

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Marcele Dorneles Bravo

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO MOLE ORGÂNICO:
AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA COM O
ACRÉSCIMO DE CAL, CINZA DE CASCA DE ARROZ E
MICROSSÍLICA**

Porto Alegre
julho 2013

MARCELE DORNELES BRAVO

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO MOLE ORGÂNICO:
AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA COM O
ACRÉSCIMO DE CAL, CINZA DE CASCA DE ARROZ E
MICROSSÍLICA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Nilo Cesar Consoli

Porto Alegre
julho 2013

MARCELE DORNELES BRAVO

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO MOLE ORGÂNICO:
AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA COM O
ACRÉSCIMO DE CAL, CINZA DE CASCA DE ARROZ E
MICROSSÍLICA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2013

Prof. Nilo Cesar Consoli
PhD Concordia University
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Amanda Dalla Rosa Johann
Dr^a. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Daniel Winter
Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

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

Dedico este trabalho aos meus pais,
Josias e Mara.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por me proporcionar cinco anos e meio de aprendizado nas diversas áreas da Engenharia Civil e por me mostrar o quão fascinante é o mundo da Engenharia, confirmando a cada dia que escolhi o caminho certo a seguir na minha carreira profissional.

Agradeço ao professor orientador deste trabalho, Nilo Cesar Consoli, que desde a época de iniciação científica me mostrou que a área geotécnica é extremamente interessante e instigante.

Ao mestrando Daniel Winter, que não mediu esforços para me auxiliar nos trabalhos de laboratório, me ajudando a esclarecer muitas dúvidas sobre conceitos e procedimentos. À colega Thaís Martins de Paula, que me acompanhou durante um ano de trabalho de conclusão, desenvolvendo o trabalho de laboratório, discutindo dúvidas e analisando problemas e resultados.

Ao professor Lucas Festugato e ao doutorando Sérgio Marques, que auxiliaram e esclareceram as dúvidas que surgiram ao longo do trabalho, agradeço a disponibilidade e a compreensão. Também agradeço à Amanda Johann, que me incentivou durante a iniciação científica a analisar o comportamento dos solos, o que se mostrou de grande valia para este trabalho.

Fora do laboratório, agradeço aos amigos que conquistei na faculdade. Às “meninas da civil”, aos colegas do Programa de Educação Tutorial da Engenharia Civil e aos sem grupo definido, que não são menos amigos por isso.

Ao meu namorado Roger, pelos conselhos profissionais, pela cumplicidade e pelas tréguas nos estudos, sempre muito bem-vindas.

Por fim, agradeço muito à minha família, que carrega comigo toda essa conquista, principalmente aos meus pais, Mara e Josias e minha irmã Josieli, que ouviram com paciência minhas lamentações todos os finais de semestre e muitas vezes se preocuparam até mais que eu com as minhas provas, mas que acreditaram que tudo ia dar certo.

To laugh often and much;
to win the respect of intelligent people
and the affection of children;
to earn the appreciation of honest critics
and endure the betrayal of false friends;
to appreciate beauty;
to find the best in others;
to leave the world a bit better, whether by a healthy child,
a garden patch or a redeemed social condition;
to know even one life has breathed easier because you
have lived.
This is to have succeeded.

Ralph Waldo Emerson

RESUMO

A Engenharia Geotécnica, ao longo de muitos anos, vem investindo no estudo de materiais que, quando misturados ao solo, possam contribuir para o ganho de resistência. O solo é base de praticamente todas as obras de Engenharia Civil e quando não tem condições de suportar o carregamento imposto, uma das possíveis soluções a ser adotada é a técnica de estabilização. A estabilização com cal é uma técnica clássica, porém não apresenta um método racional de dosagem. Entretanto, estão sendo desenvolvidas diversas pesquisas nessa área com o intuito de estabelecer parâmetros aplicáveis em campo, como porosidade/teor volumétrico de cal para a dosagem da mistura solo-cal, por exemplo. Na pesquisa em questão, foram estudados diferentes teores e combinações de solo, cal e pozolanas, analisados os diversos fatores que alteram a resistência da mistura e feitas correlações que facilitam a interpretação dos resultados. Neste trabalho é apresentado, pela primeira vez na literatura, o ensaio de cravação de base alargada que tem como objetivo facilitar a medição da resistência de solos moles submetidos ou não à estabilização. O desenvolvimento desse ensaio se deve, principalmente, à dificuldade de moldagem e compactação desses solos em molde convencional. Além disso, são desenvolvidas análises de resistência dos corpos de prova para os ensaios de tração por compressão diametral e de resistência das unidades de teste para os ensaios de cravação de base alargada em relação ao tempo de cura e relação vazios/cal (η/C_{av}), em que se ajustou um expoente de 0,2 ao termo C_{av} , que expressa o teor volumétrico de cal adicionado à mistura. As equações para os tempos de cura de 14, 28 e 56 dias, provenientes dessa análise, apresentaram como diferencial apenas um escalar. Dessa forma, pode-se obter equações únicas relacionando três variáveis de estudo: teor de cal, porosidade e tempo de cura, o que permite estimar com facilidade a resistência desejada variando os diferentes fatores citados. Foi definida a correlação entre os dois ensaios realizados no trabalho para os dados obtidos, em que foi possível ajustar uma reta, o que indica a validade dos resultados provenientes do ensaio de cravação de base alargada. Na comparação entre os valores de resistência à tração de corpos de prova moldados com microssílica e cinza de casca de arroz, houve a preponderância dos resultados das misturas que utilizaram microssílica, o que supostamente se deve ao teor de matéria amorfa no material.

Palavras-chave: Solo Medianamente Orgânico de Alta Plasticidade. Tração por Compressão Diametral. Cravação de Base Alargada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de corpos de prova moldados.....	20
Figura 2 – Diagrama de etapas da pesquisa.....	21
Figura 3 – Evolução da quantidade de hidróxido de cálcio para cada grama de cinza volante ao longo do tempo	25
Figura 4 – Evolução da quantidade de hidróxido de cálcio para cada grama de fração vítrea existente na parcela de cinza volante ao longo do tempo	26
Figura 5 – Interface entre a estrutura de C-S-H denso e o agregado em uma mistura de concreto com microssílica	27
Figura 6 – Coloração da microssílica	30
Figura 7 – Coloração das cinzas de casca de arroz.....	32
Figura 8 – Difractometria de raios X para CCA em diferentes temperaturas e durações de queima.....	33
Figura 9 – Ruptura do corpo de prova submetido à compressão diametral.....	36
Figura 10 – Variação dos Limites de Atterberg com teor de cal	37
Figura 11 – Efeito da porcentagem de cal no pH	38
Figura 12 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal dos corpos de prova de 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias	40
Figura 13 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal dos corpos de prova de 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias	41
Figura 14 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal dos corpos de prova de 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias	41
Figura 15 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do solo-cal em 28 dias de cura	42
Figura 16 – Variação da resistência à tração por compressão diametral em relação à porosidade de um silte inorgânico de baixa plasticidade misturado a cal com 28 dias de cura.....	43
Figura 17 – Variação da resistência à tração por compressão diametral em relação à porosidade dos corpos de prova curados à 20°C.....	43
Figura 18 – Variação da resistência à tração por compressão diametral pela variação da relação $\eta/(Liv)^{0,3}$ para diferentes temperaturas.....	44
Figura 19 – Avaliação do aumento da resistência à tração por compressão diametral em relação ao tempo de cura.....	45
Figura 20 – Efeito do tempo de cura nos corpos de prova com 25% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura.....	46
Figura 21 – Demonstração da correlação entre ensaios de tração por compressão diametral e compressão simples.....	47
Figura 22 – Localização do ponto de retirada da amostra de solo orgânico em Nova Santa Rita/RS.....	49

Figura 23 – Granulometria do solo.....	50
Figura 24 – Granulometria da cal.....	51
Figura 25 – Granulometria da microssílica.....	52
Figura 26 – Granulometria da cinza de casca de arroz.....	52
Figura 27 – Corpo de prova desmoldado para ensaio de tração por compressão diametral.....	55
Figura 28 – Unidade de teste para ensaio de cravação de base alargada.....	56
Figura 29 – Disposição do corpo de prova na prensa.....	57
Figura 30 – Prensa hidráulica e anel dinamométrico.....	57
Figura 31 – Ruptura do corpo de prova.....	58
Figura 32 – Execução do ensaio de cravação.....	59
Figura 33 – Anéis dinamométricos de nylon.....	60
Figura 34 – Ponteiras de base alargada.....	60
Figura 35 – Relação entre q_t (kPa) e o tempo de cura para todas as misturas estudadas com $\omega=125\%$	62
Figura 36 – Relação entre q_t (kPa) e o tempo de cura para todas as misturas estudadas com $\omega=150\%$	63
Figura 37 – Relação entre q_t (kPa) e o tempo de cura para todas as misturas estudadas com $\omega=175\%$	63
Figura 38 – Relação entre q_b (kPa) e o tempo de cura para todas as misturas estudadas com $\omega=125\%$	64
Figura 39 – Relação entre q_b (kPa) e o tempo de cura para todas as misturas estudadas com $\omega=150\%$	64
Figura 40 – Relação entre q_b (kPa) e o tempo de cura para todas as misturas estudadas com $\omega=175\%$	64
Figura 41 – Relação entre ensaios de tração por compressão diametral e cravação de base alargada.....	66
Figura 42 – Relação entre q_t (kPa) e $\eta/(C_{av})^{0,2}$ para os corpos de prova de solo orgânico, cal e cinza de casca de arroz para 14, 28 e 56 dias.....	67
Figura 43 – Relação entre q_t (kPa) e $\eta/(C_{av})^{0,2}$ para os corpos de prova de solo orgânico, cal e microssílica para 14, 28 e 56 dias.....	68
Figura 44 – Relação entre q_b (kPa) e $\eta/(C_{av})^{0,2}$ para as unidades de teste de solo orgânico, cal e cinza de casca de arroz para 14, 28 e 56 dias.....	69
Figura 45 – Relação entre q_b (kPa) e $\eta/(C_{av})^{0,2}$ para as unidades de teste de solo orgânico, cal e cinza de microssílica para 14, 28 e 56 dias.....	69
Figura 46– Variação da resistência à tração q_t (kPa) com a relação $\eta/(C_{av})^{0,2}$ e o tempo de cura.....	70
Figura 47– Variação da resistência à cravação q_b (kPa) com a relação $\eta/(C_{av})^{0,2}$ e o tempo de cura.....	71

Figura 48 – Comparação entre os valores de resistência adquiridos durante 14 dias de cura pelos corpos de prova de cinza de casca de arroz e microssílica.....	72
Figura 49 – Comparação entre os valores de resistência adquiridos durante 28 dias de cura pelos corpos de prova de cinza de casca de arroz e microssílica.....	73
Figura 50 – Comparação entre os valores de resistência adquiridos durante 56 dias de cura pelos corpos de prova de cinza de casca de arroz e microssílica.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espessura da zona de transição (em micrômetros).....	27
Tabela 2 – Propriedades físicas e químicas da microsilica	30
Tabela 3 – Composição química de algumas cinzas de casca de arroz.....	32
Tabela 4 – Propriedades da cal viva.....	35
Tabela 5 – Classificação do solo com base no teor de matéria orgânica.....	50
Tabela 6 – Dosagens estabelecidas.....	53

LISTA DE SIGLAS

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

CCA – Cinza de casca de arroz

IP – Índice de Plasticidade

ISO – International Organization for Standardization

Lacer – Laboratório de Materiais Cerâmicos

LEGG – Laboratório de Estudos Geotécnicos e Geoambientais

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MC – Microssílica

NBR – Norma Brasileira

PVC – Policloreto de polivinila

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

C_a – teor volumétrico de cal (%)

q_b – resistência à cravação (kPa)

q_u – resistência à compressão simples (kPa)

q_t – resistência à tração por compressão diametral (kPa)

γ_d – massa específica aparente seca (g/cm^3)

ω – teor de umidade (%)

η – porosidade

η/C_{av} – relação vazios/cal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	18
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	18
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	18
2.2.1 Objetivo principal	18
2.2.2 Objetivos secundários	19
2.3 PRESSUPOSTO	19
2.4 DELIMITAÇÃO	19
2.5 LIMITAÇÕES	19
2.6 HIPÓTESE	20
2.7 DELINEAMENTO	20
3. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA GEOTECNIA	24
4. VISÃO GERAL SOBRE A TÉCNICA SOLO-POZOLANA-CAL	28
4.1 MATERIAIS CONSTITUINTES DA MISTURA	28
4.1.1 Solo	29
4.1.2 Microssílica	29
4.1.3 Cinza de Casca de Arroz	31
4.1.4 Cal	34
4.1.5 Água	35
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	35
4.3 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DA MISTURA SOLO- POZOLANA-CAL	36
4.3.1 Alterações das propriedades do solo com a adição de cal	36
4.3.2 Alterações das propriedades da mistura solo-cal com a adição de material pozolânico	39
4.3.3 Comportamento da mistura solo-pozolana-cal com a porosidade	42
4.3.4 Comportamento da mistura solo-pozolana-cal de acordo com a razão vazios/cal	44
4.3.5 Comportamento da mistura solo-pozolana-cal com o tempo de cura	45
4.3.6 Correlação entre ensaios de tração por compressão diametral e compressão simples	46
5. PLANO EXPERIMENTAL	48
5.1 MATERIAIS	48
5.1.1 Solo	48

5.1.2 Cal	51
5.1.3 Microssílica	51
5.1.4 Cinza de Casca de Arroz	52
5.2 MÉTODOS	53
5.2.1 Determinação das dosagens	53
5.2.2 Preparação das misturas e moldagem dos corpos de prova	54
5.2.3 Ensaio de tração por compressão diametral	56
5.2.3.1 Processo Executivo	56
5.2.4 Ensaio de cravação de base alargada	58
5.2.4.1 Objetivo e descrição do ensaio	58
5.2.4.2 Equipamentos	59
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
6.1 EFEITO DO TEMPO DE CURA	61
6.1.1 Para ensaio de tração por compressão diametral	61
6.1.2 Para ensaio de cravação de base alargada	64
6.2 RELAÇÃO ENTRE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO E CRAVAÇÃO DE BASE ALARGADA	66
6.3 EFEITO DA RELAÇÃO VAZIOS/CAL	67
6.4 EFEITO DA ADIÇÃO DE POZOLANAS	71
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
7.1 CONCLUSÕES	74
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Antigamente, a técnica de substituição de solos era amplamente utilizada tanto em obras geotécnicas, quanto de construção civil. Se o material era de difícil utilização ou de baixa resistência, removia-se grande parte, depositando esse solo em outras localidades ou em aterros sanitários. Para a substituição, buscavam-se materiais em jazidas que poderiam ou não se localizar próximas à obra, o que acrescentava um custo considerável ao orçamento.

No contexto atual, a prática de substituição de grandes volumes de solo se torna praticamente inaceitável dos pontos de vista ambiental e econômico. A estabilização de solo através de um agente cimentante e uma pozolana, por exemplo, tem se mostrado uma possibilidade viável e racional para solucionar o problema descrito.

O solo estabilizado tem suas propriedades melhoradas através da adição de um agente cimentante, podendo-se utilizar outros materiais como resíduos pozolânicos que aceleram as reações pozolânicas e diminuem a fração de agente cimentante requerida para a estabilização. Esse processo se dá através de dois tipos de estabilização:

- a) química, através do agente cimentante;
- b) mecânica, através da compactação.

Segundo Dalla Rosa (2009, p. 23), o aproveitamento de resíduos na área de geotecnia vem se mostrando uma solução eficaz tanto na redução de custos da obra, quanto na preservação de recursos naturais. Ainda assim, não existem procedimentos de dosagem amplamente difundidos no meio técnico para solos que necessitam de estabilização para atingir a resistência requerida para utilização em campo. Seria necessário desenvolver métodos como os que existem para o concreto convencional como o fator água/cimento, por exemplo.

No caso dos solos estabilizados, um método racional de dosagem deveria considerar fatores como:

- a) quantidade de solo;
- b) porosidade;

- c) teores de,
- agente cimentante;
 - material pozolânico;
 - umidade.

É imprescindível ampliar os estudos nessa área de conhecimento, uma vez que cada solo, dependentemente de fatores como clima, região e formação geológica, possui características e propriedades diferentes ou até mesmo desconhecidas. Além disso, é importante buscar os melhores materiais a serem utilizados na estabilização dos solos, o que só é possível no momento em que se avalia as interações entre os materiais na mistura. Portanto, o pesquisador que se interessa por essa área em geotecnia tem uma gama enorme de possibilidades que podem e devem ser desmistificadas.

No Laboratório Estudos Geotécnicos e Geoambientais (LEGG) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), várias pesquisas foram e vem sendo desenvolvidas buscando a melhor forma de estabelecer a dosagem correta para esse tipo de técnica. Esses estudos comprovam que a melhor maneira de estabelecer uma relação com a resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral dos solos é através da relação vazios/cal ou vazios/cimento. No presente trabalho foram consultadas obras desenvolvidas sob esse viés, como Dalla Rosa (2009), Lopes Júnior (2007), Silvani (2013) e Thomé (1994).

É uma preocupação do pesquisador encontrar uma forma de conseguir estimar a resistência que o solo vai obter em um determinado período de tempo, antes mesmo de aplicar a técnica em campo. Para isso, são desenvolvidas correlações como a de vazios/agente cimentante, por exemplo, que facilitam a análise e estabelecem parâmetros coerentes e mais próximos da realidade.

O trabalho em questão refere-se ao tratamento de um solo orgânico muito compressível e de difícil emprego em qualquer tipo de obra. Para melhorar as características do solo com a adição de cal, cinza de casca de arroz e microssílica, foi necessário realizar um estudo completo dos fatores que interferem no comportamento da mistura, uma vez que não há bibliografia que apresente a utilização desses materiais específicos em conjunto. O que motiva essa pesquisa é, basicamente, correlacionar a resistência à tração na compressão diametral das misturas estudadas com as principais variáveis que podem ser aplicadas no processo de

estabilização para fornecer informações completas para consulta, facilitando a análise do projetista que vier a utilizar a técnica aqui demonstrada.

Este trabalho de diplomação está organizado em sete capítulos, descritos sucintamente a seguir.

O capítulo 1 traz uma breve introdução do tema, apresentando o problema e a relevância do estudo. O capítulo 2 refere-se às diretrizes da pesquisa, em que são apresentados a questão da pesquisa, seus objetivos, hipóteses, pressupostos, delimitações, limitações e delineamento. Nos capítulos 3 e 4, são apresentadas as informações colhidas na revisão bibliográfica, a fim de embasar a pesquisa em trabalhos já realizados. O capítulo 3 enfatiza a utilização de resíduos e materiais pozolânicos na Engenharia Geotécnica. Já o capítulo 4, mostra o comportamento da mistura solo-pozolana-agente cimentante em relação às variáveis estudadas nos trabalhos consultados.

O programa experimental é abordado no capítulo 5, que mostra um detalhamento das técnicas e ensaios realizados e dos materiais utilizados na pesquisa. Já no capítulo 6, são publicados os resultados observados e medidos na etapa experimental, sendo realizadas as análises pertinentes. Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as considerações finais da pesquisa.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes deste estudo são compostas pela questão de pesquisa, objetivos, hipótese, pressuposto, delimitações, limitações e delineamento. A questão identifica o foco do trabalho, devendo ser respondida ao final deste e os objetivos devem ser alcançados ao longo da pesquisa. Elaborou-se uma hipótese a fim de vislumbrar o que se espera dos resultados obtidos e um pressuposto no qual foram indicadas informações consideradas verdadeiras para esse estudo.

A partir daí, delimitou-se o estudo de forma que este se apresentasse bem definido e foram citadas as limitações consideradas ao longo de todo processo. Finalmente, realizou-se o delineamento da pesquisa como forma de demonstrar como se pretende desenvolvê-la.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: considerando-se as variáveis de estudo para as diferentes combinações de materiais estudadas, qual apresenta resistência mínima para que possa ser utilizada como camada resistente para obras de Engenharia e em que proporções se obtêm os maiores valores?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa são classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é a verificação da combinação de materiais que apresenta resistência significativa e qual a melhor proporção a ser aplicada, com o intuito de garantir características adequadas para implantação de obras de Engenharia sobre a camada estabilizada.

2.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários desta pesquisa estão descritos a seguir:

- a) verificação do desempenho de cada dosagem de materiais em relação ao ganho de resistência dos corpos de prova ensaiados;
- b) comprovação da relação entre o ensaio de tração por compressão diametral e o ensaio de cravação de base alargada;
- c) comparação entre o ganho de resistência apresentado pelas dosagens utilizando as diferentes pozolanas empregadas no estudo.

2.3 PRESSUPOSTO

É considerado pressuposto do trabalho que a resistência mínima considerada apropriada para suporte de obras de Engenharia é de 50 kN/m² em ensaios de tração por compressão diametral.

