

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

**Marina Bellaver Corte**

**MISTURAS SOLO-CAL-FIBRA: COMPORTAMENTO  
MECÂNICO À COMPRESSÃO E TRAÇÃO**

Porto Alegre  
julho 2013

**MARINA BELLAVER CORTE**

**MISTURAS SOLO-CAL-FIBRA: COMPORTAMENTO  
MECÂNICO À COMPRESSÃO E TRAÇÃO**

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**  
**Coorientador: Lucas Festugato**

Porto Alegre

julho 2013

**MARINA BELLAVER CORTE**

**MISTURAS SOLO-CAL-FIBRA: COMPORTAMENTO  
MECÂNICO À COMPRESSÃO E TRAÇÃO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA 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 pela Concordia University, Canadá  
Orientador

Prof. Lucas Festugato  
Dr. pela UFRGS  
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Dra. pela UFRGS  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Amanda Dalla Rosa Johann**  
Dra. pela UFRGS

**Rodrigo Caberlon Cruz**  
Dr. pela UFRGS

**Carina Silvani**  
M.Eng. pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Adenai e Luis, pelo incentivo e apoio durante todos os anos de Graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Nilo Cesar Consoli pela orientação e incentivo demonstrados durante a realização deste trabalho. Desde a sugestão do tema, à conclusão do trabalho, sou muito grata pela orientação. Agradeço, também, a oportunidade de realizar minha iniciação científica sob tua orientação.

Agradeço meu coorientador, Prof. Lucas Festugato, pelos ensinamentos e sugestões que contribuíram para a concretização deste trabalho. Obrigada por compartilhar teus conhecimentos de laboratório, sem dúvidas eles foram fundamentais para a conclusão pesquisa.

À professora Carin Maria Schmitt, pela dedicação na realização deste trabalho. Tuas avaliações e comentários foram fundamentais para a conclusão deste.

À minha família, por toda confiança e suporte depositados a mim. Aos meus pais, por todo o conforto e carinho, especialmente nos primeiros semestres da faculdade. Em especial, à minha mãe, obrigada por tudo, principalmente pelo incentivo de ingressar em uma universidade federal desde o meu Ensino Fundamental. Ao meu pai, por todos os conselhos, que me inspiraram durante todas as etapas de minha vida.

Lucas, meu namorado, obrigada por todo carinho e companheirismo durante todos estes anos. Agraço o estímulo (e exemplo) de seguir na pesquisa científica. Agradeço todo o apoio e incentivo para cruzar os oceanos e, assim, ficarmos juntos.

Aos meus amigos, todos eles, obrigada por todos os momentos de descontração e parceria. Agradeço por compreenderem a minha ausência nos momentos de estudo.

Agradeço a todos os colegas do Legg/Environgeo, em especial a Amanda, Emanuele, Luizmar, Vitor, Caberlon, Álisson, Floss e todos os demais colegas, pelos conhecimentos transmitidos e pelos momentos de descontração. Agradeço ao João, laboratorista, por todo o auxílio durante os ensaios. Agradeço aos colegas bolsistas, Guilherme e Elisa, por toda a ajuda durante a realização desta pesquisa, vocês foram fundamentais.

Por fim, agradeço à UFRGS e a todos os professores responsáveis por transmitir incansavelmente seus conhecimentos.

Quem ouve meus ensinamentos e vive de acordo com eles  
é como um homem sábio que construiu sua casa na rocha.  
Caiu a chuva, vieram as enchentes, e o vento soprou com  
força contra aquela casa. Porém ela não caiu,  
porque havia sido construída sobre a rocha.

*Mateus*

## RESUMO

O melhoramento dos solos locais de baixa capacidade suporte com a inclusão de fibras e materiais cimentantes, visando a construção de bases de pavimento estabilizadas e de fundações superficiais, apresenta vantagens econômicas e ambientais ao evitar o transporte de materiais de outras regiões e a necessidade de áreas para bota-fora. Estudos feitos no Legg Environgeo da UFRGS mostraram que a metodologia de dosagem baseada na relação porosidade/teor volumétrico de agente cimentante foi satisfatória para a estimativa da resistência de misturas tratadas com cal. Neste contexto, este trabalho objetivou quantificar a influência da quantidade de cal, da porosidade e da razão porosidade/cal na estimativa da resistência à compressão ( $q_u$ ) e à tração ( $q_t$ ) em misturas solo-cal-fibra de polipropileno. O solo a ser melhorado é um silte argiloso, denominado caulim rosa. O programa experimental foi desenvolvido possibilitando que a influência da adição da fibra nas misturas fosse quantificada isoladamente. Foram estudados três pesos específicos aparentes secos, 14, 15 e 16 kN/m<sup>3</sup>, contendo 3, 5, 7 e 9% de cal, calculados em relação à massa de solo seca, e um teor de fibra, 0,5%, calculado em relação à massa de sólidos da mistura. Os resultados indicaram que o aumento dos teores de cal afeta linearmente no aumento da resistência ( $q_u$ ) e ( $q_t$ ). Verificou-se, também, que, através de curvas potenciais, foi possível expressar o comportamento da redução da porosidade sobre a resistência das misturas. A relação porosidade/teor volumétrico de cal demonstrou-se apropriada na estimativa dos valores de  $q_u$  e  $q_t$ . Obteve-se uma relação única entre  $q_u/q_t$  para todas as amostras solo-cal-fibra estudadas, e esta relação é independente da razão porosidade/teor volumétrico de cal. Finalmente, fez-se a análise dos resultados com e sem a inclusão de fibras, essa comparação mostrou que a inclusão das fibras acarretou na diminuição da resistência das amostras.

Palavras-chave: Melhoramento de Solos. Reforços Fibrosos. Solo-Cal-Fibra.  
Razão Porosidade/Teor Volumétrico de Cal. Compressão Simples e Diametral.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas de pesquisa .....	18
Figura 2 – Resistência à compressão simples em relação ao teor de cal .....	22
Figura 3 – Efeito do tempo de cura sobre misturas estabilizadas com cal .....	24
Figura 4 – Influência do teor de umidade em amostras ensaiadas com 28, 60 e 90 dias .	24
Figura 5 – Influência do teor de umidade das amostras com teores de 17, 20 e 23% e 28 dias de cura submetidas à compressão simples .....	25
Figura 6 – Relação água/cal pela resistência à compressão simples de misturas com 28 dias de cura .....	26
Figura 7 – Relação vazios/cal para amostras com 90 dias de cura .....	27
Figura 8 – Relação vazios/cal ajustado para o expoente 0,12 .....	28
Figura 9 – Relação vazios/cal ajustado para o expoente 0,12 e expresso em função da porosidade e do teor volumétrico de cal .....	29
Figura 10 – Resposta cisalhante monotônica de resíduo de mineração cimentado sem a inclusão de fibras .....	31
Figura 11 – Resposta cisalhante monotônica de resíduo de mineração cimentado com a inclusão de fibras .....	31
Figura 12 – Resistência à compressão de misturas cimentadas e não reforçadas com fibras, em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento .....	32
Figura 13 – Resistência à tração de misturas cimentadas e não reforçadas com fibras, em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento .....	33
Figura 14 – Curva granulométrica do caulim .....	36
Figura 15 – Curva de compactação do caulim (energia modificada) .....	37
Figura 16 – Caulim rosa utilizado nesta pesquisa .....	37
Figura 17 – Dosagem de cal pelo método ICL .....	39
Figura 18 – (a) fibras de polipropileno cortadas com comprimento de 24 mm e (b) imagem de microscopia eletrônica de varredura com aumento de 230x .....	41
Figura 19 – Fibra de polipropileno lavada e desfiada .....	42
Figura 20 – Molde metálico tripartido .....	44
Figura 21 – Corpo de prova de solo-fibra-cal .....	45
Figura 22 – Ensaio de resistência à compressão simples .....	46
Figura 23 – Ensaio de resistência à compressão diametral .....	46
Figura 24 – Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em relação ao teor de cal (Ca) .....	48
Figura 25 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à compressão simples ( $q_u$ ) .....	49
Figura 26 – Variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cal .....	50



Figura 27 – Variação da resistência à compressão diametral ( $q_t$ ) em relação ao teor de cal (Ca) .....	51
Figura 28 – Variação da resistência à tração ( $q_t$ ) com a porosidade ( $\eta$ ) .....	52
Figura 29 – Variação da resistência à tração em função da relação vazios/cal .....	53
Figura 30 – Ajuste da razão vazios/cal para as resistências à tração e compressão .....	55
Figura 31 – Variação da resistência à tração com teor volumétrico de cal .....	56
Figura 32 – Variação da resistência à tração com a porosidade .....	57
Figura 33 – Variação da resistência à compressão com o teor volumétrico de cal .....	58
Figura 34 – Variação da resistência à compressão com a porosidade .....	59
Figura 35 – Razão porosidade/teor volumétrico da cal em relação à resistência à tração e compressão das misturas .....	60
Figura 36 – Modo de ruptura misturas sem fibra quando submetidas à compressão diametral .....	61
Figura 37 – Modo de ruptura misturas solo-cal-fibra quando submetidas à compressão diametral .....	62
Figura 38 – $q_u$ versus $\eta/Ca^{0,25}$ com e sem o reforço de fibras .....	64
Figura 39 – $q_t$ versus $\eta/Ca^{0,25}$ com e sem o reforço de fibras .....	64

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Propriedades físicas do caulim .....	35
Tabela 2 – Propriedades da cal utilizada nesta pesquisa .....	37
Tabela 3 – Propriedades das fibras de polipropileno .....	39

## **LISTA DE SIGLAS**

Environgeo – Laboratório de Resíduos, Novos Materiais e Geotecnia Ambiental

ICL – *Initial Consumption of Lime*

Legg – Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnia Ambiental

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$S$  – grau de saturação (%)

$\omega$  - teor de umidade do solo (%)

$\gamma_d$  – massa específica aparente seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$q_u$  – resistência à compressão simples (kPa)

$q_t$  – resistência à tração (kPa)

$Ca$  – teor de cal (%)

$Ca_v$  – teor volumétrico de cal (%)

$C_{iv}$  – teor volumétrico de cimento (%)

$\eta$  – porosidade (%)

$pH$  – potencial hidrogeniônico

$a/c_a$  – relação água cimento

$V_{ca}$  – volume de cal ( $\text{cm}^3$ )

$V_v$  – volume de vazios ( $\text{cm}^3$ )

$\tau$  – tensão cisalhante (kPa)

$\gamma$  – deformação cisalhante (%)

$R^2$  – coeficiente de correlação.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	16
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	16
<b>2.2.2 Objetivo secundário</b> .....	16
2.3 HIPÓTESE .....	17
2.4 PRESSUPOSTO .....	17
2.5 DELIMITAÇÕES .....	17
2.6 LIMITAÇÕES .....	17
2.7 DELINEAMENTO .....	18
<b>3 REVISÃO DA TÉCNICA DE SOLOS REFORÇADOS</b> .....	21
3.1 EFEITO DA CAL .....	21
3.2 EFEITO DA POROSIDADE .....	23
3.3 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA .....	23
3.4 TEOR DE UMIDADE .....	25
3.5 RELAÇÃO ÁGUA/CAL .....	26
3.6 RELAÇÃO VAZIOS/CAL.....	27
3.7 COMPORTAMENTO SOLO-FIBRA .....	29
<b>3.7.1 Interação solo-fibra</b> .....	30
<b>3.7.2 Comportamento tensão-deformação</b> .....	30
<b>3.7.3 Comportamento de misturas não confinadas</b> .....	32
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	34
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	34
4.2 MATERIAIS .....	35
<b>4.2.1 Solo</b> .....	35
<b>4.2.2 Cal</b> .....	38
<b>4.2.3 Fibras de polipropileno</b> .....	39
<b>4.2.4 Água</b> .....	42
4.3 MÉTODOS .....	42
<b>4.3.1 Preparação das amostras</b> .....	42
<b>4.3.2 Aceitação das amostras</b> .....	44
<b>4.3.3 Compressão simples e diametral</b> .....	45

<b>5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>47</b>
5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....	47
5.1.1 Efeito da adição da cal .....	47
5.1.2 Efeito da porosidade .....	48
5.1.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cal .....	49
5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	50
5.2.1 Efeito da adição da cal .....	51
5.2.2 Efeito da porosidade .....	51
5.2.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cal .....	52
5.3 RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO .....	53
5.4 MISTURAS CAULIM-CAL .....	55
5.4.1 Efeito da quantidade de cal e da porosidade na resistência à tração das misturas .....	56
5.4.2 Efeito da quantidade de cal e da porosidade na resistência à compressão das misturas .....	57
5.4.3 Efeito da porosidade/teor volumétrico da cal .....	59
5.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS COM E SEM A INCLUSÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO .....	60
5.5.1 Modo de ruptura .....	60
5.5.2 Avaliação das resistências com e sem a inclusão de fibras .....	62
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>65</b>
6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E DIAMETRAL .....	65
6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	66
REFERÊNCIAS .....	67



## 1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização e o crescimento das cidades fazem com que áreas antes não ocupadas devido a suas condições geográficas e geológicas sejam utilizadas para obras de Engenharia. Como exemplo, podem ser citadas obras portuárias, aeroportuárias, rodovias e mesmo grandes edificações que estejam alocadas em regiões cujos solos não sejam competentes para os projetos ali idealizados.

Ao defrontar-se com um solo pouco resistente para o tipo de obra a ser construído, pode-se proceder das seguintes formas:

- a) remoção e substituição do solo em questão;
- b) alteração do local da obra;
- c) adequação do projeto ao local da obra;
- d) melhoramento do solo.

O melhoramento do solo, particularmente, pode ser feito de numerosas formas. É possível que se compacte mais o solo a ser melhorado, aumentando o contato entre partículas do material e elevando o seu peso específico. Emprega-se, também, o tratamento do solo com agentes cimentantes artificiais, em que são empregados, mais comumente, a cal e o cimento.

Segundo Dalla Rosa (2009, p. 23), o emprego da cal como agente estabilizador é utilizado há séculos e hoje sua aplicação está presente em obras de aterros, pavimentações e fundações superficiais. A cal é vastamente utilizada na estabilização de solos por ser um aglomerante de baixo custo e por garantir o ganho de resistência quando bem dosado.

Para os processos de melhoramento de solo, a inclusão de fibras também tem sido estudada há algumas décadas. Festugato (2008, p. 132) observou que uma matriz de solo arenoso com adição de fibras apresentou maior resistência do que o solo sem reforço. O autor verificou, além disso, um comportamento de endurecimento nas misturas solo-fibra estudadas, e verificou que o índice aspecto das fibras têm importante influência sobre o ganho de resistência e a expansibilidade do material.



Neste contexto, este trabalho analisa a resistência de um solo melhorado com cal e reforçado com fibras. O capítulo 1 apresenta uma introdução ao assunto estudado. As diretrizes para o desenvolvimento deste trabalho são descritas no capítulo 2. Nele são apresentados: questão de pesquisa, objetivo principal e secundário, hipótese, pressuposto, delimitação, limitações e delineamento da pesquisa.

No capítulo 3 é feita a revisão bibliográfica dos assuntos abordados neste trabalho. É apresentado o comportamento de solos reforçados, dando enfoque no efeito que cada material acarreta e o que suas variáveis causam na mistura

O programa experimental é descrito no capítulo 4. São descritos os materiais utilizados, ensaios e procedimentos de moldagem.

O capítulo 5 descreve os resultados obtidos através dos ensaios realizados e de comparações com outros trabalhos. Além disso, neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em misturas solo-cal, necessários para a comparação dos resultados.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho. Neste capítulo também são propostas sugestões para trabalhos futuros.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: a razão vazios/agente cimentante é aplicável na estimativa das resistências à compressão e tração das misturas de solo silto-argiloso artificialmente reforçado com cal e melhorado com fibras?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do trabalho é a verificação da adequação da razão vazios/agente cimentante na estimativa das resistências à compressão e tração de um solo silto-argiloso reforçado com cal e melhorado com fibras.

#### **2.2.2 Objetivo secundário**

O objetivo secundário do trabalho é a avaliação da influência na resistência das misturas, analisando-se, isoladamente, cada uma das variáveis de interesse, sendo elas a quantidade de cal e a porosidade das misturas. Além disso, é comparada a resistência das misturas com e sem a inclusão das fibras de polipropileno.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que a razão vazios/agente cimentante é válida na estimativa das resistências à compressão e tração das misturas de solo silto-argiloso cimentado com cal e reforçado com fibras de polipropileno.

## 2.4 PRESSUPOSTO

Como pressuposto do trabalho, tem-se que o valor de sucção das misturas é suficientemente baixo e pode ser desconsiderado. Diversos autores verificaram que a sucção representa menos que 10% do valor de resistência, dentre estes autores estão: Foppa (2005), Lopes Junior (2007) e Dalla Rosa (2009).

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao uso de caulim a ser reforçado com cal e fibras de polipropileno, ensaiado à compressão simples e à tração.

