto forno, que não foi utilizada neste trabalho.

A Figura 6.7 mostra os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para os corpos de prova curados a 20 graus Célsius por 28 dias.

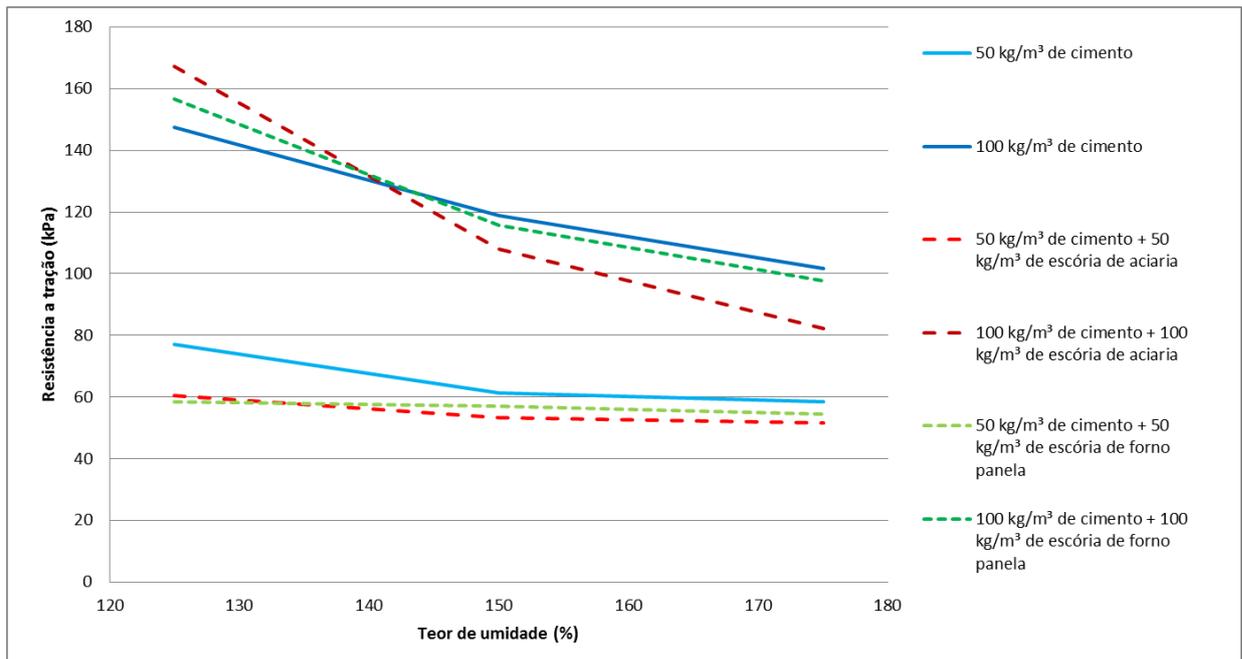


Figura 6.7: análise da resistência à tração da adição de misturas das escórias com cimento. (Elaborada pelo autor)

O gesso quando adicionado ao solo juntamente com cimento proporcionou um ganho de resistência considerável as amostras, para este tempo e condições de cura, principalmente para as maiores dosagens. O fosfogesso não apresentou o mesmo desempenho, principalmente quando este foi seco a temperatura de 150 graus Célsius, estado em que, ocasionou perda de resistência em relação a somente a mesma quantidade de cimento adicionada, ou seja, 100 kg/m³ de fosfogesso seco a 150 graus Célsius mais 100 kg/m³ de cimento adicionados ao solo geram menos resistência que a adição de 100kg/m³ de cimento no mesmo solo, para as condições de cura estudadas. Axelsson et al. (2009), obteve uma melhora no ganho de resistência com a adição de gesso à mistura solo/cimento em um dos solos orgânicos estudados no seu trabalho, já com o outro, houve uma perda deste ganho de resistência em relação ao ganho obtido com a utilização de somente cimento.

A Figura 6.8 mostra os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para os corpos de prova curados a 20 graus Célsius por 28 dias.

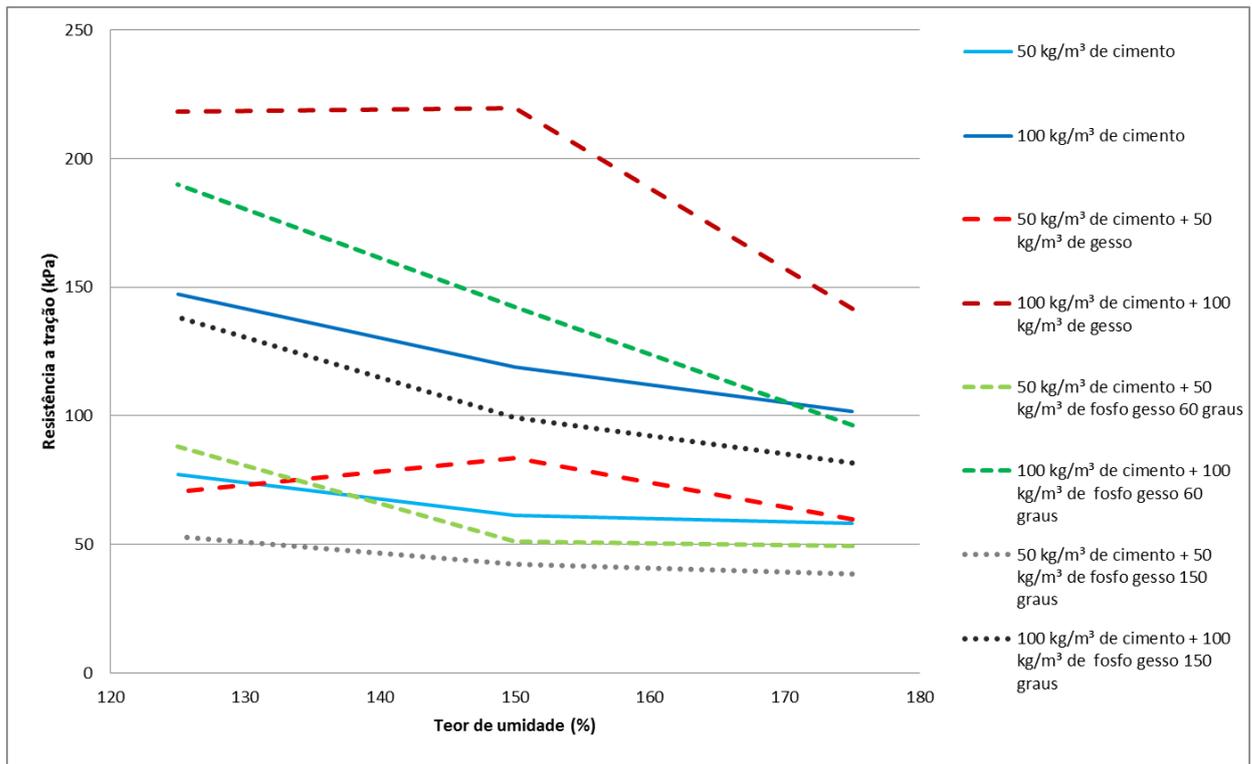


Figura 6.8: análise da resistência à tração da adição de gesso e fosfogesso com cimento. (Elaborada pelo autor)

6.3.2 Com cal viva

Nenhum material dos que foram adicionados juntamente com a cal teve desempenho satisfatório. Em praticamente todos os casos, a resistência obtida com a mistura de algum outro material foi inferior a resistência obtida com a mistura da quantidade somente de cal que foi adicionada e o solo. Não foram encontrados na literatura dados sobre o uso das escórias utilizadas, juntamente com cal, em solos orgânicos, com o intuito de melhorar a sua resistência.