2.4 DELIMITAÇÃO

O estudo delimita-se a ensaios de resistência à tração na compressão diametral e de cravação de base alargada de corpos de prova com diferentes dosagens de solo orgânico, cal, microsílica, cinza de casca de arroz e água com 14, 28 e 56 dias.

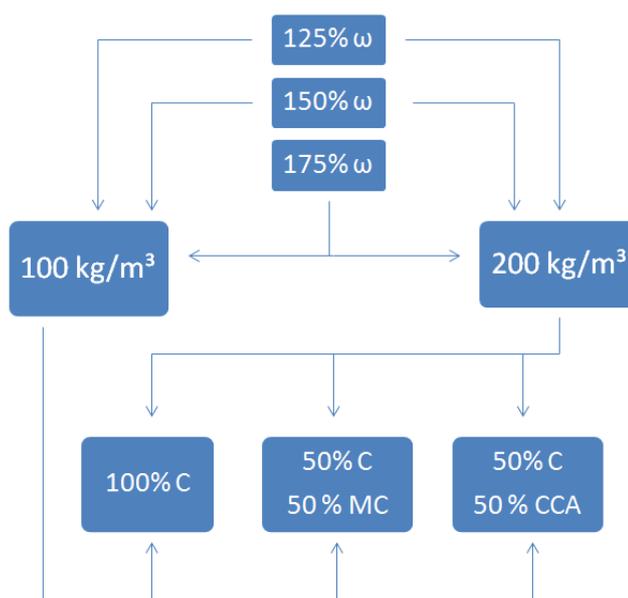
2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho quanto ao procedimento laboratorial:

- a) a moldagem dos corpos de prova foi realizada em laboratório, em condições ideais;
- b) os corpos de prova têm dimensões de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura;
- c) unidades de teste moldadas em recipientes de dimensões de 14 x 14 x 6,5 cm
- d) utilização de prensa hidráulica com capacidade de 100 kN e anéis dinamométricos calibrados com capacidade de 10 kN para os ensaios de tração e 0,6 kN para ensaios de cravação.

Quanto à dosagem de materiais, o trabalho limita-se a experimentos realizados com dois teores pré-determinados de material estabilizante (100 e 200 kg/m³) e três teores de umidade (ω). Para cada combinação entre os teores de material estabilizante e teor de umidade, foram moldados corpos de prova com três tipos de misturas, contendo cal (C), microssílica (MC) e cinza de casca de arroz (CCA), como mostra a figura 1.

Figura 1 – Fluxograma dos corpos de prova moldados



(fonte: elaborado pelo autor)

2.6 HIPÓTESE

Espera-se obter resultados de resistência à tração por compressão diametral e de cravação de base alargada adequados a obras de Engenharia em todas as misturas estudadas, sendo que os melhores resultados deverão ser encontrados para as misturas que tiverem o maior teor de material aglomerante (200 kg/m³) e utilizarem microssílica na mistura.

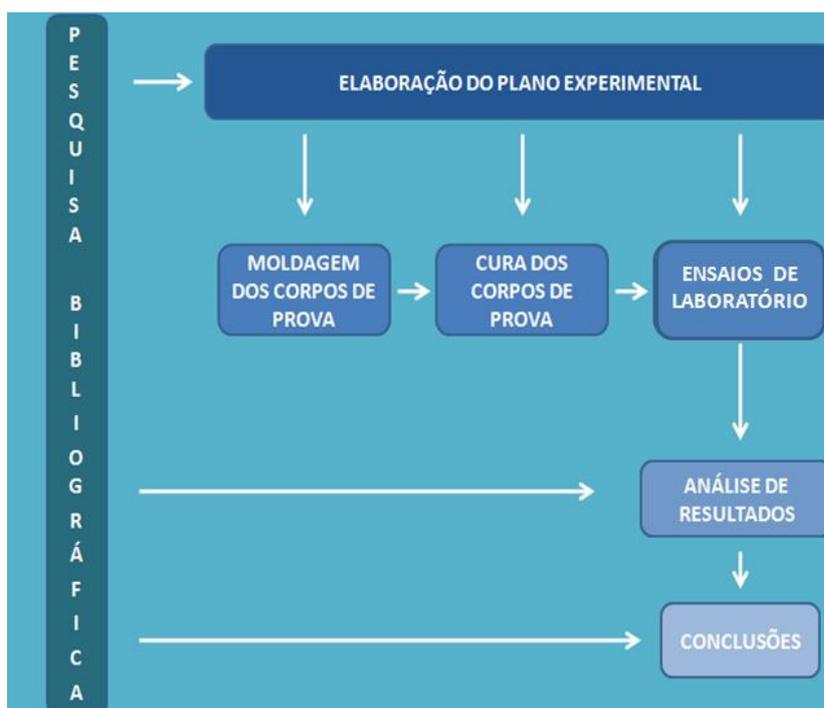
2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através de etapas apresentadas a seguir, representadas na figura 2 e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do plano experimental;

- c) moldagem dos corpos de prova;
- d) cura dos corpos de prova;
- e) ensaios de resistência à tração e à cravação;
- f) análise dos resultados;
- g) conclusões.

Figura 2 – Diagrama de etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

A **pesquisa bibliográfica** baseou-se em trabalhos acadêmicos e artigos científicos que trataram da caracterização individual dos materiais e do seu comportamento ao interagir uns com os outros. Nessa etapa, foi definido o propósito da pesquisa, buscando-se avaliar suas possíveis aplicações na prática de Engenharia. A fim de reunir uma gama considerável de informações sobre a técnica de estabilização de solos e sobre os materiais em estudo, atentou-se primordialmente para:

- a) os mecanismos de estabilização do solo;
- b) as alterações das propriedades do solo quando em contato com o agente cimentante;
- c) o efeito do peso específico e da compactação, tempo de cura e relação vazios/cal dos corpos de prova;

- d) a técnica de preparação dos materiais e moldagem dos corpos de prova;
- e) os valores de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral obtidos de acordo com os materiais utilizados nos trabalhos consultados.

Para nortear a pesquisa, foram definidos os detalhes e os recursos necessários para o desenvolvimento dos ensaios laboratoriais. Para isso elaborou-se um **plano experimental** no qual foram escolhidas as variáveis de estudo, que são:

- a) teor de cal;
- b) teor de cinza de casca de arroz;
- c) teor de microssílica;
- d) teor de umidade do solo;
- e) tempo de cura dos corpos de prova.

A partir daí, desenvolveu-se um programa fatorial em que foram definidos quantos corpos de prova seriam necessários para realizar todas as comparações propostas. Escolheu-se utilizar três tempos de cura para avaliar a evolução dos valores de resistência, dois teores de cal (100% e 50% do teor de material estabilizante) e dois teores de cinza de casca de arroz e microssílica (50% e 0% do teor de material estabilizante), para entender como a mistura se comporta com a adição de material pozolânico e quais as diferenças entre a utilização de uma pozolana ou outra. Para o teor de umidade, escolheram-se três valores de forma que para cada valor há um valor de massa específica aparente seca dependente, podendo-se analisar, dessa forma, a influência do índice de vazios da mistura.

Em laboratório, iniciou-se a **moldagem dos corpos de prova cilíndricos e das unidades de teste destinadas ao ensaio de cravação de base alargada**, dando atenção especial às suas **condições de cura**, a fim de garantir que não houvesse influência de fatores externos e imprevistos. Ao final dos tempos de cura estabelecidos, os corpos de prova moldados foram submetidos aos **ensaios de resistência à tração por compressão diametral e as unidades de teste foram submetidas ao ensaio de cravação de base alargada**. Com os resultados obtidos, elaboraram-se gráficos que mostraram a evolução da resistência com o tempo, bem como seu comportamento em relação ao fator vazios/cal.

Assim, pode-se **analisar os resultados** e acompanhar o acréscimo ou decréscimo das resistências, dependendo do fator que se está levando em consideração. Para **concluir** a

pesquisa, mostrou-se de forma clara e concisa a influência de cada variável de estudo, bem como a importante relação vazios/cal e a eficácia do ensaio de cravação de base alargada. Dessa forma, permitiu-se conhecer uma maneira mais prática de se medir a resistência de um solo estabilizado, possibilitando ao projetista que fizer uso destes resultados, buscar a melhor dosagem para ser aplicada de acordo com a obra.

3 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA GEOTECNIA

A utilização de resíduos vem se mostrando uma alternativa interessante na área de estabilização de solos por três motivos. O primeiro, é que, por se tratar de um resíduo que não possui muita aplicação, pode ser adquirido por valores relativamente baixos. O segundo, é a redução da fração de agente cimentante na mistura, o que diminui o custo de aplicação da técnica. E, o terceiro motivo, é que se trata de materiais provenientes de processos que, na maioria das vezes, desconsideram a possibilidade de utilização/reutilização desses resíduos, o que gera um problema de descarte inadequado, ocasionando impactos ambientais graves. Alguns desses resíduos podem ser provenientes de:

- a) usinas termelétricas: produz a cinza volante, gerada a partir da queima do carvão. Contém partículas muito finas e tendem a apresentar alto grau de toxicidade;
- b) mineração: resíduos derivados do beneficiamento de minérios, produzidos em larga escala e com grande variabilidade. Usualmente, são construídas barragens de disposição, o que torna o processo muito oneroso;
- c) fabricação de silício metálico e ferro-silício: o resíduo gerado é a microsilica ou sílica ativa, que possui partículas finíssimas, prejudicial à saúde pela inalação;
- d) siderurgia: gera a escória de alto forno, já utilizada pela indústria cimentícia. É produzida em larga escala e pode ser reaproveitada;
- e) pedreiras: o resíduo gerado é o calcário em pó, que polui o ar e tem como destino final os aterros sanitários;
- f) agroindústria: gera a casca de arroz que é queimada para geração de energia. Esse processo dá origem à cinza de casca de arroz que atualmente já pode ser incorporada ao cimento, por exemplo.

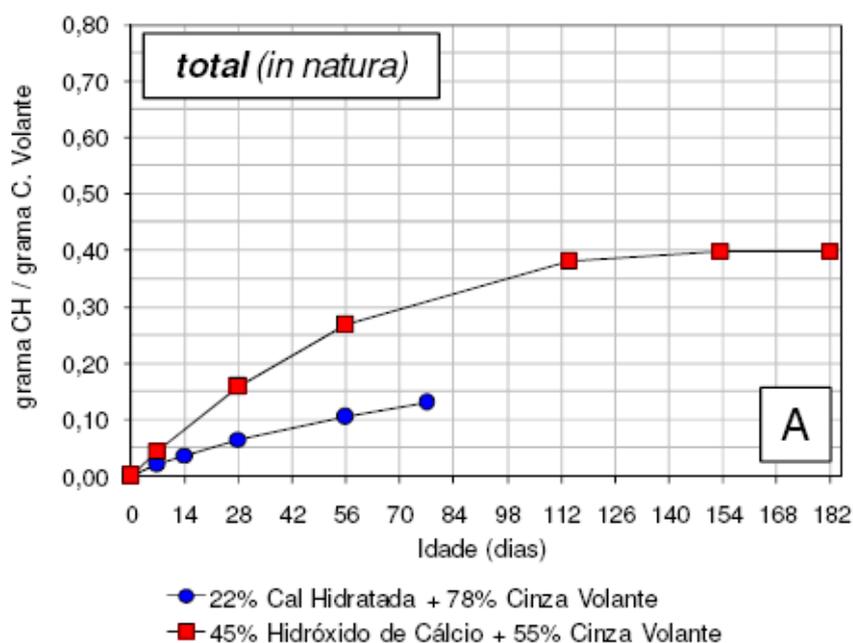
Geralmente, a fração de resíduo que é utilizada para estabilização de solos possui características pozolânicas, como é o caso dos materiais citados anteriormente. Essa propriedade disponibiliza mais material para que as reações ocorram e podem, também, tornar os valores de resistência ainda maiores quando comparados aos que são obtidos apenas com solo e agente cimentante.

As pozolanas podem ser naturais ou artificiais. Contêm um elevado teor de sílica e alumina que na presença de água reage com hidróxido de cálcio de maneira muito efetiva. Segundo

Massazza¹ (1998 apud HOPPE FILHO, 2008, p. 89), pode-se referir à atividade pozolânica como sendo a interação entre a fase vítrea do material e o hidróxido de cálcio, gerando compostos hidratados. Para que as reações ocorram, deve-se observar a quantidade de cal necessária para o processamento da reação e a taxa com que esta é consumida no processo.

Hoppe Filho (2008) realizou testes com uma mistura de cal hidratada e cinza volante com o intuito de demonstrar o consumo de hidróxido de cálcio ao longo do tempo. As figuras 3 e 4, provenientes do trabalho citado, mostram o consumo de hidróxido de cálcio por grama de cinza volante e o consumo de hidróxido de cálcio por grama de fração vítrea encontrada na cinza volante, respectivamente. Percebe-se que a interação desses componentes, no segundo gráfico, resulta em um consumo maior de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, aumentando a quantidade de reações pozolânicas, como já havia sugerido Massazza² (1998 apud HOPPE FILHO, 2008), em seu trabalho.

Figura 3 – Evolução da quantidade de hidróxido de cálcio para cada grama de cinza volante ao longo do tempo

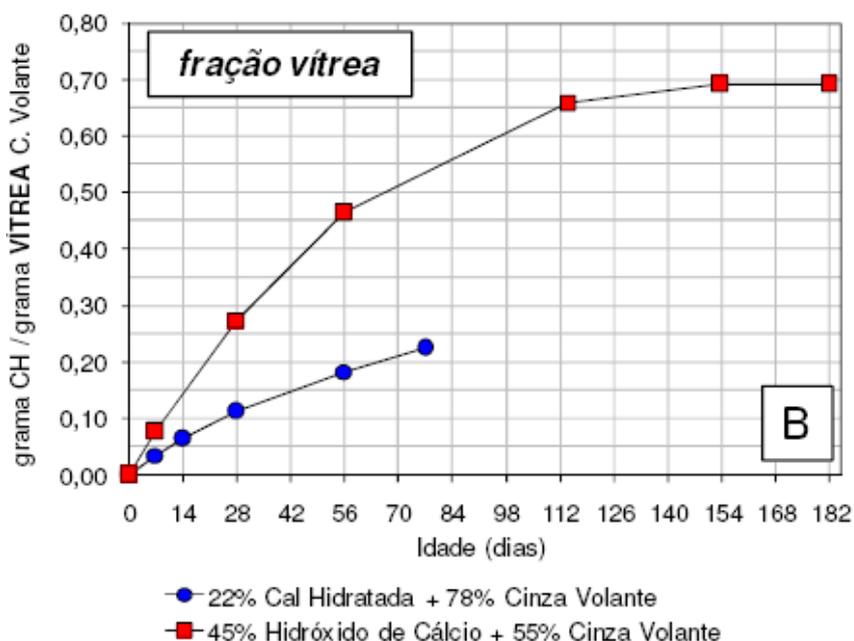


(fonte: HOPPE FILHO, 2008, p. 95)

¹ MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. *Lea's chemistry of cement and concrete*. 4rd ed. Burlington: Elsevier, 1998. p. 471- 635.

² op. cit.

Figura 4 – Evolução da quantidade de hidróxido de cálcio para cada grama de fração vítrea existente na parcela de cinza volante ao longo do tempo



(fonte: HOPPE FILHO, 2008, p. 95)

De acordo com os estudos de Paulon³ (1996 apud MENDES, 2002, p. 29), a microsilica, quando em contato com cimento e agregados, causa uma reação pozolânica que diminui a zona de transição entre os materiais, formando um concreto de alta resistência. Esse fenômeno é proveniente da granulometria da microsilica e de seu alto grau de pozolanicidade. A tabela 1 mostra um comparativo entre a diminuição da zona de transição ao longo do tempo para três situações do concreto:

- a) sem adição de pozolana (pasta pura);
- b) com 20% de microsilica ou sílica ativa;
- c) com 20% de cinza volante.

A figura 5 mostra a zona de transição entre estrutura formada pela reação pozolânica (C-S-H) e o agregado em uma mistura de concreto com microsilica.

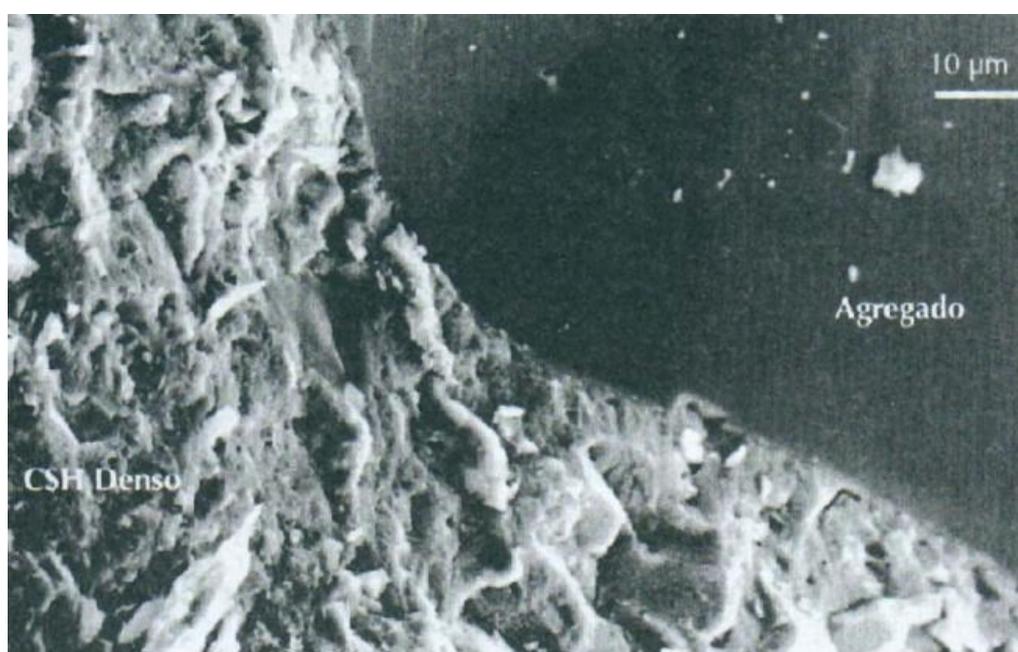
³ PAULON, V. A. A interface entre a pasta de cimento e agregado: influência na durabilidade dos concretos. **Revista Técnica**, São Paulo, v. 6., n. 25, p. 29-31, 1996.

Tabela 1 – Espessura das zonas de transição (em micrômetros)

IDADE (DIAS)	PASTA PURA		20% SILICA ATIVA		20% CINZA VOLANTE	
	Quartzo	Calcário	Quartzo	Calcário	Quartzo	Calcário
3	85	65	100	110	95	98
7	93	80	78	65	69	52
28	108	108	38	41	59	45

(fonte: PAULON⁴, 1996 apud MENDES, 2002, p. 29)

Figura 5 – Interface entre a estrutura de C-S-H denso e o agregado em uma mistura de concreto com microssílica



(fonte: AÏTCIN, 2000, p. 163)

Para o caso do concreto, nota-se que a microssílica, por ser muito fina, preenche facilmente os espaços entre cimento e agregado, o que acaba promovendo a expulsão do excesso de água existente na mistura. Ocorridas algumas reações pozolânicas, após certo tempo, já se pode perceber uma estrutura mais homogênea e coesa, garantindo à mistura uma redução da porosidade e da espessura da zona de transição (MENDES, 2002, p. 27-28).

⁴ PAULON, V. A. A interface entre a pasta de cimento e agregado: influência na durabilidade dos concretos. **Revista Técnica**, São Paulo, v. 6., n. 25, p. 29-31, 1996.

4. VISÃO GERAL SOBRE A TÉCNICA SOLO-POZOLANA-CAL

Segundo Ingles e Metcalf⁵ (1972 apud DALLA ROSA, 2009, p. 29), quando não se tem um material com características apropriadas ao projeto, a técnica solo-cal é a mais indicada a fim de que se obtenha resistência significativa, baixo grau de deformabilidade da camada e condutividade hidráulica e durabilidade adequadas. Genericamente, define-se a mistura solo-cal como sendo o produto da interação entre solo, cal e água.

Na bibliografia consultada, foram adotadas diferentes denominações para cada estágio de alteração do solo em virtude da adição de cal na mistura, tempo necessário para processar as reações, entre outros fatores. No presente trabalho, não é feita distinção de nomenclaturas, pois não faz parte do escopo do trabalho estudar essas etapas e sim, analisar o produto final, com teores de cal e tempos de cura pré-determinados.

De acordo com Dalla Rosa (2009, p. 26), a utilização da técnica de estabilização é bastante ampla. A camada estabilizada pode ser aplicada em diversos casos como, por exemplo: base e sub-base de pavimentos, proteção de taludes contra erosão, reforço de aterros, contenção em escavações, fundações de edificações de pequeno porte, entre outras.