## 2.6 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se a estudar misturas com:

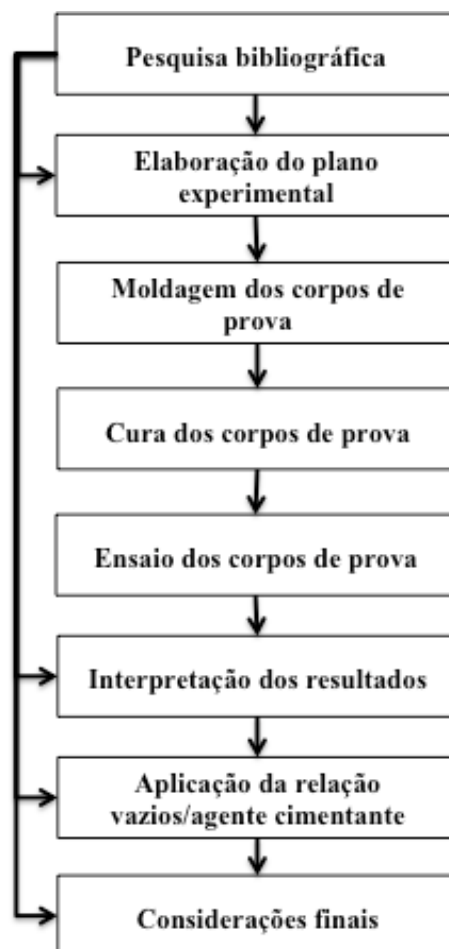
- a) solo,
  - pesos específicos aparentes secos de 14, 15 e 16 kN/m<sup>3</sup>;
  - teor de umidade do solo igual a 20%;
- b) teores de cal de 3, 5, 7 e 9%;
- c) porcentagem de fibra constante e igual a 0,5%;
- d) tempo de cura das amostras de 28 dias.

## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são 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 dos corpos de prova;
- d) interpretação dos resultados;
- e) aplicação da relação vazios/agente cimentante;
- f) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas de pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

A **pesquisa bibliográfica** teve como objetivo a obtenção de informações relativas às misturas solo-fibra e solo-cal. Buscou-se, também, publicações e estudos recentes quanto ao solo com aglomerantes, seus materiais constituintes, métodos de dosagem e variáveis de estudos propostas. Além disso, foi investigado o melhoramento dos solos quando submetidos à ensaios para quantificação da resistência, visando obter os valores de resistências à tração e à compressão.

A segunda etapa do trabalho foi a **elaboração do plano experimental**. Nesta etapa do trabalho, foram definidas as seguintes propriedades das amostras:

- a) o teor de umidade;
- b) os pesos específicos aparentes secos;
- c) os teores de cal;
- d) o tempo de cura das amostras.

Após definida esta etapa, iniciou-se a **moldagem dos corpos de prova**, segundo os teores estabelecidos. Após a moldagem, os corpos de prova foram devidamente armazenados, pelo tempo de cura adotado, e, no último dia de cura, foram imersos por 24 horas, a fim de reproduzir o efeito de saturação nas amostras, reduzindo o efeito da sucção no solo.

Após essa etapa, procedeu-se os **ensaios dos corpos de prova**. Foram realizados ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral. Ambos ensaios foram realizados no mesmo equipamento, variando apenas o posicionamento das amostras. Para a compressão simples a amostra é posicionada na vertical, enquanto que para a tração, a amostra é posicionada na horizontal. Após os ensaios, os resultados foram analisados, visando o atendimento aos parâmetros pré-estabelecidos para aceitação das amostras. Os corpos de prova que não apresentaram conformidade com esses parâmetros foram obrigatoriamente descartados e refeitos.

Quando os resultados dos ensaios mostraram-se adequados deu-se início à **aplicação da relação vazios/agente cimentante**. A análise dos resultados teve como objetivo analisar, isoladamente, cada uma das variáveis de interesse e a obtenção de uma relação entre a porosidade e o teor de cal nas amostras.

Por fim, foram feitas as **considerações finais**. Nesta etapa, foi verificada a validação da relação vazios/agente cimentante, bem como a influência de cada uma das variáveis chaves da

pesquisa. Também foi obtida uma relação constante entre a resistência à compressão e à tração. Além dessas análises, foi comparada a resistência de misturas com reforço de fibra e sem o reforço, visando verificar a influência desse elemento isoladamente.

### 3 REVISÃO DA TÉCNICA DE SOLOS REFORÇADOS

Este capítulo descreve o comportamento de solos melhorados. Os principais tópicos abordados são:

- a) as alterações causadas pela cal;
- b) o efeito da alteração dos teores da cal;
- c) o efeito provocado pela variação da porosidade;
- d) o tempo de cura;
- e) o teor de umidade do solo.

É abordado, neste capítulo, uma breve revisão das relações entre a água, a quantidade de cal e a porosidade das misturas. Também é exposto o comportamento de misturas reforçadas com fibra.

#### 3.1 EFEITO DA CAL

Para Ingles e Metcalf<sup>1</sup> (1972 apud DALLA ROSA, 2009, p. 41), mesmo pequenas quantidades de cal, quando misturadas ao solo, irão modificar as propriedades da mistura. Quanto maior a quantidade de cal adicionada, maior será a modificação das propriedades originais do material.

A respeito dos fenômenos lentos e rápidos ocorridos quando a cal é utilizada como agente estabilizante, Lopes Junior (2011, p. 34-35) descreve que:

Alguns fenômenos que podem originar a etapa rápida no processo de interação da cal com um solo fino são: troca catiônica, floculação-aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, absorção de cal e reações químicas. A fase lenta é caracterizada pelas reações pozolânicas, que proporcionam um aumento da resistência, devido à formação de produtos cimentantes; e pela carbonatação, que é uma reação prejudicial, uma vez que reduz a quantidade de cal disponível para produzir as reações pozolânicas.

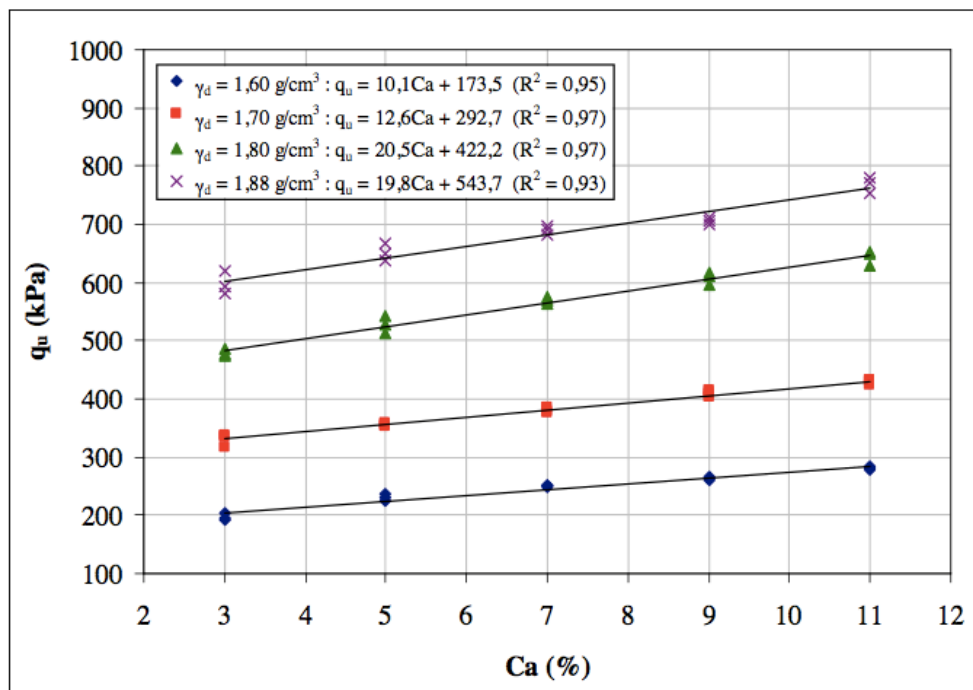
---

<sup>1</sup> INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization**: principles and practice. Sidney: Butterworths, 1972.

Este autor reforça que as fontes de sílica, alumina e ferro encontradas no solo, quando associadas à água e à cal, garantem que as reações pozolânicas continuem se desenvolvendo, aumentando gradativamente a resistência mecânica da mistura. Ingles e Metcalf<sup>2</sup> (1972 apud LOPES JUNIOR, 2011, p. 36) descrevem as reações da cal com o solo: “Os géis de silicato resultantes da reação imediatamente cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios. Os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos.”.

Lopes Junior (2007, p. 69-71) observou em seus ensaios de compressão simples, realizados nas amostras de solo reforçado com cal, nas porcentagens de 3 a 11%, com tempo de cura de 28 dias e umidade do solo de 14%, o crescimento linear da resistência. Verifica-se, através da figura 2, que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento do teor de cal independente do grau de compactação da mistura.

Figura 2 – Resistência à compressão simples em relação ao teor de cal



(fonte: LOPES JUNIOR, 2007, p. 70)

<sup>2</sup> INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization**: principles and practice. Sidney: Butterworths, 1972.



## 3.2 EFEITO DA POROSIDADE

Segundo Dalla Rosa (2009, p. 84), a redução da porosidade da mistura compactada exerce influência na resistência à compressão simples, de forma semelhante ao aumento de resistência devido à quantidade de cal adicionada na mistura. Contudo, o aumento da resistência devido à redução da porosidade é independente da quantidade de cal adicionada.

Para Lopes Junior (2007, p. 91), o aumento da resistência devido à redução da porosidade se deve à existência de uma maior interação entre as partículas existentes, possibilitando uma melhor cimentação. Também contribuem para uma maior resistência a maior capacidade de distribuição das tensões, bem como a maior capacidade de mobilização de atrito nas porosidades mais baixas.

## 3.3 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA

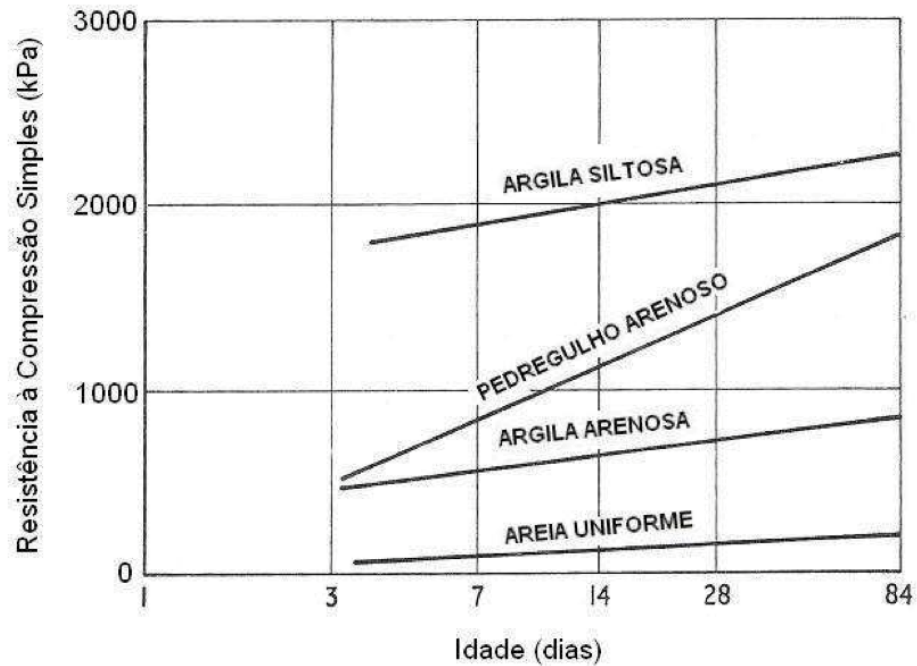
Um estudo verificando a influência do tempo de cura em amostras com 5% de cal hidratada foi apresentado por Ingles e Metcalf<sup>3</sup> (1972 apud LOPES JUNIOR, 2007, p. 35). Neste estudo é possível verificar que solos argilo-siltosos aumentam o valor de resistência com o aumento do tempo de cura. Através da figura 3, é possível verificar que, para todos os tipos de solo, quando aumentado o tempo de cura das misturas, ocorre um aumento linear da resistência à compressão simples.

As amostras desenvolvidas por Dalla Rosa (2009, p. 149) foram curadas durante os tempos de 28, 60 e 90 dias. É observado, na figura 4, um aumento de cerca de 65% quando o tempo de cura passou de 60 para 90 dias. Já a resistência obtida para 28 dias de cura é cerca de 50% inferior à resistência obtida para as amostras com 60 dias de cura. Os ensaios com 90 dias, quando comparados com os de 28, aumentaram em média 150% o seu valor de carga última.

---

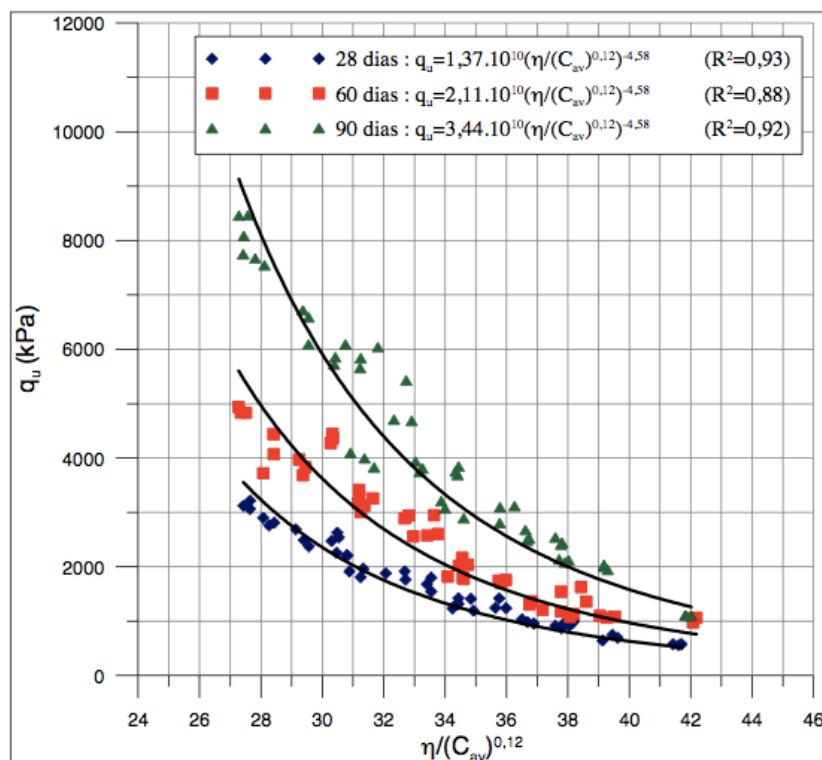
<sup>3</sup> INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization**: principles and practice. Sidney: Butterworths, 1972.

Figura 3 – Efeito do tempo de cura sobre misturas estabilizadas com cal



(fonte: INGLES; METCALF<sup>4</sup>, 1972 apud LOPES JUNIOR, 2007, p. 35)

Figura 4 – Influência do tempo de cura em amostras ensaiadas com 28, 60 e 90 dias



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

<sup>4</sup> INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization**: principles and practice. Sidney: Butterworths, 1972.

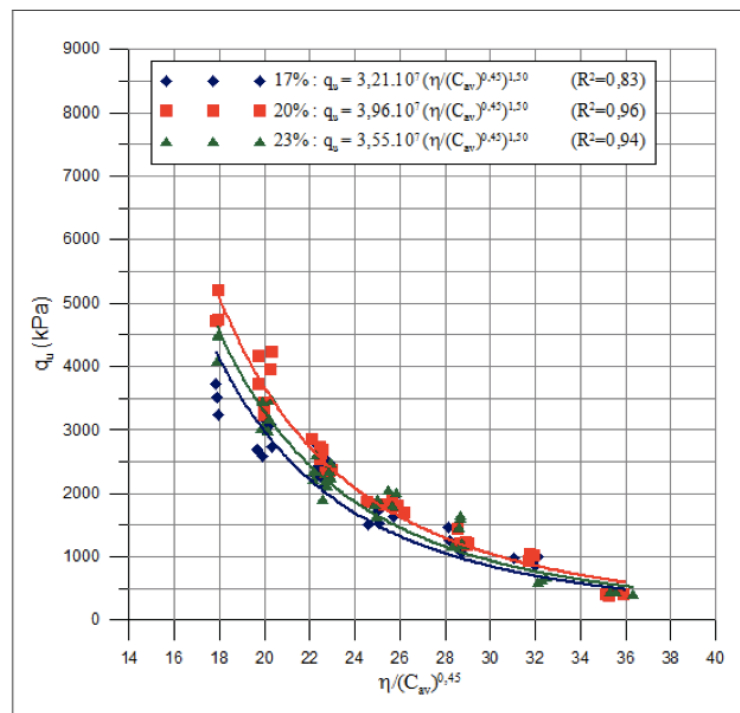
### 3.4 TEOR DE UMIDADE

Dalla Rosa Johann (2013) verificou a influência do teor de umidade em misturas caulim-cal. O estudo foi feito com três diferentes teores de umidade e diferentes tempos de cura. Na figura 5 são apresentadas as curvas obtidas para os teores umidade de 17, 20 e 23% e cura de 28 dias.

É observado, através da figura, que a variação do teor de umidade não acarretou grandes variações na resistência das misturas. Destaca-se que o teor de umidade que apresentou maiores resistências foi o de 20%, para todos os tempos de cura e para os ensaios de compressão simples e diametral.

Lopes Junior (2007, p. 120) também verificou que a variação do teor de umidade causa pequenas variações na resistência. Para o autor, “A variação do teor de umidade de moldagem, mantendo-se constante a massa específica aparente seca, não afetou consideravelmente a resistência à compressão simples de amostras com cal curadas por 28 dias [...]”.

