

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

Rafael Mirandola da Rocha

**MELHORIA DE SOLOS ARGILOSOS: INFLUÊNCIA DA
CONCENTRAÇÃO DE CAL E DA POROSIDADE NA
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO**

Porto Alegre
janeiro 2013

RAFAEL MIRANDOLA DA ROCHA

**MELHORIA DE SOLOS ARGILOSOS: INFLUÊNCIA DA
CONCENTRAÇÃO DE CAL E DA POROSIDADE NA
RESISTÊNCIA À 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

Porto Alegre
janeiro 2013

RAFAEL MIRANDOLA DA ROCHA

**MELHORIA DE SOLOS ARGILOSOS: INFLUÊNCIA DA
CONCENTRAÇÃO DE CAL E DA POROSIDADE NA
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO**

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, janeiro de 2013

Prof. Nilo Cesar Consoli
PhD. Concordia University, CA
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

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

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

Daniela Aliati Rosa
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha mãe Lenice, por ser um exemplo de perseverança e dedicação, e aos meus irmãos Andrea e Eduardo, pelo apoio inabalável.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Nilo Consoli, orientador deste trabalho, pela orientação durante a execução desta pesquisa e aos colegas de laboratório Henrique Milan e Daniela Aliati Rosa, pelo suporte e auxílio nos ensaios.

A curiosidade é mais importante que o conhecimento.

Albert Einstein

RESUMO

A melhoria das características dos solos através da incorporação de aglomerantes vem sendo empregada com sucesso em obras de rodovias, fundações superficiais e proteção de taludes. A mecânica das misturas de solo-aglomerante vem sendo estudada desde 1970 com os primeiros ensaios de corpos de prova de solo-cimento. Primeiramente, descobriu-se que as principais variáveis que influenciam o comportamento destas misturas são: teor de umidade, porosidade e teor de aglomerante ou agente cimentante. Pesquisas subsequentes propõem métodos de dosagem baseados na razão vazios/aglomerante, mostrando que é possível obter uma boa estimativa na previsão das resistências à tração e à compressão simples das misturas de solos com aglomerantes através deste fator e que as resistências são relacionadas por um escalar. Para o caso específico do solo residual de arenito Botucatu misturado com cal já existem pesquisas que demonstram a influência das variáveis na resistência à compressão. No entanto faltam dados referentes à resistência à tração. Tais dados possibilitariam a verificação da influência das variáveis na resistência à tração do solo com cal, a validação da razão vazios/cal como fator de estimativa da resistência do solo à tração e a verificação do escalar entre as resistências à tração e compressão. Este trabalho visou a obtenção destes dados e a correlação dos mesmos com os dados obtidos para a resistência à compressão da mistura arenito Botucatu, cinza volante e cal para criação de um método de dosagem racional. As equações obtidas possibilitam atingir uma resistência alvo de projeto tanto pela variação do teor de cimento, quanto da porosidade ou uma combinação entre as duas, de tal modo que se obtenha a resistência pretendida juntamente com a otimização do custo.

Palavras-chave: Solo-Cal-Cinza volante. Solo residual de arenito Botucatu. Melhoria de solos argilosos. Resistência à tração de mistura de solos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas de pesquisa	17
Figura 2 – Variação da resistência à compressão simples (q_u) com o teor de cimento	20
Figura 3 – Efeito do teor de cal volumétrico sobre a resistência à compressão simples de solo-cal curados em 90 dias	21
Figura 4 – Variação da resistência à compressão não-confinada (q_u) com a porosidade .	22
Figura 5 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do solo-cal ensaiados com 90 dias de cura	22
Figura 6 – Efeito do teor de umidade de moldagem na resistência à compressão não-confinada do solo-cimento	24
Figura 7 – Efeito do teor de umidade de moldagem na resistência à compressão não-confinada do solo-cal com 28 dias de cura	24
Figura 8 – Efeito do teor de umidade de moldagem na resistência à compressão não-confinada do solo-cal com 90 dias de cura	25
Figura 9 – Variação da resistência à compressão simples com a razão água/cal	26
Figura 10 – Variação da resistência à compressão simples com a razão água/cimento ...	26
Figura 11 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a razão vazios/cimento	28
Figura 12 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a razão vazios/cal da mistura solo-cal	28
Figura 13 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a razão vazios/cimento da mistura solo-cimento	29
Figura 14 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a razão porosidade/teor volumétrico de cal ajustada	30
Figura 15 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a razão porosidade/teor volumétrico de cimento ajustada	30
Figura 16 – Resultados do teste ICL do solo-cal	31
Figura 17 – Resultados do teste LFP do solo-cal	31
Figura 18 – Relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico de cal para amostras com 28 dias de cura	32
Figura 19 – Relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico de cal para amostras com 90 dias de cura	33
Figura 20 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a razão vazios/cimento para três tempos de cura	34
Figura 21 – Relação entre a resistência à compressão simples com a porosidade, o teor volumétrico de cimento e o tempo de cura	34
Figura 22 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com o teor de cimento em massa para mistura areia-cimento	36

Figura 23 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com a porosidade da mistura areia-cimento	37
Figura 24 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com a razão vazios/aglomerante da mistura areia-cimento	38
Figura 25 – Variação das resistências à tração por compressão diametral (q_t) e à compressão não-confinada (q_u) com a razão vazios/aglomerante da areia-cimento	39
Figura 26 – Envoltória de ruptura da mistura areia-cimento no plano de Mohr para $\eta/C_{iv}=10$	41
Figura 27 – Envoltórias de ruptura da mistura areia-cimento no plano de Mohr para diversos valores de η/C_{iv}	41
Figura 28 – Tensão-deformação para diferentes razões vazios/cal da mistura de arenito Botucatu, cinza volante e cal com 28 dias de cura	42
Figura 29 – Curva granulométrica da amostra de solo	44
Figura 30 – Curvas de compactação do solo residual de arenito Botucatu	45
Figura 31 – Programa de ensaios de compressão diametral	48
Figura 32 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com o teor de cal (C_a)	51
Figura 33 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com a porosidade (η)	52
Figura 34 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com a razão vazios/cal (η/C_a)	54
Figura 35 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com a razão vazios/cal ajustada ($\eta/C_a^{0,12}$)	54
Figura 36 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com a razão vazios/cal ($\eta/C_a^{0,12}$) e o coeficiente indicado por Lopes Junior (2011)	56
Figura 37 – Comparação entre as resistências à tração e à compressão	57
Figura 38 – Envoltória de ruptura e círculos de Mohr para $\eta/C_a^{0,12}=35$	58
Figura 39 – Envoltórias de ruptura para $\eta/C_a^{0,12}=20, 25, 30$ e 35	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas da amostra de arenito Botucatu	45
Tabela 2 – Propriedades físicas da amostra de cinza volante	46
Tabela 3 – Pontos de moldagem dos corpos de prova	48

LISTA DE SÍMBOLOS

C – teor de aglomerante em massa (%)

C_a – teor de cal massa (%)

q_t – resistência à tração (kPa)

q_u – resistência à compressão simples (kPa)

V_{ci} – volume de cal

V_v – volume de vazios

γ_d – massa específica aparente seca

η – porosidade

ω – teor de umidade (%)

η/C_a – razão vazios/cal

τ – tensão perpendicular (kPa)

σ – tensão normal (kPa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	15
2.2.1 Objetivo principal	15
2.2.2 Objetivos secundários	15
2.3 DELIMITAÇÃO	16
2.4 LIMITAÇÕES	16
2.5 DELINEAMENTO	16
3 SOLOS MELHORADOS: CONSIDERAÇÕES GERAIS	19
3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	19
3.1.1 Concentração de aglomerante	19
3.1.2 Porosidade	21
3.1.3 Teor de umidade	23
3.1.4 Razão vazios/aglomerante	27
3.1.5 Tempo de cura	33
3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	35
3.2.1 Concentração de aglomerante	35
3.2.2 Porosidade	36
3.2.3 Razão vazios/aglomerante	37
3.2.4 Relação entre as resistências à tração e à compressão	38
3.3 CRITÉRIO DE RUPTURA DA GRIFFITH	39
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	43
4.1 MATERIAIS	43
4.1.1 Solo	43
4.1.2 Cal	46
4.1.3 Cinza volante	46
4.1.4 Água	47
4.2 PROGRAMA DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	47
4.2.1 Dosagem das misturas	47
4.2.2 Programa de ensaios	47
4.2.3 Método de avaliação da influência da quantidade de cal	49
4.2.4 Método de avaliação da influência da porosidade	49

4.2.5 Método de avaliação da razão vazios/cal	49
4.2.6 Método de avaliação da relação entre as resistências à tração e à compressão	49
4.2.7 Método racional de dosagem e critério de ruptura de Griffith	50
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	51
5.1 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE CAL	51
5.2 EFEITO DA POROSIDADE	52
5.3 EFEITO DA RAZÃO VAZIOS/CAL	53
5.4 RELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO	55
5.5 CRITÉRIO DE RUPTURA DE GRIFFITH E MÉTODO RACIONAL DE DOSAGEM	57
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos dois séculos, o crescimento populacional e o desenvolvimento da sociedade levaram à necessidade de ocupação de novas áreas e ao desenvolvimento dos meios de transporte. Sendo o automóvel um dos mais utilizados atualmente, foi necessário o aumento da malha rodoviária para possibilitar a mobilidade das populações.