4.1 MATERIAIS CONSTITUINTES DA MISTURA

Usualmente, a mistura estabilizada é composta basicamente de:

- a) solo;
- b) agente cimentante;
- c) material pozolânico;
- d) água.

A seguir, são descritos os materiais listados para que se tome conhecimento das suas propriedades.

⁵ INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilisation**: principles and practice. Sydney: Butterworths, 1972.

4.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa é proveniente de Nova Santa Rita/RS. De acordo com Consoli et al. (1997, p. 217, tradução nossa), que estudou um solo de Canoas/RS com características semelhantes ao estudado neste trabalho, o solo foi caracterizado e constatou-se que é composto de 71,8% de argila, 26,2% de silte e 2% de areia. O teor de material orgânico encontrado foi de 3%, o que comprovou-se que comprometia a trabalhabilidade do solo, uma vez que solos com material orgânico são relativamente difíceis de serem compactados, devido a sua consistência.

De acordo com Consoli et al. (1997), o principal argilo-mineral constituinte é a caulinita e, segundo Ormsby e Kinter⁶ (1973 apud DALLA ROSA, 2009, p. 33), a mistura de um solo cujo principal argilo-mineral é a caulinita com cal cálcica e dolomítica apresenta bons resultados de resistência à compressão simples. A amostra de solo natural usada na caracterização do solo estudado por Consoli et al. (1997) apresentou um Limite de Plasticidade de 48% e um Limite de Liquidez de 86%, sendo que o teor de água *in situ* foi de 59% e o pH medido foi de 3,9.

4.1.2 Microssílica

A microssílica ou sílica ativa é um resíduo gerado a partir da reação do quartzo de alta pureza com carvão, durante a fabricação de silício metálico e ferro-silício. O ferro-silício é utilizado como desoxidante na produção de aço e como elemento de liga de aços e na produção de ferro fundido. Os principais consumidores desses produtos são os setores de siderurgia e fundição. Já o silício metálico tem como principais consumidores o setor de alumínio e a indústria química.

O processo de fabricação de ferro-silício e silício metálico utiliza fornos de arco elétrico que chegam a temperaturas de 2000°C e contêm filtros de tratamento de gases efluentes, chamados **filtros manga**, nos quais a microssílica é captada. A microssílica é um mineral ultrafino, de coloração que varia de branco a cinza, como pode ser verificado na figura 6 (SIDDIQUE; KHAN, 2011, p. 67-68, tradução nossa).

⁶ ORMSBY, W. C.; KINTER, E. B. Effects of Dolomitic and Calcitic Limes on Strength Development in Mixtures with Two Clay Minerals. **Public Roads**, Washington, v. 37, n. 4, p. 149-160, 1973.

Figura 6 – Coloração de microssílicas



(fonte: SIDDIQUE; KHAN, 2011, p. 68)

De acordo com Mendes (2002, p. 22), as características da microssílica podem ser bem variáveis, uma vez que dependem do tipo de liga que é produzida, bem como da sua composição e dosagem. Portanto, materiais adquiridos de diferentes fornecedores, podem apresentar cor, granulometria e composição química díspares entre si.

Turgut (2012, tradução nossa) realizou testes com microssílica, cinza volante e calcário em pó para a produção de tijolos sem o uso de cimento Portland. A microssílica utilizada no trabalho citado foi obtida através de um fornecedor mundial de ferro-silício, a *Elkem Materials (Kristiansand, Noruega)*, sendo que apresenta como propriedades físicas uma densidade de 2,3 e uma superfície específica de 20.000 m²/kg, o que representa um material muito leve. Na tabela 2, podem ser consultadas as propriedades químicas da microssílica utilizada no estudo citado.

Tabela 2 – Propriedades químicas da microssílica

Composição	Teor (%)
SiO ₂	96,7
CaO	1,42
CaO _{livre}	-
MgO	0,21
Al ₂ O ₃	0,15
Fe ₂ O ₃	0,16
SO ₃	-
Na ₂ O	0,22
K ₂ O	0,05
Cl	-

(fonte: adaptada de TURGUT, 2012, p. 362, tradução nossa)

4.1.3 Cinza de Casca de Arroz

A cinza de casca de arroz é um subproduto resultante da queima da casca do arroz para a produção de energia empregada, principalmente, no processo de secagem e beneficiamento dos grãos. Segundo Pouey (2006, p. 12), ao final do processo, a cinza equivale a 20% da casca queimada e contém um alto teor de sílica, bem como algumas impurezas (carbono, potássio, cálcio e sódio), constituindo um material volumoso e altamente poroso.

Segundo Silva⁷ (2012, p. 41), o Brasil está entre os dez maiores produtores mundiais de arroz, sendo que a região Sul se destaca no cultivo do cereal, com 300 usinas de beneficiamento. A partir dessas usinas, consegue-se extrair 1 milhão de toneladas de casca de arroz anualmente.

A utilização da cinza de casca de arroz já foi objeto de diversas pesquisas nas áreas de concreto de alta resistência e estabilização de solos. Segundo Behak (2007), alguns trabalhos como os de Rodríguez (2002)⁸ e Basha et al.(2003)⁹, estudaram a fundo a composição da cinza de casca de arroz em seus trabalhos, como pode ser visto na tabela 3. Segundo Juliano¹⁰ (1985 apud BEHAK 2007), quando submetida à incineração, a casca do arroz passa a conter um teor de sílica de 90 a 96%. Como já abordado, a sílica é o principal componente a reagir com o hidróxido de cálcio, gerando reações pozolânicas.

Conforme Pouey (2006, p. 24), a cinza varia de coloração (do preto ao cinza claro) devido às impurezas, ao tipo e à temperatura de queima. A figura 7 mostra essa diferença de coloração.

⁷ O autor indica que a informação foi retirada de Anuário Brasileiro do Arroz (2011) e não se tem dados mais específicos em relação a esta referência.

⁸ BEHAK (2007) indica que o trabalho é de RODRÍGUEZ, G. , com o título de Influencia de la Incorporación de Ceniza de Cáscara de Arroz Residual em Hormigones de Alto Desempeño y Convencionales. Publicado nas XXX JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 2002, Brasília.

⁹ BASHA, E. A., HASHIM, R., MUNTOHAR, A. S. Effect of the Cement: Rice Husk Ash on the Plasticity and Compaction of Soil. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. Burdick, v. 8, Jun. 2003. Disponível em:<www.ejge.com/2003/Ppr0304/Abs0304.htm>. Acesso em: 18 mar. 2013.

¹⁰ JULIANO, B. O. **Rice: chemistry and technology**. Minneapolis: American Association of Cereal Chemists, 1985.

Tabela 3 – Composição química de algumas cinzas de casca de arroz

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	Basha et al. (2003)	Rodríguez (2002)
Silica (SiO ₂)	93,15	87,20
Óxido de Cálcio (CaO)	0,41	0,55
Óxido de Magnésio (MgO)	0,45	0,35
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	---	1,12
Potássio (K ₂ O)	2,31	3,60
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	0,21	0,16
Alumina (Al ₂ O ₃)	0,21	0,15

(fonte: adaptado de BEHAK, 2007, p. 30)

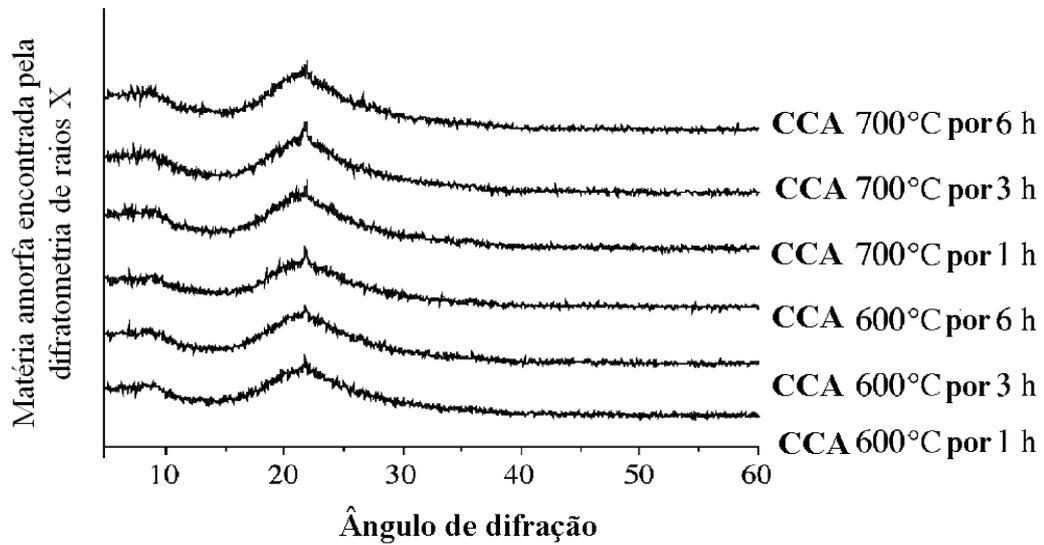
Figura 7 – Coloração das cinzas de casca de arroz



(fonte: POUEY, 2006, p. 144)

Della et al. (2002, tradução nossa) estudou o efeito da temperatura e a duração da queima da casca de arroz para a produção de cinza. Observou-se que há uma redução considerável no teor de SiO₂ amorfo quando há diferenciações do ideal, que seria uma queima a 700°C com duração de 6 h, o que reduz o grau de pozolanidade da cinza. Na figura 8, a difratometria de raios X mostra a quantidade de matéria amorfa e para diferentes temperaturas e durações de queima.

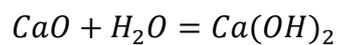
Figura 8 – Difratometria de raios X para CCA em diferentes temperaturas e durações de queima



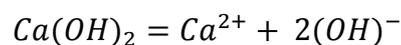
(fonte: adaptado de DELLA et al., 2002, p. 819, tradução nossa)

4.1.4 Cal

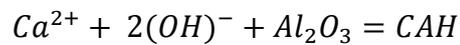
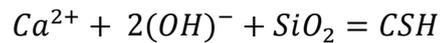
A cal é um dos materiais de construção mais antigos do mundo. Esse material é composto predominantemente por óxido de cálcio e óxido de magnésio e é produto da decomposição térmica (queima ou calcinação) de calcários magnesianos e dolomíticos. A cal viva, utilizada nesse trabalho, quando em contato com a água, sofre a seguinte reação:



Dalla Rosa (2009) descreve que para cales desprovidas de magnésio em sua constituição, quando em contato com a água, sofrem hidrólise a partir da reação:



Segundo *Transportation Research Board*¹¹ (1987 apud DALLA ROSA, 2009, p. 37), é comum que, na presença de água, a cal reaja com a sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3) amorfas, compostos químicos facilmente encontrados em materiais pozolânicos. As reações que ocorrem são:



Os compostos CSH e CAH representam os produtos cimentantes formados após as reações, denominados, respectivamente, de Silicato Hidratado de Cálcio e Aluminato Hidratado de Cálcio. As letras empregadas nas siglas CSH e CAH são abreviações dos elementos químicos encontrados nos produtos formados conforme a convenção: C=CaO; S=SiO₂; A=Al₂O₃ e H=H₂O.

Conforme Thomé (1994, p. 3), uma mistura solo-cal apresenta reações químicas que ocorrem quase que instantaneamente e outras que levam mais tempo para ocorrerem. Além das reações pozolânicas, enfatizadas nesse trabalho, ocorrem outros três tipos de fenômenos que promovem alteração na estrutura do composto:

- a) floculação;
- b) carbonatação;
- c) adsorção química de moléculas de Ca (OH)₂.

Dentre as cales existentes no mercado, um tipo de cal utilizada na pesquisa para estabilização de solos é a cal viva. Na tabela 4, são apresentadas algumas informações sobre esse material, colhidas junto ao fornecedor da cal utilizada no presente trabalho.

¹¹ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization, reactions, properties, design and construction.** Washington: 1987. State of Art Report n. 5.

Tabela 4 – Propriedades da cal viva

Componentes da fórmula	Porcentagem
CaO	53,70%
MgO	38,60%
H ₂ O combinada	1,10%
CO ₂	1,80%
CaCO ₃ total	nd
CO ₃ residual	4,09%
Propriedades	Descrição
Solubilidade	solúvel em baixas concentrações
Estabilidade	estável
Classificação de risco	cáustico
pH	12

(fonte: fornecedor da cal)

4.1.5 Água

Segundo Ingles e Metcalf¹² (1972 apud DALLA ROSA, 2009, p. 36), a utilização de água potável para a moldagem das misturas e para realização dos ensaios laboratoriais é satisfatório, uma vez que se aproxima mais das condições encontradas em campo e é factível, uma vez que em condições reais não seria possível a utilização de água destilada, por exemplo.

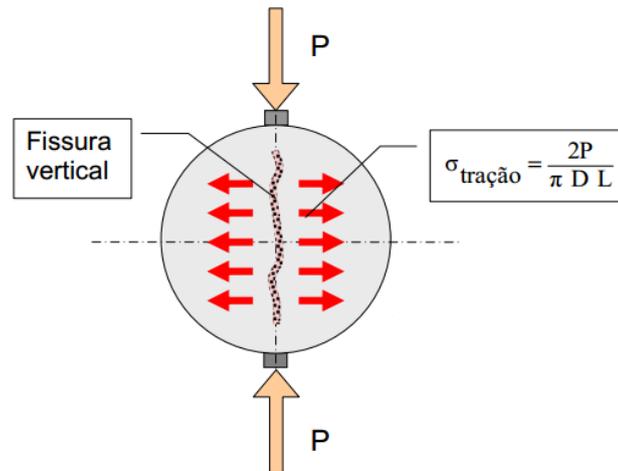
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de compressão diametral, também conhecido como ensaio brasileiro ou ensaio de tração indireta, é uma forma simples de se obter a resistência à tração de um corpo de prova, seja ele de concreto ou de solo-cimento/cal. A seguir, descreve-se um breve histórico do ensaio a fim de embasar sua aplicação e execução.

A NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 1) determina o procedimento de ensaio de tração por compressão diametral e define que a relação comprimento/diâmetro deve estar entre 1 e 2, para corpos de prova de concreto e argamassa. A norma em questão é abordada mais detalhadamente no capítulo 5.

¹² INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilisation**: principles and practice. Sydney: Butterworths, 1972.

Figura 9 – Ruptura do corpo de prova submetido à compressão diametral



(fonte: THOMAZ, 2011, p. 4)

4.3 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DAS MISTURAS SOLO-POZOLANA-CAL

A seguir, são abordados alguns tópicos referentes à alteração das propriedades do solo com a adição de cal e pozolanas, bem como o comportamento da mistura quanto à porosidade, razão vazios/cal e tempo de cura. Esses são parâmetros de suma importância para conhecer o desempenho do solo estabilizado, pois reúnem as principais variáveis de interesse a serem estudadas e analisadas.

4.3.1 Alterações das propriedades do solo com a adição de cal

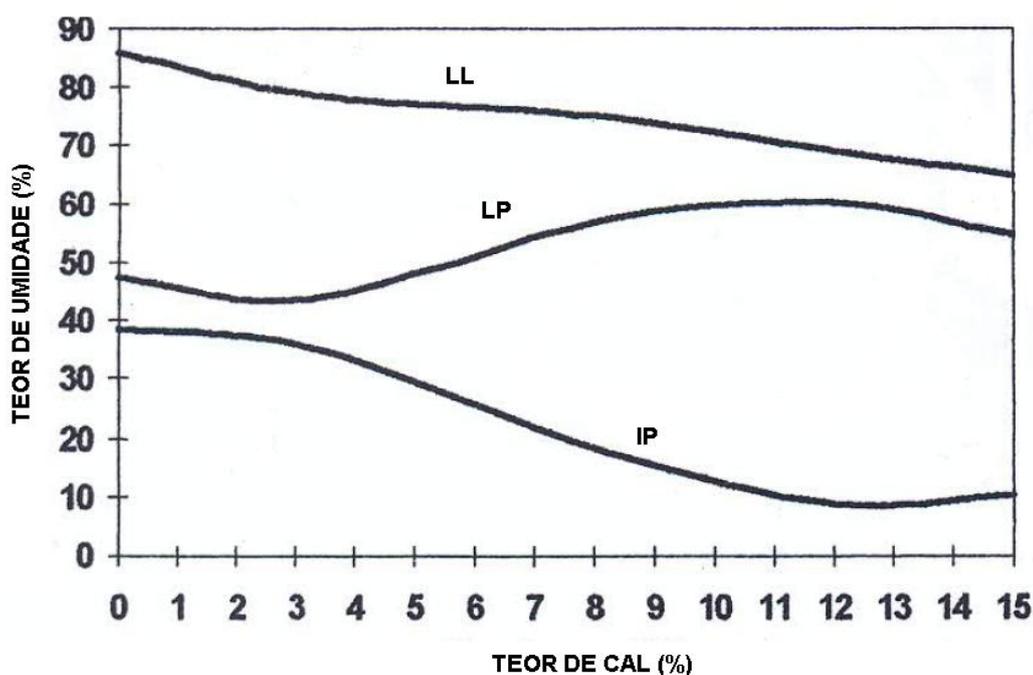
A estabilização de um solo orgânico e altamente compressível depende de mecanismos bastante complexos. Por apresentarem-se saturados, existe uma dificuldade de interação entre as partículas, o que torna o processo de compactação relativamente difícil.

Consoli et al. (1997, tradução nossa) realizaram testes com uma mistura solo-cal a fim de conhecer o comportamento do solo ao interagir com alguns teores de cal. Um ensaio realizado foi o de granulometria, no qual o material mostrou uma diminuição significativa na fração de argila com o aumento do teor de cal. Sem acréscimo de cal, a fração de argila no solo era de 71,8%. Ao adicionar teores de cal de 5%, 9% e 13%, houve uma redução dessa fração para 58,1%, 41,9% e 28%, respectivamente. Devido a essas variações, o comportamento da

mistura solo-cal pode ser classificado de duas maneiras pelos critérios da ASTM D 2487 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2006). Com 5% de cal, a mistura deve ser classificada como uma argila orgânica altamente plástica e como silte altamente plástico com 9% e 13% de cal.

Outros ensaios importantes realizados por Consoli et al. (1997, tradução nossa) foram os de determinação dos limites de Atterberg. Esses ensaios nos permitem conhecer as mudanças entre os estados de consistência do material através de conceitos amplamente difundidos na Mecânica dos Solos como o Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP). A figura 10 mostra a variação desses parâmetros com o aumento de teor de cal na mistura.

Figura 10 – Variação dos Limites de Atterberg com teor de cal

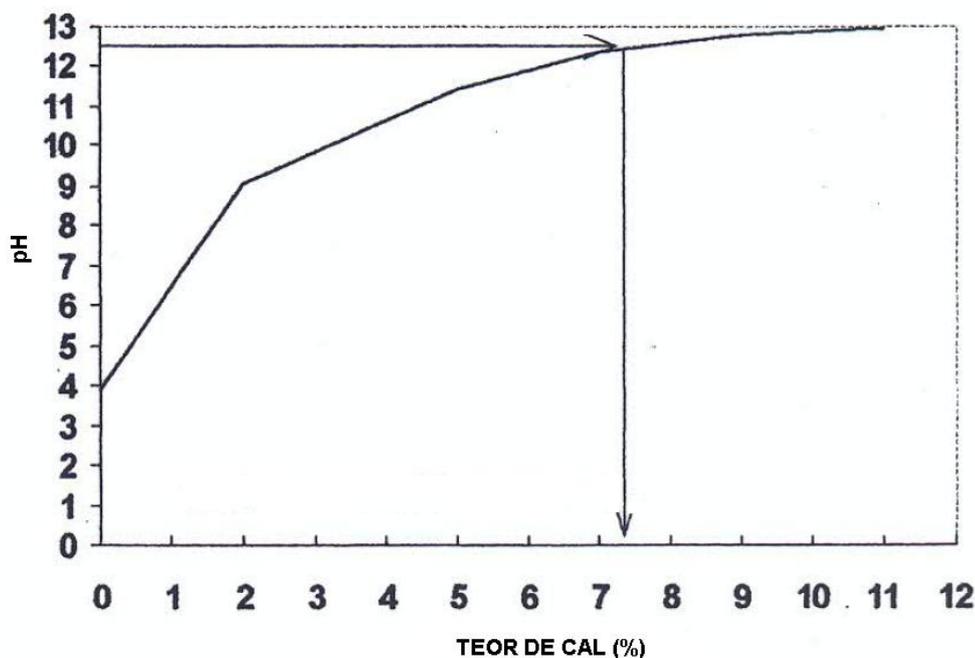


(fonte: CONSOLI et al., 1997, p. 218, tradução nossa)

Inicialmente, o Limite de Plasticidade apresenta uma redução, o que significa uma perda de plasticidade e a dificuldade de moldagem das misturas com até 4% de cal. Com porcentagens maiores de cal percebe-se o aumento desse limite que representa condições mais favoráveis para o trato do material, chegando ao pico no teor de 11% de cal. O Limite de Liquidez diminui constantemente com a adição de cal e o Índice de Plasticidade tem o seu valor mais

baixo quando são acrescidos 13% de cal. Assim, deve-se ter um cuidado maior com a adição de água na mistura, uma vez que esse parâmetro representa a quantidade máxima de água que pode ser adicionada a fim de que a consistência da mistura se mantenha plástica. A figura 11 apresenta a variação de pH do solo com a adição de cal.