Figura 5 – Influência do teor de umidade das amostras com teores de 17, 20 e 23% e 28 dias de cura submetidas à compressão simples



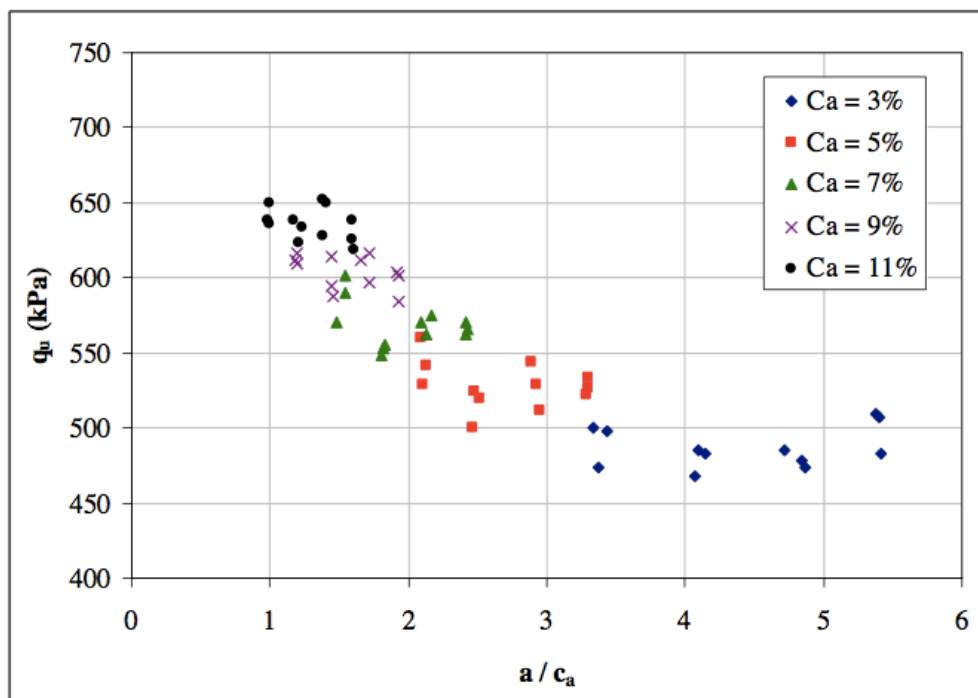
(fonte: DALLA ROSA JOHANN, 2013, p. 133)

### 3.5 RELAÇÃO ÁGUA/CAL

De acordo com Lopes Junior (2007, p. 97), quando verificada a resistência à compressão simples de misturas, como função da relação água/cal, os resultados obtidos não se mostraram satisfatórios para uma metodologia de dosagem. Através dos dados indicados na figura 6, verifica-se que os resultados apresentam-se em patamares, não se dessemelhando dos teores de cal presentes em cada mistura.

O autor acredita que o uso de uma relação entre a quantidade de vazios da mistura e a quantidade de cal seja mais indicado para a verificação das resistências. Segundo Lopes Junior (2007), a condição de não-saturação total do solo indica que a relação entre quantidade de vazios, ao invés da quantidade de água, seja mais satisfatória para estimar a resistência.

Figura 6 – Relação água/cal pela resistência à compressão simples de misturas com 28 dias de cura



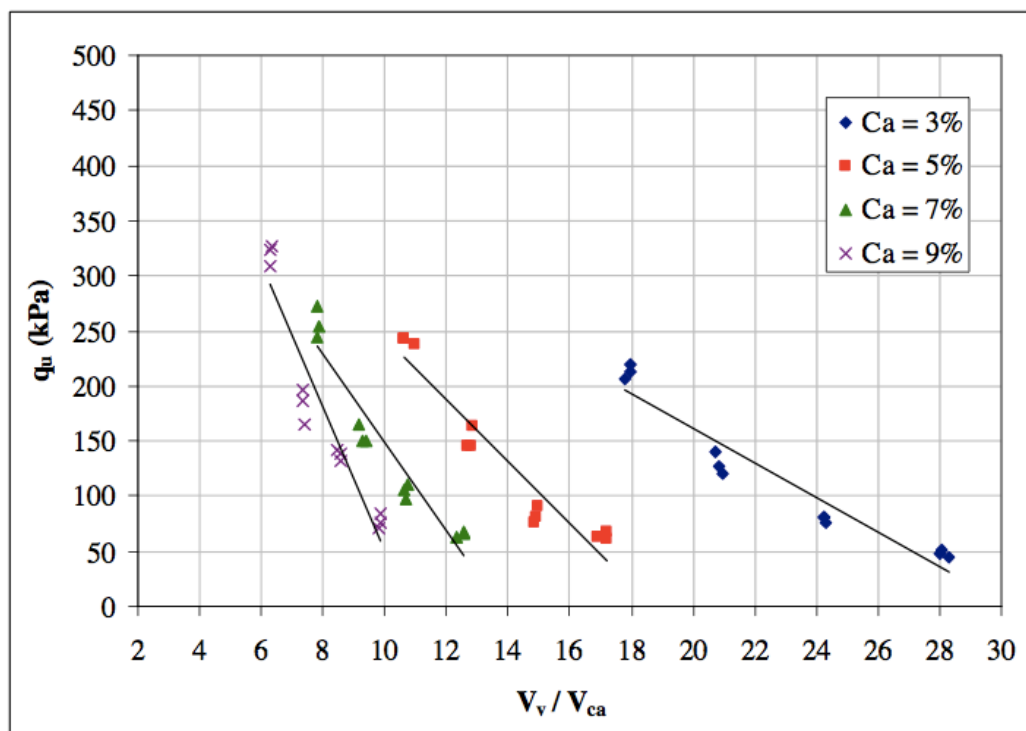
(fonte: LOPES JUNIOR, 2007, p. 74)

### 3.6 RELAÇÃO VAZIOS/CAL

A relação vazios/cal é definida pela razão do volume de vazios pelo volume de cal. Trabalhos como os de Foppa (2005), Lopes Junior (2007, 2011) e Dalla Rosa (2009) apresentam correlações entre a relação vazios/agente cimentante e a resistência à compressão simples considerada razoável pelos autores.

A figura 7 apresenta a razão vazios/cal em função da resistência à compressão simples de misturas de solo areno-argiloso cimentadas com cal obtida por Dalla Rosa (2009, p. 119). Observa-se que os resultados são divididos em patamares relativos a diferentes teores de cal. A autora acrescenta que os pontos dispersos, na figura, apresentam uma leve tendência exponencial.

Figura 7 – Relação vazios/cal para amostras com 90 dias de cura



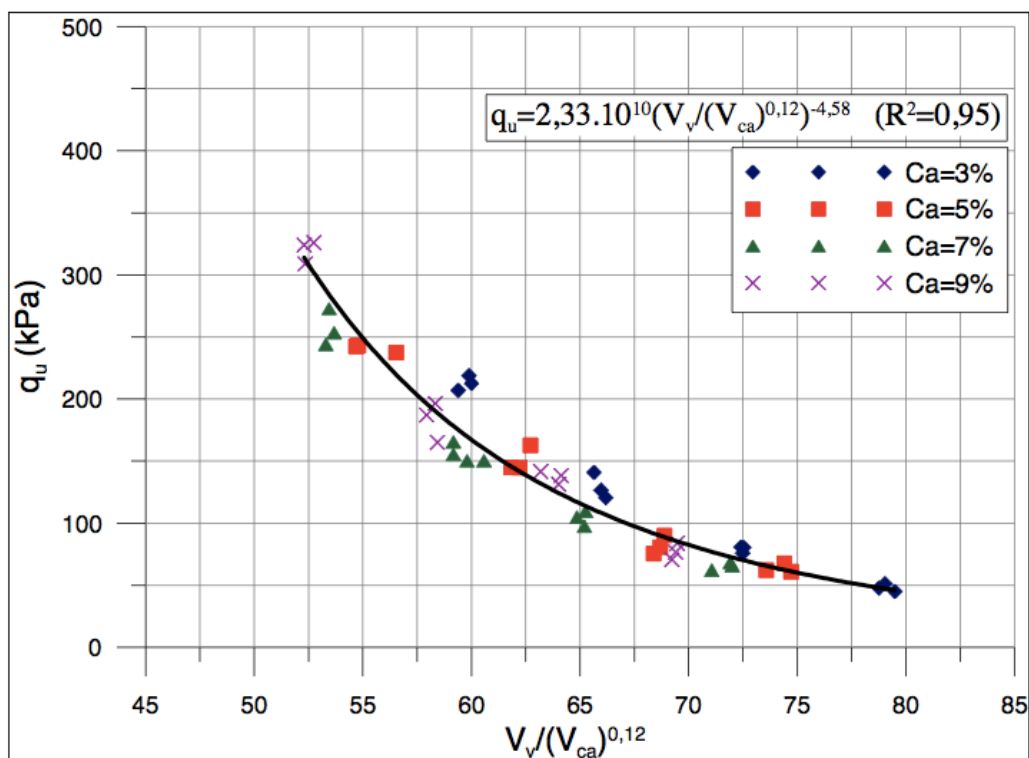
(fonte: DALLA ROSA, 2009, p. 119)

A fim de obter um melhor ajuste entre o volume de vazios e o volume de agente cimentante, Foppa (2005, p. 124) aplicou um expoente no volume de agente cimentante desta relação. Com isso, o autor visava compatibilizar as taxas de variação desses volumes. Esse expoente é

determinado de maneira a se obter um melhor coeficiente de ajuste ( $R^2$ ) e é definido por tentativa.

Dalla Rosa (2009, p. 122) aplicou o expoente 0,12 sobre o volume de cal, apresentado na figura 8, verificando um coeficiente de correlação de 0,95. Devido ao bom coeficiente de ajuste ( $R^2$ ) apresentado pela aplicação do expoente, a autora considerou adequada a aplicação do expoente para representar os resultados de compressão simples.

Figura 8 – Relação vazios/cal ajustado para o expoente 0,12



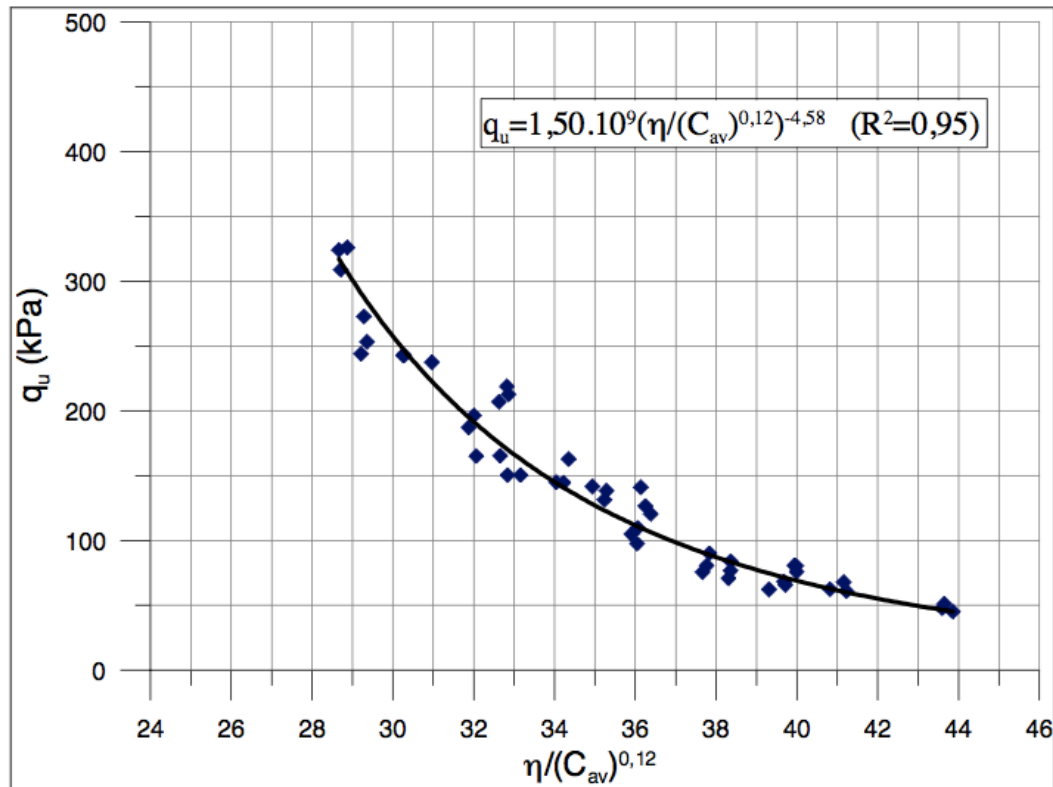
(fonte: DALLA ROSA, 2009, p. 112)

Foppa (2005, p. 126) considerou válida a aplicação do expoente ao volume de agente cimentante. Contudo, visando apresentar os resultados de um forma adimensional, o autor apresentou seus dados, não através da razão vazios/agente cimentante, mas através da porosidade do material, expressa em porcentagem, e o teor volumétrico do agente cimentante, também expresso em porcentagem.

Dalla Rosa (2009, p. 122) aplicou a relação entre a porosidade e o teor volumétrico da cal, como mostra a figura 9. É comprovado que não ocorrem alterações na qualidade dos ajustes,

pois a razão porosidade/teor volumétrico do aglomerante é proporcional à relação vazios/agente cimentante.

Figura 9 – Relação vazios/cal ajustado para o expoente 0,12 e expresso em função da porosidade e do teor volumétrico de cal



(fonte: DALLA ROSA, 2009, p. 122)

### 3.7 SOLO-FIBRA

Nos próximos itens, são apresentadas as características da interação entre o solo e a fibra, onde é apresentada uma breve explicação do comportamento tensão-deformação de solos cimentados reforçados com fibras. Além disso, são discutidas as resistências à compressão e à tração de misturas reforçadas.

### 3.7.1 Interação solo-fibra

Festugato (2008, p. 30) cita que o comportamento das misturas solo-fibra pode ser verificado através dos mesmos parâmetros empregados para solos não reforçados. O autor ainda ressalta que “As características de resistência e de deformabilidade do elemento de reforço tem uma influência fundamental no comportamento tensão-deformação do solo reforçado.”.

Festugato (2008, p. 31) evidencia que:

Sua principal função é de aumentar a ductilidade e diminuir a perda de resistência pós-pico, além do acréscimo de resistência mecânica. [...]

As fibras somente passam a exercer uma ação efetiva dentro da massa de solo quando esta, submetida a esforços externos, sofre deformações. O funcionamento das fibras como elementos de reforço é então comandado pelas características de deformabilidade do solo e pela forma de distribuição destas deformações, que dependem do tipo de sollicitação ao qual o material está sendo submetido.

### 3.7.2 Comportamento tensão-deformação

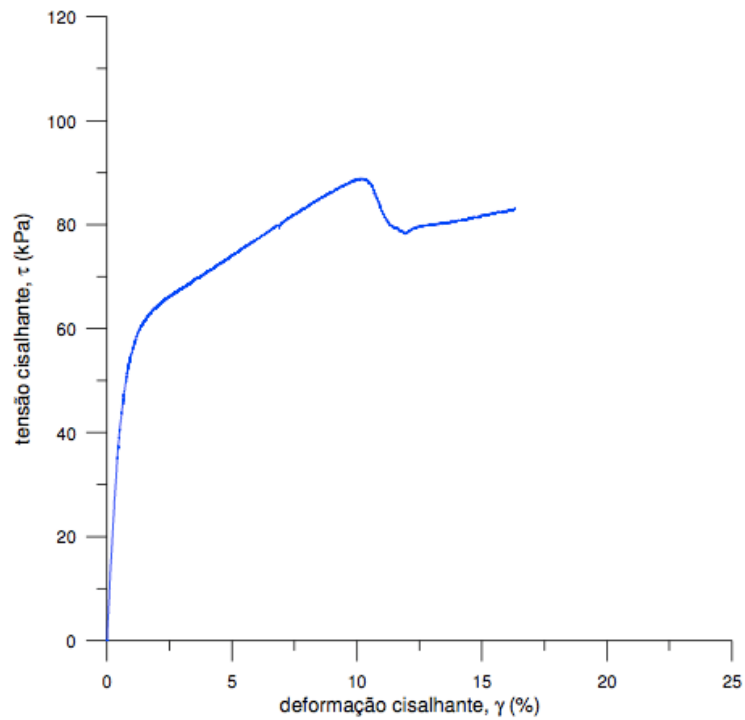
Quando há a inclusão de fibras ao solo, verifica-se uma modificação de comportamento deste material (FESTUGATO, 2011, p. 114). Quando observadas duas amostras de solo, uma delas reforçada com cimento e a outra com cimento e fibras, é observado que o comportamento segue distintas formas.

Na figura 10 é apresentado o resultado de um ensaio *simple shear* monotônico, onde o corpo de prova estudado constitui-se de resíduo de mineração cimentado não reforçado com fibras. Observa-se que a adição de cimento aumenta a resistência do material, onde há tensão cisalhante de pico, sendo a resistência de aproximadamente 100 kPa (FESTUGATO, 2011, p. 114-116).

Festugato (2011, p. 116) observou que, ao se incluir fibras ao resíduo de mineração cimentado, o material apresentou um comportamento de endurecimento notável. Além disso, verificou-se que para maiores deformações cisalhantes, a resposta foram maiores resistências, sendo assim a amostra com a inclusão de fibras não apresentou um pico de resistência. Na figura 11 é apresentado este comportamento.