As rodovias constituem obras de grande porte nas quais a solução mais usual, quando o solo local não possui os requisitos necessários, é o uso de solos transportados de outras localidades. Porém, isto implica no transporte de grandes volumes de material e a eventual dispensa do solo pré-existente. O custo decorrente da execução de um projeto com esta solução está intrinsecamente ligado às distâncias entre os materiais que possuem as características necessárias e a área na qual serão utilizados. Adicionalmente, o alto grau de transporte empregado na movimentação e dispensa do material pré-existente pode tornar financeiramente muito onerosa a construção. Assim surgiu a necessidade de uma alternativa mais barata, que reduzisse a movimentação de material.

Por outro lado, a ocupação de novas áreas, que muitas vezes não propiciavam às melhores condições técnicas de suporte às estruturas, acarretou no surgimento de métodos de fundações profundas e de contenção. No entanto muitas vezes essas técnicas, ainda que efetivas e comprovadas, possuem um alto custo de aplicação, pois necessitam de máquinas e materiais específicos que podem não estar disponíveis no local do empreendimento. Para as duas situações descritas, muito provavelmente, o melhoramento de solos surgiu como uma alternativa mais barata.

Com este intuito, surgiram na década de 1970, nos Estados Unidos, os primeiros estudos do comportamento de misturas de solo-cimento Portland. Entretanto, devido ao limitado conhecimento técnico, não foi possível estabelecer parâmetros para o controle das características da mistura e as influências das mesmas nas resistências às solicitações. Sendo assim, até a década passada, a aplicação prática estava baseada em relações empíricas extraídas de um pequeno número de dados.

Pesquisas mais recentes procuraram primeiramente estabelecer parâmetros fundamentais para o controle da resistência do solo melhorado, tais como: a concentração de material aglomerante, o teor de umidade e o índice de vazios. Simultaneamente, o desenvolvimento da tecnologia de materiais permitiu o uso de materiais compostos, com o uso de fibras de polipropileno e cimento, na mistura. Por outro lado, o aumento do custo de cimento incentivou a procura por materiais mais baratos como: a cal e a cinza pesada, dentre outros.

Através dos parâmetros de controle pesquisados puderam ser estabelecidas correlações dos mesmos com a resistência dos solos. Então, a partir destas relações foram desenvolvidos métodos racionais de dosagem dos componentes dessas misturas, considerando o efeito das diferentes variáveis, tornando o melhoramento de solos uma alternativa passível de ser contemplada corretamente tanto técnica quanto economicamente.

Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar, através ensaios em condições controladas, como diferentes concentrações de cal em uma mistura com solo argiloso e cinza volante modificam as propriedades resistentes do material. Desta forma, através destes resultados, explicitou-se a relação entre as variáveis para compreensão da interação entre as mesmas, desenvolveu-se uma curva de dosagem a qual relaciona a razão vazios/quantidade de cal com a resistência à tração do solo melhorado e as envoltórias de rupturas referentes aos valores estudados.

Este trabalho de diplomação é constituído por seis capítulos. O primeiro capítulo é introdutório, apresentando os motivos que levaram à execução das pesquisas de melhoria de solos. No capítulo dois são definidas as diretrizes da pesquisa. São apresentados: a questão de pesquisa, objetivos, delimitações, limitações e delineamento deste trabalho. O capítulo três é constituído pela descrição geral das pesquisas já realizadas e resultados obtidos. Enquanto no capítulo quatro é descrito o programa experimental, no qual são detalhados todos os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa. No capítulo cinco são expostos os resultados deste programa experimental, juntamente com as análises pertinentes. Finalmente, no capítulo seis, são apresentadas as considerações finais e conclusões desta pesquisa.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Este capítulo aborda a questão de pesquisa e os objetivos principal e secundários.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual o método prático e racional de dosagem para a mistura de solo residual de arenito Botucatu, cinza volante e cal?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a definição de um método de dosagem racional para a mistura de solo residual de arenito Botucatu, cinza volante e cal, de modo que as equações obtidas possibilitem atingir uma resistência alvo de projeto tanto pela variação do teor de cimento, quanto da porosidade ou uma combinação entre as duas, visando obter-se a resistência pretendida juntamente com a otimização do custo.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho, referentes à resistência à tração da mistura solo-cinza-cal, são:

- a) verificação da influência da quantidade de cal;
- b) verificação da influência da porosidade;
- c) validação da relação vazios/cal na estimativa desta resistência.

2.3 DELIMITAÇÃO

O trabalho delimita-se ao uso de solo residual de arenito Botucatu como solo a ser misturado com cal e cinza volante.

2.4 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se a estudar:

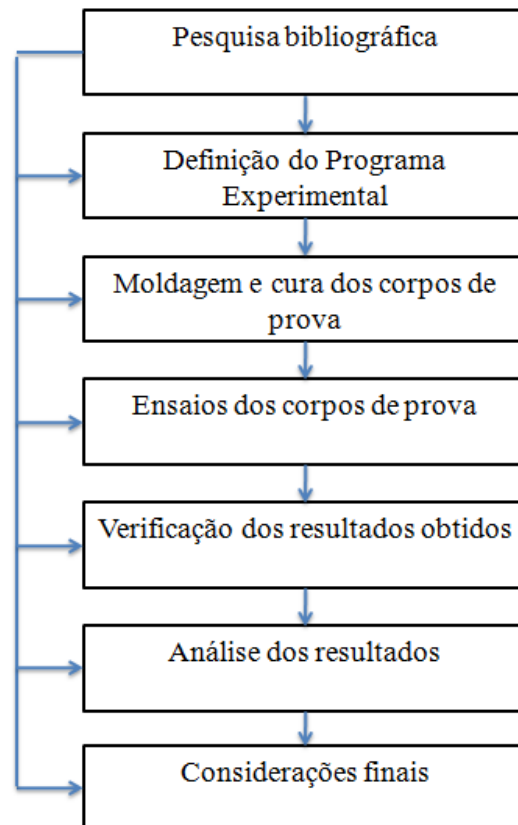
- a) teores de cal de 3 a 11%;
- b) teor de umidade de 14%;
- c) teor de cinza volante de 25%;
- d) massas específicas aparentes secas da mistura variando de 1,6 a 1,88 g/cm³;
- e) tempo de cura de 28 dias;
- f) não será levado em conta o efeito da sucção.

2.5 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, as quais estão representadas na figura 1 e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição do programa experimental;
- c) moldagem dos corpos de prova;
- d) cura dos corpos de prova;
- e) ensaios dos corpos de prova;
- f) verificação dos resultados obtidos;
- g) análise dos resultados;
- h) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas de pesquisa



(fonte: elaborada pelo autor)

A **pesquisa bibliográfica** foi efetuada primeiramente para obter informações sobre as publicações e estudos mais recentes na literatura tendo em vista as misturas de solo com aglomerantes, os materiais que as constituem, os métodos de dosagem concebidos e variáveis propostas. Subsequentemente, foi pesquisado na literatura sobre a mecânica dos solos melhorados, como estes se comportam quando submetidos a ensaios de resistência, quais variáveis regem a resistência do solo e quais as relações entre as resistências à tração e à compressão.

A segunda etapa do trabalho foi a **definição do programa experimental**. Nesta foram determinados o teor de umidade, as porosidades, as concentrações de cal, a concentração de cinza volante e as massas específicas que foram pesquisados. Então, deu-se início à etapa de **moldagem e cura dos corpos de prova**, na qual estes foram moldados como especificado no programa experimental e permaneceram durante 28 dias em uma estufa. Após a cura os corpos de prova foram imersos em água durante 24 horas, visando reduzir os efeitos

provocados pela sucção. Após tal processo, ocorreram os **ensaios dos corpos de provas** em ensaios de compressão diametral.

A subsequente **verificação dos resultados obtidos** teve como objetivo verificar a consistência dos dados adquiridos a partir da ruptura dos corpos de prova. Os resultados que foram discrepantes ou nos quais for constatado erro experimental foram desconsiderados.

Em seguida, efetuou-se a **análise dos resultados**, etapa na qual foram avaliadas as influências da concentração de cal e da porosidade na resistência à tração. Adicionalmente, avaliou-se a relação entre a razão vazios/cal com esta resistência. Dispondo de tal relação foi efetuada a comparação entre as resistências à tração e à compressão, pesquisada por outros autores, e se verificou a existência de uma correlação direta entre as duas, validando-se o critério de ruptura de Griffith para misturas de solo, cinza volante e cal. Ambos constituem o método de dosagem racional para a mistura proposta.

Por fim, realizaram-se **considerações finais**, nas quais foram compiladas as conclusões das análises e suas implicações no conhecimento da mecânica dos solos argilosos misturados com cal e cinza volante.

3 SOLOS MELHORADOS: CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este capítulo tem como objetivo fazer uma descrição geral sobre as pesquisas já realizadas na área. Na primeira divisão, faz-se a analogia entre os resultados expressivos encontrados para misturas solo-cimento e solo-cal em termos de resistência à compressão simples e a relação desta com as seguintes variáveis: concentração de aglomerante, porosidade, teor de umidade, razão vazios/aglomerante e tempo de cura. Então, são expostos resultados obtidos na bibliografia para misturas de areia-cimento em ensaios de compressão diametral e são analisados os resultados. Finalmente, descreve-se o critério de ruptura de Griffith e as experiências que corroboram sua utilização na mecânica dos solos misturados.

Ingles e Metcalf (1972, tradução nossa) afirmam que a estabilização de solos com cal hidratada é amplamente similar a estabilização com cimento em relação aos ensaios e práticas construtivas empregados. No entanto, ela se difere em dois importantes aspectos: primeiro, pode ser aplicada em solos muito argilosos, sendo menos praticável para solos granulares; e, segundo, pode ser utilizada para a preparação de solos a receber outros tratamentos ou para melhoramento do solo suficiente para suportar a carga de tráfego durante a construção. Os itens a seguir explicitam a similaridade comportamental de ambos os tipos de misturas.