A Figura 6.9 mostra a resistência à tração obtida com as escórias de aciaria e de forno panela junto com a cal viva adicionada ao solo aos 28 dias de cura, comparados com somente a quantidade que foi adicionada de cal no solo com as mesmas condições.

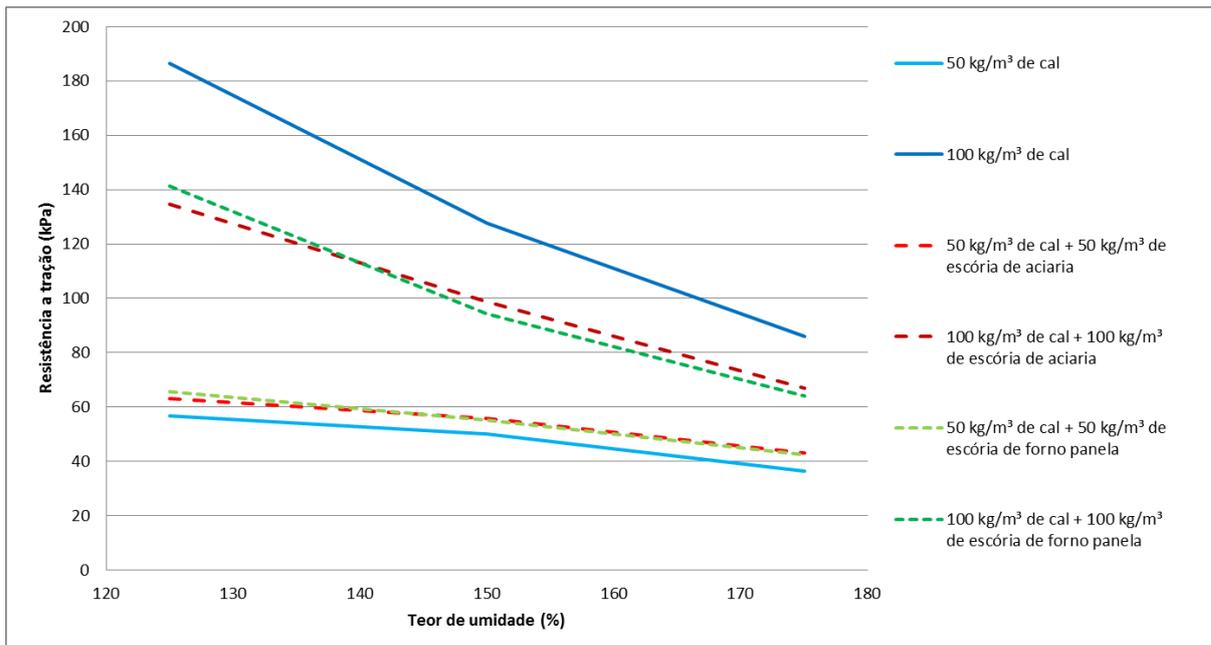


Figura 6.9: análise da resistência à tração da adição de misturas das escórias com cal viva. (Elaborada pelo autor)

A Figura 6.10 mostra a resistência à tração obtida com a mistura de gesso e fosfogesso seco a 60 e 150 graus célsius junto com a cal viva ao solo aos 28 dias de cura, comparados com somente a quantidade que foi adicionada de cal na mistura junto com o solo. Mostrando que o qualquer um dos tipos de gesso utilizados diminui a resistência das amostras, principalmente para altas dosagens de mistura. Ahmed et al. (2012) obtiveram ganhos de resistência em um solo mole orgânico com a adição de cal e gesso, porém, não compararam com a utilização somente de cal nas mesmas quantidades.

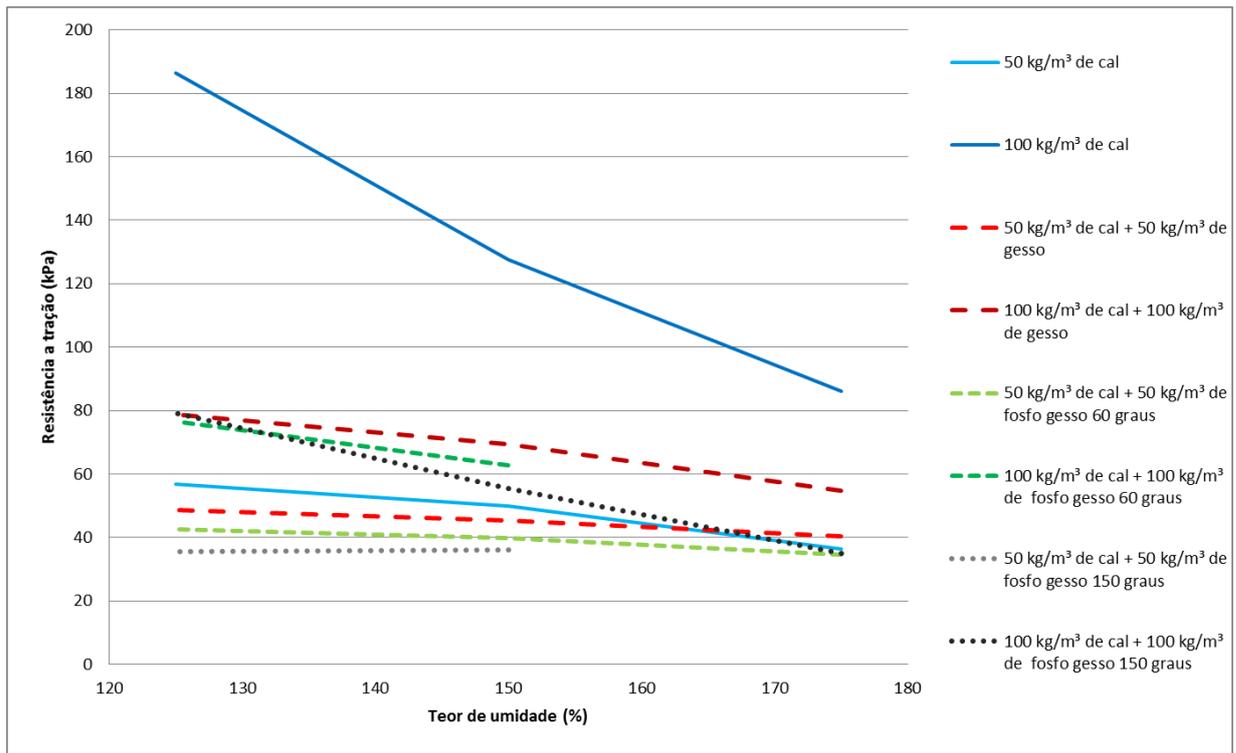


Figura 6.10: análise da resistência à tração da adição de gesso e fosfogesso com cal viva. (Elaborada pelo autor)

6.4 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

Os resultados obtidos com a variação da temperatura de cura na análise de resistência são mostrados nos itens a seguir.