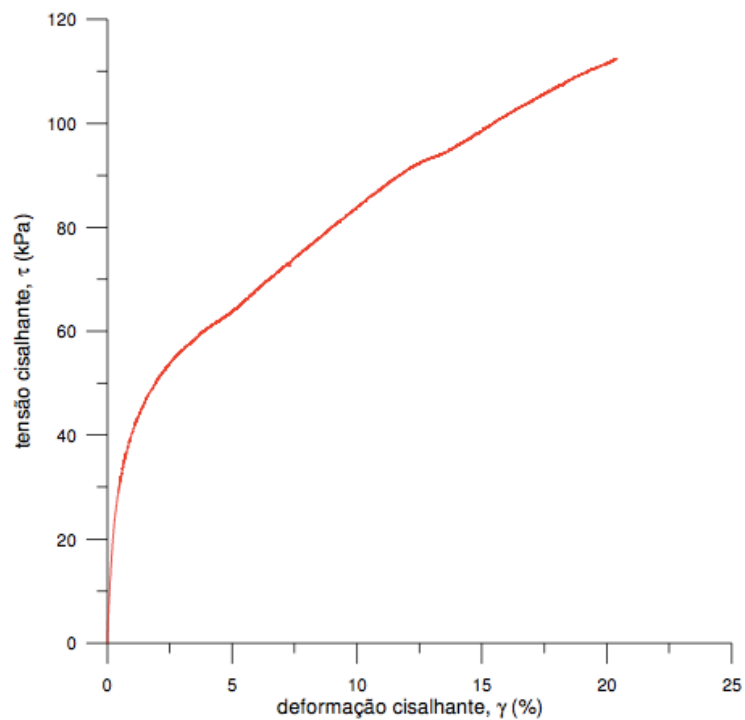


Figura 10 – Resposta cisalhante monotônica de resíduo de mineração cimentado sem a inclusão de fibras



(fonte: FESTUGATO, 2011, p. 115)

Figura 11 – Resposta cisalhante monotônica de resíduo de mineração com a inclusão de fibras



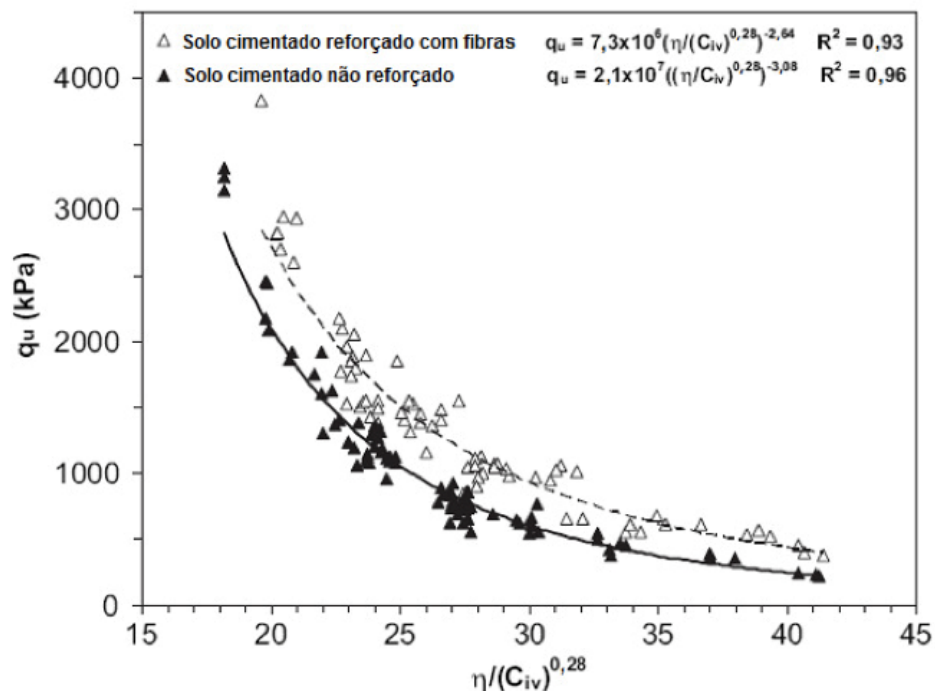
(fonte: FESTUGATO, 2011, p. 116)

### 3.7.3 Comportamento de misturas não confinadas

Festugato (2011, p. 192-198) estudou o comportamento de misturas de solo cimentado artificialmente. Neste experimento o autor contou com um programa de ensaios em um solo arenoso cimentado com a inclusão de fibras e outro sem a inclusão dos reforços. Os ensaios desenvolvidos foram os de compressão simples e de compressão diametral. Os teores de materiais em ambos os ensaios foram variados da mesma forma.

Na figura 12, observa-se o resultado dos ensaios à compressão simples com e sem fibras. A inclusão de fibras, juntamente com a redução da porosidade e o aumento do teor volumétrico de cimento, acarreta em um aumento da resistência à compressão. Em ambas as curvas, foi aplicado o mesmo expoente de ajuste. Observa-se que os coeficientes de correlação das curvas são bastante altos (FESTUGATO, 2011, p. 195).

Figura 12 – Resistência à compressão de misturas cimentadas reforçadas e não reforçadas com fibras, em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento



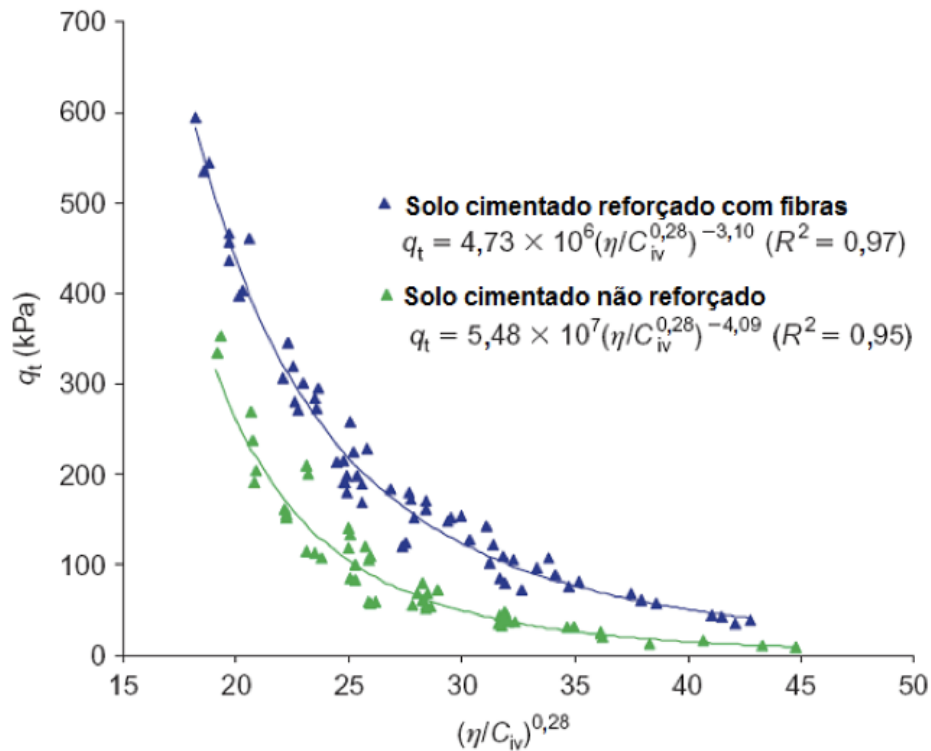
(fonte: FESTUGATO, 2011, p. 196)

Festugato (2011, p. 196) desenvolveu um estudo semelhante avaliando a influência da fibra no comportamento à tração das misturas. Uma matriz de solo areno-siltosa foi cimentada, parte dos ensaios contou com a inclusão de fibras e parte foi moldada sem elas. Os resultados,

apresentados na figura 13, mostram que a inclusão das fibras aumentou a resistência das misturas.

Na figura 13, foram agrupados os resultados de compressão diametral das misturas com e sem reforço de fibras. Uma análise similar à apresentada para a compressão simples foi feita para a tração. É observado na figura 13 que a inclusão de fibras, assim como a redução da porosidade e o aumento do teor volumétrico do cimento aumentaram a resistência à tração das misturas estudadas. Nota-se também que os coeficientes de correlação das curvas ( $R^2$ ) são bastante elevados.

Figura 13 – Resistência à tração de misturas cimentadas reforçadas e não reforçadas com fibras, em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento



(fonte: FESTUGATO, 2011, p. 197)

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o programa experimental desenvolvido para este Trabalho de Conclusão de Curso. São descritos os materiais e dosagens utilizados, os procedimentos de moldagem dos corpos de prova e os ensaios realizados.

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de analisar a influência da quantidade de cal e da porosidade das amostras sobre a resistência à compressão e à tração, e posteriormente, verificar a aplicação da relação vazios cal na estimativa da resistência. Além disso, o estudo busca uma comparação do efeito causado pela inclusão de fibras com misturas similares sem este reforço.

Buscou-se um solo argiloso para compor esta pesquisa, visando a sua estabilização com cal. Devido a grande quantidade de finos presente no caulim rosa, este solo foi o escolhido para este estudo.

Além disso, visou-se a posterior comparação deste trabalho com outros paralelos, que estavam sendo realizados no mesmo laboratório. Deste modo, para obtenção dos objetivos deste estudo e posterior comparação dos resultados, fixou-se os seguintes pontos de moldagem:

- a) massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ) de 14, 15 e 16 kN/m<sup>3</sup>;
- b) teor de cal de 3, 5, 7 e 9% em relação à massa de solo seco;
- c) teor de fibra de polipropileno igual a 0,5% em relação a massa de solo seco;
- d) teor de umidade igual a 20% em relação a massa de solo seco;
- e) tempo de cura das amostras de 28 dias.

Definindo-se as características das amostras, foi adotada a moldagem de três amostras iguais para cada ponto de moldagem. Dadas estas características das misturas, foram preparadas 36 amostras para os ensaios de compressão simples e iguais 36 amostras para os ensaios de tração por compressão diametral.

## 4.2 MATERIAIS

A seguir, são detalhados os materiais utilizados para realização do programa experimental, sendo eles:

- a) solo;
- b) cal hidratada;
- c) fibras de polipropileno;
- d) água.

### 4.2.1 Solo

O solo empregado neste trabalho é conhecido como caulim rosa. É um solo proveniente do município de Pantano Grande, no estado do Rio Grande do Sul. Este solo, por ser caolinítico, não apresenta expansividade, sendo adequado para a estabilização com agentes cimentantes.

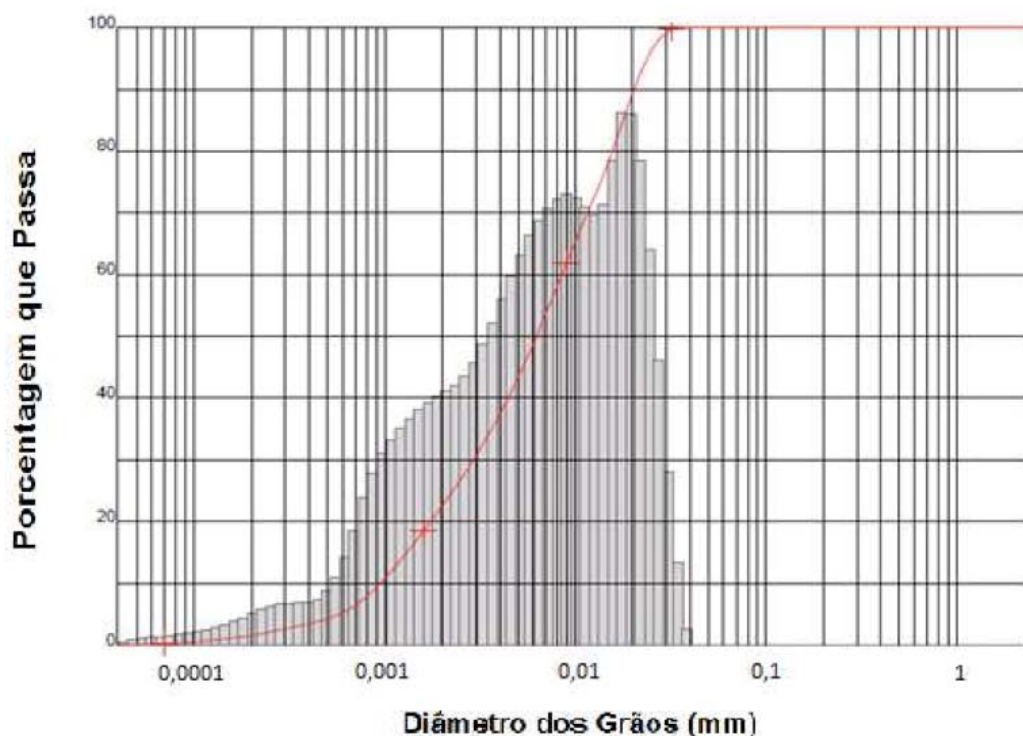
Conforme descreve Rosa (2010, p. 24):

O caulim apresenta uma cor branca ou rosada, de acordo com o teor de ferro presente. É composto por silicatos de alumínio hidratados cristalinos ( $Al_2 \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$ ), principalmente caulinita e haloisita e, em menor proporção, illita. Podem ocorrer outros metais (silício, hidrogênio, oxigênio, etc.) além dos materiais absorvidos ou impurezas, tais como: areia, palhetas de mica, grãos de feldspato e óxido de ferro.

Sabe-se que o tratamento de solo com cal não é efetivo para qualquer matriz de solo. Lopes Junior (2011, p. 32), cita que solos com pouca quantidade de finos sofrem pouca influência quando cimentados com cal. Para ser empregada a estabilização com a cal, a presença de frações de argila e silte na composição do solo torna-se fundamental.

As propriedades físicas do caulim, obtidas por Dalla Rosa Johann (2013, p. 90-91), mostram que a quantidade de argila presente no material é de 22% e a de silte é de 78%, figura 14. A autora obteve a curva granulométrica do caulim por ensaio de difração a laser (figura 2) e suas propriedades físicas, que são apresentadas na tabela 1. Evidencia-se que a composição deste solo é de 100% de finos e, como citado anteriormente, segundo Lopes Junior (2011), pode ser utilizada a cal na estabilização deste material.

Figura 14 – Curva granulométrica do caulim



(fonte: DALLA ROSA JOHANN, 2013, p. 90)

Tabela 1 – Propriedades físicas do caulim rosa

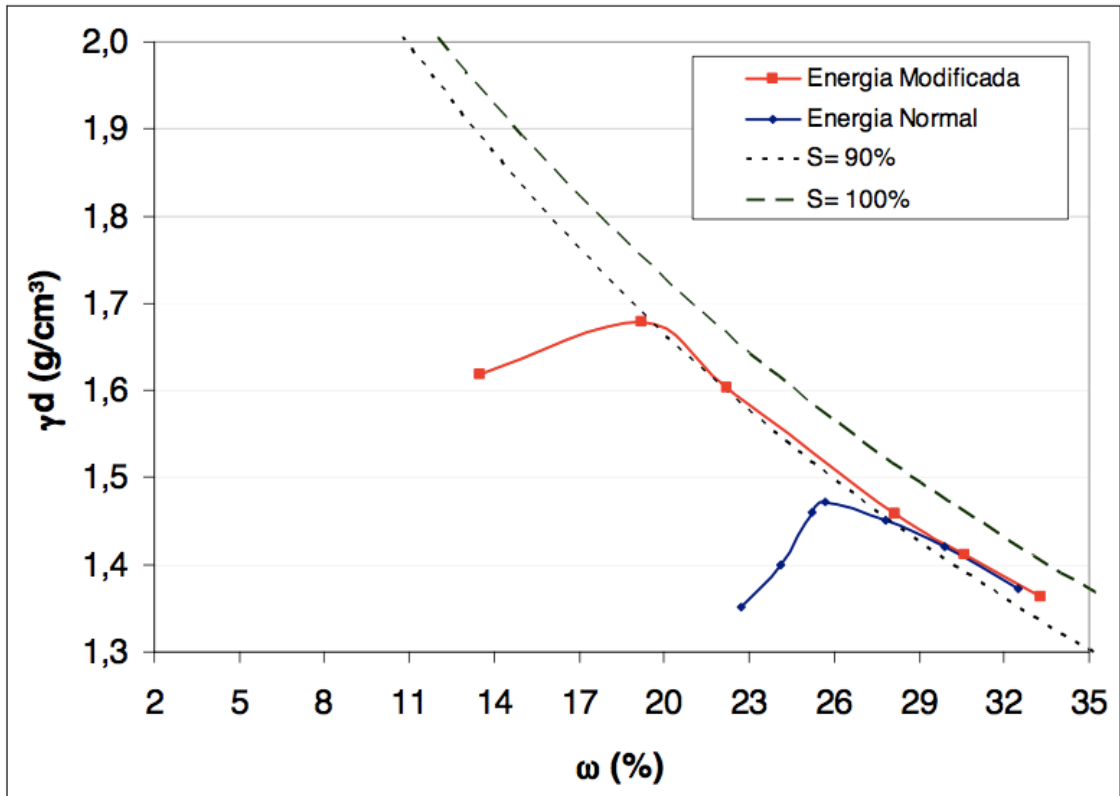
Propriedades	Valores	Norma seguida para classificação e/ou ensaio	Observações
Limite de Liquidez (LL)	38,2	NBR 6459/84	-
Limite de Plasticidade (LP)	34,5	NBR 7180/84	-
Índice de Plasticidade (IP)	3,7	-	-
Densidade dos Grãos (G)	2,55	NBR 6508/84	Média de 3 determinações
% de Silte (0,002 > Ø < 0,06 mm)	78%	Ensaio de difração à laser	-
% de Argila (0,002 < Ø mm)	22%		

(fonte: adaptado de DALLA ROSA JOHANN, 2013, p. 91)

A curva de compactação, obtida com a energia modificada, proposta por Rosa (2010, p. 47), apresentou como umidade ótima o teor de 20%. Já os pesos específicos aparentes secos variaram entre 14 e 16 kN/m<sup>3</sup>, sendo o máximo de 16,7 kN/m<sup>3</sup>. As curvas de saturação de

90% e 100% também são apresentadas na figura 15. Na figura 16 é apresentada uma imagem do caulim rosa utilizado na pesquisa.

Figura 15 – Curva de compactação do caulim (energia modificada e energia normal)



(fonte: adaptado de ROSA, 2010, p. 47)

Figura 16 – Caulim rosa utilizado nesta pesquisa



(fonte: foto da autora)

## 4.2.2 Cal

Segundo Guimarães<sup>5</sup> (2002 apud LOPES JUNIOR, 2011, p. 33), a cal empregada no melhoramento de solos é derivada da calcinação das rochas cálcicas e magnesianas, obtida a temperaturas próximas à 1000°C. Para Dalla Rosa (2009, p. 106), “As reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica de misturas solo-cal. Esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes.”.