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

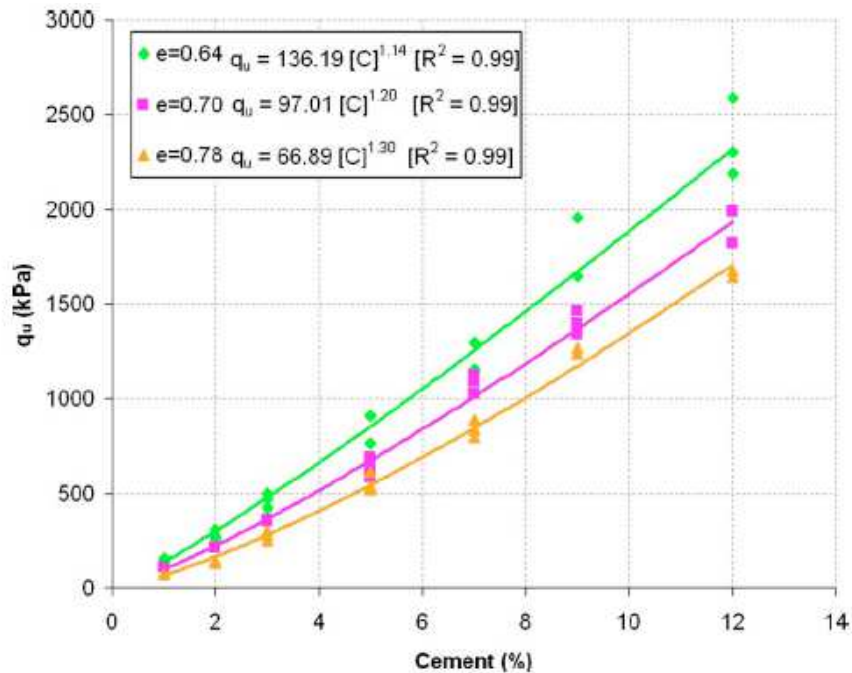
Nos parágrafos a seguir, é feita a comparação dos resultados obtidos para misturas de solo com cimento Portland e solo com cal em ensaios de compressão não-confinada.

3.1.1 Concentração de aglomerante

Segundo Consoli et al. (2010, tradução nossa), para as misturas de solo-cimento a concentração de cimento possui um grande efeito na resistência à compressão, de modo que uma pequena adição de cimento provoca grandes ganhos de resistência. Os autores afirmam que os dados obtidos na pesquisa demonstram que uma função potência adapta-se bem à relação entre a resistência à compressão não-confinada e a variação da concentração de

cimento, sendo esta última a razão entre a massa de cimento e a de solo presentes nos corpos de prova. As equações e seus gráficos estão representados na figura 2, onde q_u representa a resistência à compressão simples, R^2 é o coeficiente de correlação e as curvas estão descritas em função do índice de vazios (e).

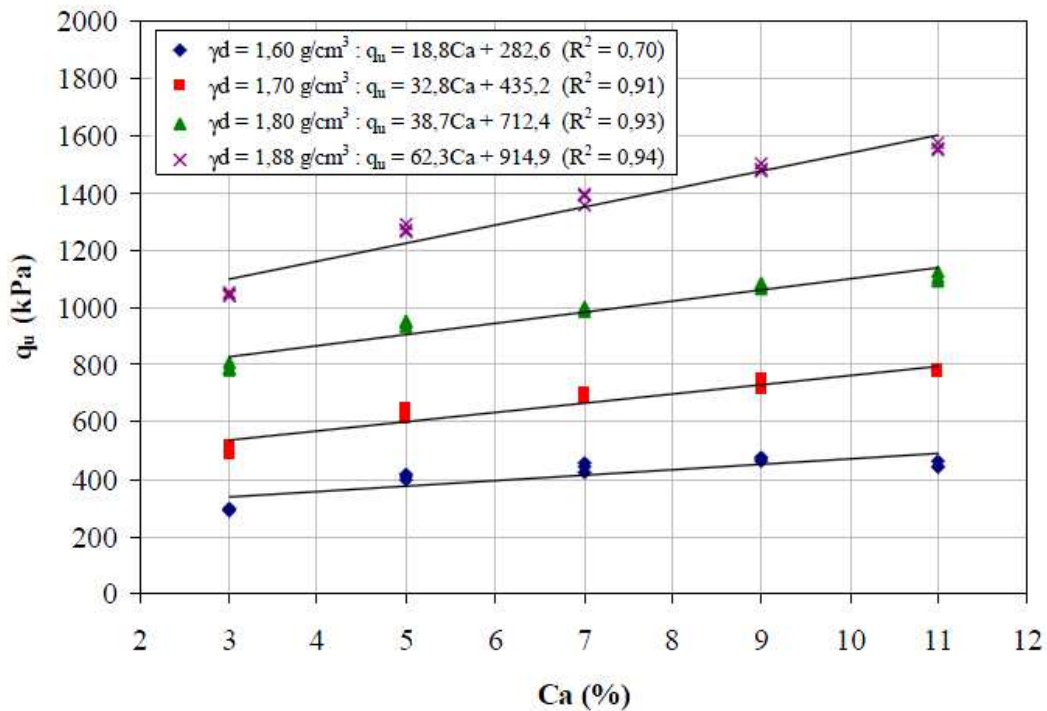
Figura 2 – Variação da resistência à compressão simples (q_u) com o teor de cimento



(fonte: CONSOLI et al., 2010, p. 761)

Lopes Junior (2007) afirma que a quantidade de cal influi diretamente na resistência à compressão simples e mesmo pequenas adições de cal são suficientes para gerar ganhos de resistência. O mesmo autor também salienta que a inclinação das retas de ajuste permanece praticamente constante com o aumento de massa específica aparente seca. A figura 3 demonstra os resultados obtidos por Lopes Junior (2007) em testes de compressão simples para mistura de areia argilosa Botucatu e cal. Estão presentes, nessa figura, as respectivas equações recomendadas pelo autor, nas quais o teor volumétrico de cal corresponde à razão entre o volume de cal presente e o total do corpo de prova. O autor identifica as curvas conforme a massa específica aparente seca γ_d e, em suas equações, q_u representa a resistência à compressão simples, R^2 é o coeficiente de correlação entre os dados e as retas ajustadas.

Figura 3 – Efeito do teor de cal volumétrico sobre a resistência à compressão simples de solo-cal curados em 90 dias



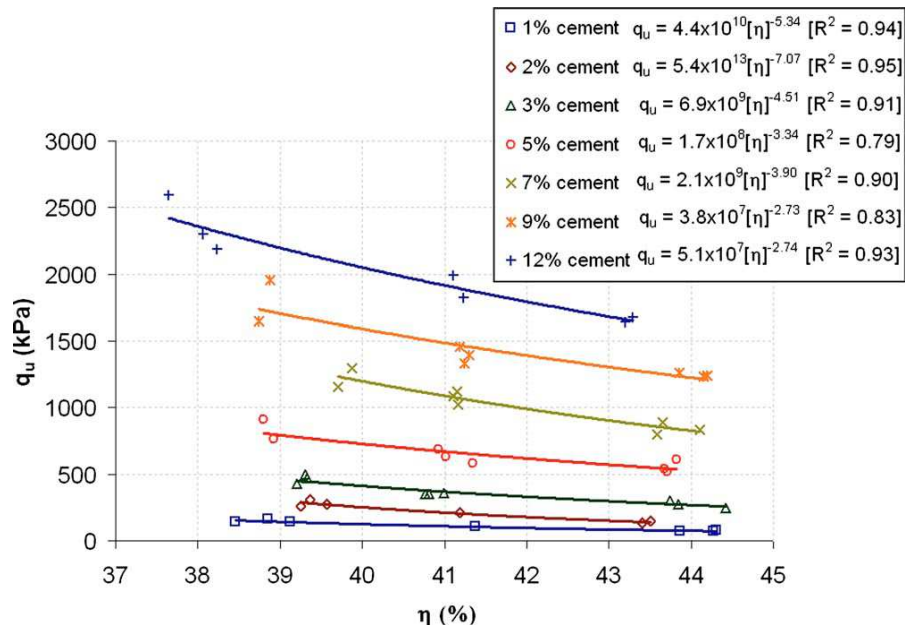
(fonte: LOPES JUNIOR, 2007, p. 70)

3.1.2 Porosidade

Segundo Consoli et al. (2010, tradução nossa), as misturas solo-cimento apresentam um ganho de resistência à compressão não-confinada com o decréscimo da porosidade. Os autores ajustaram funções para as relações entre a porosidade e a resistência à compressão simples obtidas para cada teor de cimento incorporado. Tais resultados estão presentes na figura 4, na qual as equações η corresponde à porosidade, q_u representa a resistência à compressão simples e R^2 o coeficiente de correlação.