Autores como Andersson et al. (2000) e Axelsson et al. (2009), em seus estudos, avaliaram o efeito da temperatura de cura, porém para faixa de temperaturas diferentes, mostrando que, como obtido no presente trabalho, para um mesmo período de cura, a resistência das misturas solo orgânico/cimento e solo orgânico/cal aumenta conforme a temperatura de cura cresce.

6.4.1 Com cimento

As amostras de solo com cimento foram curadas nas temperaturas de 20 e 50 graus Célsius. Observa-se que, para ambos os casos, a resistência cresce de forma praticamente linear conforme é adicionado mais agente cimentante à mistura, para esta faixa de quantidade de cimento adicionado. A diferença de resistência observada devido à variação da temperatura de cura possivelmente se torna possível por meio do efeito catalizador que esta proporciona ao cimento, para a ocorrência das reações pozolânicas. Este ganho de resistência se mostra mais pronunciado para maiores teores de agente cimentante.

A Figura 6.11 ilustra o ganho de resistência em relação ao teor de cimento adicionado para o solo com teor de umidade inicial de 125%.

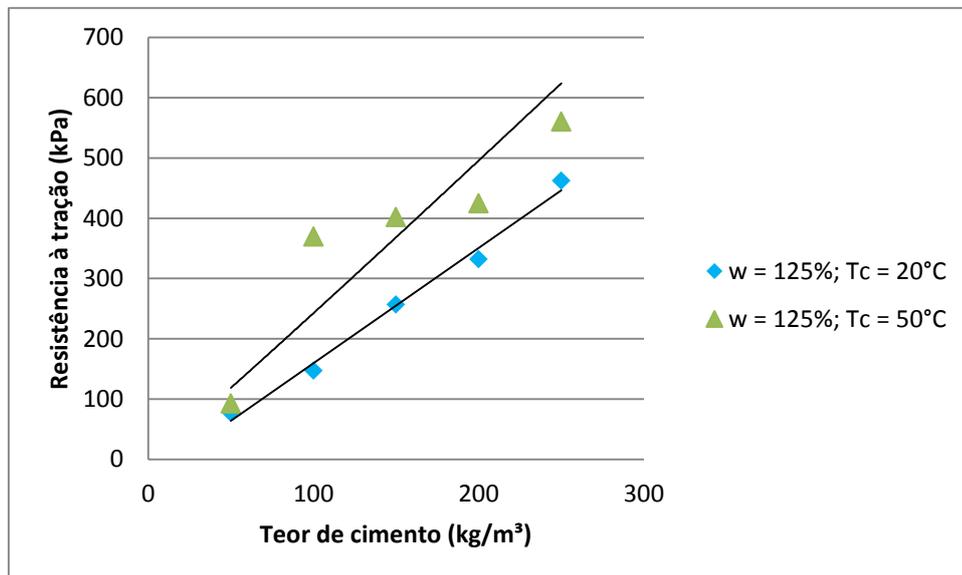


Figura 6.11: verificação da influência da temperatura de cura com cimento e teor de umidade de 125% aos 28 dias de cura. (Elaborada pelo autor)

A Figura 6.12 ilustra o ganho de resistência em relação ao teor de cimento adicionado para o solo com teor de umidade inicial de 150%.

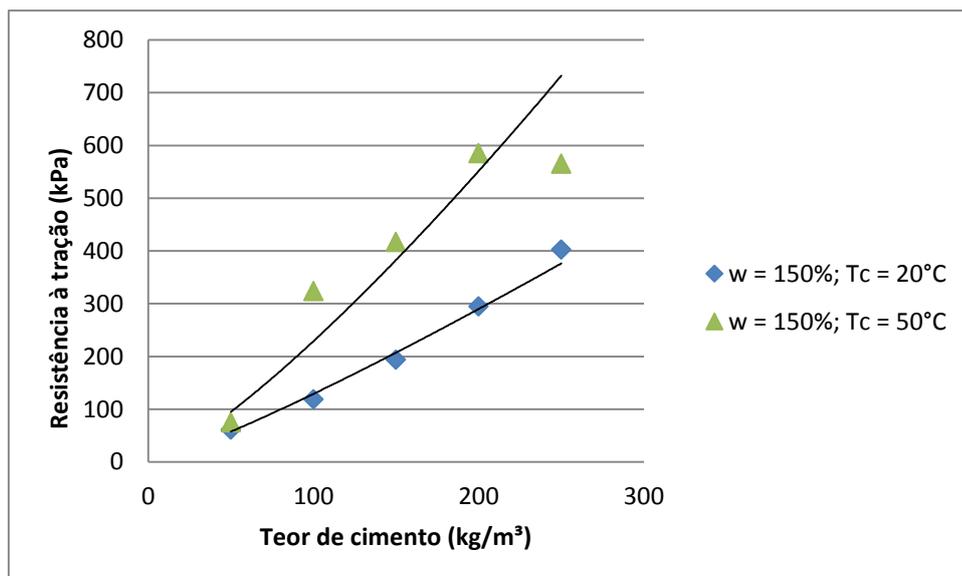


Figura 6.12: verificação da influência da temperatura de cura com cimento e teor de umidade de 150% aos 28 dias de cura. (Elaborada pelo autor)

A Figura 6.13 ilustra o ganho de resistência em relação ao teor de cimento adicionado para o solo com teor de umidade inicial de 175%.