A cal utilizada nos ensaios é a cal hidratada dolomítica do tipo CH II, proveniente de Caçapava do Sul, neste estado. A caracterização da cal foi obtida por Dalla Rosa Johann (2013) e está apresentada na tabela 2. A massa específica da cal, obtida pela autora, foi de 2,49 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 2 – Propriedades da cal utilizada na pesquisa

Propriedades	Limites da NBR 7175/86	Análise
Densidade	600 g/l	510 g/l
Perda ao Fogo	-	23,3%
Resíduo Insolúvel	-	4,7%
CO <sub>2</sub> (anidrido carbônico)	5%	2,2%
Óxidos Totais	88%	94,8%
Óxidos não Hidratados	15%	11%
CaO	-	44,8%
MgO	-	27,9%
Umidade	1,5%	0,6%
Resíduo na peneira 0,600 mm	0,5%	0,0%
Resíduo na peneira 0,075 mm	15%	8,0%

\*Dados do fabricante

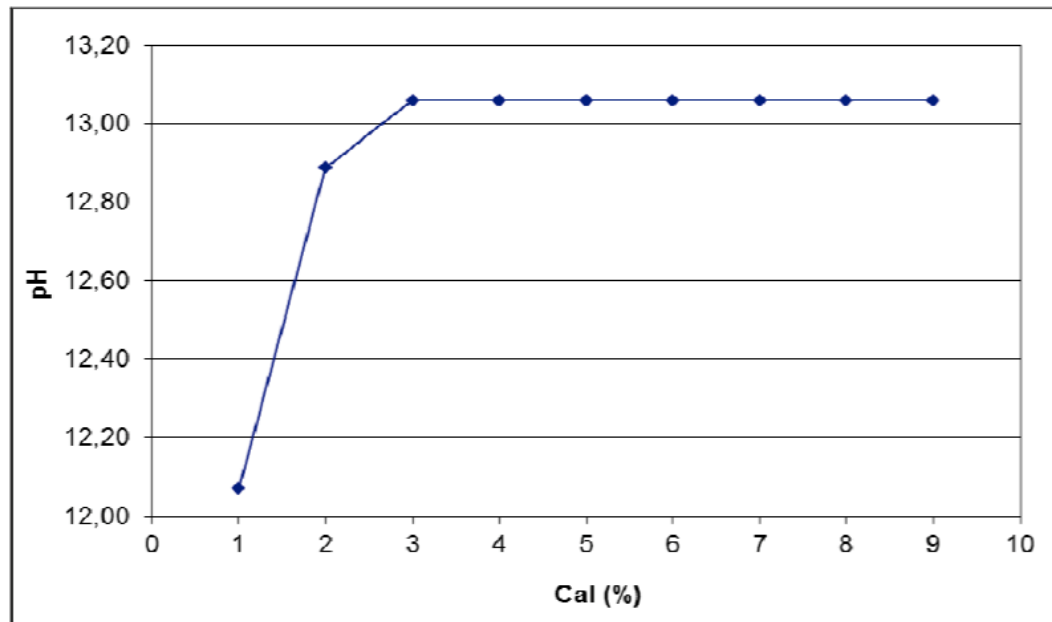
(fonte: DALLA ROSA JOHANN, 2013, p. 92)

Quanto ao teor de cal a ser inserido nas amostras, o resultado do estudo feito por Dalla Rosa Johann (2013, p. 93), utilizando caulim rosa, apresenta como teor mínimo 3% de cal, definido pelo método do ICL (*Initial Consumption of Lime*). Na figura 17 é possível verificar que, a partir deste teor, o pH da mistura permanece constante.

<sup>5</sup> GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal**: fundamentos e aplicações na Engenharia Civil. São Paulo: Pini, 2002.



Figura 17 – Dosagem de cal pelo método ICL



(fonte: DALLA ROSA JOHANN, 2013, p. 93)

### 4.2.3 Fibras de polipropileno

Festugato (2008, p. 70) expressa o porquê da utilização de fibras de polipropileno para o reforço de solos:

As fibras utilizadas como elemento de reforço são poliméricas de polipropileno e estão disponíveis no mercado em forma de pequenos filamentos. Foram escolhidas por apresentarem características uniformes e bem definidas, por serem inertes quimicamente e por estarem disponíveis em grande quantidade no comércio, o que possibilita a extrapolação de resultados para projetos de engenharia.

De acordo com Feuerharmel (2000, p. 25):

O primeiro efeito provocado pela inclusão de fibras ao solo pode ser detectado já na fase de compactação, formando uma estrutura distinta da do solo sem fibras. Mantendo-se constante a energia de compactação, a inclusão de fibras provoca um aumento do índice de vazios do solo. Tal efeito pode ser mais ou menos pronunciado dependendo do atrito desenvolvido entre o solo e o reforço.

Segundo Festugato (2008, p. 70), o título é a unidade que representa o diâmetro dos filamentos de fibra e sua unidade é o dtex (1 dtex = 1g/10000m). As propriedades das fibras de polipropileno que foram utilizadas na pesquisa são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades das fibras de polipropileno

Propriedades Mecânicas	fibras 3,3dtex
diâmetro	0,023mm
densidade	0,91
módulo de elasticidade	3GPa
resistência à tração última	120MPa
deformação na ruptura	80%

(fonte: adaptada de FESTUGATO, 2008, p. 71)

Ainda de acordo com Festugato (2008, p. 67), a matriz do solo é fundamental no comportamento tensão-deformação das misturas reforçadas com fibras. Desta forma, faz-se necessário conhecer:

- a) granulometria;
- b) índice de vazios;
- c) umidade;
- d) demais índices físicos do solo.

Festugato (2011, p. 44) afirma que:

As fibras somente passam a exercer uma ação efetiva dentro da massa de solo quando esta, submetida a esforços externos, sofre deformações. O funcionamento das fibras como elemento de reforço é então comandado pelas características de deformabilidade do solo e pela forma de distribuição destas deformações, que dependem do tipo de sollicitação ao qual o material está sendo submetido.

Sachetti (2012, p. 48) verificou que as fibras de polipropileno, empregadas no Legg Environgeo da UFRGS, são vastamente empregadas na indústria têxtil e são originárias da empresa Fitesa Fibras e Filamentos SA.

Festugato (2008) sugere que o diâmetro dos corpos de provas seja, pelo menos, duas vezes maior que o comprimento das fibras, evitando assim que haja qualquer interferência entre os reforços fibrosos e o diâmetro das amostras. Sendo assim, foi adotado um molde cilíndrico para a confecção de amostras com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, visto que o comprimento das fibras é de 24 mm, este

Na figura 18 são apresentadas duas imagens da fibra de polipropileno. Na primeira (a), observa-se como a fibra é obtida e, na segunda (b), tem-se uma imagem microscópica da mesma. Após ser lavada e desfiada, a fibra apresenta um aspecto mais “leve”, onde cada uma das fibras fica separada das demais. Na figura 19 tem-se as fibras lavadas e desfiadas prontas para serem utilizadas no procedimento de moldagem.

A utilização de 0,5% de fibra, em relação ao solo seco, vem sendo adotada por numerosos pesquisadores, acerca deste tema destacam-se trabalhos como o de Feuerharmel (2000) e Festugato (2008). As misturas com esse teor de fibra garantem uma trabalhabilidade adequada, possibilitando a fácil moldagem dos corpos de prova e a homogeneidade das misturas. Este mesmo teor foi adotado nesta pesquisa.

Figura 18 – (a) fibras de polipropileno cortadas com comprimento de 24 mm e  
(b) imagem de microscopia eletrônica de varredura com aumento de 230x



(fonte: CASAGRANDE, 2001, p. 42)

Figura 19 – Fibra de polipropileno lava e desfiada



(fonte: foto da autora)

#### **4.2.4 Água**

A fim de obter-se maior controle sobre a qualidade dos ensaios foi utilizada água destilada para a realização dos ensaios. A água destilada também foi utilizada para submergir os corpos de prova durante o período de saturação das amostras. O processo de destilação da água era feita em laboratório.

### **4.3 MÉTODOS**

Os métodos utilizados para a realização dos ensaios de compressão simples e diametral são apresentados neste item.

#### **4.3.1 Preparação das amostras**

As amostras, para ambos os ensaios, eram elaboradas seguindo o mesmo procedimento. A mistura era preparada em um molde cilíndrico tripartido com dimensões suficientes para obter-se um corpo de prova com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro, figura 20.

A pesagem dos materiais era feita com precisão de 0,01 g. Após a pesagem de todos os materiais necessários para a mistura, dava-se início o procedimento de moldagem.

A cal necessária para a mistura foi calculada em relação à massa de solo seco. A quantidade de água foi obtida através da soma das massas de solo e cal. O teor de fibra adicionado às misturas foi obtido através da soma dos sólidos (solo e cal).

A mistura era iniciada com o caulim e a cal. Quando obtida uma uniformidade, adicionava-se a água destilada. O processo de mistura era feito manualmente, com o auxílio de uma espátula metálica, misturando-se os materiais até obter-se a homogeneidade de todos os elementos e, só então, adicionavam-se as fibras. A quantidade de material utilizada era suficiente para a preparação dos corpos de prova e para a medição do teor de umidade.

Após a mistura dos materiais, a quantidade de solo-cal-fibra necessária para a confecção dos corpos de prova era dividida em três partes iguais. Visando a posterior compactação, as misturas eram armazenadas em recipiente com tampa, evitando a perda de umidade.

Ao final desta etapa, duas pequenas amostras da mistura eram pesadas e levadas à estufa a 100 graus Celsius pelo tempo de 24 horas. Depois desse período, pesavam-se as cápsulas com o material já seco e calculava-se o teor de umidade. A média dos dois teores de umidade era adotada como sendo o teor de umidade do corpo de prova.

Os corpos de prova eram moldados estaticamente em três camadas iguais. Entre as camadas de solo, tomava-se o cuidado de escarificá-las, visando aumentar a ligação entre as camadas.

Terminada esta etapa, a amostra era imediatamente extraída do molde. A massa, diâmetro e altura do corpo de prova eram registrados com resolução de 0,01 g e 0,01 mm. Posteriormente, a amostra era acondicionada em saco plástico, identificada e vedada. Os corpos de prova eram então armazenados e curados pelo período de 27 dias em temperatura controlada ( $23 \pm 2$  °C). Sob igual temperatura, no vigésimo sétimo dia, as amostras eram imersas em água destilada por 24 horas, visando à saturação e a redução da sucção.

Figura 20 – Molde metálico tripartido



(fonte: foto da autora)

### 4.3.2 Aceitação das amostras

Foram considerados aptas a serem ensaiadas as unidades amostrais que seguiam os seguintes critérios:

- a) massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ): grau de compactação de 99 a 101% do especificado;
- b) teor de umidade ( $\omega$ ):  $\pm 0,5$  pontos percentuais;
- c) diâmetro:  $50 \pm 0,5$  mm;
- d) altura:  $100 \pm 1$  mm.

As amostras que não atenderam os critérios físicos foram descartadas e refeitas. Na figura 21 é apresentado um corpo de prova que atingiu os critérios de aceitabilidade. Quanto aos critérios de aceitação das resistências, foi seguida a NBR 12253 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992). Segundo esta norma, deve ser calculada a média da resistência obtida dos três corpos de prova idênticos. São considerados os valores de resistência que estiverem dentro da faixa de variação da média de 10 % para mais ou para menos. Era considerada a carga máxima atingida pelo corpo de prova.

Figura 21 – Corpo de prova de solo-cal-fibra



(fonte: elaborado pela autora)

### 4.3.3 Compressão simples e tração por compressão diametral

O ensaio de compressão simples é amplamente difundido no meio técnico. Além disso, é um ensaio de simples e rápida execução, possui baixo custo e é confiável. Segundo Foppa (2005), o ensaio de compressão simples está presente na maioria dos programas experimentais que desejam verificar a efetividade da estabilização de solo.

O ensaio de compressão diametral foi utilizado para obter-se a resistência à tração das amostras ( $q_t$ ). Com isto, avaliou-se a relação entre a resistência à tração e à compressão ( $q_t/q_u$ ).

Para os ensaios acima descritos, foi utilizada uma prensa automática com capacidade para 100 kN, provida de anél dinamométrico calibrado com capacidade de 10 kN, com uma resolução de 0,005 kN (0,5 kgf). A velocidade de deformação da prensa foi de 1,14 mm por minuto. Nas figuras 22 e 23 são apresentados, respectivamente, amostras sendo ensaiadas à compressão simples e à diametral.

Figura 22 – Ensaio resistência à compressão simples



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 23 – Ensaio resistência à compressão diametral



(fonte: elaborado pela autora)



## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através do programa experimental elaborado. Primeiramente, são expostos os resultados obtidos com o elemento de reforço fibroso e, posteriormente, os resultados obtidos de outros autores sem a inclusão das fibras. A relação entre as resistências à tração e à compressão é mostrada, assim como as comparações entre os resultados obtidos com e sem a inclusão de fibras de polipropileno.

### 5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

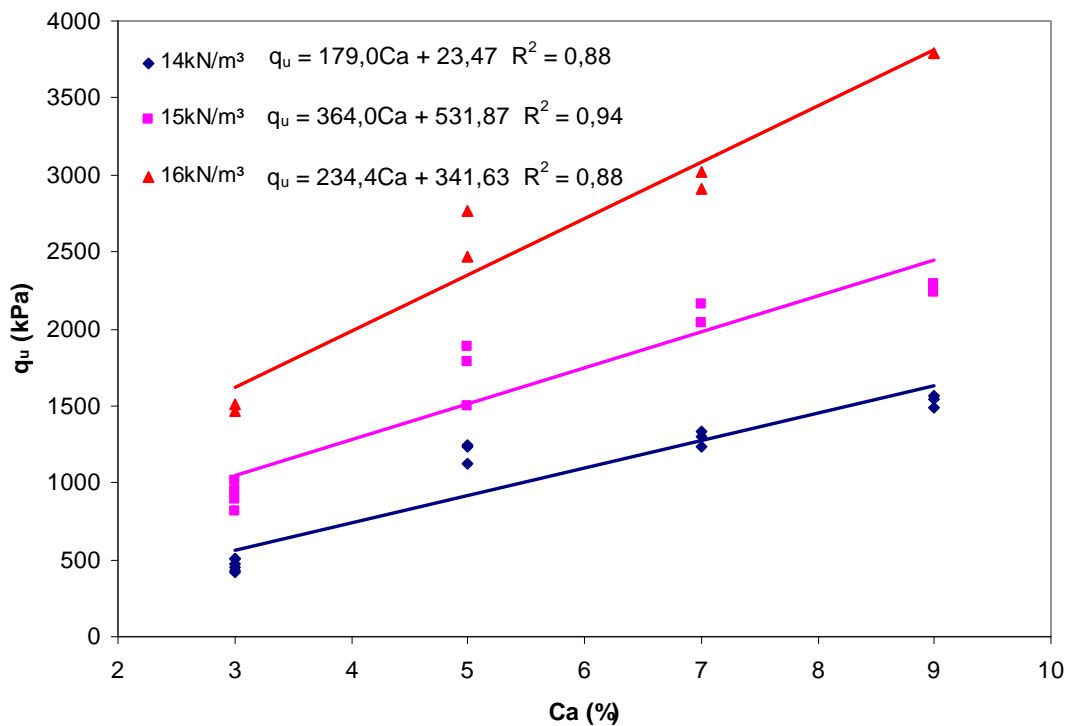
Os corpos de prova submetidos aos ensaios de compressão simples foram analisados a fim de se verificar o efeito do teor de cal e da porosidade na resistência das misturas. A relação vazios/cal obtida também é apresentada neste item.

#### 5.1.1 Efeito da adição de cal

Na figura 24, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função da quantidade de cal (Ca) nas amostras. Cada uma das curvas possui o mesmo peso específico aparente seco.

É possível observar que a quantidade de cal nas misturas influencia na resistência das amostras. Ao aumentar o teor de cal de 3% para 9%, a resistência à compressão simples, em média, teve um acréscimo de 150%. Verifica-se também que, para os teores estudados, a resistência à compressão simples varia linearmente com o aumento da quantidade de cal. A análise da inclinação das curvas de ajuste mostra que a taxa do ganho de resistência cresce com a redução do índice de vazios, representando que o reforço é mais efetivo nas misturas com maior peso específico.