Figura 11 – Efeito da porcentagem de cal no pH



(fonte: EADES; GRIM¹³, 1966 apud CONSOLI et al., 1997, p. 218, tradução nossa)

Consoli et al. (1997, p. 222, tradução nossa) analisam duas teorias que definem o teor de cal mínimo necessário para a estabilização do solo:

- a) o método do pH de Eades e Grim¹⁴ (1966 apud CONSOLI et al., 1997, p. 220, tradução nossa);
- b) o método do ponto de fixação da cal de Hilt e Davidson¹⁵ (1960 apud CONSOLI et al., 1997, p. 220, tradução nossa).

O primeiro método citado considera que se deve atingir um valor de pH da mistura igual a 12,4 para que o solo comece a ser estabilizado. Esse valor garante que a sílica se solubilize,

¹³ EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilisation. **Highway Research Board Record**, Washington, D. C., n. 139, p. 61-72, 1966.

¹⁴ op. cit.

¹⁵ HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. **Lime fixation in clayey soils**. Washington, D. C.: National Research Council, 1960. Highway Research Board Bulletin, n. 262.

fazendo com que as reações pozolânicas ocorram e formem silicato de cálcio hidratado. No caso do solo orgânico estudado, esse pH é atingido com um teor de cal igual a 7,3%, como pode-se perceber na figura 11 (EADES; GRIM¹⁶, 1966 apud CONSOLI et al., 1997, p. 220, tradução nossa).

Já para o segundo método, deve-se observar a figura 10. O pico da curva do Limite de Plasticidade da mistura se dá com um teor de 11% de cal e indica que é nesse momento que o solo passa a ganhar resistência com a adição de cal. Esse ponto é fixado como sendo o teor de cal que melhora a trabalhabilidade da mistura, garantindo o início das reações (HILT; DAVIDSON¹⁷, 1960 apud CONSOLI et al., 1997, p. 220, tradução nossa).

Segundo Consoli et al. (1997, p. 222, tradução nossa), conclui-se a partir das análises que o método do pH não representa um método garantido para o caso estudado, pois subestima o teor de cal mínimo necessário para a estabilização do solo orgânico. Já o método do ponto de fixação da cal mostra-se compatível com resultados encontrados em ensaios de resistência à compressão simples (q_u) realizados para 90 dias de cura no estudo realizado, o que mostra que o método é adequado. O valor proveniente do segundo método foi de 11% de cal para estabilizar a mistura, portanto, os valores de teste devem ser iguais ou superiores a esse valor para que ocorra a estabilização.

4.3.2 Alterações das propriedades da mistura solo-cal com a adição de material pozolânico

Segundo Dalla Rosa (2009, p. 51-52), o material artificialmente cimentado deve ser considerado um novo material com características que diferem totalmente das características individuais e do comportamento mecânico de cada componente da mistura. Por esse motivo, é importante conhecer as interações entre os materiais, principalmente as reações pozolânicas que acontecem na mistura e os efeitos que acarretam.

Nos gráficos do estudo realizado pela autora citada, pode-se analisar a variação do teor de cinza volante de 0, 12,5 e 25% para o tempo de cura de 90 dias. Além do tempo de cura,

¹⁶ EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilisation. **Highway Research Board Record**, Washington, D. C., n. 139, p. 61-72, 1966.

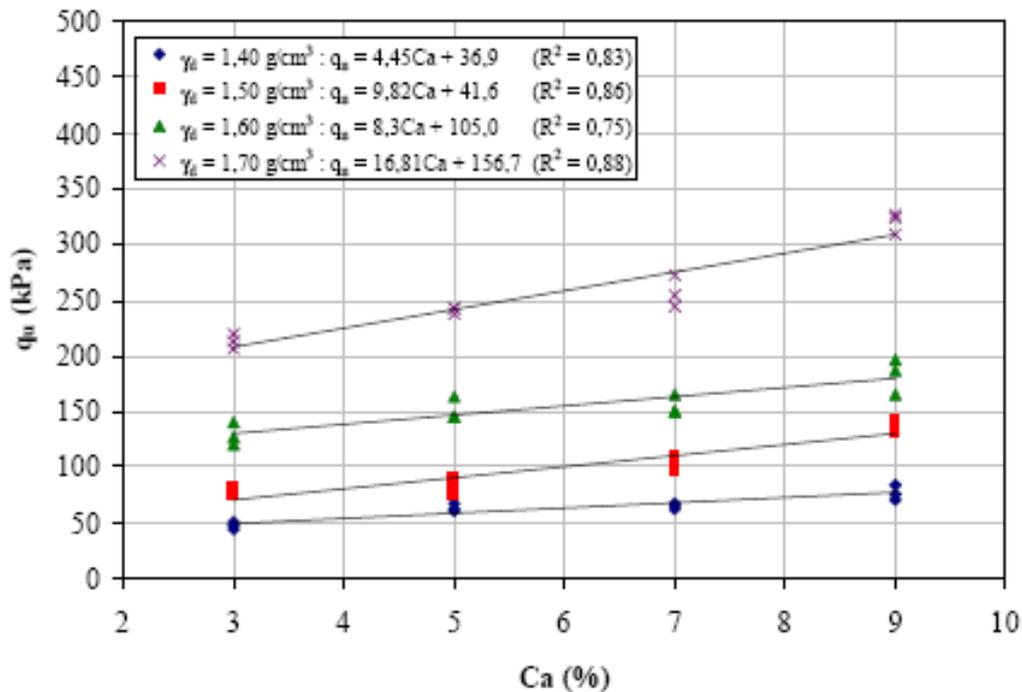
¹⁷ HILT, G. H.; DAVIDSON, D.T. **Lime fixation in clayey soils**. Washington, D. C.: National Research Council, 1960. Highway Research Board Bulletin, n. 262.

também se manteve constante o teor de umidade que foi de 14% para todos os corpos de prova cujos resultados compõem as curvas.

As figuras 12 a 14 mostram que ocorre o aumento linear da resistência à compressão simples (q_u) com o aumento do teor de cal. Pode-se perceber que a magnitude de q_u aumenta consideravelmente em relação ao aumento do teor de cinza volante.

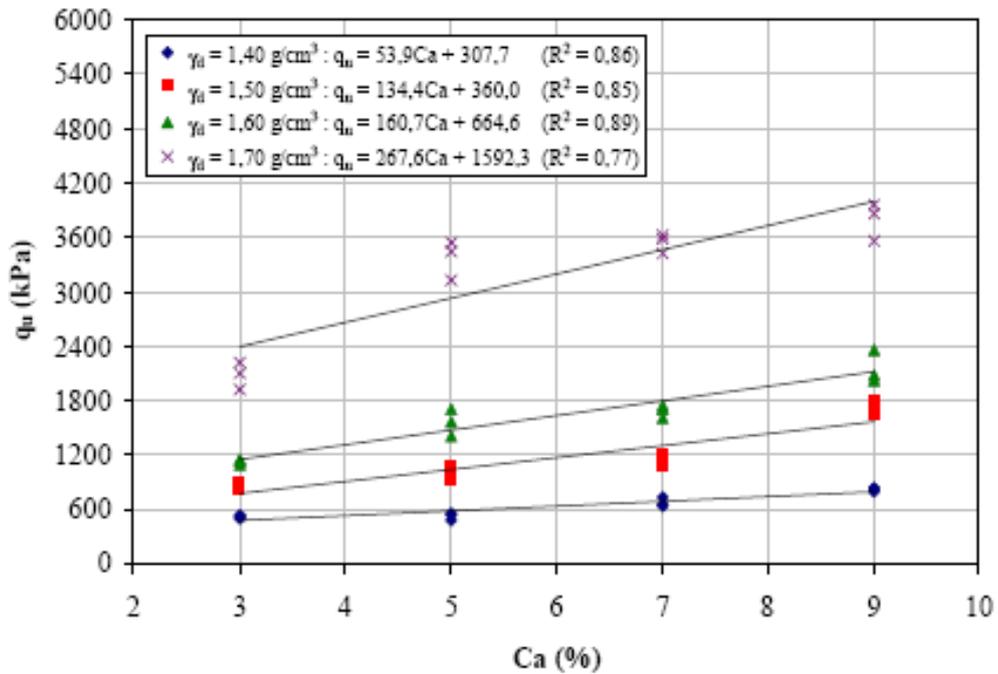
A figura 13, por exemplo, mostra a curva de corpos de prova com $\gamma_d=1,4 \text{ g/cm}^3$ começando em um valor de resistência a compressão simples próximo a 600 kPa, limite este que a figura 12, que apresenta os resultados de corpos de prova sem acréscimo de cinza volante, não alcança nem com os corpos de prova de maior γ_d estudados. Comparando as figuras 13 e 14, pode-se observar que o que ocorre mais nitidamente para as curvas de maior γ_d , é que o valor de resistência adquirido praticamente dobra com o dobro do teor de cinza volante.

Figura 12 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal dos corpos de prova de 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias



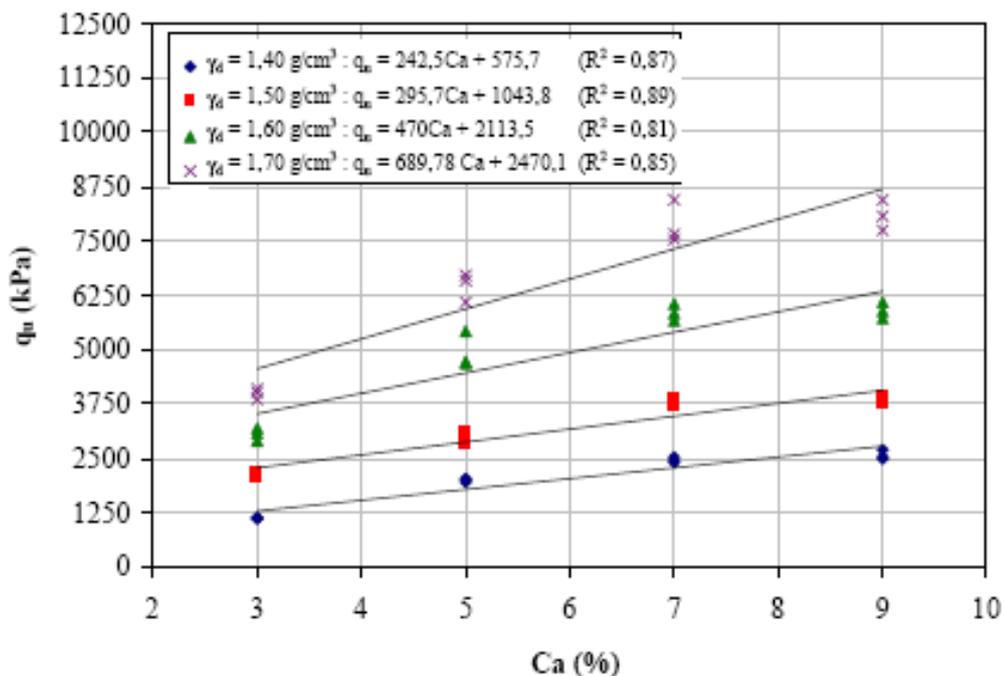
(fonte: DALLA ROSA, 2009, p. 80)

Figura 13 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal dos corpos de prova de 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias



(fonte: DALLA ROSA, 2009, p. 84)

Figura 14 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal dos corpos de prova de 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias

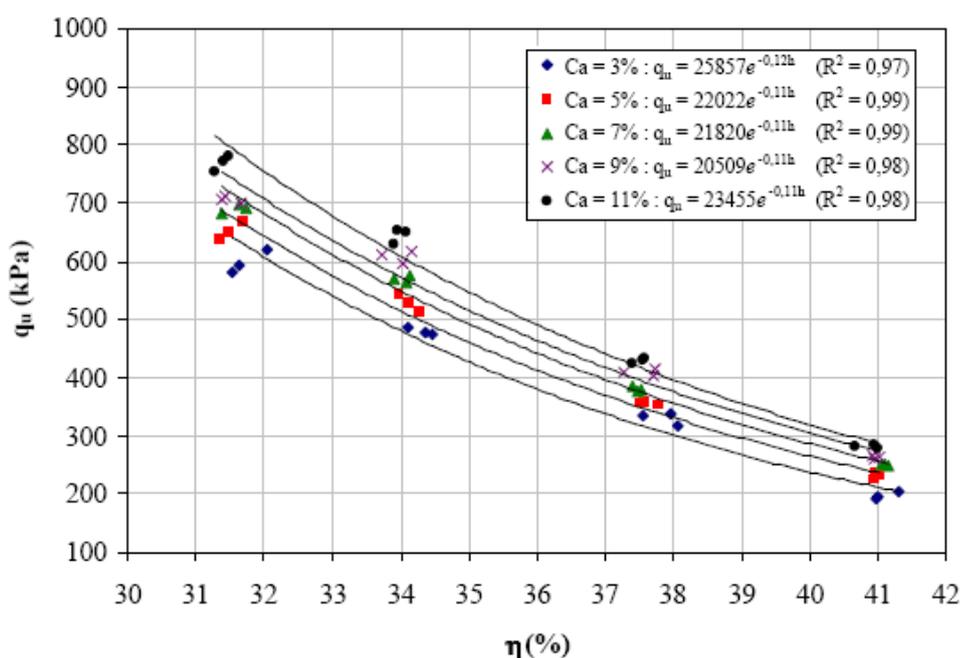


(fonte: DALLA ROSA, 2009, p. 89)

4.3.3 Comportamento da mistura solo-pozolana-cal com a porosidade

Lopes Junior (2007, p. 71) realizou um estudo completo sobre o comportamento de solos com a adição de cal. Na figura 15, são mostradas as curvas obtidas para diferentes teores de cal, mantendo o teor de umidade constante ($\omega=14\%$), quando se relaciona a resistência à compressão simples com a porosidade (η).

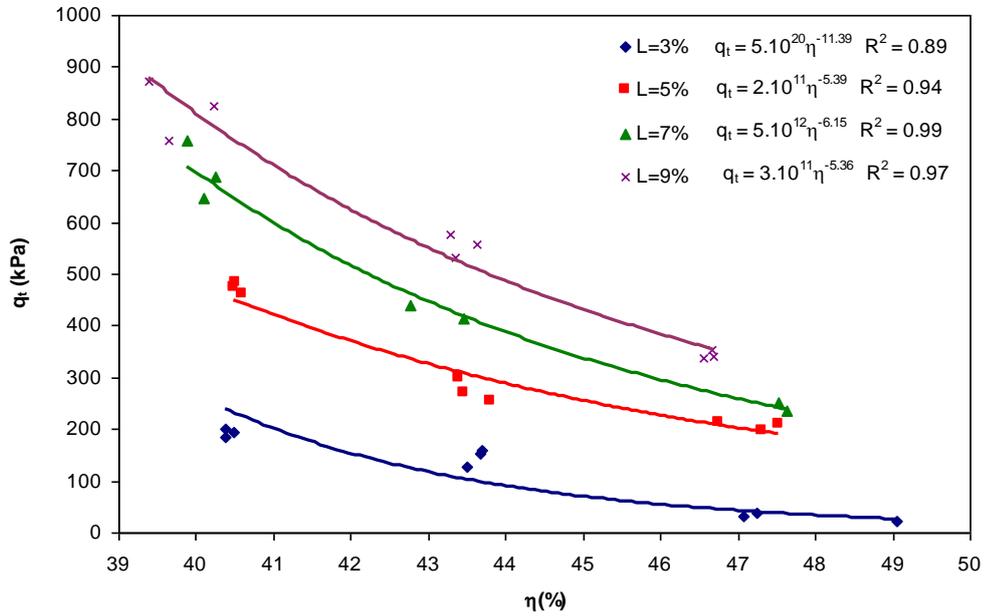
Figura 15 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do solo-cal com 28 dias de cura



(fonte: LOPES JUNIOR, 2007, p. 71)

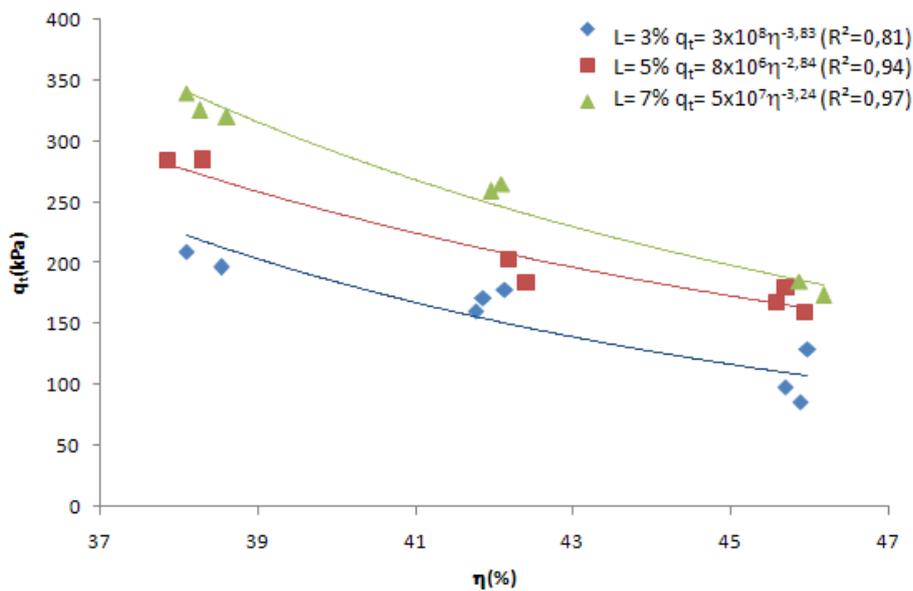
Consoli et al. (2011, p. 6, tradução nossa) e Silvani (2013, p. 61) encontraram um comportamento semelhante quando relacionaram porosidade à resistência à tração por compressão diametral (q_t), como pode ser observado nas figuras 16 e 17. De acordo com a evolução das curvas observadas nos dois gráficos, pode-se perceber que o aumento de η da mistura resulta em um decréscimo exponencial de q_u e q_t , o que pode ser explicado pelo fato de que o aumento de η na mistura compactada afasta as partículas dos materiais, prejudicando as reações.

Figura 16 – Variação da resistência à tração na compressão diametral em relação à porosidade de um silte inorgânico de baixa plasticidade misturado a cal com 28 dias de cura



(fonte: CONSOLI et al., 2011, p. 86)

Figura 17 – Variação da resistência à tração por compressão diametral em relação à porosidade dos corpos de prova curados a 20°C.