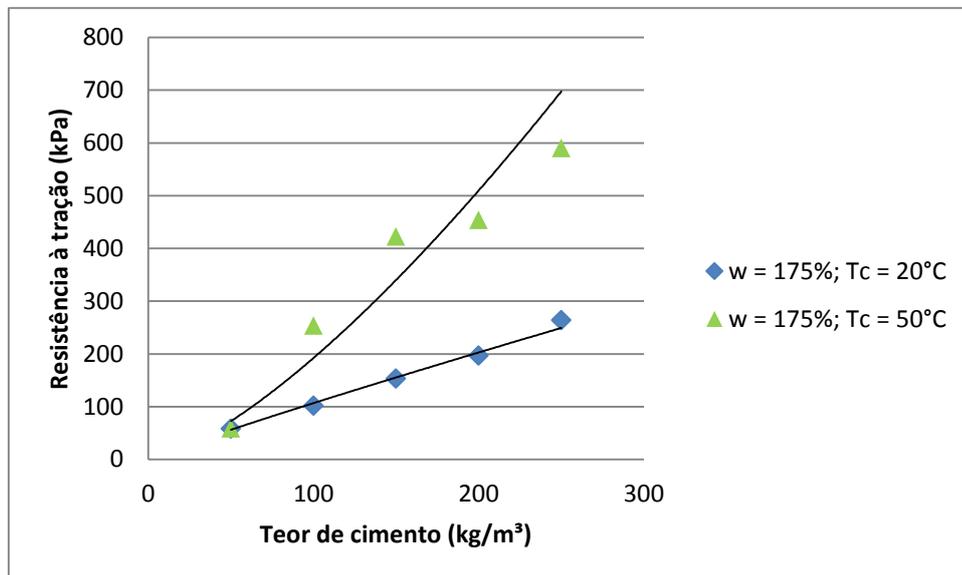


Figura 6.13: verificação da influência da temperatura de cura com cimento e teor de umidade de 175% aos 28 dias de cura. (Elaborada pelo autor)

O comportamento similar observado nos resultados experimentais para os três teores de umidade utilizados dão confiabilidade ao estudo. A metodologia de dosagem utilizando a relação entre a resistência à tração por porosidade/teor de volumétrico de cimento pode ser utilizada, apesar de uma maior dispersão em relação à temperatura de cura de 20 graus, como mostrado na Figura 6.14. O expoente da equação utilizada foi o mesmo adotado anteriormente mudando apenas o escalar desta, de $1,79 \times 10^{17}$ para $3,15 \times 10^{17}$. Para outros tempos de cura ou temperaturas de cura, o expoente da equação regente possivelmente será o mesmo, dentro da mesma faixa de variação do teor de cimento.

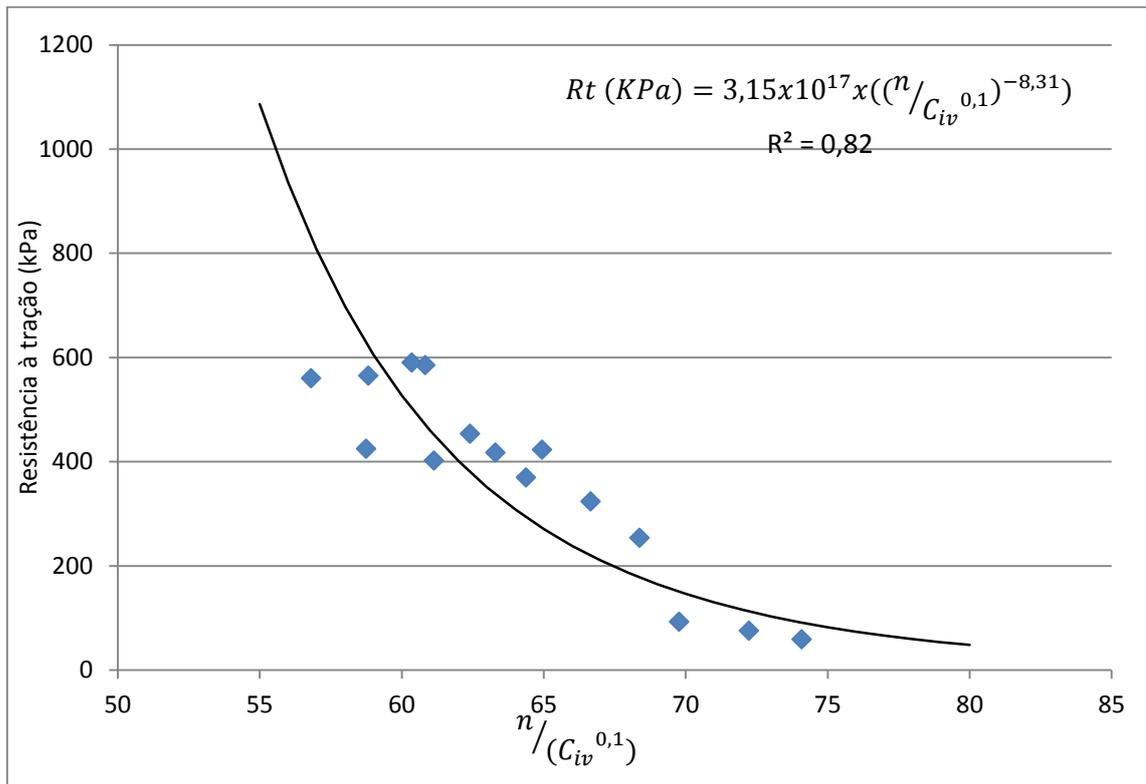


Figura 6.14: Resistência à tração x teor de umidade para diferentes quantidades de cimento adicionadas com temperatura de cura de 50 graus. (Elaborada pelo autor)

6.4.2 Com cal viva

Similar aos resultados do ensaio de compressão diametral para a temperatura de 20 graus Célsius, houve um aumento na resistência à tração dos corpos de prova conforme aumentou o teor de cal adicionado, até o teor ótimo de cal. Posteriormente esta resistência cai com a adição do agente cimentante. O teor ótimo de cal para esta temperatura de cura é diferente do obtido para a temperatura de cura de 20 graus Célsius. Não é possível afirmar se ocorre somente uma aceleração das reações ou uma otimização destas. Para confirmar o efeito que a temperatura têm nestas reações seria necessário observar o comportamento dos corpos de prova curados nas duas temperaturas utilizadas em diferentes períodos de tempo.

A Figura 6.15 ilustra o ganho de resistência em relação ao teor de cal adicionada para o solo com teor de umidade inicial de 125%.