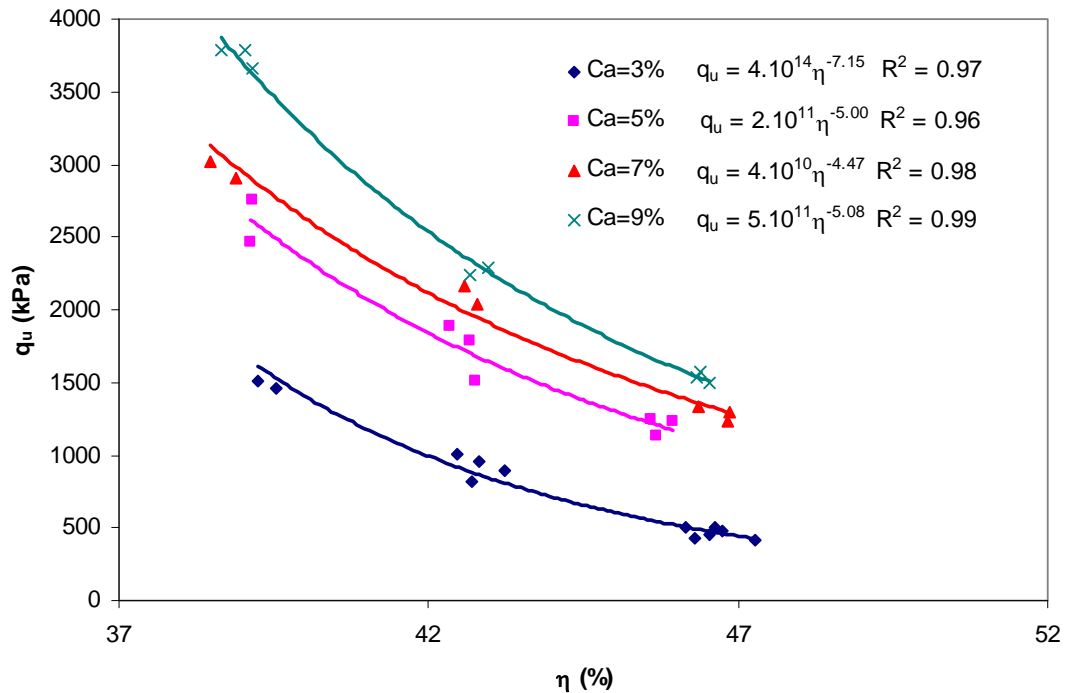
Figura 24 – Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em relação ao teor de cal (Ca)



(fonte: elaborado pela autora)

### 5.1.2 Efeito da porosidade

Na figura 25, é apresentado como a porosidade ( $\eta$ ) afeta a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) nas misturas caulim-cal-fibra. Cada curva de ajuste apresentada possui o mesmo teor de cal. A resistência à compressão simples aumenta com a redução da porosidade de cada mistura, e esta redução acarreta em um ganho potencial de resistência, independentemente do teor de cal na mistura. Para Chang e Woods (1992, tradução nossa), quanto maior o número de contatos entre partículas em solos cimentados observa-se uma maior possibilidade de cimentação dos materiais, assim é possível explicar o ganho da resistência com a redução da porosidade.

Figura 25 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à compressão simples ( $q_u$ )

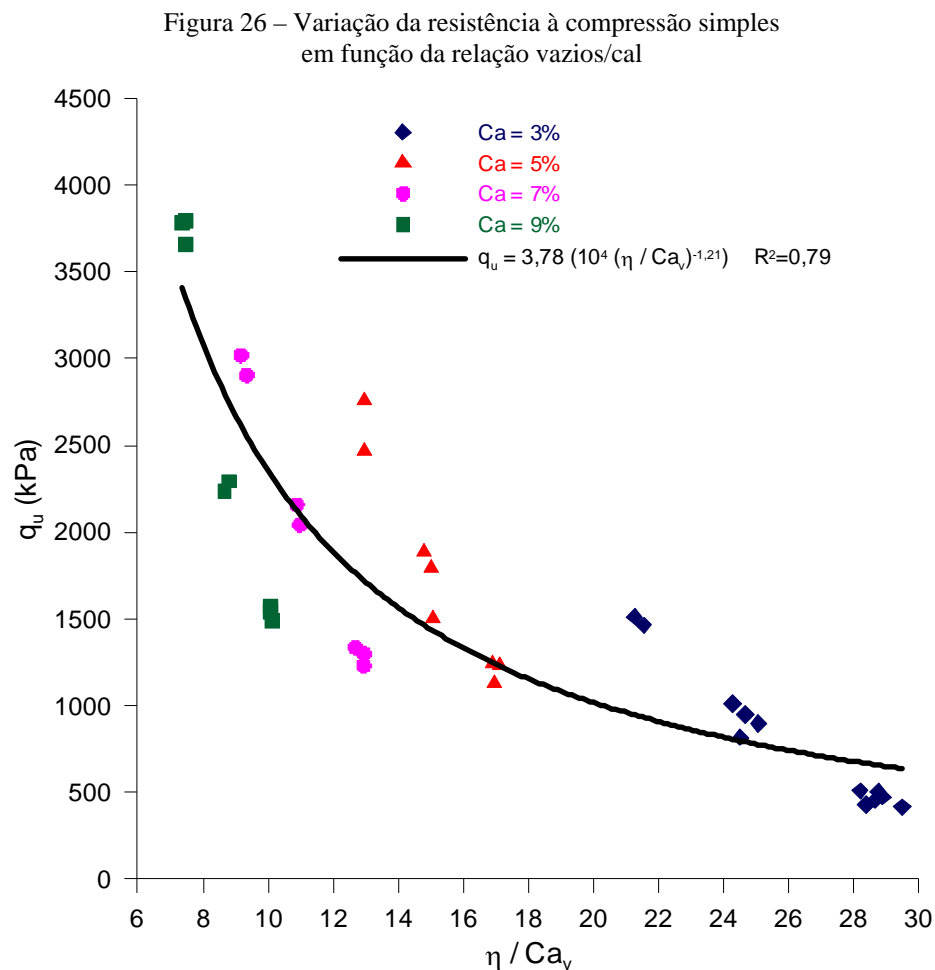
(fonte: elaborado pela autora)

### 5.1.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cal

Nos resultados anteriores, apresentados nas figuras 24 e 25, é verificado que a resistência à compressão simples é dependente da porosidade e da quantidade de cal das misturas. Ao aumentar a porosidade da mistura ocorre a redução na resistência, enquanto maiores teores de cal resultam no acréscimo da resistência. Sendo estes dois termos fundamentais na estimativa da resistência, propõe-se que há uma relação entre a porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico da cal ( $Ca_v$ ), sendo possível estimar a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) de misturas com estas duas variáveis. O teor volumétrico de cal representa a razão entre o volume de cal e o volume total das amostras, expresso em porcentagem.

A relação  $q_u$  versus  $\eta/Ca_v$  demonstra que o termo  $\eta/Ca_v$  representa o efeito distinto das duas variáveis ( $\eta$  e  $Ca_v$ ) em um único fator. Isso significa que  $\eta$  e  $1/Ca_v$  afetam separadamente  $q_u$ , e que o efeito sobre  $q_u$  resultado do aumento da porosidade pode ser contraposto pelo aumento do teor volumétrico da cal, resultando em  $\eta/Ca_v$  governando  $q_u$ .

Na figura 26, é apresentada a resistência à compressão simples como função da razão vazios/cal ( $\eta/Ca_v$ ). Verifica-se que a diminuição da relação  $\eta/Ca_v$  provoca o aumento da resistência à compressão simples. Na mesma curva, apresentam-se todos os teores de cal e pesos específicos que podem ser correlacionados com  $q_u$  em uma curva de ajuste potencial. O coeficiente de correlação da curva é 0,79.



(fonte: elaborado pela autora)

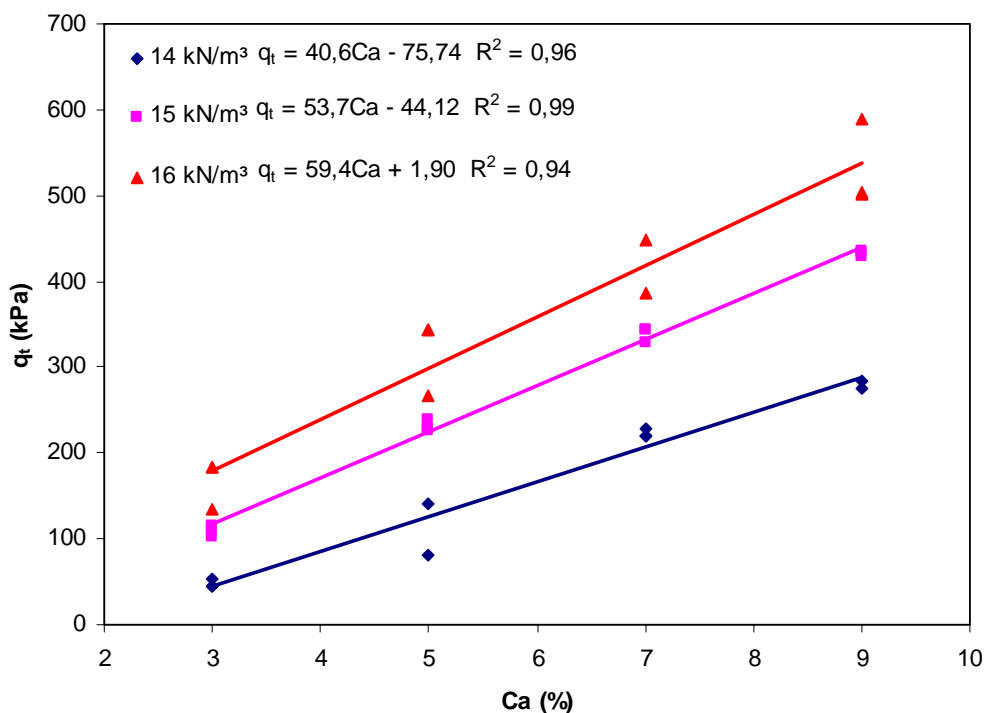
## 5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de compressão diametral foi utilizado para se obter a resistência à tração das amostras. Os resultados desse ensaio foram analisados quanto ao efeito do teor de cal e da porosidade sobre a resistência das amostras. A relação vazios/cal também foi analisada.

### 5.2.1 Efeito da adição de cal

As três curvas apresentadas na figura 27, cada uma delas expressando um peso específico aparente seco, mostram a resistência à tração ( $q_t$ ) como função do teor de cal no solo (Ca). Pode-se observar que, paralelamente ao visto para as amostras ensaiadas à compressão simples, mesmo pequenos teores de cal nas misturas solo-cal-fibra geram um ganho significativo de resistência. A exemplo do item 5.1.1 deste trabalho, curvas lineares também representam o melhor ajuste para o efeito da cal na resistência das misturas. Observa-se que quanto maior o peso específico da mistura, maior a inclinação das retas de ajuste, o que indica um reforço mais efetivo nas misturas com maior peso específico

Figura 27 – Variação da resistência à tração ( $q_t$ ) em relação ao teor de cal (Ca)



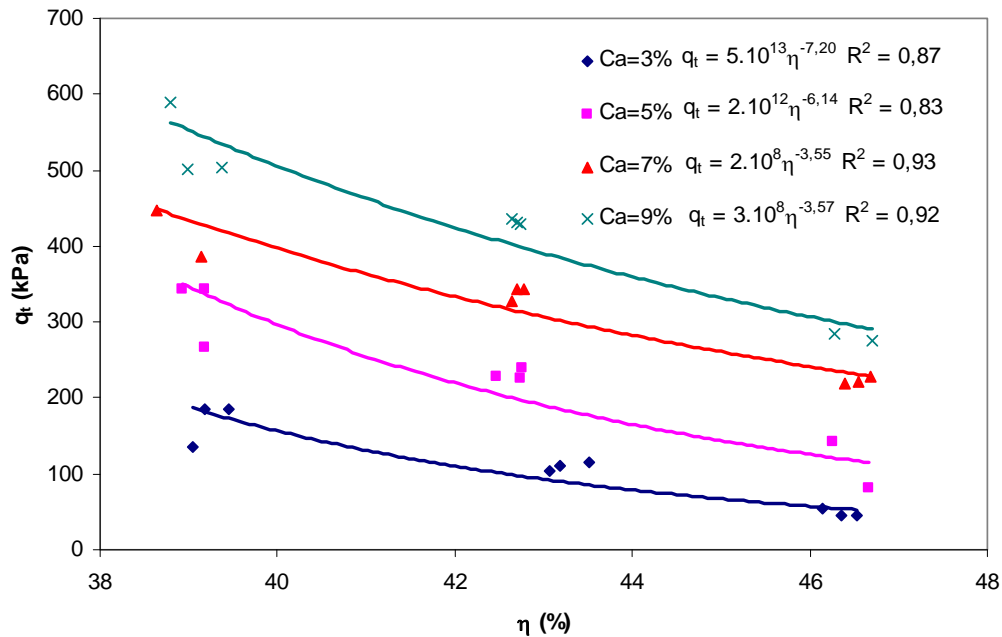
(fonte: elaborado pela autora)

### 5.2.2 Efeito da porosidade

O efeito benéfico da redução da porosidade pode ser verificado através da figura 28. O mesmo comportamento observado no item 5.1.2 é obtido nos ensaios de tração, tem-se que a

resistência à tração ( $q_t$ ) aumenta conforme há a redução da porosidade ( $\eta$ ) nas misturas, independentemente do teor de cal. Na figura 28, cada uma das curvas de ajuste possui o mesmo teor de cal.

Figura 28 – Variação da resistência à tração ( $q_t$ ) com a porosidade ( $\eta$ )



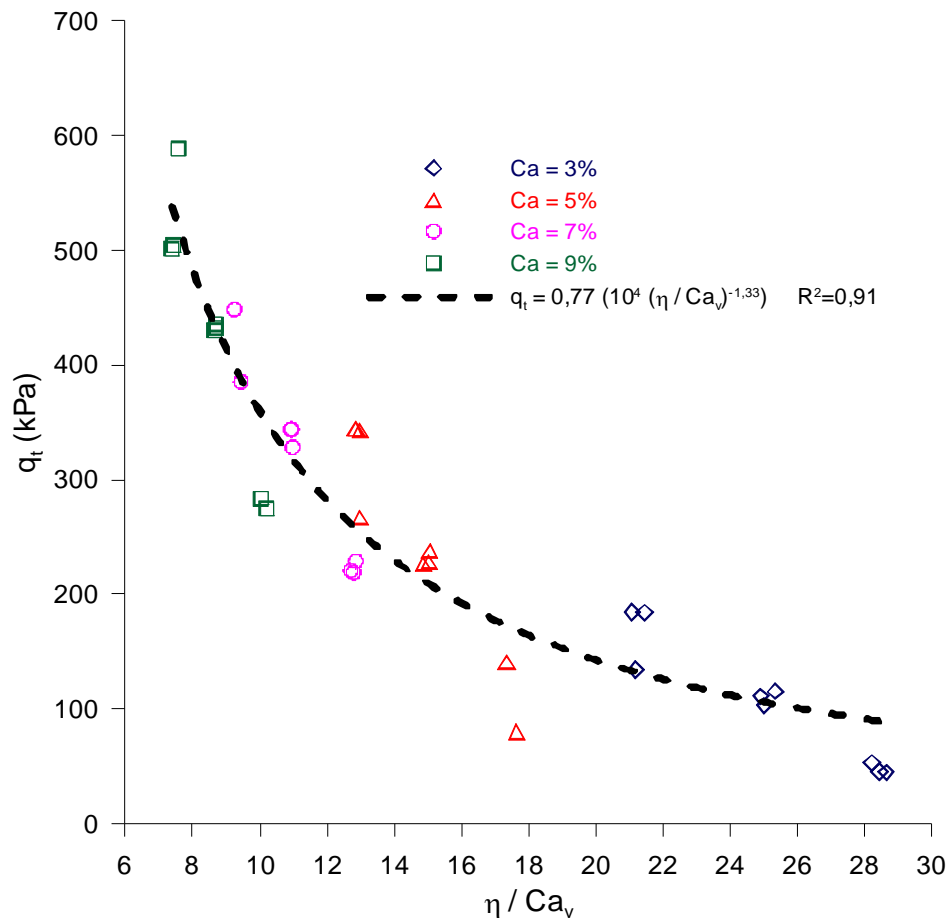
(fonte: elaborado pela autora)

### 5.2.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cal

Como visto nos resultados anteriores, a resistência à tração ( $q_t$ ) era dependente tanto da porosidade ( $\eta$ ), quanto do teor de cal nas misturas ( $Ca$ ). O mesmo foi verificado nos ensaios de compressão simples e, assim sendo, os resultados podem ser expressos de forma semelhante, utilizando-se a razão vazios/cal ( $\eta/Ca_v$ ).

Na figura 29 é apresentada a resistência à tração como função da razão vazios/cal. Com a diminuição da relação  $\eta/Ca_v$  há o acréscimo da resistência à tração das misturas, visto que isso representa, ao mesmo tempo, o aumento do teor de cal e a diminuição da porosidade. O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) da curva potencial ajustada para os pontos é 0,91.

Figura 29 – Variação da resistência à tração em função da relação vazios/cal



(fonte: elaborado pela autora)

### 5.3 RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO

As figuras 26 e 29 diferenciam-se entre si, respectivamente, pelos valores de  $q_t$  e  $q_u$  versus  $\eta / Ca_v$ . Entretanto, em cada uma das figuras, é possível encontrar-se pontos com semelhantes valores de  $\eta / Ca_v$ , porém obtidos através de diferentes combinações de cal e porosidade e assim, apresentando diferentes resistências. Uma forma de tornar as taxas de variação de  $\eta$  e  $1 / Ca_v$  compatíveis é com a aplicação de uma potência em um dos termos. Neste trabalho, a potência de 0,25 foi a que melhor se ajustou, e foi aplicada no termo  $1 / Ca_v$ , para os resultados de tração e compressão.

O resultado da aplicação deste expoente pode ser observado na figura 30. O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) das curvas obtidas foi de 0,95 e 0,92, para a resistência à compressão e à tração respectivamente.