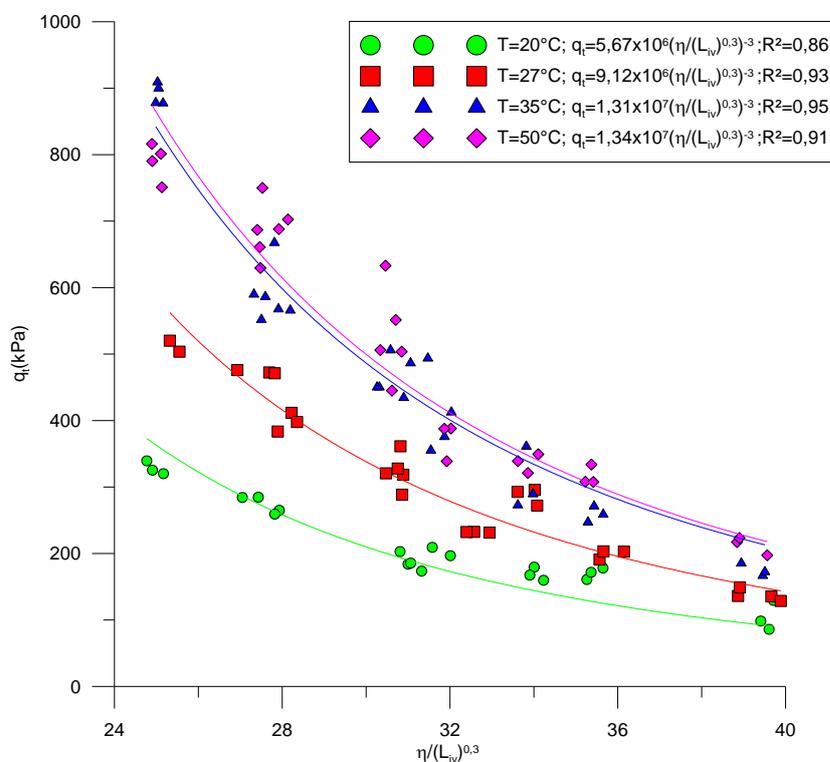


(fonte: SILVANI, 2013, p. 62)

4.3.4 Comportamento da mistura solo-pozolana-cal de acordo com a razão vazios/cal

A razão vazios/cal ou η/C_{av} é uma expressão que traduz o envolvimento entre dois fatores: a porosidade da mistura e o teor volumétrico de cal utilizado. Na mistura, os dois efeitos agem e se contra-balançam. Por isso a necessidade de encontrar uma relação que expresse os dois fatores. Para isso, a taxa de crescimento/decrescimento da resistência deve se tornar compatível e a melhor maneira de expressar essa razão é através de uma potência. Silvani (2013, p. 84) estudou a variação da razão vazios/cal para corpos de prova com 28 dias de cura e diferentes temperaturas (20, 27,35 e 50°C), tanto para resistência à tração por compressão diametral quanto para resistência à compressão simples. Os resultados tiveram a mesma tendência para os dois tipos de ensaios realizados, sendo que a razão vazios/cal foi ajustada à potência 0,3 para os dois gráficos. Na figura 18, estão representadas as curvas obtidas no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Figura 18 – Variação na resistência a tração na compressão diametral pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para diferentes temperaturas

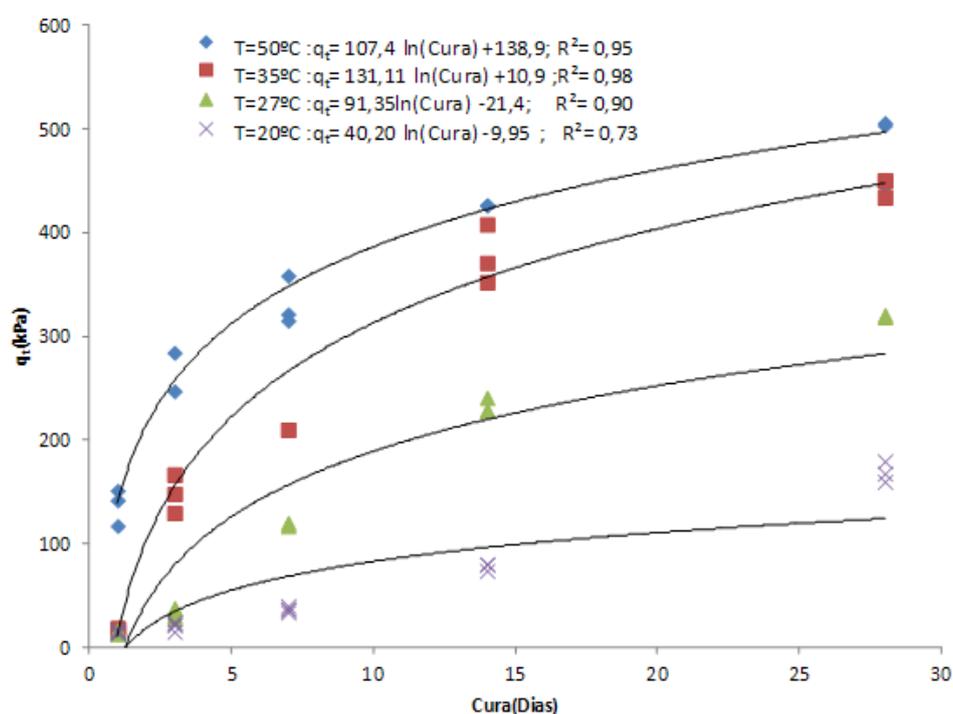


(fonte: SILVANI, 2013, p. 90)

4.3.5 Comportamento da mistura solo-pozolana-cal com o tempo de cura

Segundo Silvani (2013, p. 93), para ensaios de tração à compressão diametral, a resistência à tração aumenta mais significativamente até os 7 dias e após esse período, cresce a uma taxa menor, tendendo à estabilização. A figura 19 mostra, para diferentes temperaturas de cura, o que ocorre com q_t à medida que transcorre o tempo de cura. Nota-se que as curvas têm o mesmo comportamento, quando ajustadas a curvas logarítmicas.

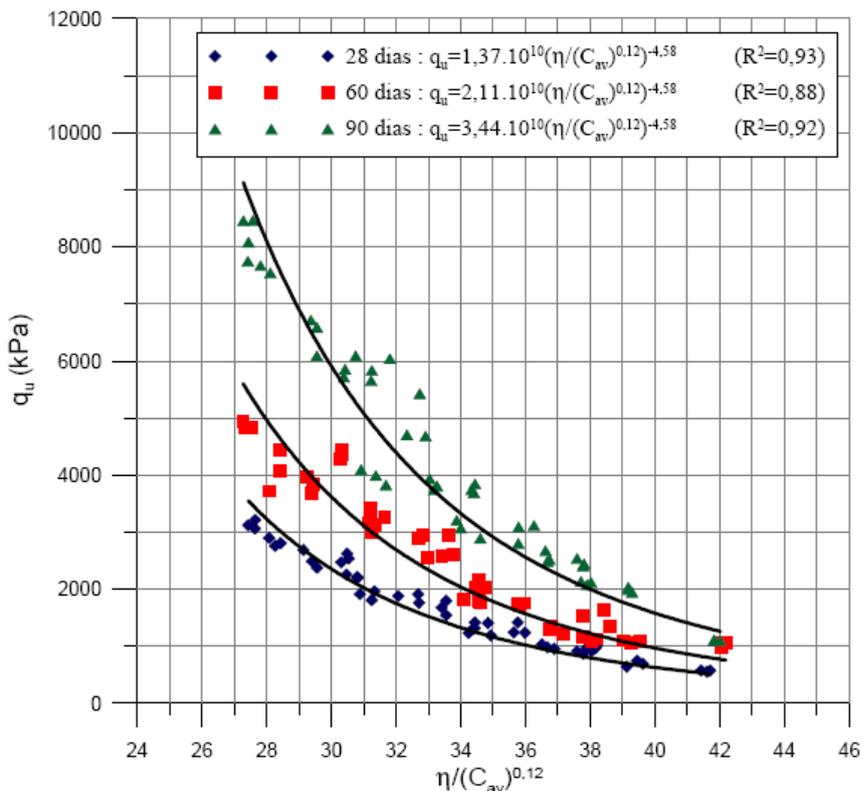
Figura 19 – Avaliação do aumento da resistência à tração por compressão diametral em relação ao tempo de cura



(fonte: SILVANI, 2013, p. 81)

De acordo com as análises realizadas por Dalla Rosa (2009, p. 147-149), os resultados obtidos para as resistências à compressão simples em relação a η/C_{av} mostram que as curvas para diferentes tempos de cura variam de forma exponencial para os teores de cinza volante estudados. Segundo a autora, e como pode ser percebido na figura 20, os valores de resistência aumentam consideravelmente com o tempo de cura. Isso se deve às reações pozolânicas envolvidas no processo que envolve solo, cal e cinza volante para esse caso. Essas reações podem ser bastante lentas, o que explica o aumento de resistência com o tempo e não só com a quantidade de cal ou porosidade da mistura compactada.

Figura 20 – Efeito do tempo de cura nos corpos de prova com 25% de cinza volante ensaiados com 28, 60 e 90 dias de cura

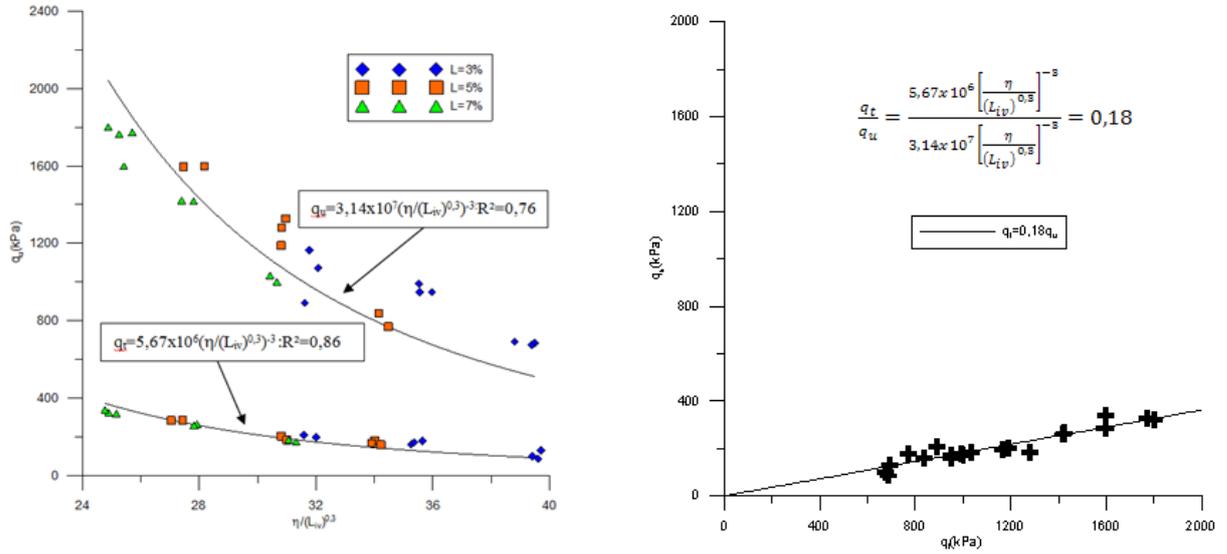


(fonte: DALLA ROSA, 2009, p. 149)

4.3.6 Correlação entre os ensaios de tração por compressão diametral e compressão simples

Silvani (2013, p. 92-97) aborda a correlação entre os dois ensaios realizados em seu trabalho: tração por compressão diametral e compressão simples. Através da análise realizada, a autora conclui que o resultado independe da relação porosidade/teor volumétrico de cal, uma vez que dividindo as equações obtidas para q_t e q_u , se obtém uma constante, o que é comprovado pelo gráfico que relaciona os dois ensaios. Na figura 21, são mostrados dois gráficos que ilustram a situação descrita que, no trabalho citado, correspondem a corpos de prova compostos de misturas de areia de Osório/RS, cal e cinza volante, moldados a 20°C.

Figura 21 – Demonstração da correlação entre ensaios de tração por compressão diametral e compressão simples



(fonte: SILVANI, 2013, p.93-94)

5 PLANO EXPERIMENTAL

O desenvolvimento do trabalho foi realizado em duas etapas. A primeira contempla a escolha dos materiais utilizados no trabalho e as dosagens a serem empregadas e a segunda determina a forma de execução dos ensaios de laboratório.

Para os materiais utilizados na pesquisa, foram realizados ensaios de granulometria no Laboratório de Materiais Cerâmicos (Lacer) através do equipamento Cilas 1180, que segue a ISO¹⁸ 13320/2009. Para a obtenção do peso específico real dos grãos, utilizou-se a técnica descrita na NBR 6508 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984a).

Definidos os materiais e as dosagens, foram estabelecidas as variáveis a serem analisadas na pesquisa com base na bibliografia estudada. Escolheram-se as variáveis de modo a adequá-las a linha de pesquisa desenvolvida pela área de melhoramento/estabilização de solos desenvolvida pela universidade, buscando obter relações de modo a se chegar a uma resposta final do tipo q_t (resistência à tração por compressão diametral) x η/C_{iv} (relação vazios cal) e q_b (resistência à cravação de base alargada) x η/C_{iv} (relação vazios cal), sem deixar de analisar todos os resultados intermediários.

5.1 MATERIAIS

5.1.1 Solo

O solo utilizado no experimento é proveniente de Nova Santa Rita/RS. Na figura 22, é mostrada a localização de onde a amostra de solo foi removida. De acordo com a classificação de Karlsson e Hansbo¹⁹ (1989 apud HARTLÉN; WOLSKI, 1981, p. 20, tradução nossa), apresentada na tabela 5, se trata de um solo medianamente orgânico, como comprovado pelo ensaio de perda ao fogo realizado no Lacer, que indicou um teor de 11,29% de matéria orgânica. Esse ensaio consiste em submeter uma determinada massa de solo a variações

¹⁸ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320**: particle size analysis – laser diffraction methods. Geneva, 2009.

¹⁹ KARLSSON, R.; HANSBO, S. **Soil Classification and Identification**: Byggningsrådet. Gothenburg: Swedish Geotechnical Soc., 1981.

crecentes de temperatura até atingir 900°C, em um período de tempo padronizado. O teor matéria orgânica é determinado em forma percentual por diferenças de massa antes e após a realização do processo.

Figura 22 – Localização do ponto de retirada da amostra de solo orgânico em Nova Santa Rita/RS



(fonte: elaborado pelo autor)

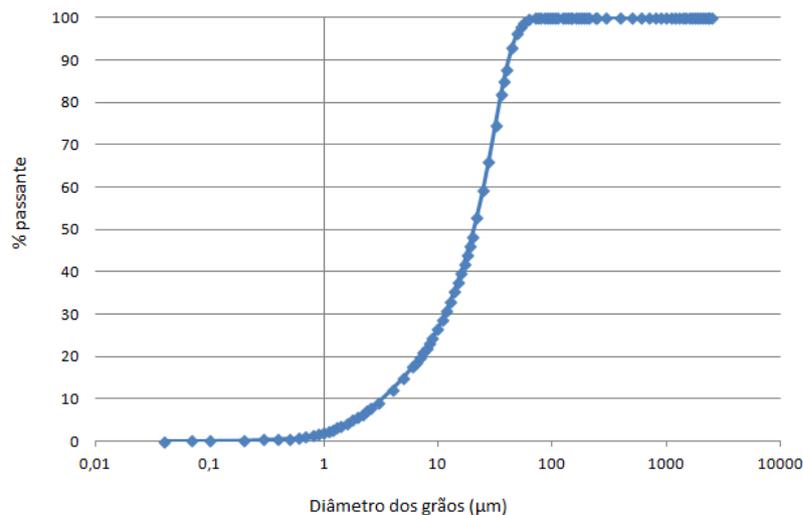
Tabela 5 – Classificação do solo com base no teor de matéria orgânica

Tipo de Solo	Teor de MO por peso (%) de material seco (< 2 mm)
Solo pouco orgânico	2 a 6
Solo medianamente orgânico	6 a 20
Solo altamente orgânico	> 20

(fonte: KARLSSON; HANSBO²⁰, 1989 apud HARTLÉN; WOLSKI, 1996, p. 20, tradução nossa)

Através dos procedimentos descritos na NBR 6459 (ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 1984b) e na NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 1984c), foram realizados os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, respectivamente. Com os ensaios citados, obteve-se LL= 58%, LP= 35% e IP= 23%. Através desses índices e da granulometria do material pode-se, então, classificar o solo como um silte orgânico de média e alta plasticidade, de acordo com a classificação de solos indicada pela ASTM D 2487 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2006). A massa específica real dos grãos resultou em 2,55 g/cm³ e o diâmetro médio dos grãos ficou em torno de 21,93 µm, como pode ser visto na figura 23.

Figura 23 – Granulometria do solo



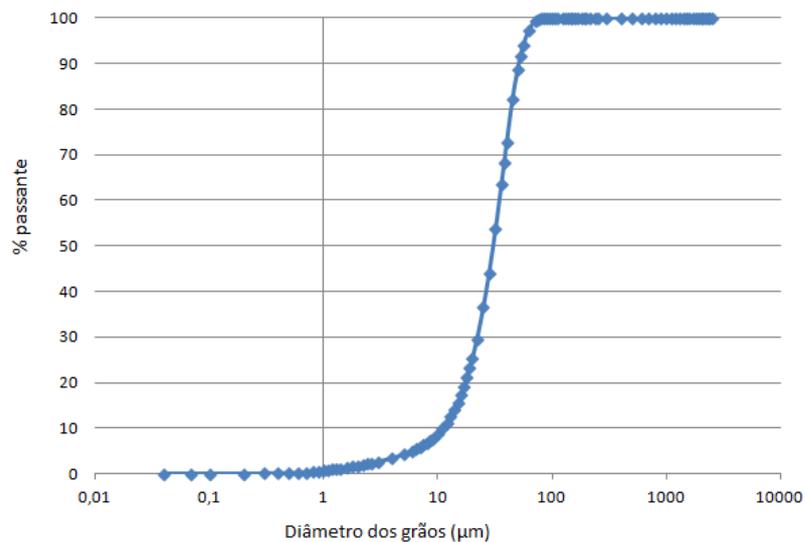
(fonte: elaborado pelo Lacer)

²⁰ KARLSSON, R.; HANSBO, S. **Soil Classification and Identification**: Byggnadsforskningrådet. Gothenburg: Swedish Geotechnical Soc., 1981.

5.1.2 Cal

A cal viva usada nos experimentos foi comprada por um fornecedor localizado em Porto Alegre/RS. A massa específica real dos grãos medida ficou em torno de $2,65 \text{ g/cm}^3$ e o diâmetro médio dos grãos é de $31,05 \mu\text{m}$, como pode ser observado na figura 24.

Figura 24 – Granulometria da cal

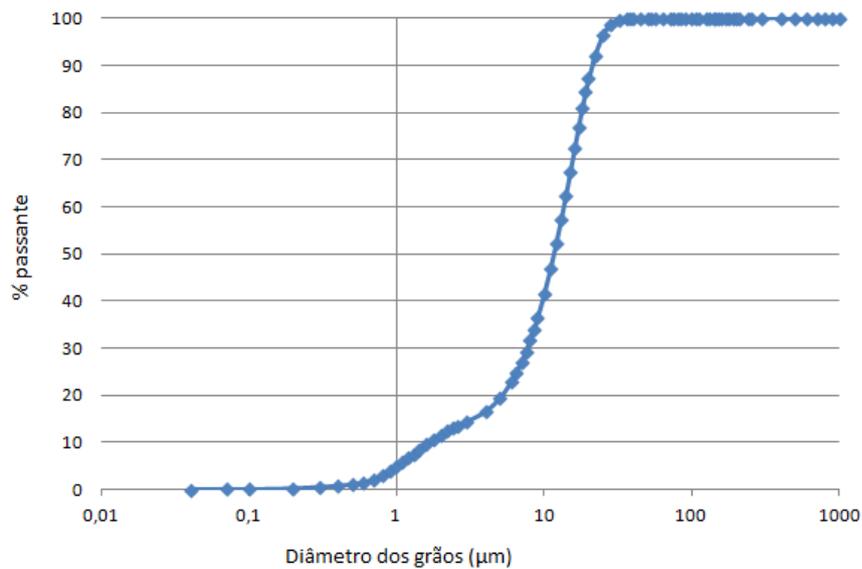


(fonte: elaborado pelo Lacer)

5.1.3 Microssílica

A microssílica (MC) foi o único material obtido fora do estado. Por possuir uma granulometria majoritariamente fina, tem facilidade de reagir com os outros materiais da mistura, como pode ser visto no ensaio de granulometria da figura 25, em que se obteve um diâmetro médio de partículas de $11,78 \mu\text{m}$. O ensaio de massa específica real dos grãos resultou $2,38 \text{ g/cm}^3$;

Figura 25 – Granulometria da microssílica

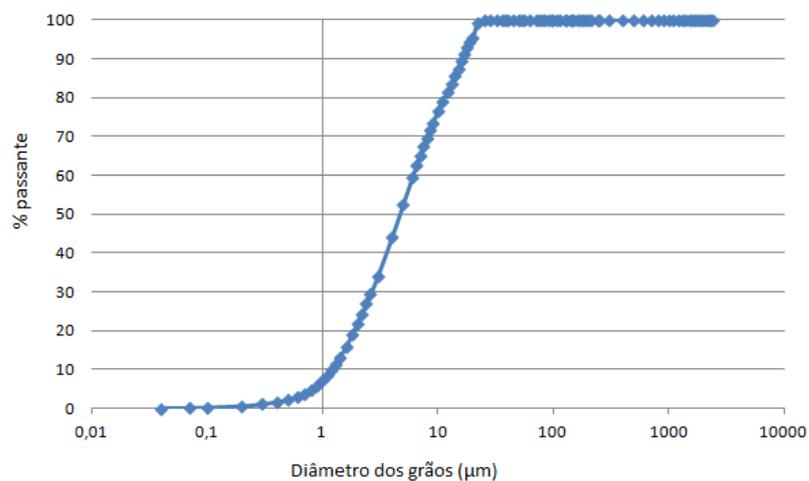


(fonte: elaborado pelo Lacer)

5.1.4 Cinza de Casca de Arroz

A cinza de casca de arroz (CCA) foi obtida através de uma indústria localizada no interior do estado do Rio Grande do Sul. Assim, como a microssílica, a cinza de casca de arroz possui partículas com diâmetro pequeno, em torno de 6,77 μm, como demonstrado na figura 26. Para o ensaio de massa específica real dos grãos, se obteve 3,93 g/cm³.