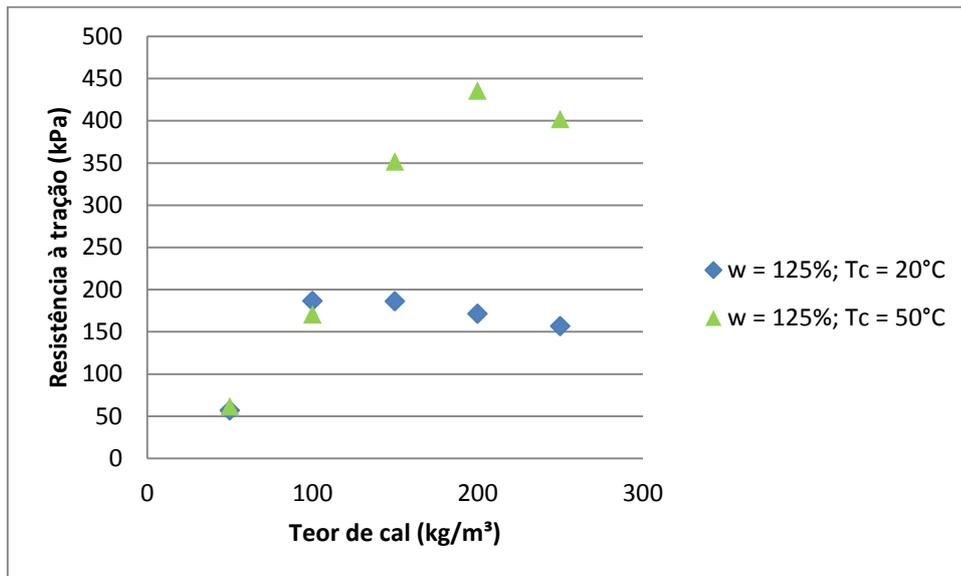


Figura 6.15: verificação da influência da temperatura de cura com cal viva e teor de umidade de 125% aos 28 dias de cura. (Elaborada pelo autor)

A Figura 6.16 ilustra o ganho de resistência em relação ao teor de cimento adicionado para o solo com teor de umidade inicial de 150%.

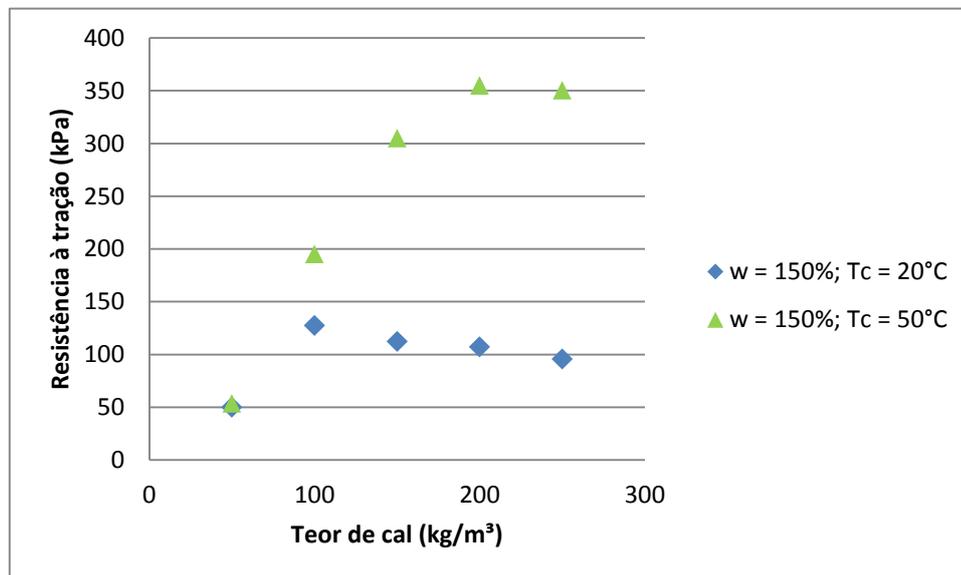


Figura 6.16: verificação da influência da temperatura de cura com cal viva e teor de umidade de 150% aos 28 dias de cura. (Elaborada pelo autor)

A Figura 6.17 ilustra o ganho de resistência em relação ao teor de cimento adicionado para o solo com teor de umidade inicial de 175%.

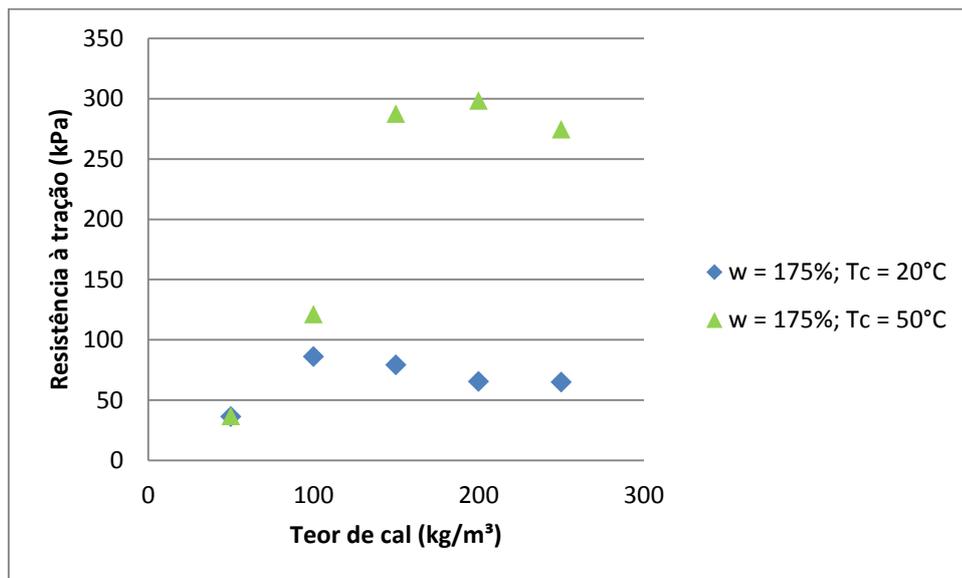


Figura 6.17: verificação da influência da temperatura de cura com cal viva e teor de umidade de 175% aos 28 dias de cura. (Elaborada pelo autor)

6.5 COMPARAÇÃO ENTRE O USO DA CAL E DO CIMENTO

As misturas com cimento Portland apresentaram resistências maiores do que as misturas com cal viva, com a mesma proporção de agente cimentante. Esta diferença foi mais pronunciada com o aumento do teor de umidade, pois quanto maior o teor de umidade menor a quantidade de material amorfo para as reações pozolânicas se encontra disponível para reagir com a cal. Em alguns casos, a resistência obtida com as misturas nas quais foram adicionadas cal, curadas a 50 graus Célsius, obtiveram uma resistência maior que os corpos de prova com a mesma quantidade de cimento curados a 20 graus Célsius.

Como observado nos trabalhos de Kuno et al. (1989), Onitsuka et al. (2003), Axelsson et al. (2000) e Andersson et al. (2000), a melhor eficácia no melhoramento de um solo com cimentação depende do solo que está sendo tratado. Alguns solos apresentam um comportamento melhor com cal e outros com cimento, dependendo de uma grande gama de fatores, como a mineralogia do solo, quantidade de matéria orgânica, tipo de matéria orgânica, pH do solo, teor de umidade, temperatura de cura e presença de contaminantes.

A Figura 6.18 compara a eficácia do melhoramento deste solo com um teor de umidade inicial de 125% com cal viva e cimento para as temperaturas de cura utilizadas.