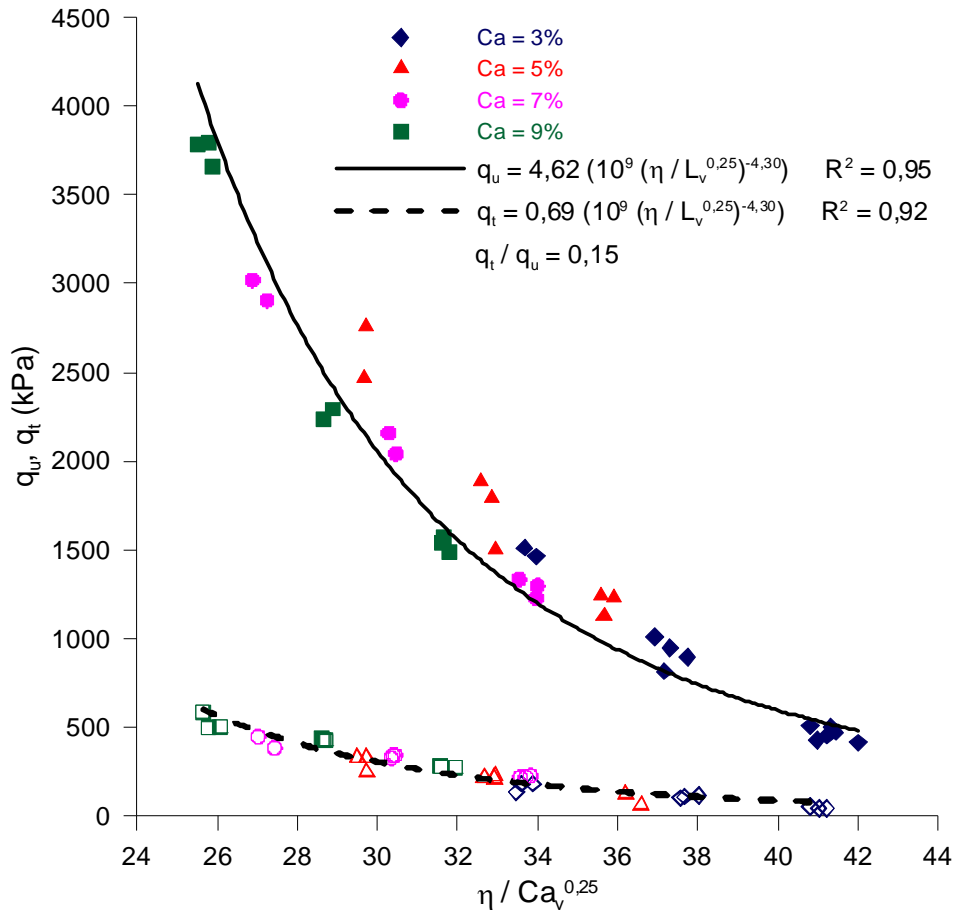
Analisando a figura 30, verifica-se que  $q_u$  e  $q_t$  apresentam a mesma tendência. Ao dividir a curva de ajuste obtida para  $q_t$  em função de  $\eta/(Ca_v)^{0,25}$  pela relação obtida para  $q_u$ , que também é função de  $\eta/(Ca_v)^{0,25}$ , é obtida uma relação escalar entre  $q_t/q_u$  para as misturas de solo-cal-fibra estudadas, sendo esta relação independente da porosidade, do teor de cal e da razão vazios/cal. Visto isso, há uma proporção entre a resistência à tração e à compressão das misturas solo-cal-fibra que é válida para todas as porosidades e teores de cal presentes no estudo. A relação obtida entre  $q_t/q_u$  é de 0,15.

Verifica-se que esta relação,  $q_t/q_u$ , encontrada (0,15) está dentro da faixa de valores encontrada por outros autores. Para Consoli et al. (2012b, p. 9, tradução nossa), a relação entre as resistências à tração e à compressão, para misturas de arenito formação Botucatu cimentado e reforçado com fibras de polipropileno, foi 0,14. Sendo este valor independente do teor de cimento e da porosidade das misturas.

A areia cimentada, estudada por Consoli et al. (2010, p. 763, tradução nossa), mostrou uma relação  $q_t/q_u$  igual a 0,15. Esta relação não mostrou-se dependente dos teores de cimento ou porosidade das misturas estudadas.



Figura 30 – Ajuste da razão vazios/cal para as resistências à tração e compressão



(fonte: elaborado pela autora)

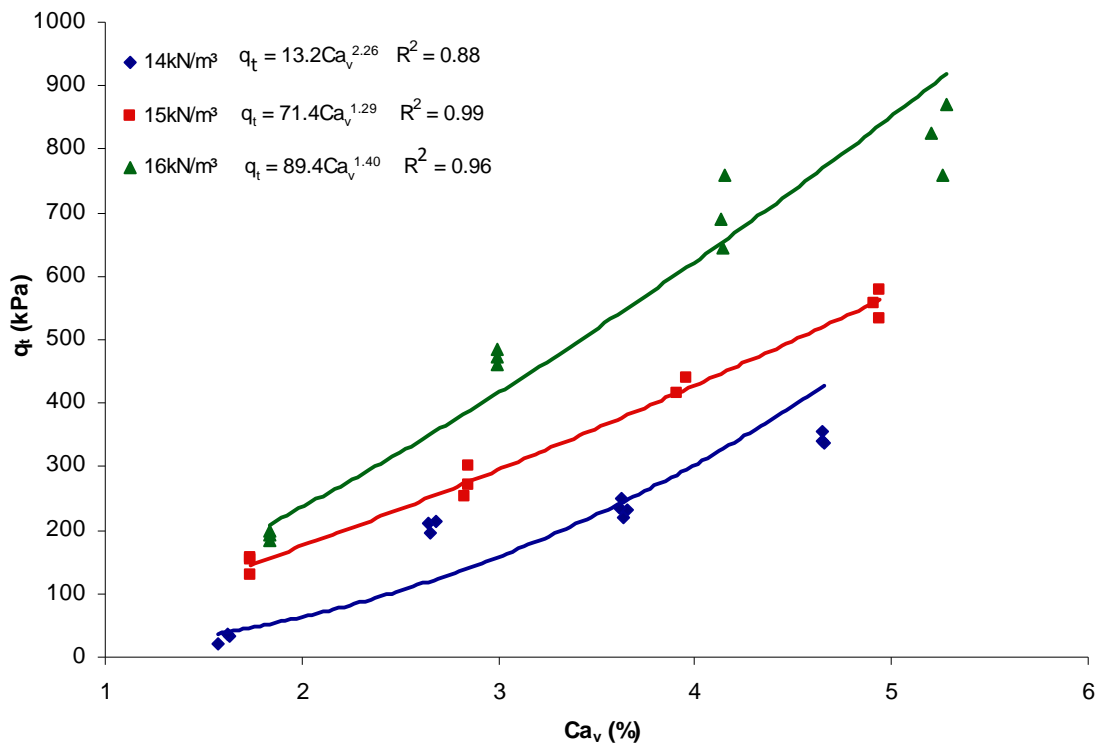
#### 5.4 MISTURAS CAULIM-CAL

Este item apresenta os resultados obtidos com misturas de caulim-cal, sem o reforço com fibras, que servem de base para a posterior comparação dos efeitos provocados pela inclusão de fibras à mistura.

### 5.4.1 Efeito da quantidade de cal e da porosidade na resistência à tração das misturas

Consoli et al. (2012a, p. 82, tradução nossa) observaram que o teor volumétrico da cal possui grande efeito sobre a resistência à tração do solo. Mesmo um pequeno incremento na quantidade de cal foi suficiente para gerar um ganho de resistência significativa. Na figura 31, observa-se que uma função do tipo potência é a que melhor se ajusta aos três teores de umidade estudados.

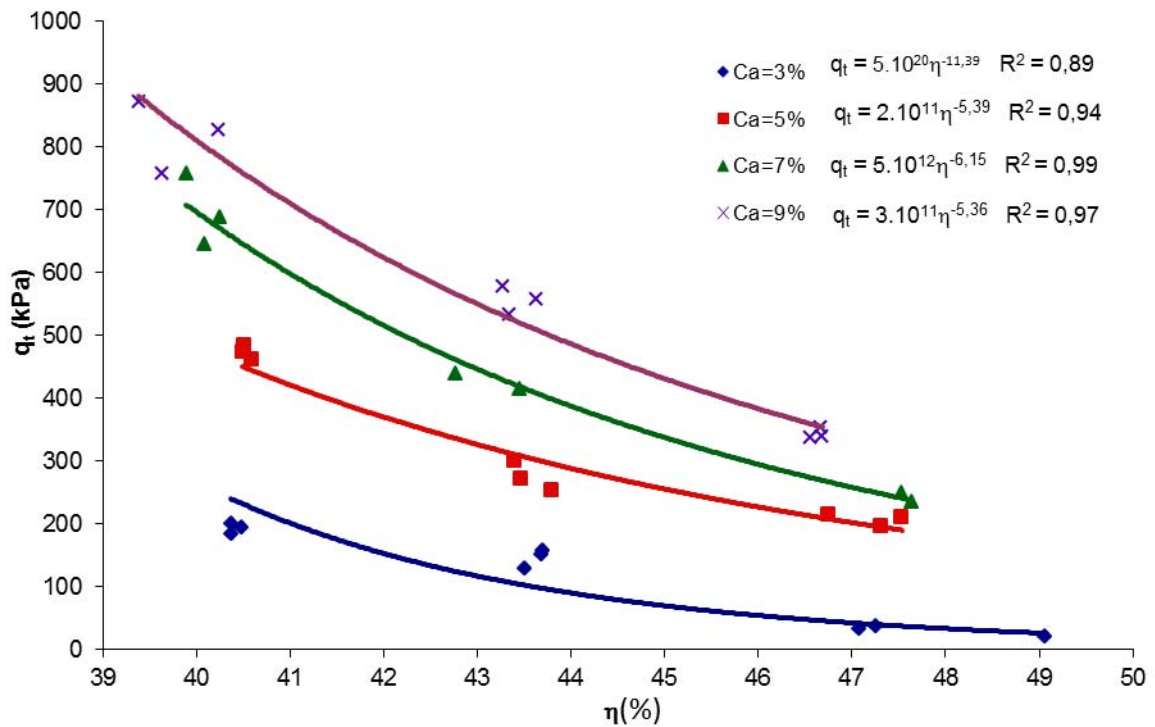
Figura 31 – Variação da resistência à tração com o teor volumétrico de cal



(fonte: adaptado de CONSOLI et al., 2012a, p. 83)

A figura 32 apresenta o efeito da porosidade na resistência das misturas estudadas. A verificação feita por Consoli et al. (2012a, p. 82-83, tradução nossa) mostrou que a redução da porosidade de moldagem das misturas acarretou no aumento da resistência.

Figura 32 – Variação da resistência à tração com a porosidade

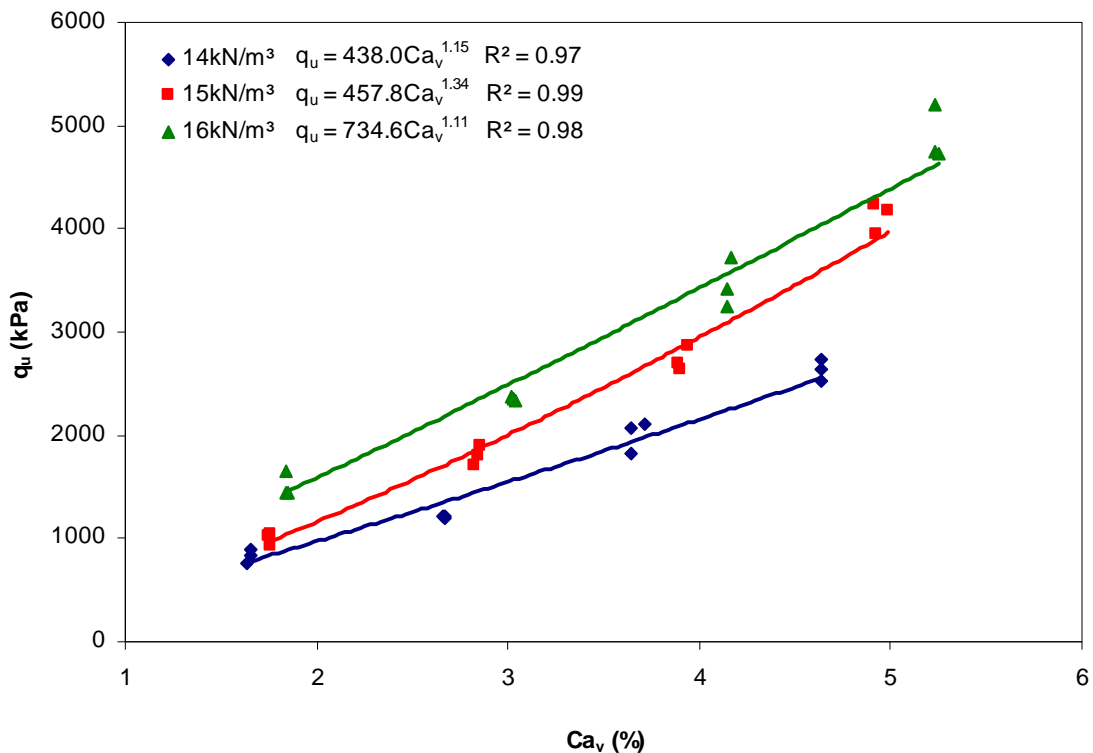


(fonte: adaptado de CONSOLI et al., 2012a, p. 83)

#### 5.4.2 Efeito da quantidade de cal e da porosidade na resistência à compressão das misturas

A resistência à compressão simples em relação ao teor volumétrico da cal, estudado por Consoli et al. (2012a, p. 83, tradução nossa), é apresentada na figura 33. Foi observado pelos autores que as misturas solo-cal são melhor ajustadas por uma curva potencial e mesmo pequenos acréscimos de cal às misturas foram suficientes para se obter um significativo aumento de resistência.

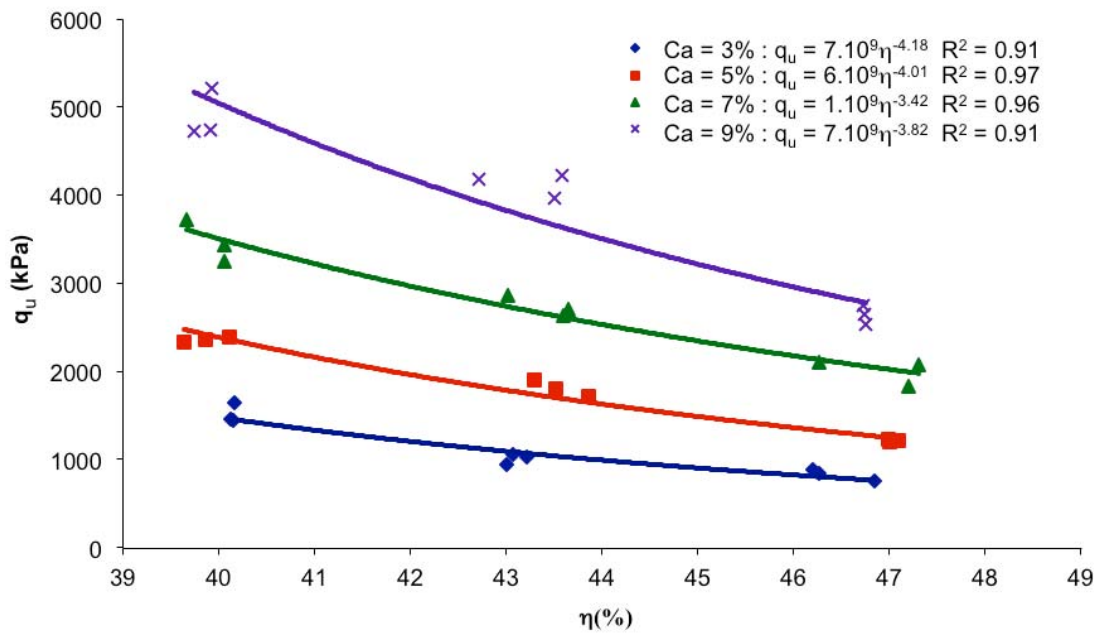
Figura 33 – Variação da resistência à compressão com o teor volumétrico de cal



(fonte: adaptado de CONSOLI et al., 2012a, p. 84)

Quanto à análise referente à redução da porosidade, Consoli et al. (2012a, p. 84, tradução nossa) observaram que, assim como nos ensaios à tração, os ensaios à compressão mostraram um aumento da resistência com a diminuição da porosidade das misturas. Os ensaios que comprovam essa afirmação são apresentados na figura 34.