Figura 26 – Granulometria da Cinza de Casca de Arroz



(fonte: elaborado pelo Lacer)

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Determinação das dosagens

Foi determinada a moldagem de corpos de prova com teores pré-determinados de material estabilizante, ou seja, com 100 e 200 kg/m³. Para cada uma dessas quantidades de material estabilizante adicionadas serão considerados:

- a) 3 valores de teor de umidade do solo;
- b) 2 teores de cimento;
- c) 1 teor de pozolana;

Dessa forma, foi realizada a moldagem de corpos de prova com apenas cal, alcançando 100% do teor de material estabilizante e corpos de prova com 50% de cal e 50% de pozolana. As combinações estão indicadas na tabela 6.

Tabela 6 – Dosagens estabelecidas

Para os teores de material estabilizante de 100 e 200 kg/m ³			
% aglomerante	% pozolana	% teor de umidade	Tempo de cura (dias)
100	0	125	14
			28
			56
		150	14
			28
			56
		175	14
			28
			56
Para os teores de material estabilizante de 100 e 200 kg/m ³			
% aglomerante	% pozolana	% teor de umidade	Tempo de cura (dias)
50	50	125	14
			28
			56
		150	14
			28
			56
		175	14
			28
			56

(fonte: elaborado pelo autor)

5.2.2 Preparação das misturas e moldagem dos corpos de prova

Os ensaios de compressão diametral utilizaram corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Para tanto, a confecção dos corpos de prova foi realizada através de pesagem, mistura, moldagem e acondicionamento dentro dos moldes pelo tempo de cura determinado.

Para dar início à moldagem dos corpos de prova, houve a verificação do teor de umidade natural do solo acondicionado.. Esse procedimento necessitou ser realizado no dia anterior à moldagem, pois se retirou uma amostra de solo natural com uma cápsula, mediu-se a massa do solo juntamente com massa da cápsula e o conjunto foi colocado em uma estufa para secagem. Após, mediu-se novamente a massa do conjunto e calculou-se a umidade em que o solo se encontrava. Conhecendo o valor da umidade natural, que ficava em torno de 90%, calculou-se a quantidade necessária para alcançar 125%, 150% e 175% de umidade. A partir daí, foram medidas as quantidades necessárias de cal, microssílica e cinza de casca de arroz com precisão de 0,01g. Passou-se, então, à mistura dos materiais e à moldagem dos corpos de prova. Por se tratar de um material que apresenta grande dificuldade de compactação por meio de molde tripartido, as unidades de teste foram moldadas da seguinte forma:

A mistura foi colocada aos poucos dentro do molde, caracterizando em torno de 6 camadas de forma que cada camada sofreu acomodação por meio de cerca de 12 golpes e teve parte dos vazios expulsos através da cravação de um palito, contabilizando 15 cravações.

Concluído este processo, o corpo de prova foi reservado para o período de cura, sem ser extraído do molde de policloreto de polivinila (PVC). Foi adotada a cura submersa para os corpos de prova deste estudo, com o intuito de manter o teor de umidade, pois as amostras estavam saturadas. Os corpos de prova só foram extraídos no dia em que iriam ser submetidos ao ensaio, quando também se mediu a massa, o diâmetro e a altura do corpo de prova. A figura 27 mostra o aspecto final de corpo de prova moldados segundo o procedimento descrito anteriormente.

Figura 27 – Corpo de prova desmoldado para ensaio de tração por compressão diametral



(fonte: foto do autor)

Para o ensaio de cravação de base alargada, foram realizadas misturas com as mesmas composições e dosagens dos corpos de prova, só que dessa vez moldadas em recipientes com dimensões de 14 x 14 x 6,5 (cm), totalizando 0,98 litros de mistura. Após essa etapa, foram colocadas divisórias de plástico, separando a mistura em quatro quadrados iguais, a fim de ser ensaiada uma divisão para cada tempo de cura, sobrando uma para repetir algum ensaio em caso de resultado duvidoso. Finalmente, preencheu-se um centímetro acima da mistura com água, que permaneceu até a realização do ensaio, com o intuito de manter o teor de umidade constante. Não houve desmoldagem nesse caso, as misturas foram testadas diretamente dentro da unidade de teste. Abaixo, a figura 28 mostra como foram moldadas as misturas nos recipientes.

Figura 28 – Unidade de teste para o ensaio de cravação de base alargada



(fonte: foto do autor)

5.2.3 Ensaio de Tração por Compressão Diametral

5.2.3.1 Processo Executivo

O procedimento adotado para realização dos ensaios de compressão diametral foi o descrito pela NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). A norma indica que devem ser colocadas tiras de fibra de madeira centradas nos pratos superior e inferior usados na célula de compressão da prensa hidráulica. O corpo de prova deve ser colocado ao longo da geratriz formada pelas tiras, como mostra a figura 29. Após ajustado o corpo de prova, a carga começa a ser aplicada com um acréscimo constante de tensão até a ruptura deste. O resultado medido pelo anel dinamométrico é anotado e para calcular a tensão de tração aplica-se a seguinte fórmula:

$$\sigma_{\text{tração}} = (2 \times P) / (\pi \times D \times L) \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$\sigma_{\text{tração}}$ = resistência à tração por compressão diametral em MPa

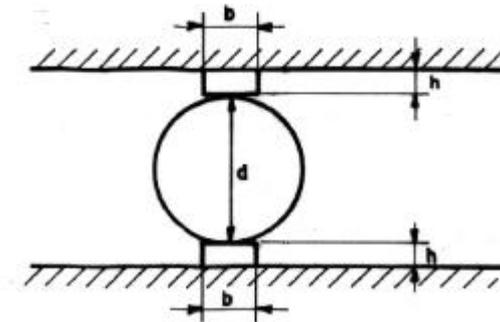
P = carga máxima obtida no ensaio em kN

D = diâmetro do corpo de prova em mm

L = altura do corpo de prova em mm

As figuras 29 e 30 mostram como o corpo de prova deve ser alocado em relação às tiras de madeira e a prensa hidráulica utilizada para a realização dos ensaios, respectivamente. Já a figura 31, mostra o corpo de prova preparado para o ensaio e, ao lado, o mesmo já rompido. É importante salientar que as hastes ao lado do corpo de prova, que podem ser observadas nas figuras 30 e 31, serviram apenas para ajustá-lo na posição correta e não foram utilizados durante o ensaio.

Figura 29 – Disposição do corpo de prova na prensa



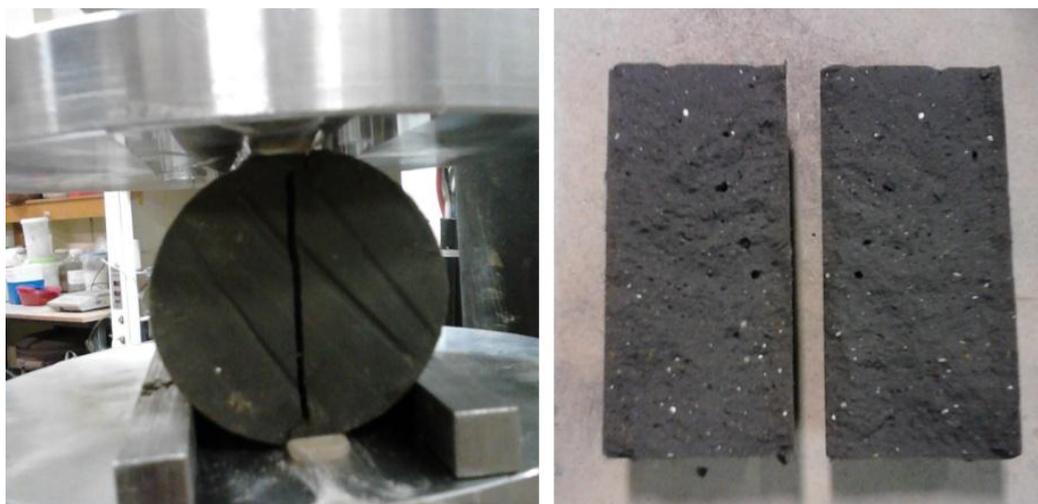
(fonte: ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 2)

Figura 30 – Prensa hidráulica e anel dinamométrico



(fonte: foto do autor)

Figura 31 – Ruptura do corpo de prova



(fonte: foto do autor)

5.2.4 Ensaio de cravação de base alargada

5.2.4.1 Objetivo e descrição do ensaio

Para solos extremamente moles, como o utilizado no experimento descrito nesse trabalho, a moldagem de corpos de prova convencionais para a realização de ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral é bastante complexa. Isso se deve ao altíssimo teor de umidade a que este pode estar submetido.

Em contrapartida, existe a necessidade de avaliar o ganho de resistência de solos moles quando se adiciona algum tipo de material estabilizante. Em virtude da dificuldade de moldagem e compactação de corpos de prova para esse tipo de solo, foi desenvolvido o ensaio de cravação de base alargada pelo Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul Nilo Cesar Consoli²¹ e dois alunos de mestrado, Daniel Winter e Andry Soares Rilho (em fase de elaboração).

O ensaio consiste em cravar uma ponteira de base alargada em uma camada de solo com, no mínimo, 5 cm de espessura. São realizadas leituras a cada centímetro de cravação, contabilizando quatro medidas no total: para um, dois e três centímetros de cravação, mais a medida máxima que pode corresponder a uma leitura dos três primeiros centímetros ou ser

²¹ O ensaio citado está sendo desenvolvido sob orientação do professor Nilo Cesar Consoli pelos mestrados Daniel Winter e Andry Rilho que participam atualmente do PPGEC, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

maior. Na figura 32, é demonstrada a forma de execução do ensaio e o detalhe da cravação da ponteira de base alargada.

Figura 32 – Execução do ensaio de cravação



(fonte: foto do autor)

5.2.4.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados foram anéis de nylon com diferentes espessuras, sendo que a esses anéis são acoplados medidores, que servem para realizar a medição de deslocamentos deste anel com precisão de centésimos de milímetros, conforme mostra a figura 33. As ponteiras de base alargada são rosqueadas aos anéis e, dependendo da resistência da mistura, podem ser utilizadas ponteiras com diferentes áreas de base (0,5, 1,0, 2,0 e 4,0 cm²). Para misturas mais resistentes utiliza-se a ponteira mais fina, devido a uma maior facilidade de cravação. As ponteiras estão demonstradas na figura 34.

Figura 33 – Anéis dinamométricos de nylon



(fonte: foto do autor)

Figura 34 – Ponteiros de base alargada



(fonte: foto do autor)

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados da pesquisa são apresentados e discutidos a seguir.

6.1 EFEITO DO TEMPO DE CURA

6.1.1 Para ensaio de tração por compressão diametral

De acordo com a bibliografia estudada, os gráficos que relacionavam a resistência à compressão ou a resistência à tração com o tempo de cura apresentaram curvas logarítmicas como tendência. No presente trabalho, foram relacionados os pontos dos corpos de prova moldados para cada teor de umidade e conseguiu-se obter curvas logarítmicas de ajuste bastante representativas para 14, 28 e 56 dias.

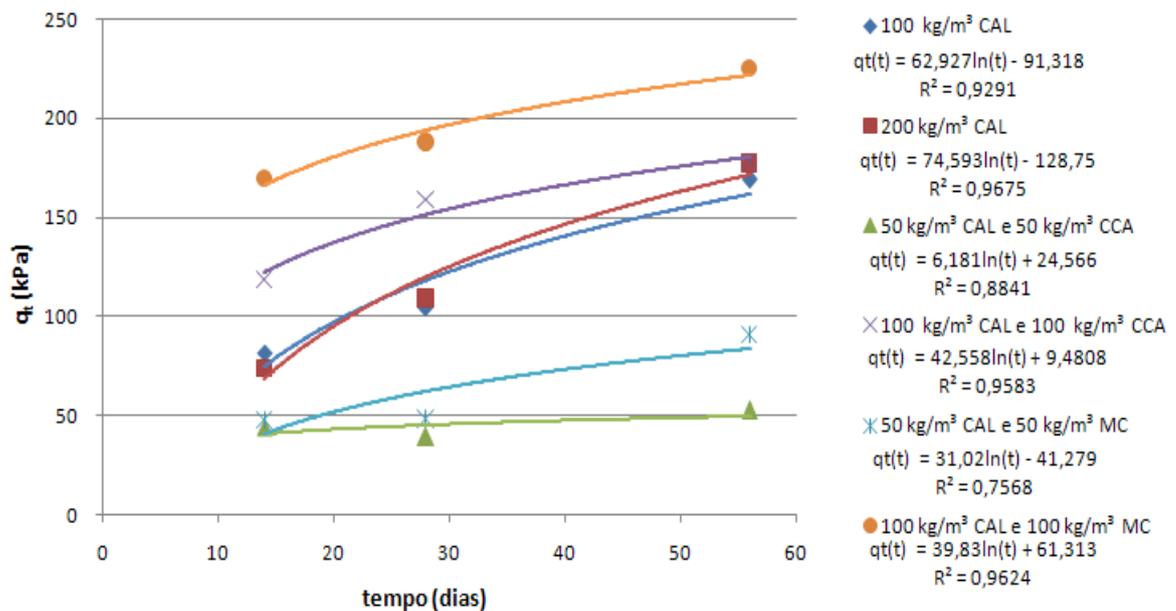
Para os três teores de umidade estudados, percebe-se que os corpos de prova moldados com 200 kg/m³ de material estabilizante composto de cal e microssílica apresentaram resultados superiores aos de 200 kg/m³ de material estabilizante composto somente de cal, o que comprova que a substituição de parte da cal empregada por microssílica é efetiva para o ganho de resistência. Já a substituição por cinza de casca de arroz só se mostra efetiva para os teores de umidade de 125% e 175% (figuras 35 e 37), não se comprovando para o teor de umidade de 150% (figura 36). Nesse caso, ocorre um ganho superior de resistência da mistura de 200 kg/m³ de material estabilizante composto apenas de cal. Acredita-se que esse efeito pode ser atribuído a quantidade de ácidos húmicos presentes nas amostras de 125% e 175% preparadas, que limitam as reações com Ca(OH)₂.

Além disso, para 100 kg/m³ de material estabilizante, não se verifica ganho de resistência com a substituição de 50% de cal da mistura por microssílica ou cinza de casca de arroz, para nenhum teor de umidade. Uma possível explicação seria que existe uma quantidade mínima de material estabilizante a ser acrescentado na mistura para estabilizar a quantidade de solo utilizada.

Nas figuras 35 e 36, pode-se observar que para os corpos de prova moldados somente com cal ocorre um acréscimo de resistência com o tempo mais acentuado em vista do que acontece com as demais dosagens, nas quais se obtêm uma curva mais abatida. Esse fato leva a crer que para menores tempos de cura, as dosagens de 200 kg/m³ que levam microssílica e cinza de casca de arroz são mais apropriadas. Caso o desejado seja ganhar resistência consideravelmente ao longo do tempo, a dosagem indicada seria a de material estabilizante composto somente de cal.

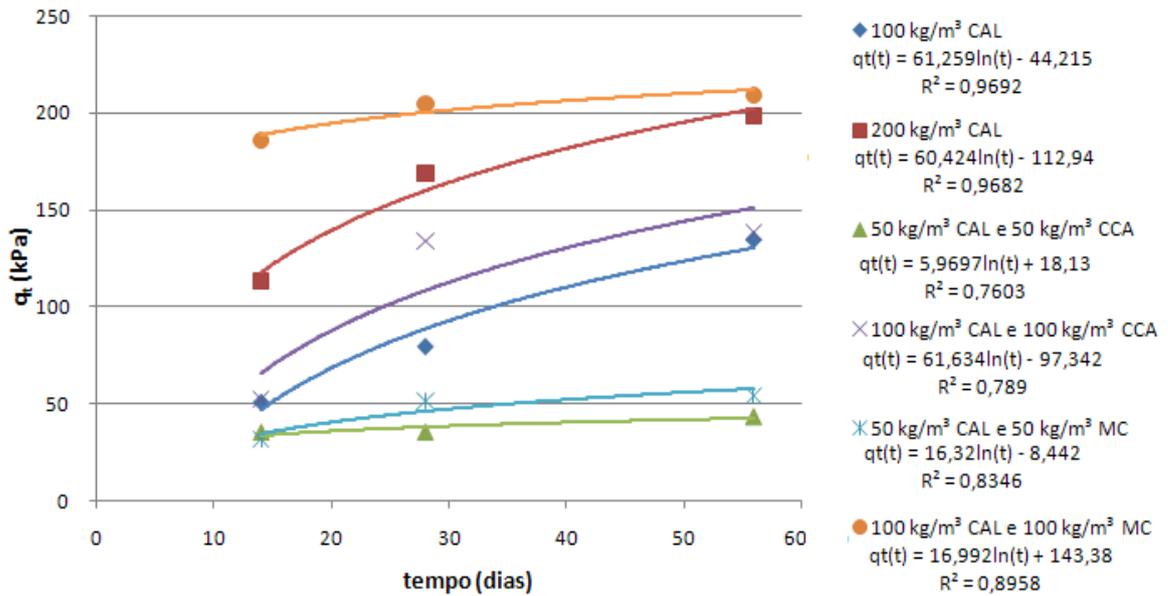
As figuras de 35 a 37 servem para analisar o acréscimo de resistência à tração que se obteve com a variação do tempo de cura, com o intuito de propor correlações entre q_t versus tempo de cura para os três teores de umidade.

Figura 35 – Relação entre q_t (kPa) e o tempo de cura para todas as misturas estudadas com $\omega=125\%$



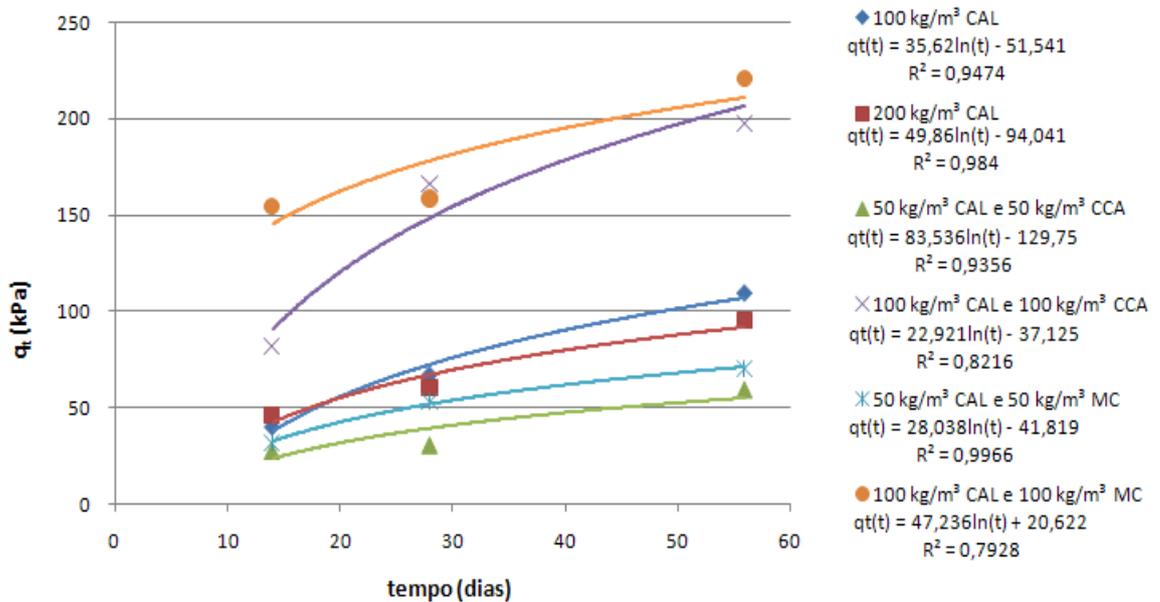
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 36 – Relação entre q_t (kPa) e o tempo de cura para todas as misturas estudadas com $\omega=150\%$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 37 – Relação entre q_t (kPa) e o tempo de cura para todas as misturas estudadas com $\omega=175\%$



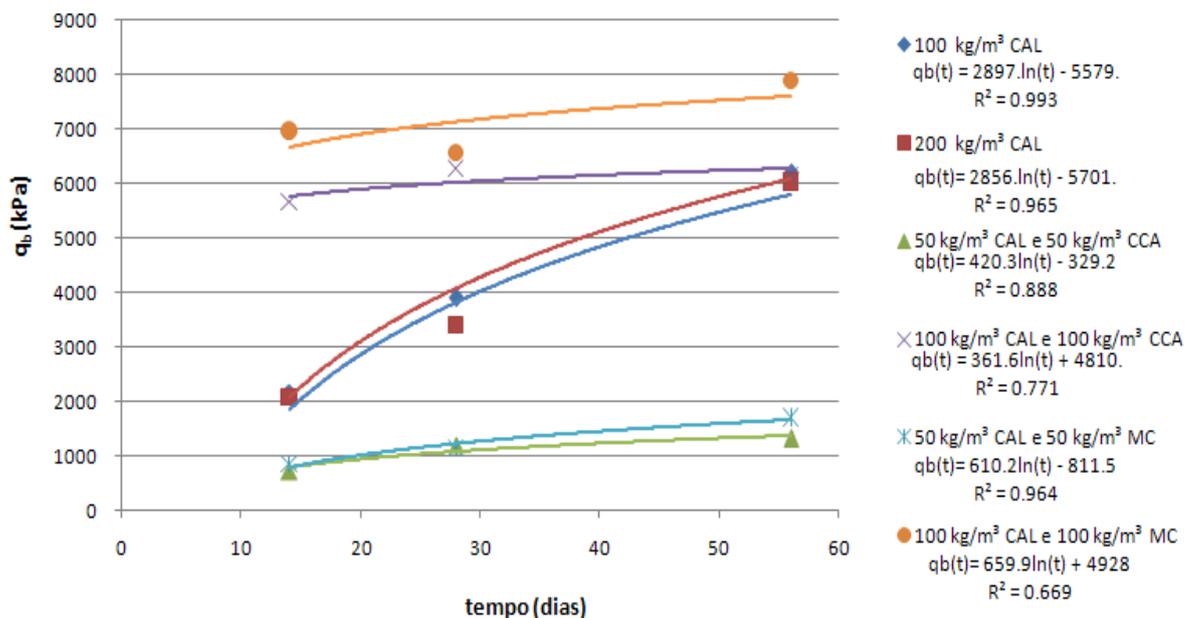
(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.2 Para ensaio de cravação de base alargada

As análises realizadas para o ensaio de cravação de base alargada são análogas às de tração por compressão diametral, uma vez que ao comparar os gráficos com mesmo teor de umidade, percebe-se a similaridade entre resultados. As misturas com maior teor de material estabilizante contendo microssílica também se mostram superiores às demais e não há grande representatividade nas resistências obtidas para misturas com 100 kg/m³ de material estabilizante, utilizando ou não pozolanas.