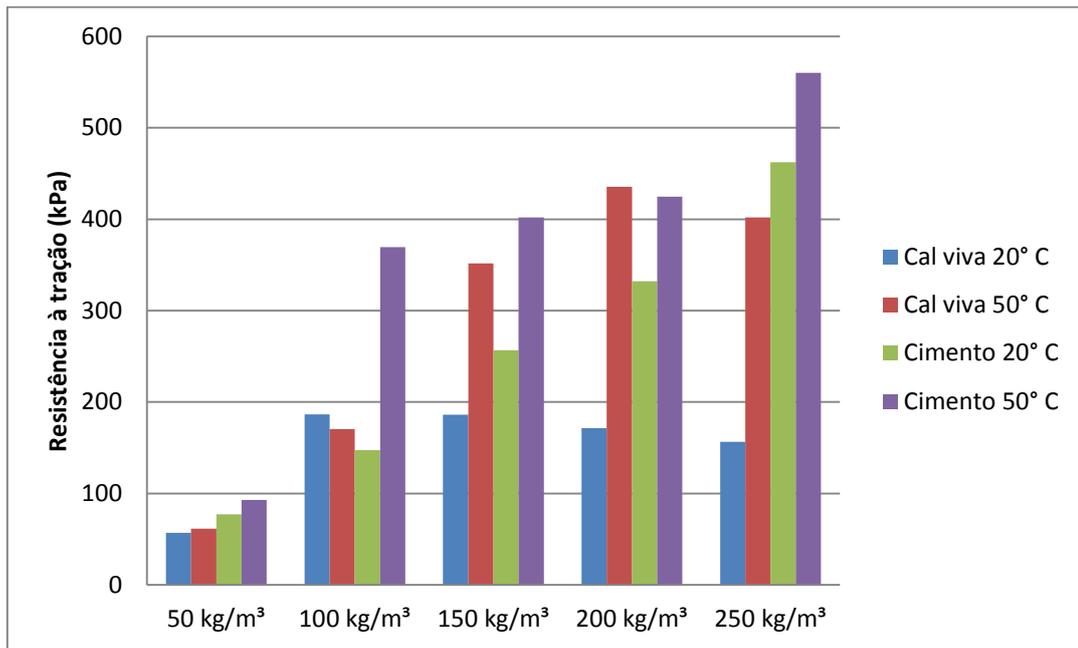


Figura 6.18: eficácia do melhoramento deste solo com um teor de umidade inicial de 125% com cal viva e cimento para as temperaturas de cura utilizadas.
(Elaborada pelo autor)

A Figura 6.19 compara a eficácia do melhoramento deste solo com um teor de umidade inicial de 150% com cal viva e cimento para as temperaturas de cura utilizadas.

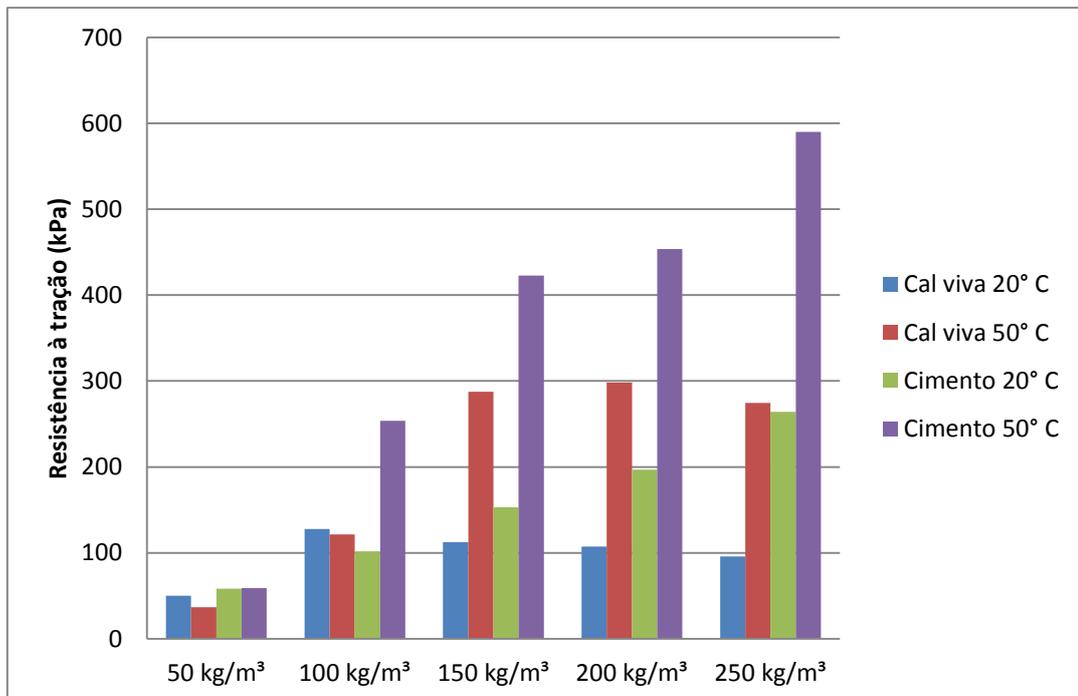


Figura 6.19: eficácia do melhoramento deste solo com um teor de umidade inicial de 150% com cal viva e cimento para as temperaturas de cura utilizadas.
(Elaborada pelo autor)

A Figura 6.20 compara a eficácia do melhoramento deste solo com um teor de umidade inicial de 175% com cal viva e cimento para as temperaturas de cura utilizadas.