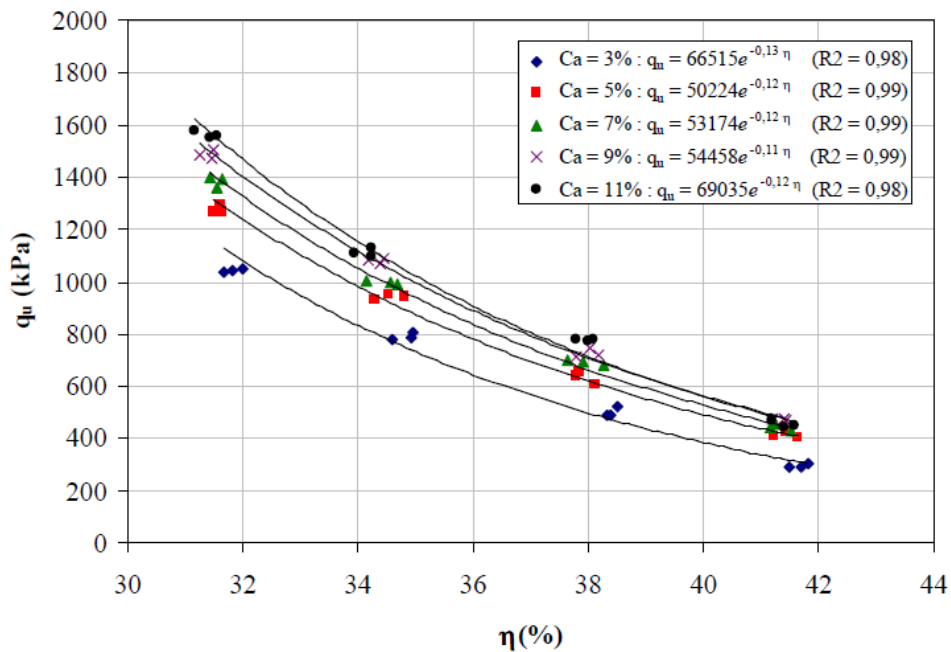
Para as misturas de solo com cal, Lopes Junior (2007) afirma que a resistência à compressão simples aumenta exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada. O mesmo autor ajusta curvas, representadas na figura 5, para os resultados colhidos em sua pesquisa. A porosidade é representada por η e são estabelecidas equações para cada teor de cal estudado.

Figura 4 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a porosidade



(fonte: CONSOLI et al., 2010, p. 761)

Figura 5 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do solo-cal ensaiados com 90 dias de cura



(fonte: LOPES JUNIOR, 2007, p. 72)

Sobre tais resultados, Lopes Junior (2007, p. 72) afirma:

Verifica-se que, de maneira contrária à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência à compressão simples do

solo-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos consideráveis de resistência. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou em [...] 3,4 vezes a resistência à compressão simples do solo-cal testado para [...] 90 dias de cura, respectivamente.

Em relação aos efeitos da porosidade para ambos os materiais, Consoli et al. (2009, tradução nossa) comentam que as misturas solo-cimento por eles estudadas apresentaram um claro aumento na resistência à compressão não-confinada com a adição de cimento e com o aumento da massa específica aparente seca. Para misturas solo-cal os autores comentam que este comportamento não foi tão pronunciado, sugerindo que a redução na porosidade é mais efetiva nas misturas de solo-cimento do que nas misturas com cal.

3.1.3 Teor de umidade

Para a avaliação da influência do teor de umidade, Consoli et al. (2009, tradução nossa) moldaram corpos de prova com a mesma massa específica aparente seca e diferentes teores de umidade, tanto para uma mistura solo-cimento quanto para uma mistura solo-cal. Os resultados encontrados pelos autores encontram-se nas figuras 6 e 7, para solo-cimento e solo-cal, respectivamente. Nessas figuras, ω representa o teor de umidade em porcentagem relacionado com a resistência à compressão simples q_u , com resultados expressos para cada um dos teores de aglomerante em massa pesquisados.

Em relação aos resultados presentes na figura 6, publicados em artigo por Consoli et al. (2009) e derivados das pesquisas de Lopes Junior (2007, p. 78), este último comenta que para a mistura de solo-cimento:

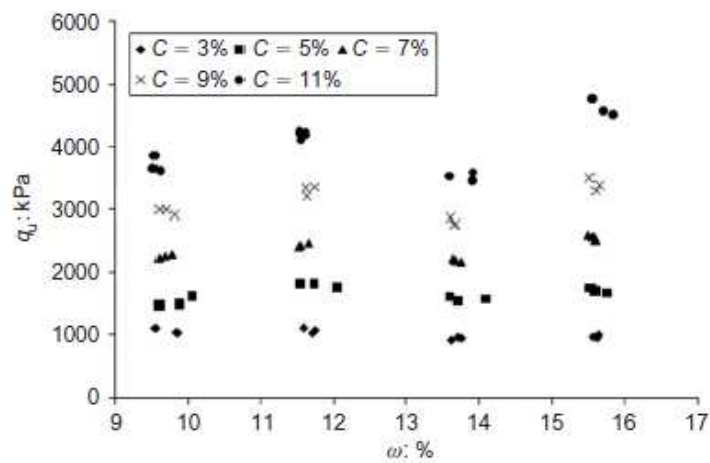
[...] a variação do teor de umidade não afetou consideravelmente a resistência à compressão simples dos corpos de prova com teores de 3 a 9% de cimento. No caso de corpos de prova com 11% de cimento, observa-se uma pequena queda na resistência aos 14% de umidade e um aumento nos 16%.

Para os resultados presentes na figura 7, solo-cal com tempo de cura de 28 dias, Lopes Junior (2007, p. 74) afirma: “[...] a variação no teor de umidade de moldagem não afetou consideravelmente a resistência à compressão simples.”. Adicionalmente, esse autor moldou corpos de prova com os mesmos teores de cal e de umidade que os utilizados nos corpos de prova com 28 dias de cura, porém estendeu o tempo de cura para 90 dias. Tais resultados

estão representados na figura 8. Sobre os resultados da figura 8, Lopes Junior (2007, p 74) afirma:

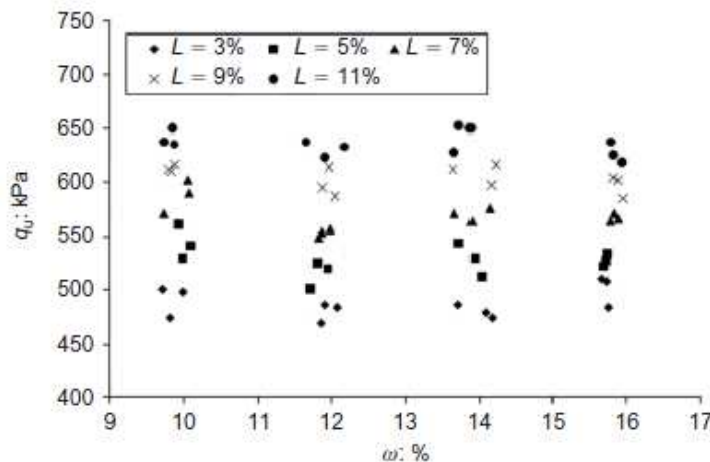
[...] a variação no teor de umidade afetou a resistência à compressão simples. De maneira geral, observa-se um “patamar” de resistência até 12% de umidade, a partir deste ponto as resistências à compressão simples diminuem em média 30%. Verifica-se que o teor ótimo de umidade, para corpos de prova ensaiados a 90 dias de cura, encontra-se abaixo dos 12% de umidade.

Figura 6 – Efeito do teor de umidade de moldagem na resistência à compressão não-confinada do solo-cimento



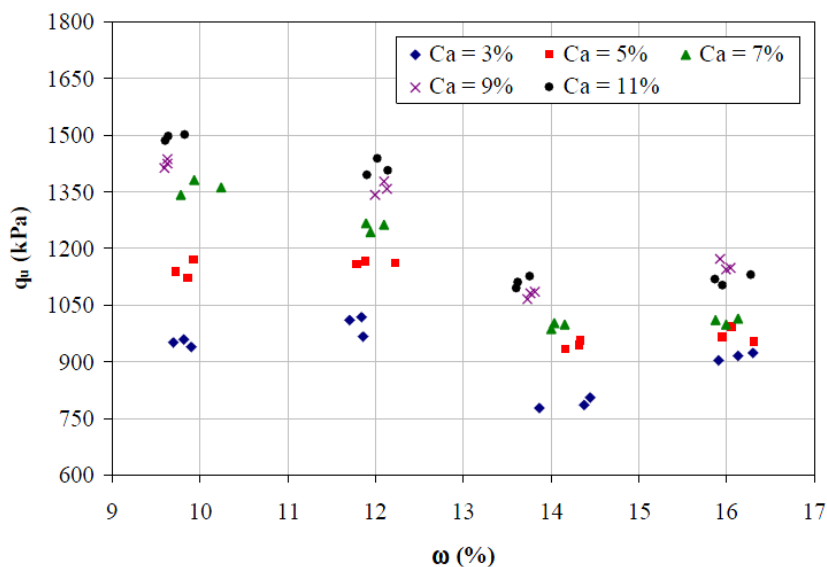
(fonte: CONSOLI et al., 2009, p. 114)

Figura 7 – efeito do teor de umidade de moldagem na resistência à compressão não-confinada do solo-cal com 28 dias de cura



(fonte: CONSOLI et al., 2009, p. 114)

Figura 8 – Efeito do teor de umidade de moldagem na resistência à compressão não-confinada do solo-cal com 90 dias de cura



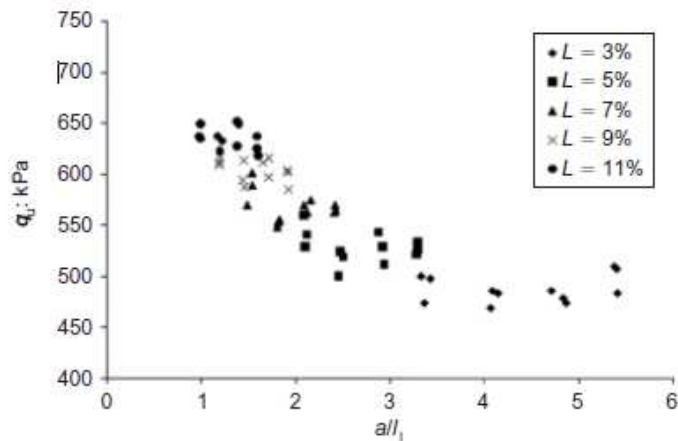
(fonte: LOPES JUNIOR, 2007, p. 73)

Adicionalmente, Consoli et al. (2009) analisaram a influência da razão água/aglomerante, definida como a massa de água dividida pela massa de material cimentante, na resistência à compressão simples. Os resultados estão apresentados nas figuras 9 e 10. Consoli et al. (2009, tradução nossa) comentam que parece existir uma relação direta entre a resistência à compressão não-confinada e a razão água/material cimentante do material tanto para solo-cal quanto para solo-cimento. Entretanto, os autores salientam que tal relação pode não estar de fato correta, visto que, utilizando tanto de 3% de cal quanto de 3% de cimento e juntamente com quatro diferentes valores de teor de umidade e consequentemente, quatro valores distintos de razão água/material cimentante, resultam em um único valor de resistência à compressão, provando que o teor de umidade para corpos de prova não-saturados não é um valor que deve ser utilizado para estimar tal resistência. Consoli et al. (2009, tradução nossa) afirmam que, para teores de 5, 7, 9 e 11% de material cimentante, os resultados são análogos aos anteriores, todos representados nas figuras 9 e 10.