Figura 34 – Variação da resistência à compressão com a porosidade

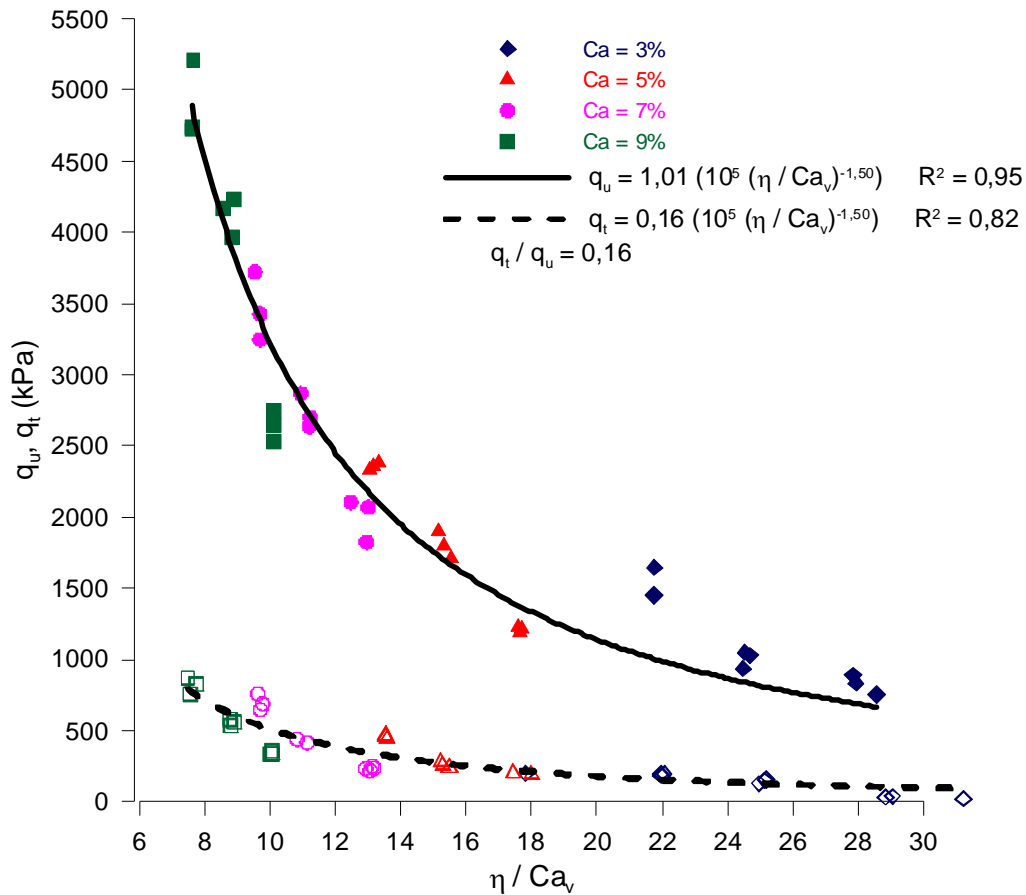


(fonte: adaptado de CONSOLI et al., 2012, p. 84)

### 5.4.3 Efeito da porosidade/teor volumétrico da cal

Na figura 35, para analisar simultaneamente o efeito da variação da porosidade e do teor volumétrico de cal, Consoli et al. (2012, p. 85, tradução nossa) correlacionaram a resistência à compressão e tração com a razão entre a porosidade e o teor volumétrico de cal,  $\eta/C_{av}$ . As curvas de ajuste diferenciam-se apenas por um escalar, desta forma os autores puderam estabelecer a razão entre a resistência à tração e à compressão das misturas estudadas, 0,16.

Figura 35 – Razão porosidade/teor volumétrico da cal em relação à resistência à tração e compressão das misturas



(fonte: adaptado de CONSOLI et al., 2012a, p. 85)

## 5.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS COM E SEM A INCLUSÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO

Neste item é apresentada a alteração causada pela inclusão de fibras nas misturas solo-cal. A análise é baseada na comparação do modo de ruptura das amostras e na avaliação da resistência à compressão simples e à tração.

### 5.5.1 Modo de ruptura

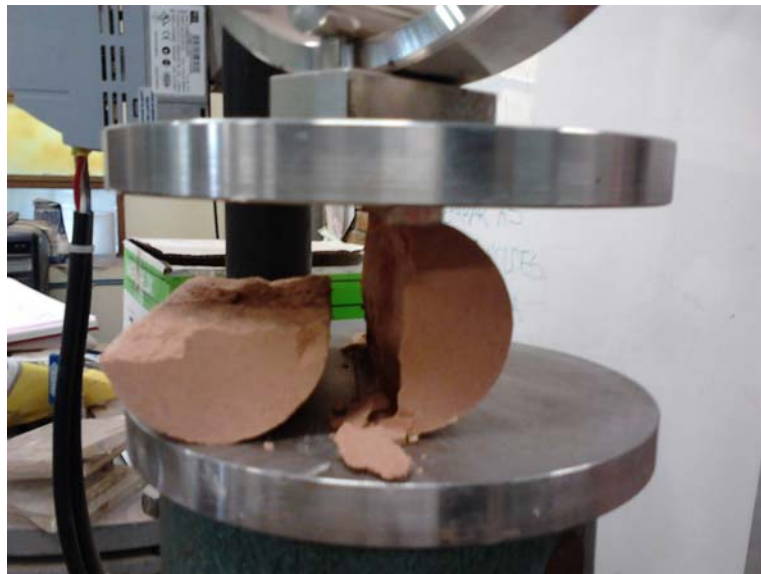
Um importante aspecto a ser analisado ao incluir fibras em misturas de solo é a forma de ruptura. O aumento da ductilidade do solo com a adição de fibras é uma observação feita em

caráter unânime por vários autores, entre eles Festugato (2008) e Sachetti (2012), sendo este aumento mais pronunciado quanto maior for a quantidade de fibras.

A figura 36 apresenta o modo de ruptura de uma mistura de caulim rosa reforçada com cal, sem a inclusão de fibras (SACHETTI, 2012), submetida ao ensaio de compressão diametral. Percebe-se um plano de ruptura vertical definido, característico de um material rígido.

Para comparação, a figura 37 mostra uma amostra de solo-cal-fibra rompida por compressão diametral. Não é verificado um plano de ruptura definido e, em função das fibras, há formação de fissuras radiais no corpo de prova. Nos ensaios submetidos à compressão simples também não foi observado plano de ruptura. Havia a formação de banda de cisalhamento.

Figura 36 – Modo de ruptura de misturas sem fibra quando submetidas à compressão diametral



(fonte: SACHETTI., 2012, p. 63)

Figura 37 – Modo de ruptura de misturas solo-cal-fibra quando submetidas à compressão diametral



(fonte: elaborado pela autora)

### 5.5.2 Avaliação das resistências com e sem a inclusão de fibras

Conforme citado anteriormente, o programa experimental deste trabalho foi desenvolvido para que os resultados dessa pesquisa pudessem ser comparados com os resultados de outros estudos desenvolvidos no Legg Environgeo da UFRGS. Assim, os resultados de Consoli et al. (2012a) foram comparados com os obtidos nesse estudo.

Sobre os dados de Consoli et al. (2012a) foi aplicada a potência 0,25 sobre o teor volumétrico de cal, mesmo expoente aplicado neste estudo e apresentado na figura 30. Nas figuras 38 e 39 são apresentados os resultados de resistência à compressão ( $q_u$ ) e tração ( $q_t$ ), respectivamente, em função da porosidade/teor volumétrico de cal com a aplicação da potência ( $\eta/Ca_v^{0,25}$ ). Em ambas figuras, a curva tracejada representa dos resultados sem a inclusão dos reforços fibrosos e a linha cheia expressa os resultados com a adição das fibras.

Ao contrário do esperado, as figuras 38 e 39 mostram que a inclusão de fibras ao solo diminuiu a resistência à compressão simples e à tração nas misturas estudadas. Outros autores verificaram o efeito negativo das fibras na resistência de misturas de solo.

Consoli et al. (2009) avaliaram a inclusão de fibras em areias cimentadas com cimento Portland de alta resistência inicial. Quando o teor de cimento era superior a 5%, em relação ao



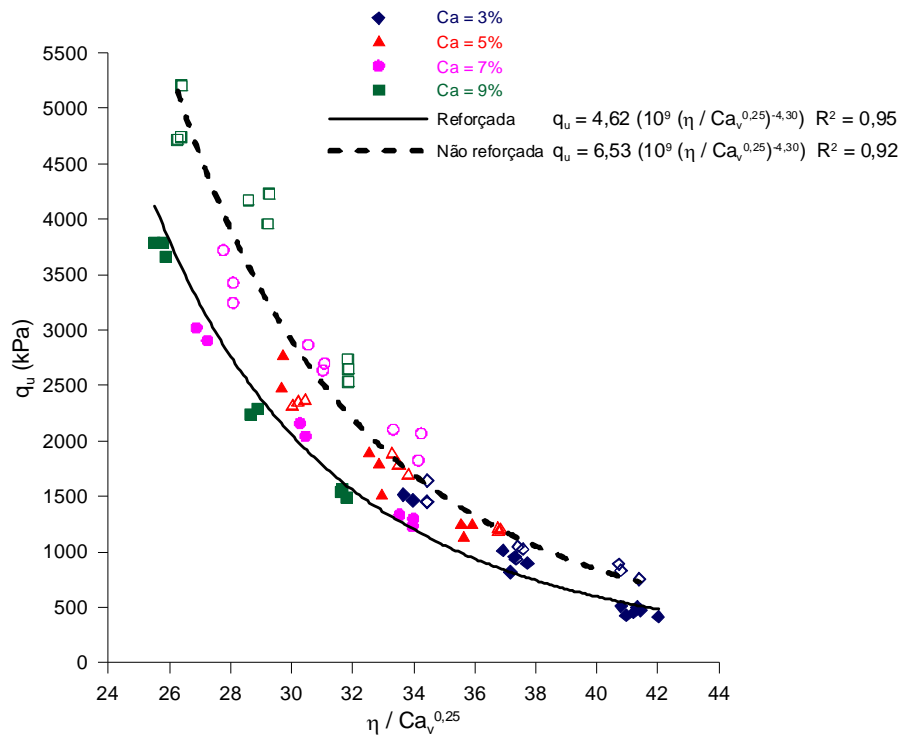
peso de material seco, as fibras prejudicavam a resistência obtida através de ensaios de compressão triaxiais. Quando a resistência era relativamente grande, maior que 1000 kPa, a fibra piorava a resistência das misturas.

Floss e Festugato (2009) também observaram a influência negativa de fibras em misturas de areia artificialmente cimentada. O estudo mostrou que em amostras mais densas ou com maior teor de cimento, a inclusão das fibras não foi benéfica.

Através de ensaios cíclicos com tensão cisalhante controlada, Festugato (2011) investigou o comportamento de um resíduo de mineração cimentado e reforçado com fibras. O teor de cimento estudado foi de 5% em relação à massa de solo e o teor de fibra foi de 0,5% em relação aos sólidos da mistura. Com a inclusão de fibras à mistura, sob condições cíclicas de tensão controlada, verificou-se o aumento nos níveis de deformação cisalhante e a redução número de ciclos até o início da tendência de deformação exponencial mais pronunciada.

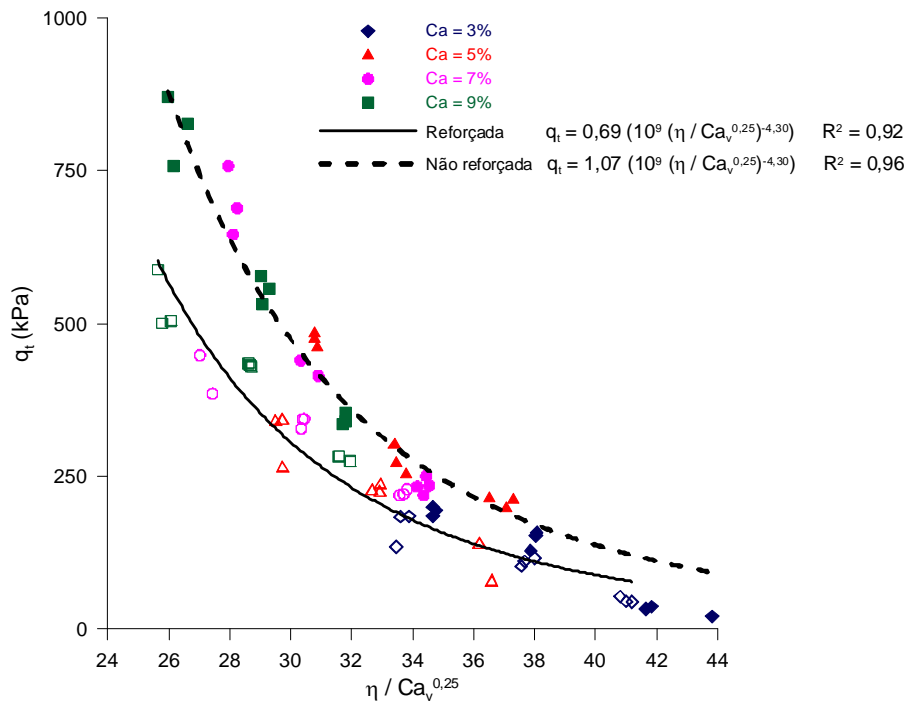
Entretanto, todos os autores ressaltaram o benefício da ductilidade conferida ao material com a inclusão de fibras nas misturas. O comportamento dúctil do material é desejável, principalmente, em encostas, aterros e bases de fundações e pavimentos.

Figura 38 –  $q_u$  versus  $\eta/Ca^{0,25}$  com e sem o reforço de fibras



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 39 –  $q_t$  versus  $\eta/Ca^{0,25}$  com e sem o reforço com fibras



(fonte: elaborado pela autora)

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do programa experimental e da análise dos resultados, são apresentadas as conclusões neste capítulo. Também são feitas sugestões para trabalhos futuros.

### 6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E DIAMETRAL

A relação porosidade/teor volumétrico de cal,  $\eta/\text{Ca}_v$ , mostrou-se adequada para a avaliação da resistência das misturas. O ajuste da razão vazios/cal,  $\eta/\text{Ca}_v^{0.25}$ , foi considerado apropriado para avaliar tanto a resistência à tração quanto à compressão. Ambas resistências,  $q_t$  e  $q_u$ , reduzem com o aumento dos valores de  $\eta/\text{Ca}_v^{0.25}$ .

O estudo observou que nas misturas solo-cal-fibra a adição de cal, mesmo em pequenas quantidades, provocou ganhos consideráveis na resistência do material. Para os teores estudados, as resistências à compressão simples e diametral cresceram linearmente com o aumento do teor de cal. Além disso, a taxa do ganho de resistência, representada pela inclinação das curvas de ajuste, cresceu com a redução do índice de vazios inicial do material estudadas, indicando que o reforço através das fibras é mais efetivo nas misturas mais compactadas.

A redução da porosidade nas misturas acarretou em ganhos significativos nas resistências para ambos tipos de ensaios. Observou-se que a resistência à compressão simples e à tração aumentou na forma de potência com a redução da porosidade da mistura solo-cal-fibra.

A relação entre as resistências,  $q_t/q_u$ , resultou no escalar 0,15 para as misturas solo-cal-fibra avaliadas no estudo. Este valor mostrou-se independente da relação porosidade/teor volumétrico de cal. Como consequência, através do método de dosagem baseado nesta relação, pode-se concentrar os ensaios tanto na compressão simples quanto na diametral, uma vez que eles podem ser correlacionados entre si.

O escalar encontrado na relação das resistências mostrou-se muito próximo à encontrada por Consoli et al. (2012a), que estudou misturas de caulim-cal sem a inclusão das fibras. A razão encontrada por esses autores foi 0,16.

A influência isolada da fibra de polipropileno na resistência mecânica das misturas foi analisada através da comparação entre os resultados obtidos nesta pesquisa e o estudo de Consoli et al. (2012a). Observou-se que a inclusão das fibras afeta negativamente a resistência das misturas, para todos os teores de cal e porosidade estudados. Em contrapartida, houve a alteração do comportamento do material. O comportamento rígido das amostras de solo-cal modificou-se para dúctil, sem formação de planos de ruptura, com a inclusão das fibras de polipropileno.

## 6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Algumas sugestões, para a ampliação do conhecimento e o prosseguimento sobre os estudos de solos reforçados com fibras em futuros trabalhos, são dadas a seguir:

- a) análise do efeito de maiores tempos de cura na resistência;
- b) estudo do efeito do teor de fibra adicionado à matriz de solos, dando ênfase a teores menores que 0,50% a fim de verificar se há o aumento da resistência com a diminuição do teor de fibra inserido nas amostras;
- c) avaliar microscopicamente os mecanismos de interação solo-cal-fibra e solo-cal.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.253**: solo-cimento – dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 1992.

CHANG, T. S.; WOODS, R. D. Effect of particle contact bond on shear modulus. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York: ASCE, v. 107, n. 6, p. 799-817, Aug. 1992.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. 2001. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F. FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 136, n. 5, p. 759-763, May 2010.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA JOHANN, A.; 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**, United Kingdom, v. 2, n. 3, p. 81-85, Sept. 2012a.

CONSOLI, N. C.; de MORAES, R. R.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of fiber-reinforced cemented soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York: ASCE (aceito para publicação). 2012b.

CONSOLI, N. C.; VENDRUSCOLO, M. A.; FONINI, A.; DALLA ROSA, F. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. **Geotextil and Geomembranes**, Institute of Civil Engenners, v. 19, n. 5, p. 194-201, Jan. 2009.

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. Disponível em:  
<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/17359/000714655.pdf?sequence=1>>  
Acesso em: 9 out. 2012.

DALLA ROSA JOHANN, A. **Metodologias para previsão do comportamento mecânico e da variação da porosidade de um solo siltoso tratado com cal em longos tempos de cura**. 2013. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspectos**. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em:  
<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/14740/000668191.pdf?sequence=1>>  
Acesso em: 9 out. 2012.

\_\_\_\_\_. **Comportamento mecânico de hidratação e resposta cisalhante cíclica de resíduo de mineração cimentado reforçado com fibras.** 2011. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/35605>> Acesso em: 9 out. 2012.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno.** 2000. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2804/000326387.pdf?sequence=1>> Acesso em: 10 dez. 2012.

FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. Metodologia de dosagem para areia reforçada com fibras de vidro. In: CONFERENCIA SUDAMERICADA DE INGENIEROS GEOTÉCNICOS JÓVENES, 3., 2009, Córdoba. **Anais...** Córdoba: UTN, 2009. Não paginado. 1 CD.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentado.** 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7845/000558347.pdf?sequence=1>> Acesso em: 11 dez. 2012.

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. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/11804/000614159.pdf?sequence=1>> Acesso em: 11 dez. 2012.

\_\_\_\_\_. **Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal.** 2011. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle/10183/49306>> Acesso em: 9 out. 2012.

ROSA, D. A. **Validação da Relação Vazios/Cimento na Estimativa da Resistência à Compressão Simples do Caulim Artificialmente Cimentado.** 2010. 79 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28558/000769507.pdf?sequence=1>> Acesso em: 11 dez. 2012.

SACHETTI, D. A. **Solo reforçado com cal e fibras de polipropileno: comportamento quando submetido à compressão triaxial.** 2012. 83 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.