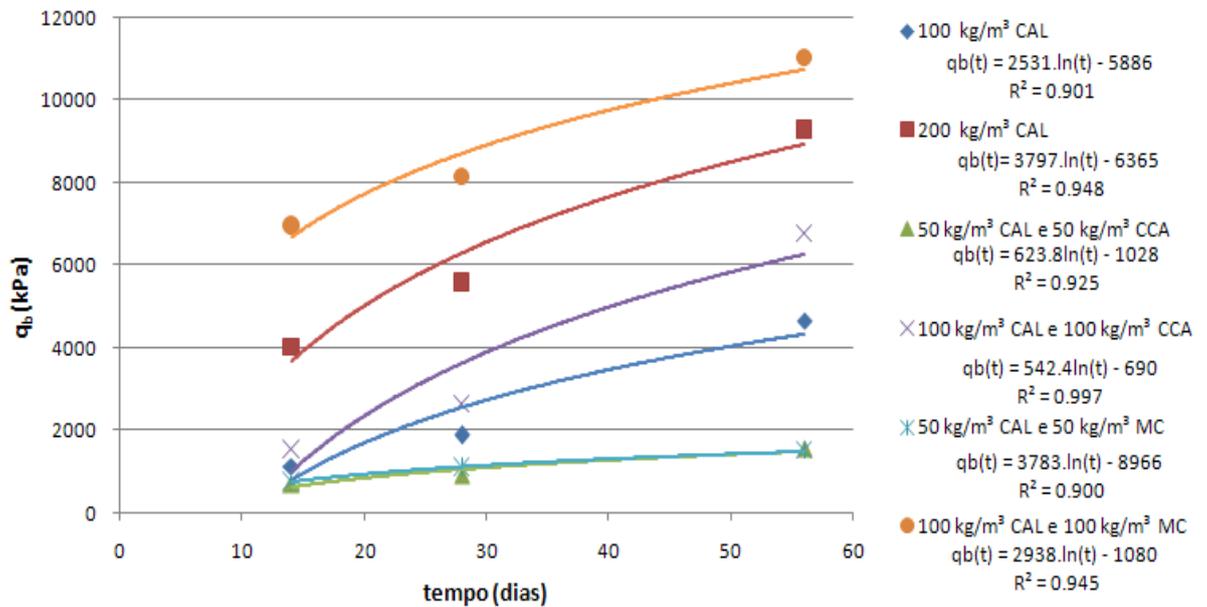
Também ocorre o mesmo fenômeno descrito anteriormente para o ensaio de tração, em que para o teor de umidade de 150%, os valores de resistência de 200 kg/m³ de material estabilizante composto somente de cal são superiores aos de mesmo teor utilizando cal e cinza de casca de arroz, confirmando as proposições. Nas figuras 38 a 40, pode-se avaliar o comportamento das misturas para cada teor de umidade.

Figura 38 – Relação entre q_b (kPa) e o tempo de cura para todas as misturas estudadas com $\omega=125\%$



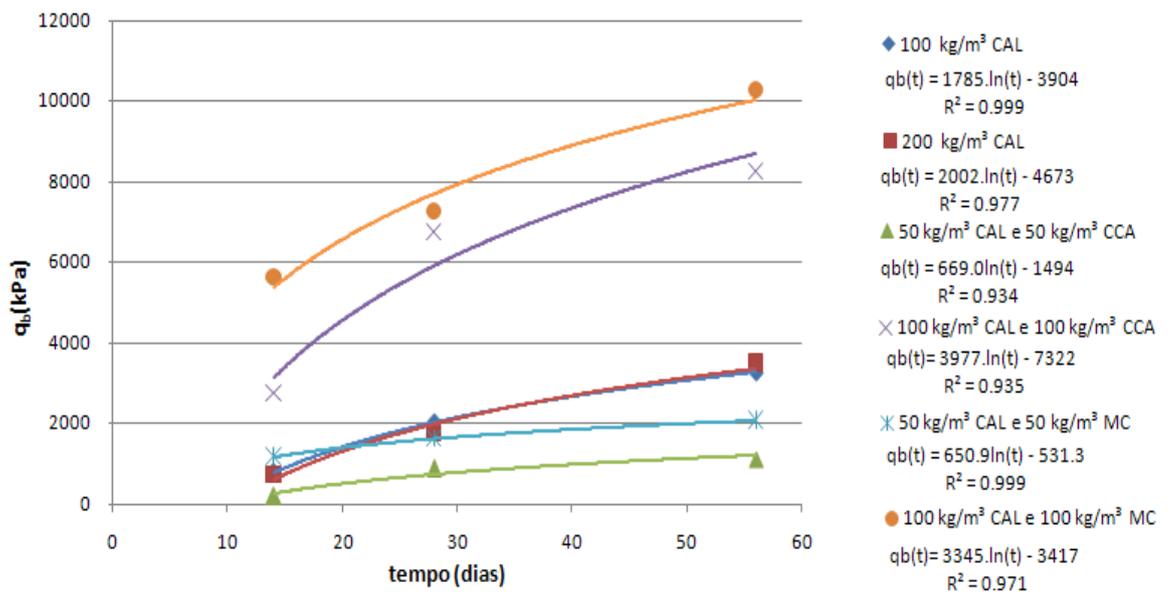
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 39 – Relação entre q_b (kPa) e o tempo de cura para todas as misturas estudadas com $\omega=150\%$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 40 – Relação entre q_b (kPa) e o tempo de cura para todas as misturas estudadas com $\omega=175\%$



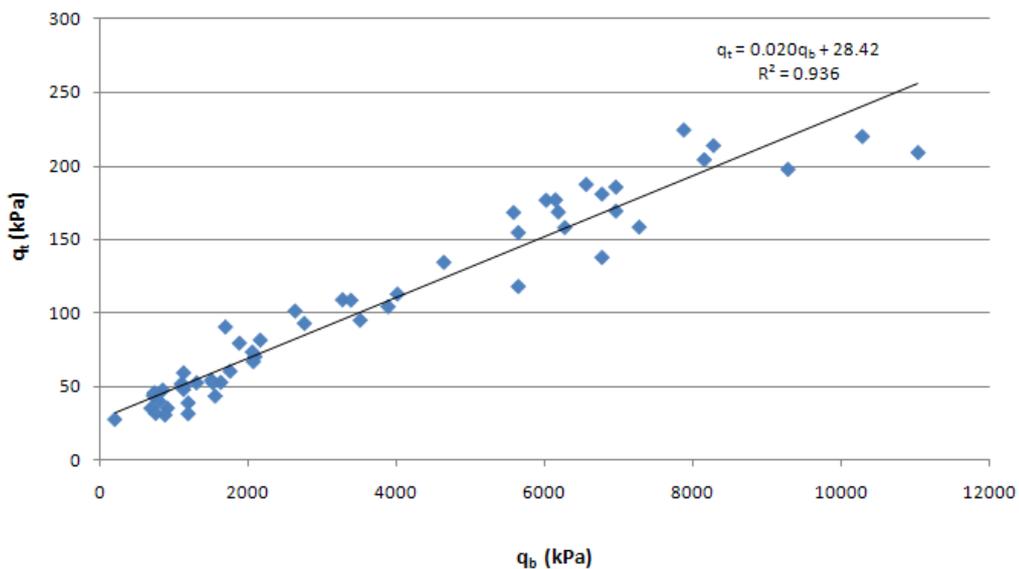
(fonte: elaborado pelo autor)

6.2 RELAÇÃO ENTRE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO E CRAVAÇÃO DE BASE ALARGADA

O intuito do ensaio de cravação de base alargada é facilitar a obtenção de resultados de resistência do solo cimentado, desde que sejam usadas correlações com ensaios de tração e compressão consistentes. O trabalho em questão traz, pela primeira vez na literatura, o ensaio de cravação de base alargada desenvolvido no LEGG/UFRGS como método de obtenção de valores de resistência para solos moles, visando demonstrar sua viabilidade e comprovar que é possível obter correlações deste ensaio com o ensaio de tração por compressão diametral para os corpos de prova estudados.

Através da figura 41 foi estabelecida uma relação linear entre os resultados de resistência à tração por compressão diametral e os de cravação de base alargada ou q_b (kPa). Conseguiu-se obter um ajuste de reta bastante confiável (R^2 próximo de 1). Dessa forma, entende-se que há consistência nos dados obtidos através dos ensaios de cravação de base alargada, uma vez que se relaciona perfeitamente com o ensaio de tração por compressão diametral, já difundido no meio científico.

Figura 41 – Relação entre ensaios de tração por compressão diametral e cravação de base alargada



(fonte: elaborado pelo autor)

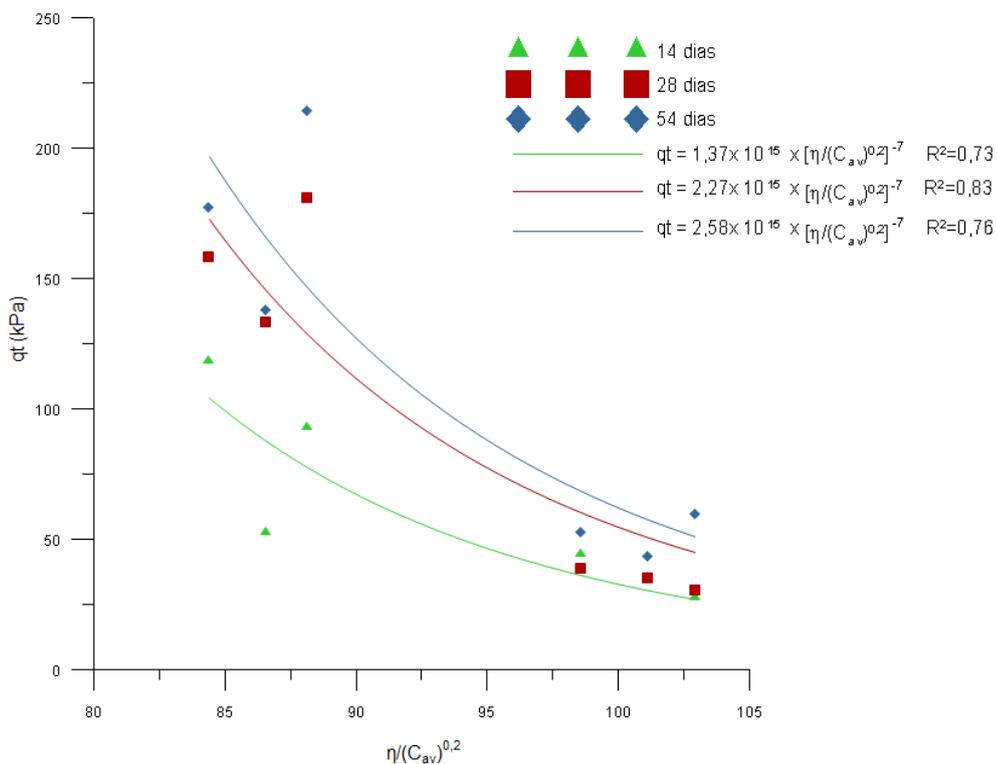
6.3 EFEITO DA RELAÇÃO VAZIOS/CAL

A relação η/C_{av} agrega o efeito de duas variáveis, porosidade e teor volumétrico de cal, em um único fator. Empregando esse fator em uma relação q_t versus $\eta/(C_{av})^{0,2}$, consegue-se contrabalançar os valores de q_t , pois a resistência à tração diminui com o aumento da porosidade e aumenta com o aumento do teor de cal.

Abaixo, estão relacionadas as figuras 42 e 43 para os valores de resistência à tração para os corpos de prova moldados com cinza de casca de arroz e microsilica, respectivamente.

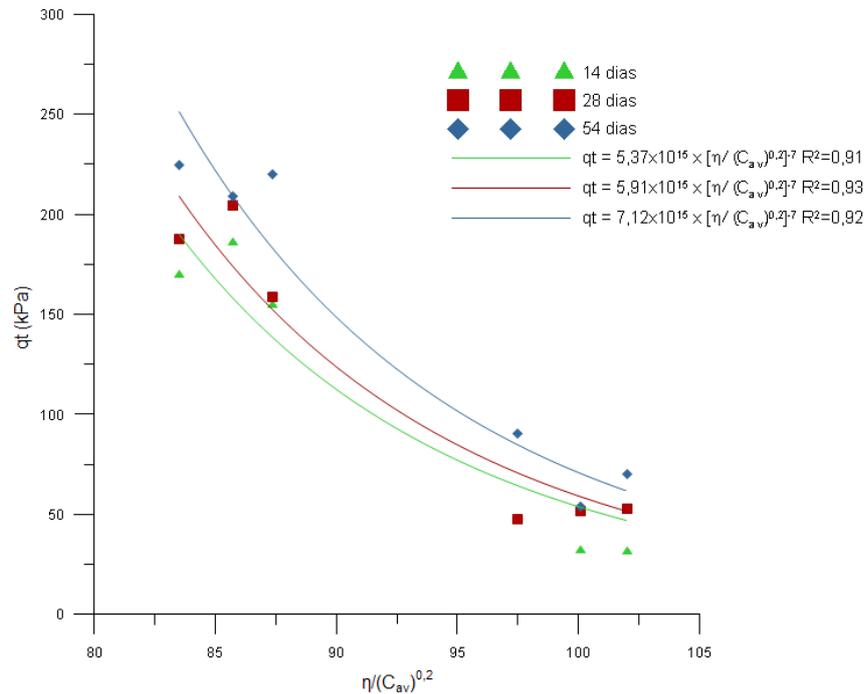
Os gráficos distinguem, para cada tempo de cura, a relação entre os valores de q_t e $\eta/(C_{av})^{0,2}$. Percebe-se que as curvas exponenciais têm uma boa concordância com os dados experimentais pelo valor de R^2 da equação, que se aproxima de 1 para todos os casos.

Figura 42 – Relação entre q_t (kPa) e $\eta/(C_{av})^{0,2}$ para os corpos de prova de solo orgânico, cal e cinza de casca de arroz para 14, 28 e 56 dias



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 43 – Relação entre q_t (kPa) e $\eta/(C_{av})^{0,2}$ para os corpos de prova de solo orgânico, cal e microssílica para 14, 28 e 56 dias



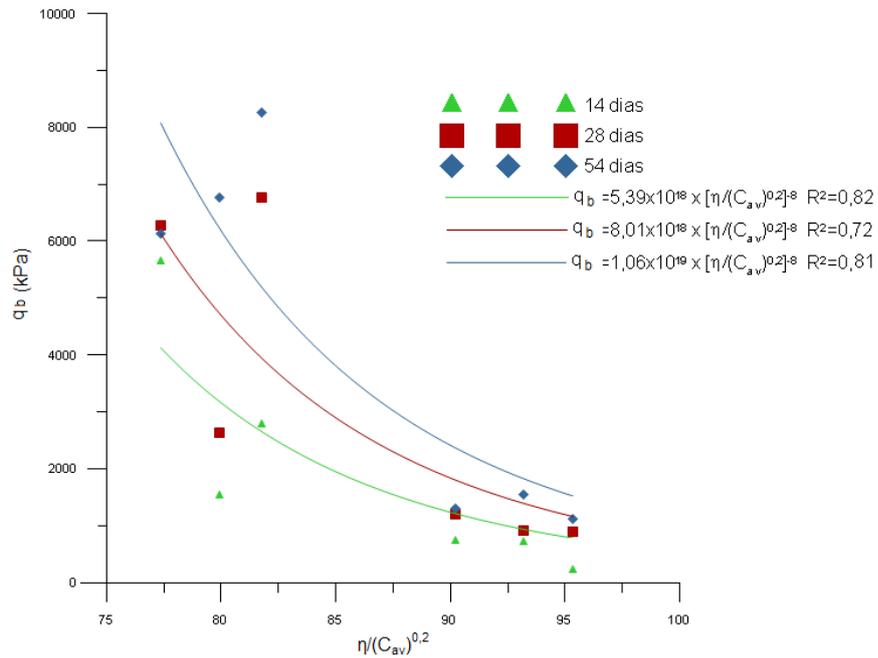
(fonte: elaborado pelo autor)

Devido às variações substanciais na taxa de crescimento da resistência com a porosidade e com o inverso do teor volumétrico de cal, houve a necessidade de compatibilizar as duas taxas de crescimento através de um expoente aplicado à parcela do teor volumétrico de cal. Esse método já foi usado por diversos pesquisadores da área como Lopes Júnior (2007), Dalla Rosa (2009), entre outros. A necessidade de utilização do expoente para compatibilização de fatores pode estar ligado à quantidade de finos no solo e/ou ao tipo de agente cimentante utilizado.

Para os dois gráficos, percebe-se que para menores valores de $\eta/(C_{av})^{0,2}$ tem-se os maiores valores de q_t , como o esperado de acordo com a bibliografia estudada. Nos gráficos apresentados também se percebe a forte influência do tempo de cura, em que se pode encontrar os maiores valores de resistência para 56 dias, depois para 28 dias e por fim, para 14 dias tem-se as menores resistências.

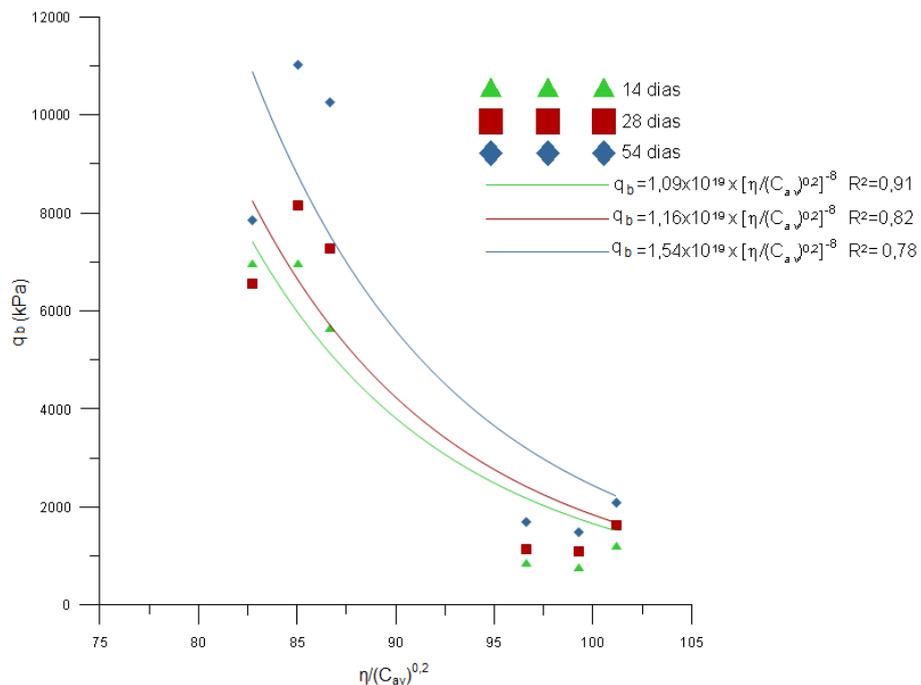
Ao relacionar os valores de resistência à cravação de base alargada com a relação η/Cav aplicado ao mesmo expoente, foram obtidas curvas semelhantes. O ajuste das curvas também se mostrou adequado, como pode ser observado nas figuras 44 e 45, para as unidades de teste de cinza de casca de arroz e microssílica, respectivamente.