Adicionalmente, quanto aos resultados das figuras 9 e 10, Consoli et al. (2009, tradução nossa) indicam que no estudo realizado os vazios estavam apenas parcialmente preenchidos por água e não houve nenhuma relação única entre o índice de vazios e a quantidade de água. Deste modo, os papéis desempenhados pela porosidade e pelo teor de umidade são diferentes. Enquanto a água afeta a resistência, por possível mudança da estrutura do solo, na porosidade, o seu efeito na resistência é através da modificação do número de pontos de contato entre as

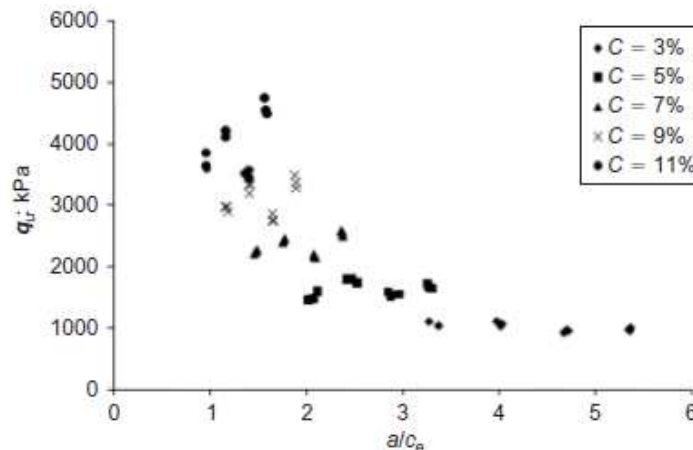
partículas de solo. Portanto, para o solo-cimento no estado não-saturado, como usualmente é utilizado na prática de Engenharia, uma relação entre a porosidade e o teor de cimento deve ser mais apropriada na análise e no controle das suas propriedades mecânicas. Os autores concluem que variando o teor de umidade mantendo a massa específica aparente seca constante não afetou significativamente a resistência à compressão não-confinada.

Figura 9 – Variação da resistência à compressão simples com a razão água/cal



(fonte: CONSOLI et al., 2009, p. 115)

Figura 10 – Variação da resistência à compressão simples com a razão água/cimento



(fonte: CONSOLI et al., 2009, p. 115)

Consoli et al. (2009, tradução nossa) salientam que anteriormente ao ensaio de compressão não-confinada os corpos de prova foram imersos em água por 24 horas, considerando este processo uma boa maneira de obter graus elevados e repetíveis de saturação. Os graus de

saturação obtidos nos corpos de prova, após esse processo, situam-se em torno de 80%, independentemente da porosidade e do teor de aglomerante.

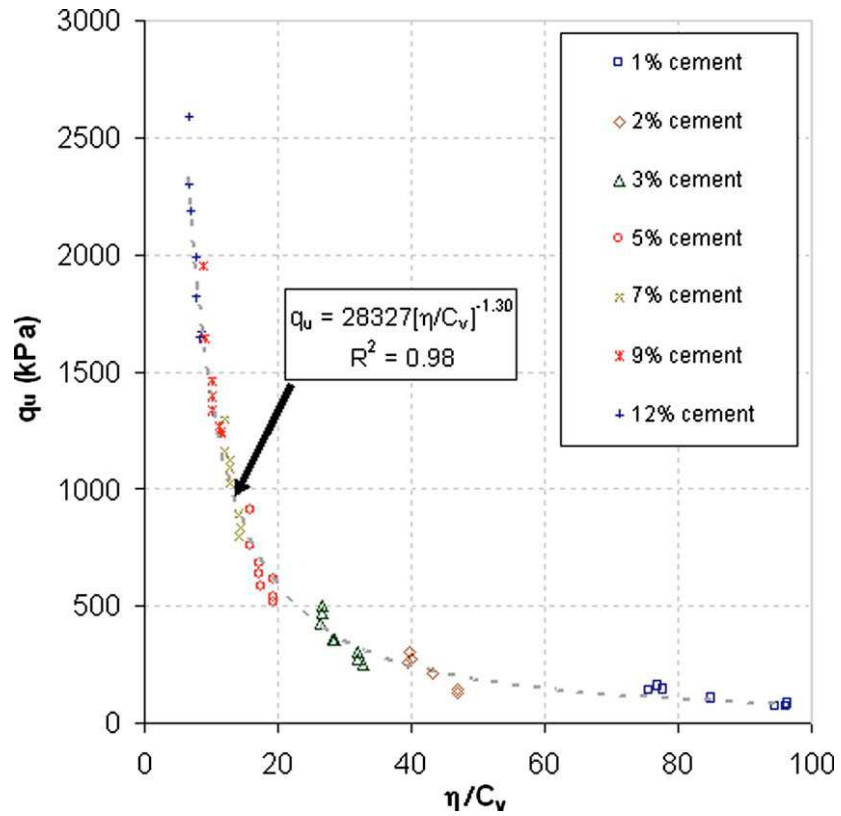
Quanto a sucção, Consoli et al. (2009, tradução nossa) relatam valores medidos na ordem de 1 a 5% da resistência à compressão não-confinada, sendo estas medidas realizadas após a ruptura dos corpos de prova. Sendo assim, provavelmente superestimem os valores reais porque podem ter ocorrido leves secagens dos corpos de prova durante o tempo entre o início do ensaio de ruptura até o momento de medição da sucção. Adicionalmente, os autores afirmam que por causa dos pequenos valores encontrados, em relação aos valores de resistência à compressão não-confinada, a sucção não foi levada em consideração nas análises das variáveis investigadas.

3.1.4 Razão vazios/aglomerante

Estudando misturas de solo-cimento, Consoli et al. (2010) utilizaram a razão vazios/aglomerante como a porosidade η dividida pelo teor volumétrico de cimento C_v do corpo de prova, sendo este último a divisão do volume de cimento pelo volume total do corpo de prova. Esta razão seria o mesmo que dividir o volume de vazios (água mais ar) pelo volume de cimento. Os autores comentam que para os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples foi possível ajustar uma função potência relacionando tal razão e a resistência com um bom coeficiente de correlação ($R^2=0,98$). Os resultados obtidos estão representados na figura 11. Segundo Consoli et al. (2010, tradução nossa), uma simples observação dos resultados expressos nessa figura demonstra que a razão vazios/aglomerante é útil para a normalização de resultados.

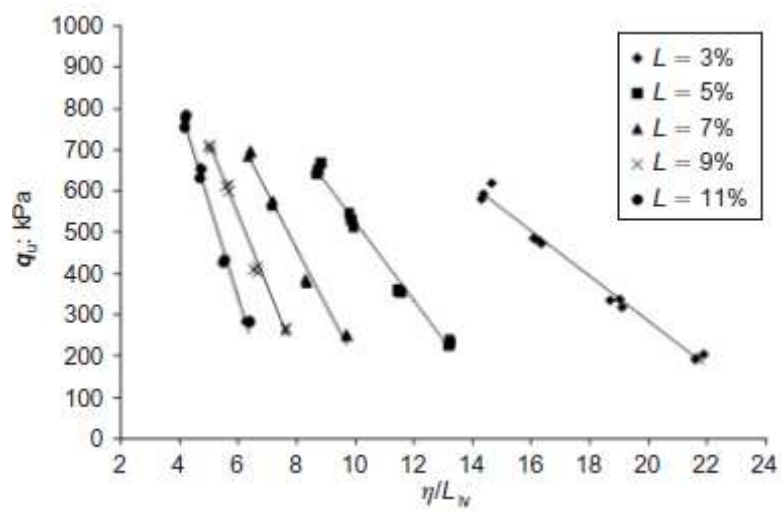
De modo semelhante, Consoli et al. (2009) moldaram corpos de prova de solo-cimento e solo-cal com teores de 3, 5, 7, 9 e 11% e analisaram a relação da razão vazios/aglomerante com a resistência à compressão simples, mantendo o teor de umidade constante de 14%. Os resultados estão expressos nas figuras 12 e 13, para solo-cal e solo-cimento, respectivamente.