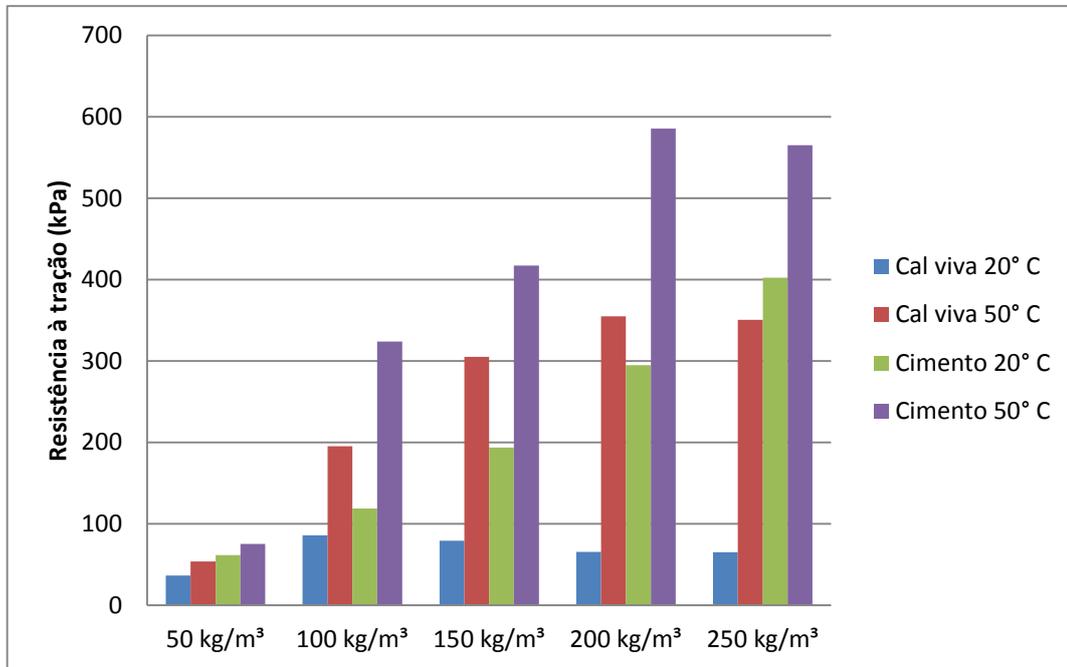


Figura 6.20: eficácia do melhoramento deste solo com um teor de umidade inicial de 175% com cal viva e cimento para as temperaturas de cura utilizadas.
(Elaborada pelo autor)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresenta uma análise de processos de tratamento de solos orgânicos. Diversos procedimentos e materiais foram adotados, sendo a avaliação de desempenho empírica. Verificou-se que é possível o melhoramento deste solo com a utilização de ambos agentes cimentantes analisados, para o tempo e condições de cura adotados. Entre os produtos utilizados, o mais indicado é o cimento por chegar a níveis de resistência mais altos e não ocorrer perda de resistência com uma adição além do que seria a dosagem ótima para a cal viva.

A influência no ganho de resistência com a variação da quantidade de agente cimentante utilizado mostra-se mais pronunciada, para o solo estudado, quando este encontra-se com um menor índice de vazios, tanto para cal viva quanto para o cimento. Fato este se deve a maior proximidade entre as partículas e a maior quantidade de sílica e alumina para as reações pozolânicas.

Uma metodologia de dosagem com a utilização de cimento neste solo é possível de ser utilizada para esta faixa de teores de cimento que foi utilizada no estudo. Já com a cal não foi possível esta utilização devido à perda de resistência que ocorre posteriormente ao teor ótimo de cal. Teor ótimo este que depende de diversas variáveis como a mineralogia, composição química do solo, do teor e tipo de matéria orgânica que é encontrada no material e da cal a ser utilizada.

As escórias não se mostraram adequadas para estabilização, pois não produziram ganhos de resistência neste solo, junto com os agentes cimentantes que foram estudados e para o tempo de cura utilizado. Apesar de fornecerem sílica e alumina para as reações pozolânicas, não foi observado ganho de resistência em relação às misturas onde somente foram adicionados os agentes cimentantes. Não se mostraram prejudiciais as misturas, porém, para afirmar isto com uma maior confiabilidade é necessário um estudo mais detalhado sobre a sua influência nestas, principalmente, ao longo do tempo.

A utilização do gesso e do fosfogesso nas misturas deste solo, com os agentes cimentantes utilizados, é indicada para os tempos e condições de cura avaliados, somente junto com o cimento e para altas dosagens de material. Já com a cal viva segundo este estudo a utilização

destes materiais é extremamente prejudicial para as condições analisadas, ocorrendo até uma perda de 50% do ganho de resistência obtido somente com a cal.

O uso da temperatura acelera as reações de cimentação para os dois agentes cimentantes utilizados. Entretanto, para afirmar isto com maior confiabilidade é necessário executar uma avaliação do ganho de resistência das misturas ao longo do tempo, com diferentes tempos de cura, já que a temperatura pode influenciar na solubilidade de algumas substâncias contidas nas misturas, alterando assim as reações químicas que ocorrem.

Não foi possível avaliar o efeito das substâncias húmicas nas reações cimentantes, para isto, seria necessário além de analisá-las quimicamente, com outros ensaios, adicionar diferentes quantidades destas nas misturas.

Estas conclusões são válidas somente para este solo orgânico. Como visto na revisão bibliográfica a heterogeneidade destes solos gera diferenças nas reações químicas que ocorrem em cada um deles.

Finalmente, destaca-se que para executar o melhoramento de um solo orgânico é necessário um estudo laboratorial avançado com este, levando-se em consideração o comportamento físico e químico das misturas, conforme discutido nos capítulos de revisão bibliográfica.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste item são apresentadas algumas sugestões para futuros trabalhos:

Avaliar a influência de diferentes ácidos húmicos obtidos de diversos solos em um solo base, caracterizando estas substâncias. Avaliação esta com a finalidade de encontrar quais são as propriedades que alguns tipos de ácidos húmicos possuem que afetam as reações pozolânicas. Considera-se este procedimento essencial à uma abordagem racional da técnica de melhoramento ou estabilização de solos orgânicos.

Utilizar diferentes teores de sal nas misturas para observar o seu efeito na minoração dos efeitos indesejados causados pela parte orgânica do solo nas reações cimentantes.

Analisar a aplicação de alguns outros resíduos industriais juntamente com os agentes cimentantes com a finalidade de encontrar uma mistura mais eficiente.

Empregar outros períodos de cura, para se verificar o efeito da cimentação a longo e em curto prazo, tendo assim um comportamento ao longo do tempo destas misturas.

Verificar o efeito da temperatura no ganho de resistência das misturas solo/cal e solo/cimento. Utilizando diferentes temperaturas, misturas e tempos de cura.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, A.; UGAI, K.; KAMEI, T. Assessment of recycled gypsum for organic soft clay soil improvement. In... 2012 Geo-congress. Oakland, CA. **Proceedings...** American Society of Civil Engineers, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS., **ASTM D5373-02**: Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal and Coke. New York, 2007.

ANDERSSON, R.; CARLSSON, T.; LEPPANEN, M. Hydraulic cement binders for mass stabilization of organic soils., In... Soft Ground Technology, 1, Noordwijkerhout. **Proceedings...** American Society of Civil Engineers, 2000.

ANDREJKO, M. J.; FIENE, F.; COHEN, A. D., Comparison of ashing techniques for determination of the inorganic contents in peats. **Testing of peats and organic soils**. ASTM Special Technical Publication 820, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984b.

_____, **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c.

_____, **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2010.

_____, **NBR 13600**: Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro, 1996.

AXELSSON, K.; JOANSSON, S.; ANDERSSON, R., **Stabilization of organic soil by cement and puzzolanic reactions – feasibility study**. Swedish deep stabilization research center, Linköping, Sweden, 2000.

BERGADO, D. T.; ANDERSON, L. R.; MUIRA, N.; BALASUBRAMANIAM, A. S. **Soft ground improvement**: In Lowland and Other Environments. New Work: American Society of Civil Engineers, 1996.

BUJANG, B. K. H.; SHUKRI, M.; THAMER, A. H. Effect of chemical admixtures on the Engineering properties of tropical peat soils. **American Journal of Applied Sciences**, 2, 7, p. 1113-1120, 2005.