Figura 44 – Relação entre q_b (kPa) e $\eta/(C_{av})^{0,2}$ para as unidades de teste de solo orgânico, cal e cinza de casca de arroz para 14, 28 e 56 dias



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 45 – Relação entre q_b (kPa) e $\eta/(C_{av})^{0,2}$ para as unidades de teste de solo orgânico, cal e microssílica para 14, 28 e 56 dias

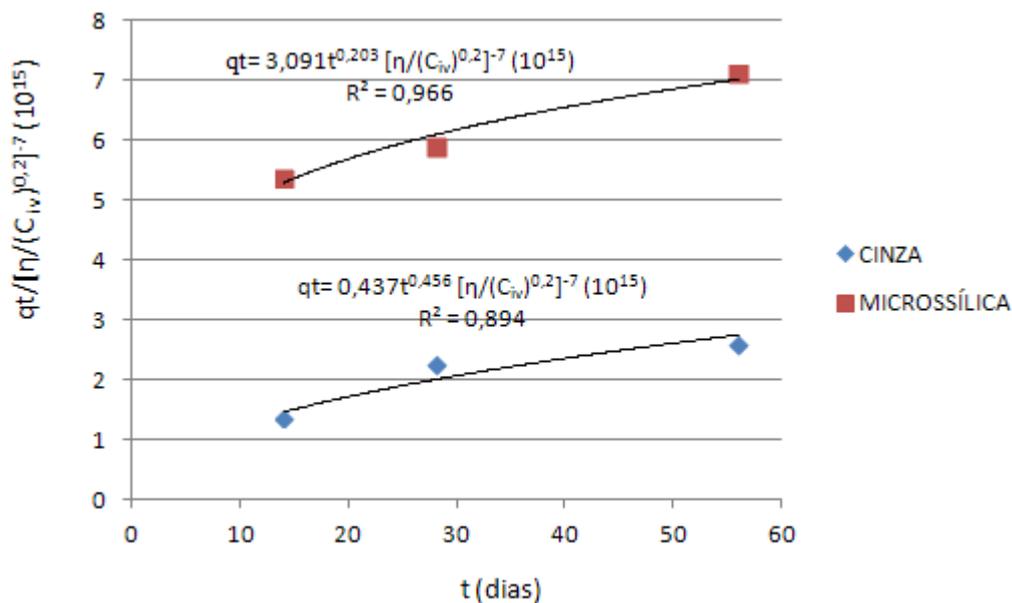


(fonte: elaborado pelo autor)

Devido ao bom ajuste das curvas aos dados experimentais e à evolução das resistências com o tempo de cura, acredita-se que a relação $\eta/(C_{av})^{0,2}$ se mostra válida. Como pode ser observado nos gráficos das figuras de 40 a 43, pode-se observar que q_t tem uma relação direta com $[\eta/(C_{av})^{0,2}]^{-7}$ e q_b com $[\eta/(C_{av})^{0,2}]^{-8}$. Percebe-se que apenas um escalar difere entre as equações, o que mostra que essas relações são dependentes apenas do tempo de cura e, apesar de não se diferenciarem quanto à pozolana utilizada, acredita-se que não há relação direta entre as duas equações obtidas para cada ensaio. Nas figuras 46 e 47, estão representadas equações únicas para cada composição, relacionadas à parcela de resistência, o tempo de cura e a relação η/C_{av} .

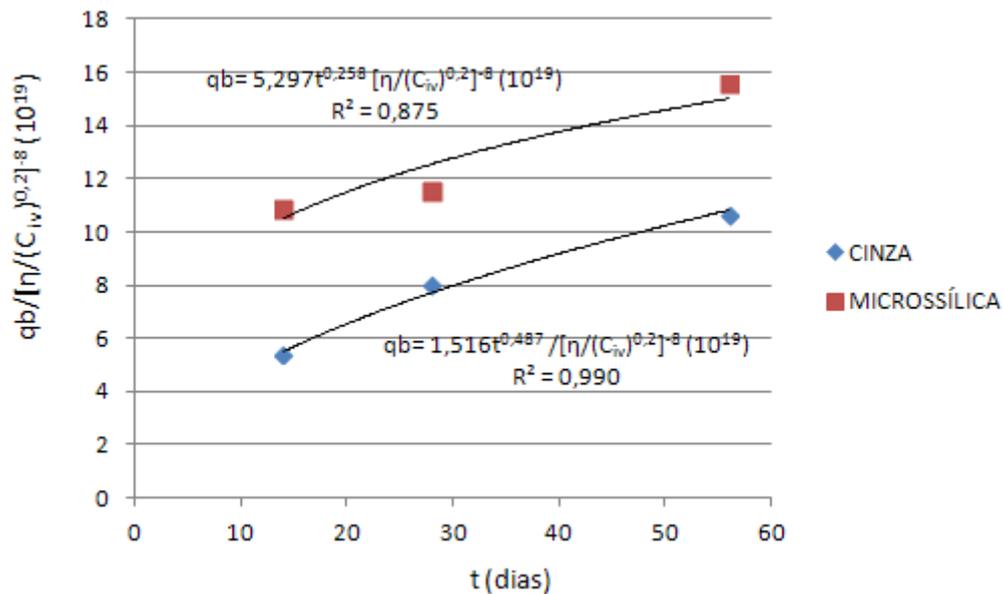
As equações apresentadas nos gráficos podem ser utilizadas para a estimativa de resistência à tração e à cravação do solo mole orgânico, sendo que os resultados apresentados sugerem que se pode escolher o teor de cal e a porosidade apropriados para obter a resistência desejada, dependendo dos custos dos materiais e do estado natural do solo quanto à umidade. Pode-se também, com esse método, controlar o tempo em que a resistência deve ser alcançada, o que permite a adequação aos prazos da obra a ser realizada.

Figura 46 – Variação da resistência à tração q_t (kPa) com a relação $\eta/(C_{av})^{0,2}$ e o tempo de cura



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 47 – Variação da resistência à cravação q_b (kPa) com a relação $\eta/(C_{av})^{0,2}$ e o tempo de cura



(fonte: elaborado pelo autor)

Para os corpos de prova ensaiados somente com cal, sem adição de microssílica ou casca de arroz, houve um aumento de resistência com o tempo de cura, mas os pontos não apresentaram uma tendência em que se pudesse ajustar alguma curva. Portanto, não pode ser realizada uma análise efetiva acerca desses resultados para nenhum dos ensaios.

6.4 EFEITO DA ADIÇÃO DE POZOLANAS

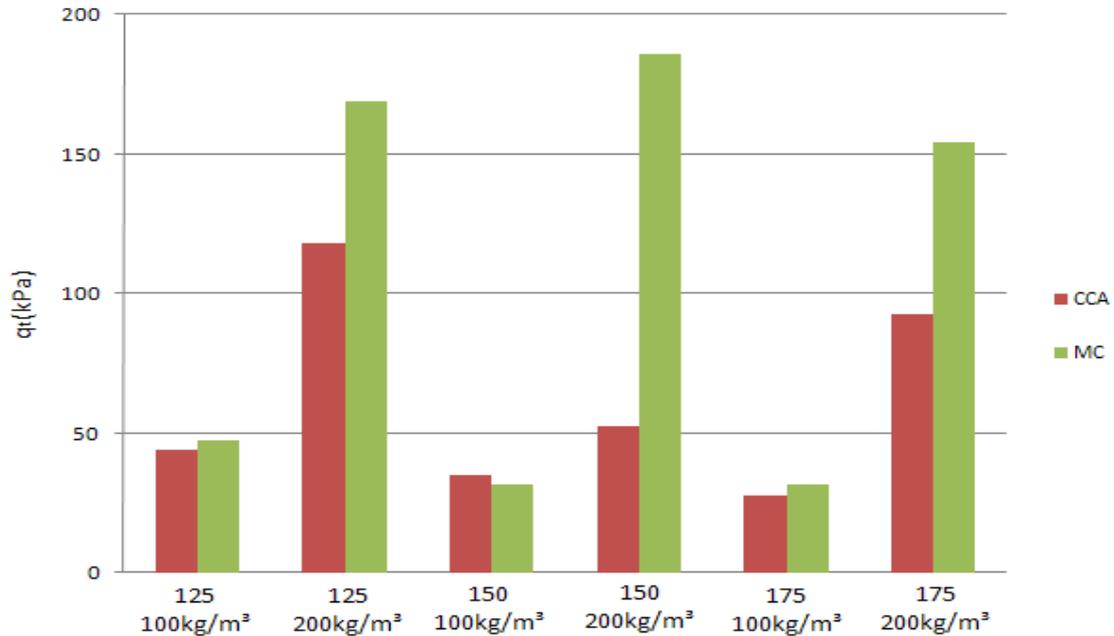
Sabe-se que os materiais pozolânicos têm propriedades que aumentam as reações entre as partículas e, como consequência, fazem com que a mistura adquira uma resistência maior em um tempo de cura mais curto, como abordado no capítulo 3. Tal capacidade é atribuída, principalmente, ao diâmetro reduzido dos grãos dos materiais e ao teor de óxido de silício, chamado também de sílica.

As figuras de 48 a 50 mostram, para os diferentes tempos de cura, a relação entre as resistências obtidas para cada teor de umidade e cada tipo de mistura estudada. Com estes gráficos, consegue-se perceber claramente que os valores de resistência à tração com a utilização da microssílica são superiores em relação aos da cinza de casca de arroz. Uma possível explicação está no teor de matéria amorfa no material, que é a estrutura de material

que não tem ordenação espacial definida e que está mais suscetível a reagir quando em contato com água e $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sabe-se que mais efetivas são as reações pozolânicas, quanto maiores forem os teores de SiO_2 amorfo na composição da pozolana.

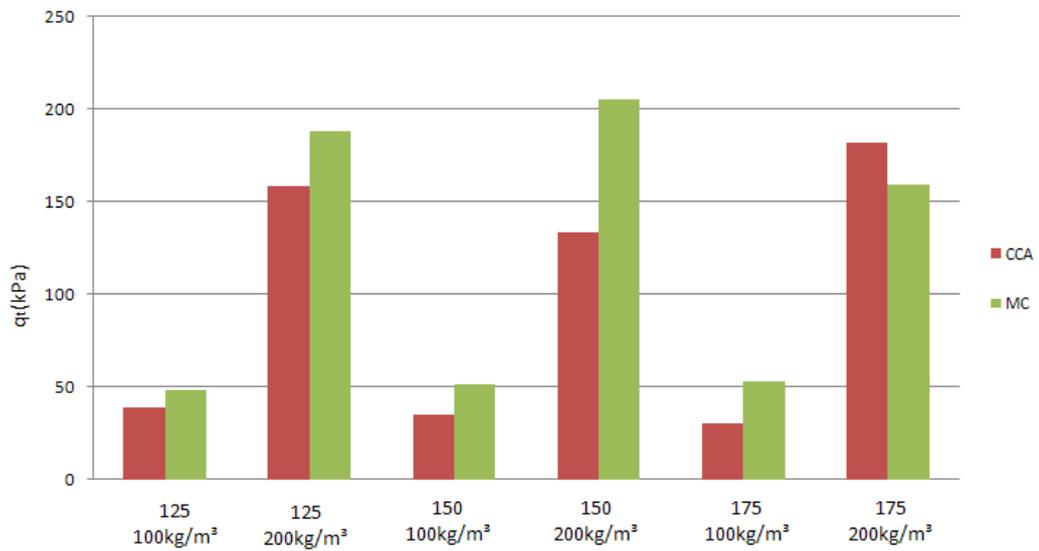
Um fator que influencia o teor de matéria amorfa é a temperatura de queima do material. Como visto anteriormente, de acordo com Della (2002, p. 819, tradução nossa), há uma temperatura ideal de queima para a cinza de casca de arroz, em que se obtêm a maior superfície específica e a maior quantidade de SiO_2 amorfo. Ao aumentar ou diminuir a temperatura e a duração da queima, ocorre a perda do potencial pozolânico do material. Esse é um fator determinante, pois a queima da casca de arroz é um procedimento que não faz parte de um processo produtivo como o que ocorre com a microssílica, por isso pode ocorrer maior variabilidade no caso da cinza de casca de arroz. Presume-se, então, que a microssílica possui maior teor de matéria amorfa na sua estrutura que a cinza de casca de arroz e por isso proporciona resistências superiores na maioria dos casos estudados.

Figura 48 – Comparação entre os valores de resistência adquiridos durante 14 dias de cura pelos corpos de prova de cinza de casca de arroz e microssílica



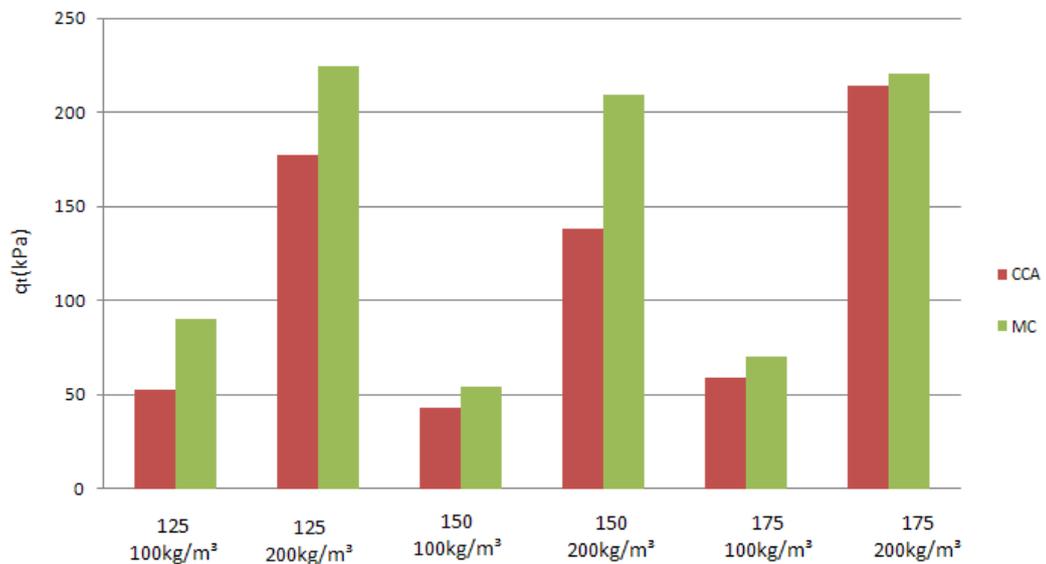
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 49 – Comparação entre os valores de resistência adquiridos durante 28 dias de cura pelos corpos de prova de cinza de casca de arroz e microssílica



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 50 – Comparação entre os valores de resistência adquiridos durante 56 dias de cura pelos corpos de prova de cinza de casca de arroz e microssílica



(fonte: elaborado pelo autor)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados, bem como da avaliação das variáveis de estudo (quantidade de cal, microssílica e cinza de casca de arroz, teor de umidade e tempo de cura) sobre a resistência de um solo estabilizado com cal e pozolanas, dentro das limitações apresentadas, pode-se chegar às conclusões descritas a seguir.

Quanto à influência do tempo de cura, percebe-se que a substituição da parcela de cal por microssílica ou cinza de casca de arroz atende às expectativas, aumentando a resistência da mistura. Em contrapartida, as curvas das misturas que levam pozolanas tem um acréscimo de resistência tão acentuado quanto a que tem 200 kg/m^3 de material estabilizante composto somente de cal, o que leva a crer que para obter maiores resistências em curto prazo a substituição por pozolana compensa. Já para resistências adquiridas em longo prazo, sugere-se a utilização de mistura com cal sem adição de pozolana.

A relação entre o ensaio de resistência à tração por compressão diametral e o ensaio de cravação de base alargada comprovou que os ensaios têm uma boa correlação. Isso indica que o ensaio de cravação pode ser uma boa alternativa quando se quer confirmar a confiabilidade dos corpos de prova moldados com solo mole. A relação obtida entre os dois ensaios é uma reta que relaciona somente q_t e q_b , portanto, independe da relação vazios/cal.

Os gráficos obtidos para a relação vazios/cal com a parcela de teor volumétrico de agente cimentante ajustado por um expoente igual a 0,2 mostrou-se a melhor maneira de obter uma correlação que reflita a influência da porosidade e o teor de cal para a previsão de comportamento de corpos de prova e unidades de teste curadas a todos os tempos de cura. Acredita-se que a necessidade de compatibilização por meio de um expoente entre os dois fatores é função do tipo de solo estudado e /ou do agente cimentante utilizado. As curvas que relacionam as parcelas de resistência, tempo de cura, porosidade e quantidade de cal apresentam um papel fundamental para a utilização da técnica em campo, uma vez que se pode variar um parâmetro em relação ao outro a fim de obter o resultado mais conveniente em termos de custo ou de resultado.

Finalmente, na comparação entre pozolanas, confirmou-se a superioridade da microssílica em relação à cinza de casca de arroz. Acredita-se que isso se deve ao teor de matéria amorfa existente nos materiais, o que ocorre em maior proporção na microssílica.

Diante dos resultados obtidos e das variáveis aplicadas ao estudo, confirmou-se o pressuposto de que a resistência mínima considerada apropriada para suporte de obras de Engenharia de 50 kN/m² em ensaios de tração por compressão diametral foi obtida para todos os testes realizados, exceto para os corpos de prova moldados com material estabilizante composto de 50 kg/m³ de cal e 50 kg/m³ de pozolana para 14 e 28 dias. Essas misturas necessitam de um tempo de cura maior para adquirir a resistência requerida, o que se comprova com os corpos de prova com 56 dias de cura.

Os maiores valores de resistência obtidos apresentaram a maior dosagem de material estabilizante (200 kg/m³) com a utilização de microssílica na mistura. Sendo assim, esta foi considerada a melhor composição a ser aplicada com o intuito de minimizar o teor de agente cimentante na mistura, melhorando a resistência e diminuindo custos de aplicação da técnica.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a dar continuidade na pesquisa apresentada neste trabalho de conclusão de curso e ampliar os conhecimentos acerca do comportamento de solos orgânicos estabilizados com cal e pozolanas, a autora sugere que, futuramente, sejam desenvolvidos os seguintes tópicos:

- a) verificação das resistências de tração por compressão diametral e de cravação de base alargada para misturas contendo 150 kg/m³ de material estabilizante para que os gráficos de η/C_{av} sejam complementados e se consiga ajustar curvas com maior grau de confiabilidade;
- b) execução de ensaios de compressão simples para os teores de umidade e tempos de cura analisados neste trabalho;
- c) realização de correlações entre ensaio de tração por compressão diametral e compressão simples, bem como para ensaio de cravação de base alargada e compressão simples a fim de ampliar a aplicação do novo ensaio apresentado;
- d) moldagem de mais amostras para cada ponto estudado no presente trabalho e desenvolvimento de gráficos de resistência em função de η/C_{av} divididos por umidade.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: Pini, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2487**: standard practice for classification of soils for Engineering purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: massa específica real dos sólidos. Rio de Janeiro, 1984a.

_____. **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.

BEHAK, L. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com Cinza de Casca de Arroz e Cal**. 2007. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

CONSOLI, N. C.; JOHANN, A. D. R.; GAUER, E. A.; DOS SANTOS, V. R.; MORETTO, R.L.; CORTE, M. B. Key parameters for tensile and compressive strength of silt-lime mixtures. **Géotechnique Letters**, Londres, v. 2, p. 81-88, 2011.

CONSOLI, N. C.; THOMÉ, A.; CERATTI, J. A. P. Engineering properties of organic soft soil-lime mixtures. In: SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1997. p. 217-222.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal**. 2009. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Rice husk ash as an alternative source for active silica production. **Materials Letters**, Burlington, v. 57, p. 818-821, 2002.

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

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada**: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto. 2008. 298 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. 2007. 147 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MENDES, S. E. S. **Estudo Experimental de Concreto de Alto Desempenho utilizando Agregados Graúdos disponíveis na Região Metropolitana de Curitiba**. 2002. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e /ou pozolânico**. 2006. 345 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. **Supplementary Cementing Materials: engineering materials**. 1st ed. Berlin: Springer, 2011.

SILVA, M. P. **Retração total e penetração de cloretos de concretos compostos com CCA de diferentes teores de carbono grafítico**. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SILVANI, C. **Influência da Temperatura de Cura no Comportamento Mecânico de Misturas Areia-Cinza Volante-Cal**. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

THOMAZ, E. C. S. **Ensaio de compressão diametral**. Rio de Janeiro: IME, 2011. Notas de aula do curso de Engenharia de Fortificação e Construção. Disponível em: <<http://aquarius.ime.br/~webde2/prof/ethomaz/>>. Acesso em 20 abr. 2013.

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) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

TURGUT, P. Manufacturing of building bricks without Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, St. Louis, v. 37, p. 361-367, 2012.