Figura 11 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a razão vazios/cimento



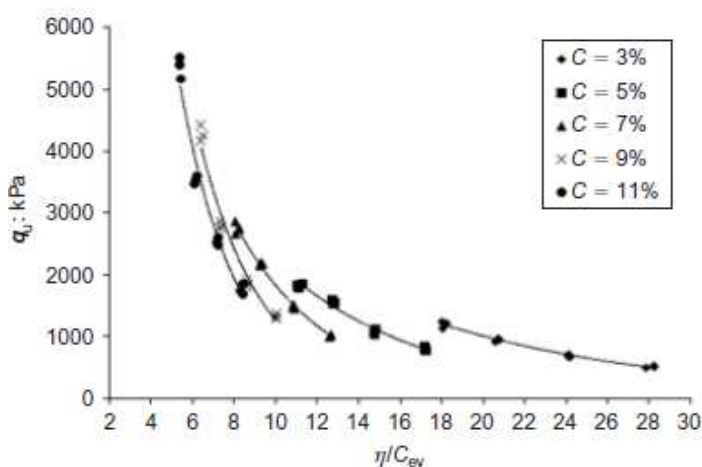
(fonte: CONSOLI et al., 2010, p. 762)

Figura 12 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a razão vazios/cal da mistura solo-cal



(fonte: CONSOLI et al., 2009, p. 115)

Figura 13 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a razão vazios/cimento da mistura solo-cimento

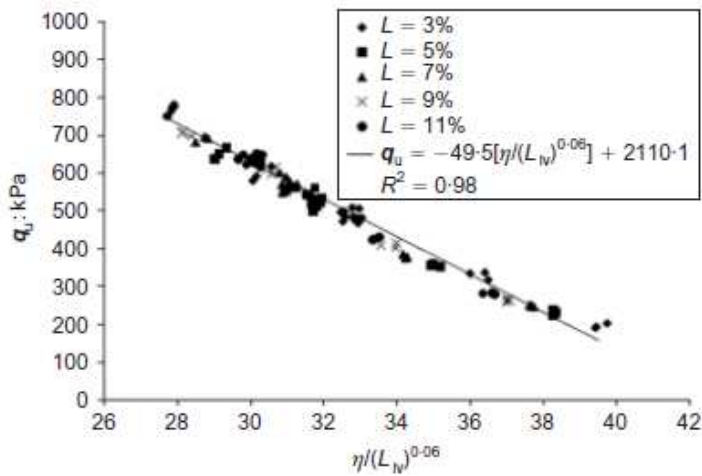


(fonte: CONSOLI et al., 2009, p. 115)

Consoli et al. (2009, tradução nossa) afirmam que para a mistura solo-cal não há uma relação única entre a resistência à compressão simples q_u e a razão vazios/cal, porém a mistura solo-cimento apresenta uma relação razoável entre q_u e a razão vazios/cimento η/C_{ev} . Os autores comentam que ao dividir a porosidade pelo teor volumétrico de agente cimentante (aglomerante) foi assumido que um aumento na porosidade da mistura poderia ser contrabalanceado por um proporcional aumento no teor volumétrico de agente cimentante, mantendo constante a resistência à compressão não-confinada.

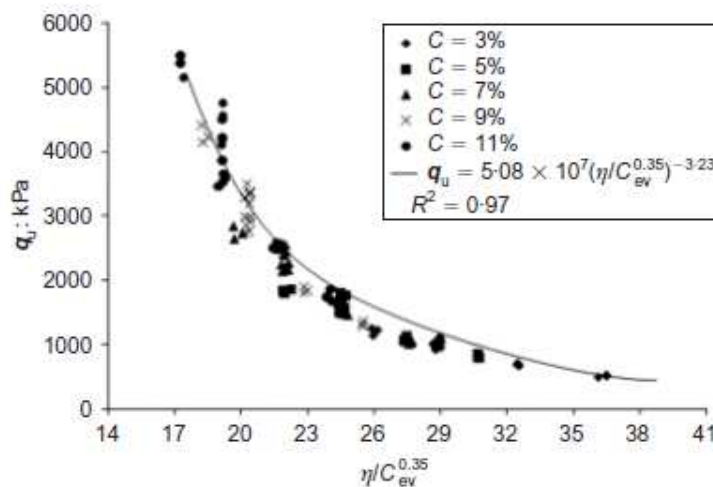
De fato, segundo Consoli et al. (2009, tradução nossa), para manter a mesma q_u deve-se aplicar um expoente a uma das variáveis (η , C_{ev} , L_{iv}) a fim de tornar os efeitos da variação em q_u compatíveis. Deste modo, aplicando um expoente de 0,06 ao parâmetro L_{iv} nas misturas solo-cal e um expoente de 0,35 ao parâmetro C_{ev} nas misturas solo-cimento foram obtidos bons ajustes aos dados de resistências à compressão. Para aquelas o melhor ajuste foi através de uma relação linear, porquanto para estas a melhor curva ajustada foi uma função potência. Os resultados desta análise estão nas figuras 14 e 15. Juntamente com os coeficientes de correlação encontrados e as equações sugeridas pelos autores para o solo estão os teores de cimento e cal, teor de umidade e porosidades pesquisados.

Figura 14 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a razão porosidade/teor volumétrico de cal ajustada



(fonte: CONSOLI et al., 2009, p. 117)

Figura 15 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a razão porosidade/teor volumétrico de cimento ajustada

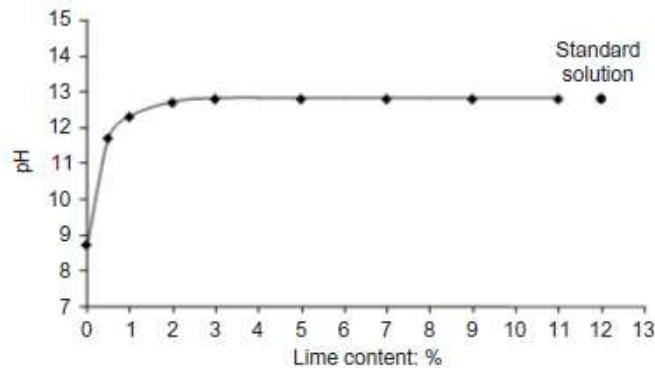


(fonte: CONSOLI et al., 2009, p. 117)

Finalmente, sobre tais resultados, Consoli et al. (2009, tradução nossa) afirmam que o ajuste do teor volumétrico de aglomerante pelo expoente de 0,06, praticamente zero, para a mistura solo-cal indica que uma vez que a quantidade mínima de cal é satisfeita, o teor de cal pouco afeta a resistência de tais misturas. Conseqüentemente, para a mistura solo-cal estudada, o valor alvo de resistência à compressão não-confinada para um dado projeto deve ser obtido através da redução da porosidade da mistura solo-cal, utilizando pequenos teores de cal, em concordância com os teores mínimos requeridos pelos métodos ICL (*Initial Consumption of Lime*) e LFP (*Lime Fixation Point*).

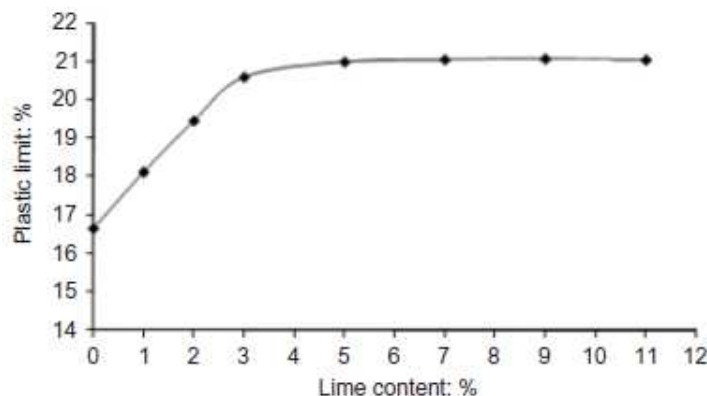
Os dados obtidos por Consoli et al. (2009) utilizando tais metodologias estão representados nas figuras 16 e 17, referentes à mistura de areia argilosa Botucatu e cal. A primeira demonstra a variação do pH da mistura com teor de cal (ICL) e a segunda demonstra a variação do limite de plasticidade com o aumento do teor de cal (LFP). Pode ser observado na figura 16 que um mínimo de 3% de cal é necessário para estabilizar o pH da mistura e atingir um nível semelhante ao da solução-padrão do método. Adicionalmente, na figura 17 observa-se que 3% de cal é a quantidade necessária para a mistura atingir o limite de plasticidade máximo. Baseados nos dois métodos supracitados, Consoli et al. (2009) selecionaram 3% de cal como o teor mínimo a ser empregado.

Figura 16 – Resultados do teste ICL do solo-cal



(fonte: CONSOLI et al., 2009, p. 112)

Figura 17– Resultados do teste LFP do solo-cal



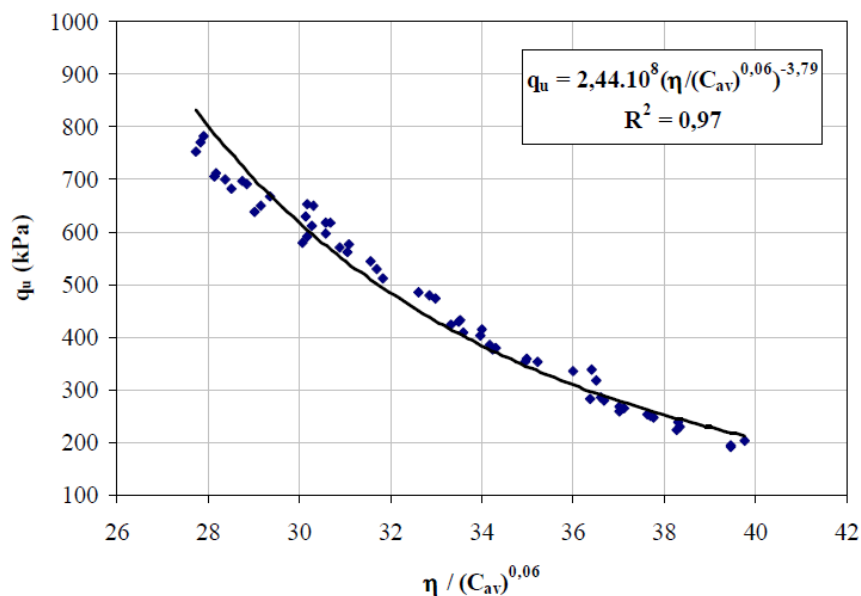
(fonte: CONSOLI et al., 2009, p. 112)

Entretanto, para a mistura solo-cimento, Consoli et al. (2009, tradução nossa) afirmam que os dados da figura 15, e o consequente ajuste do expoente 0,35, significam que para tal mistura

há efetivamente duas maneiras de se obter a resistência à compressão não-confinada de um dado projeto: redução da porosidade ou aumento do teor de cimento. Portanto, para a mistura areia argilosa Botucatu e cimento Portland estudada, a melhor maneira de atingir a resistência alvo de projeto deve ser escolhida tendo em vista o menor custo, de modo que a decisão entre utilizar uma maior energia de compactação ou aumentar o teor de cimento Portland será baseada em critérios econômicos.