CASTRO, F. J. C. 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, Rio de Janeiro.

CHIKYALA, S. R. **Effect of calcium based treatment on organic soil behavior**. 2008. 133 p. Master degree thesis. University of Texas. Texas. Arlington.

CONSOLI, N. C.; THOMÉ, A.; CERATTI, A. P., Engineering properties of organic soft soil-lime mixtures. In... International Conference of Recent Developments in Soil and Pavements Mechanics., 20, 1997, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rotterdam : Bakelma , 1997.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D., FESTUGATO, L., HEINECK, K. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 133, 197–205, 2007.

DICK, D.P.; NOVOTNY, E.H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica do solo. In... ALLEONI, L. R. F.; MELO, V. F. **Química e Mineralogia do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirement for lime stabilization. **Highway Research Record**, 139, 62-72, 1996.

ENGBRETSON, R.; VON WANDRUSKA, R. Microorganization in dissolved humic acids. **Environmental Science and Technology**, 28, 1934-1944, 1994.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GERMAINE, J. T.; GERMAINE, A. V. **Geotechnical laboratory measurements for engineers**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

HARRIS, P.; HARVEY, O.; PUPPALA, A.; SEBESTA, S.; CHIKYALA, S. R.; SARIDE, S. **Mitigating the effects of organics in stabilized soils**: technical report. Texas: Texas Transportation Institute, 2009.

HARTLÉN, J.; WOLSKI, W. **Embankments on organic soils**. Amsterdam: Elsevier, 1996.

HAYES, M. H. B. Concepts of the origin, composition and structures of humic substances. In... WILSON, W. S. **Advances in soil organic matter research**: The impact of agriculture and the environment. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1991.

HERRIN, M.; MITCHELL, H. Lime soil mixture. **Highway Research Board**, 304, p. 99-138, 1961,

HERZOG, A.; MITCHELL, J. K. Reactions accompanying stabilization of clay with cement. **Highway Research Record**, 36, p. 146-171, 1963.

HOBBS, N.B. (1986) Mire morphology and the properties and behaviour of some British and foreign peats. **The Quartemary Journal of Engineering Geology**. 19, 1, 1986.

HOLMEN, K. The global carbon cycle. In... JACOBSON, M. C.; CHARLSTON, R. J.; RODHE, H.; ORIAN, G. H. **Earth system science: from biogeochemical cycles to global change**. San Diego: Academic Press, 2000.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principle and practice**. Melbourne: Butterworths, 1972.

JOHNSTON, C.; TOMBACZ, E. Surface chemistry of soil minerals. In... DIXON, J. B.; SCHULZE, D. G. **Soil mineralogy with environmental applications**. Madison: Soil Science Society of America, 2002.

JOHANN, A. D. R. **Metodologias para a previsão do comportamento mecânico e para a análise da variação da porosidade de um solo siltoso tratado com cal em diferentes tempos de cura**. 2013. 272 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

JOHANSSON, S. E.; AHNBERG, H.; PIHL, H. **Kemiska reaktioner vid stabilisering av jord**. Swedish deep stabilization research center, Linköping, Sweden, 2006.

KARLSSON, R.; HANSBO, S. **Soil classification and identification**. Stockholm: Swedish Council for Building Research, 1981.

KOSKINEN, W. C.; HARPER, S. S. The retention process: Mechanisms. In... CHENG, H. H. **Pesticides in the soil environment: Processes, impacts, and modeling**. Madison: Soil Science Society of America, 1990.

KONOVALOV, P. A. **Ustojstvo fundamentov na zatorfovannykh gruntach**. Moskwa: Stroizdof, 1980.

KUNO, G.; KUTARA, K.; MIKI, H. Chemical stabilization of soft soils containing Humic acid, In... International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Taylor & Francis, Vol.2, 1989.

LANDVA, A.O.; KORPIJAAKKO, E. O.; PHEENEY, P. E. Geotechnical classification of peats and organic soils. **Testing of peats and organic Soils**. ASTM Special Technical Publication 820, 1983.

LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. London: Edward Arnod, 1956.

LOPES JUNIOR, L. S. **Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal.** 2011. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete.** New Jersey: Pearson Education, 2003.

MODMONTION, C.; LU, J.; ONITSUKA, K. Influence of humic acid and salt concentration on lime-stabilized Ariake clays and microstructure research. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 26, 2, p. 281-286, 2004.

NIEDER, R.; BENBI, D.K. **Carbon and nitrogen in the terrestrial environment.** Germany; Springer, 2008.

NUNEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** 1991. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

OKRUSZKO, H. **Zaktualizowana klasyfikacja gruntów organicznych dla potrzeb budownictwa ziemnego.** Mat. Niepublikowane, 1984.

ONITSUKA, K.; MODMOLTIN, M.; KOUNO, M.; NEGAMI, T. Effect of organic matter on lime and cement stabilized Ariake clay. **Japanese Geotechnical Engineering**, 729, 3, p. 1-13, 2003.

PILON, C. N.; MIELNICZUK, J.; NETO, L. M., **Métodos de fracionamento e caracterização da matéria orgânica do solo.** Pelotas: RS, EMBRAPA, 2002.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARIA, S. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. **Transportation Research Record, Washington**, 1652, p. 215-227, 1999.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING S. Lime requirement for stabilization. **Transportation Research Board Annual Meeting**, 79, 2000.

SCHNITZER, M.; KHAN, S. U. **Humic substances in the environment.** New York: Marcel Dekker, 1972.

SCHNITZER, M. A lifetime perspective on the chemistry of soil organic matter. **Advances in Agronomy**, 68, p. 1-58, 2000.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms.** Madison: American Society of Agronomy, 1997.

SPARKS, D. **Environmental soil chemistry.** San Diego: Academic Press, 1995.

THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais**. 1994. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TIMONEY, M. J.; MACCABE, B. A.; BELL, A. L. Experiences of dry soil mixing in highly organic soils. **Ground Improvement**, 165 , p. 3-14, 2012.

TREMBLAY, H.; DUCHESNE, J.; LOCAT, J.; LEROUEIL, S. Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. **Canadian Geotechnical Journal**, 39, p. 535-546, 2002.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OF SCIENCE. **Carbon cycling and biosequestration: integrating biology and climate through systems science**. United States: Report from the March 2008 Workshop, U.S. Department of Energy Office of Science Office of Biological and Environmental Research, 2008.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. 247 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VON POST, L. Das genetische system der organogenen bildungen schwedens, **International committee of pedology**., 22, 1924.

YUNUS, N. Z. M.; WANATOWSKI, D.; STACE, L. R. Effect of humic acid on physical and engineering properties of lime-treated organic clay, **Engineering and Technology**, 59, p. 1820-1825, 2011.