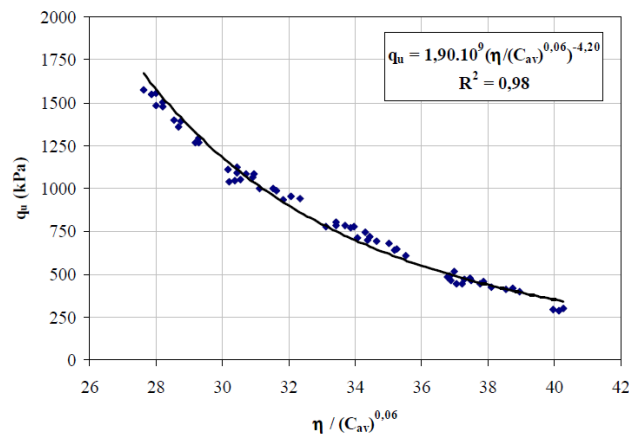
Entretanto, é interessante ressaltar que Lopes Junior (2007), um dos autores de Consoli et al. (2009), ajusta funções potência aos resultados obtidos em seus ensaios de solo-cal, os quais serviram de base para o artigo. Lopes Junior (2007) ensaiou, dentre outros, corpos de prova de areia argilosa Botucatu e cal tanto para 28 quanto para 90 dias de cura. Segundo o autor, as funções potência ajustadas também possuem um ótimo grau de precisão, coeficiente de correlação R^2 de 0,97 para 28 dias de cura e R^2 de 0,98 para 90 dias de cura. Os resultados e equações propostos por Lopes Junior (2007) estão representados nas figuras 18 e 19, nas quais C_{av} representa o teor volumétrico de cal, η a porosidade e q_u a resistência à compressão simples. Segundo o autor, são colocados em função potência para melhor comparação com os resultados obtidos por outros autores para misturas com cimento Portland.

Figura 18 – Relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e do teor volumétrico de cal para amostras com 28 dias de cura



(fonte: LOPES JUNIOR, 2007, p. 104)

Figura 19 – Relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico de cal para amostras com 90 dias de cura



(fonte: LOPES JUNIOR, 2007, p. 104)

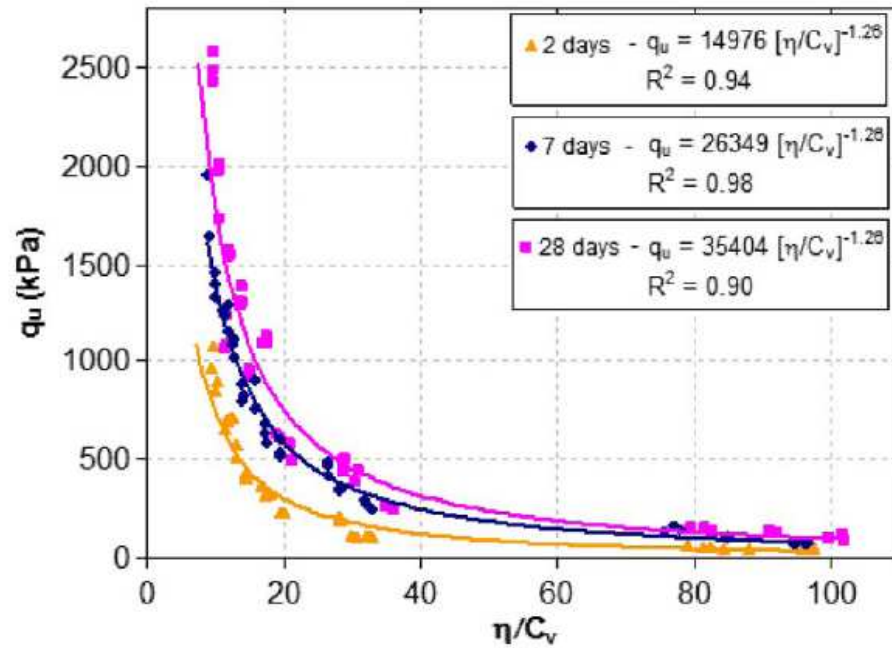
3.1.5 Tempo de cura

As figuras 18 e 19, de autoria de Lopes Junior (2007), demonstram que existe uma alteração da resistência conforme o tempo de cura para a mistura solo-cal, aumentando a resistência com o aumento do tempo de cura. Lopes Junior (2007, p. 105) afirma:

[...] as reações pozolânicas, as quais proporcionam ganhos efetivos de resistências às misturas compactadas de solo e cal, são lentas, estendendo-se por anos e só se iniciam certo tempo depois da compactação. O ganho de resistência só ocorre se houver pH suficientemente elevado para dissolução da sílica e da alumina dos argilos minerais do solo e se a combinação delas com a cal derem origem a novos compostos cimentantes. Pois tanto para a manutenção do pH elevado, como para a formação de aluminatos, silicatos e/ou alumino-silicatos de cálcio, é fundamental a participação da cal. Daí que para tempos de cura de 90 dias seja tão expressiva a dependência da resistência à compressão simples em relação ao teor desse estabilizante.

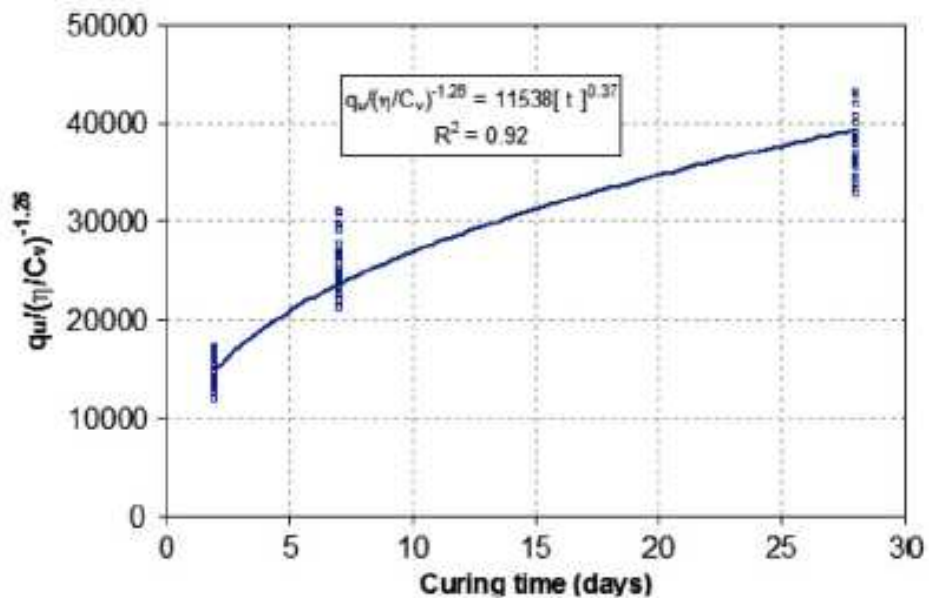
A fim de avaliar a influência do tempo de cura nas misturas solo-cimento, Consoli et al. (2011) moldaram corpos de prova de solo-cimento com teores de cimento distintos e com teor de umidade e massa específica composta constantes, sendo este último uma combinação entre a massa de cimento e de solo. Como esperado, Consoli et al. (2011, tradução nossa) afirmam que para todos os tempos de cura estudados o aumento da resistência à compressão com o tempo de cura é consistente. Adicionalmente, os efeitos das variáveis na resistência possuem a mesma tendência: funções potência para a porosidade, o teor volumétrico de cimento e a razão vazios/cimento (utilizada na forma η / C_v). Os resultados obtidos por Consoli et al. (2011) estão representados nas figuras 20 e 21.

Figura 20 – Variação da resistência à compressão não-confinada com a razão vazios/cimento para três tempos de cura



(fonte: CONSOLI et al., 2011, p. 695)

Figura 21 – Relação entre a resistência à compressão simples e a porosidade, o teor volumétrico de cimento e o tempo de cura



(fonte: CONSOLI et al., 2011, p. 695)

A figura 20 demonstra a variação da resistência à compressão não-confinada com a razão vazios/cimento. Apenas uma diferença escalar pode ser observada entre as curvas ajustadas para os distintos tempos de cura. Deste modo, uma relação única pode ser concebida, relacionando o teor de cimento, a porosidade e o tempo de cura. A equação sugerida pelos autores para o solo, o teor de umidade e a gama de teores de cimento, tempos de cura e porosidades ensaiadas está representada na figura 21.

3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Consoli et al. (2010) moldaram corpos de prova de areia-cimento com diversos teores de cimento, porosidades e índices de vazios. Subsequentemente, utilizaram tais corpos de prova em ensaios de compressão simples e de compressão diametral, este último a fim de encontrar a resistência à tração.

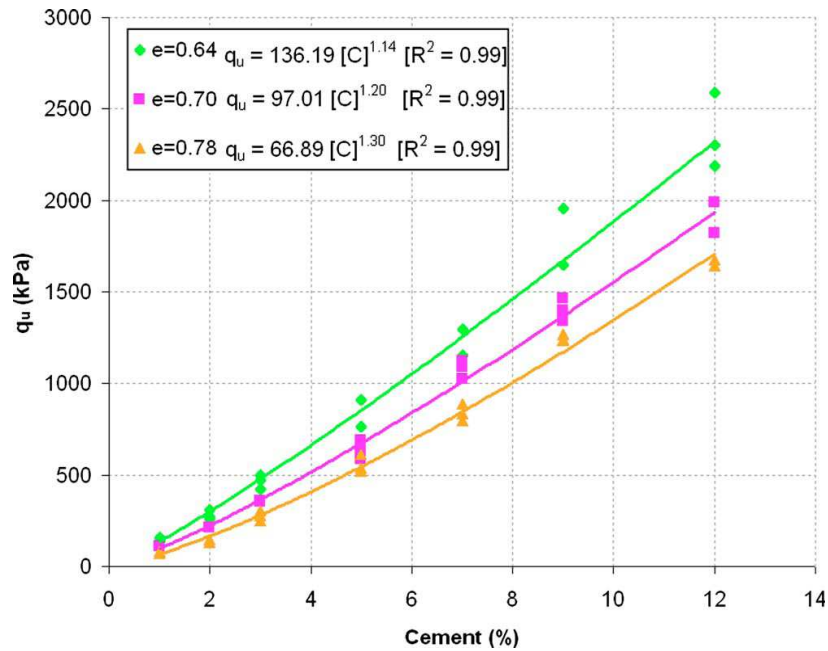
A pesquisa dos autores supracitados, permite relacionar diretamente as resistências da mistura solo-cimento estudada. Portanto, nos próximos tópicos são descritos os resultados obtidos e as análises feitas por Consoli et al. (2010) referentes à influência da concentração de aglomerante, da porosidade e da relação vazios/aglomerante na resistência à tração de uma mistura areia-cimento, bem como, à relação entre as resistências à compressão e à tração.

3.2.1 Concentração de aglomerante

Analisando os resultados de suas experiências, Consoli et al. (2010, tradução nossa) afirmam que a concentração de cimento tem grande influência na resistência à tração da mistura areia-cimento estudada, de modo que uma pequena quantidade de cimento é suficiente para gerar um grande ganho de resistência. Adicionalmente, os autores indicam que uma função potência adapta-se bem à relação entre a resistência à tração q_t e a concentração de cimento em massa C .

Na figura 22, Consoli et al. (2010) apresentam as curvas e equações ajustadas para a relação entre C e q_t . Os resultados obtidos foram discriminados pelos índices de vazios, de modo que, para cada índice, foram ensaiados corpos de prova com diversos teores de cimento.

Figura 22 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com o teor de cimento em massa para mistura areia-cimento



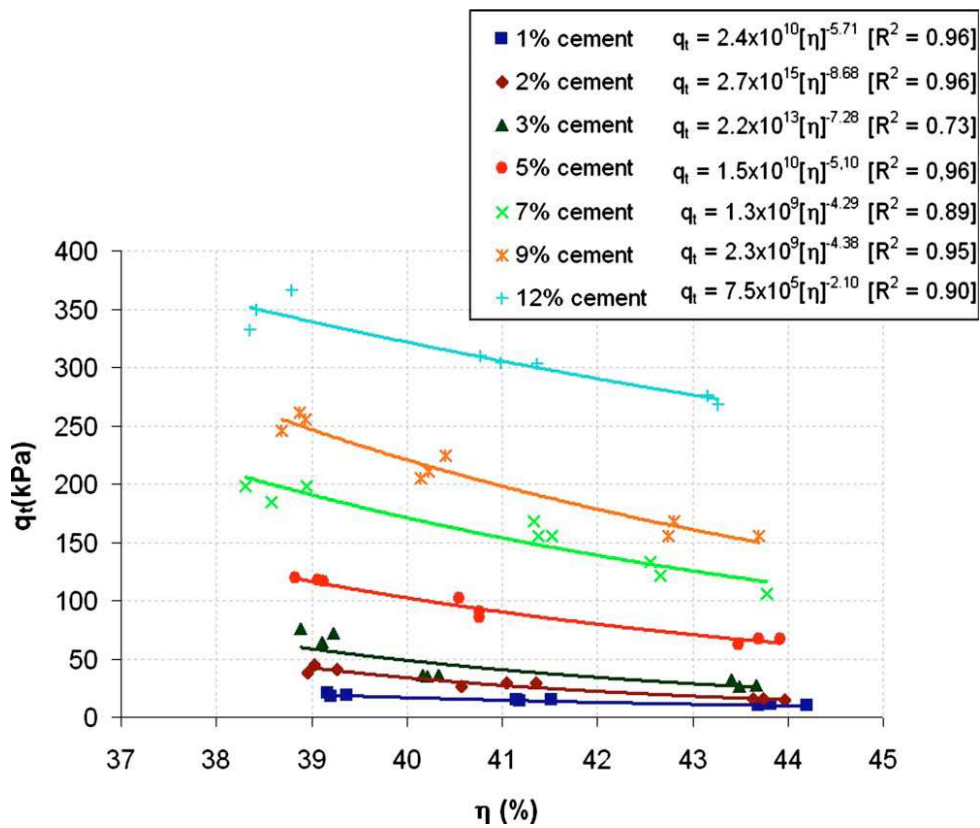
(fonte: CONSOLI et al., 2010, p. 761)

3.2.2 Porosidade

Consoli et al. (2010) também estudaram os efeitos da porosidade em uma mistura areia-cimento. Para tal, moldaram corpos de prova com diferentes porosidades e dispuseram os resultados em curvas para cada teor de cimento utilizado, representadas na figura 23.

A figura 23 demonstra como a porosidade afeta a resistência à tração. Consoli et al. (2010, tradução nossa) afirmam que a resistência aumenta claramente com a redução da porosidade. Tal fato deve-se principalmente ao aumento do contato entre as partículas de solo e, conseqüentemente, uma maior probabilidade de cimentação entre as partículas. De modo análogo ao teor de cimento, os autores afirmam que funções potência ajustam-se bem à relação entre a resistência à tração e a porosidade η . Nessa figura são dispostas as curvas em relação ao teor de cimento C .

Figura 23 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) em relação à porosidade da mistura areia-cimento



(fonte: CONSOLI et al., 2010, p. 761)

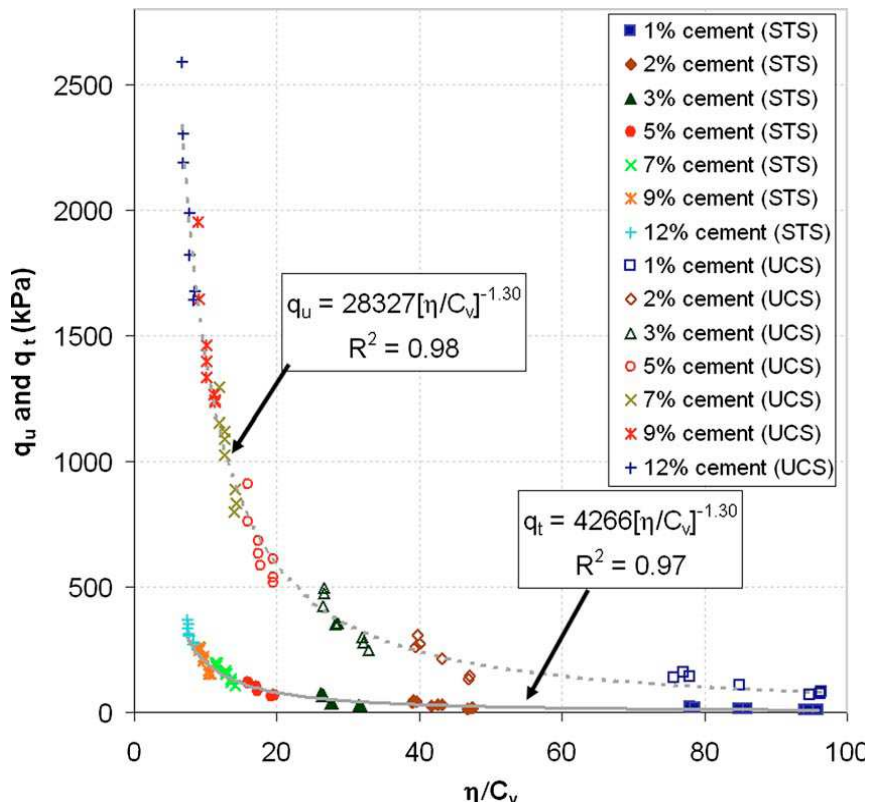
3.2.3 Razão vazios/aglomerante

Consoli et al. (2010, tradução nossa) apresentam a razão vazios/aglomerante como o quociente entre a porosidade η e a concentração volumétrica de cimento C_v . Os autores afirmam que a observação dos resultados obtidos por eles e expressos na figura 24 sugere que tal razão é útil para a normalização de resultados.

Analogamente às outras variáveis, Consoli et al. (2010) ajustaram funções potência aos dados obtidos e verificaram a existência de uma boa correlação ($R^2=0,97$) entre a resistência à tração por compressão diametral e a razão η/C_v . A equação ajustada pelos autores encontra-se na figura 24.

para toda a gama de índices de vazios e teores de cimento estudados. Consequentemente, Consoli et al. (2010, tradução nossa) concluem que qualquer metodologia de dosagem para a mistura solo-areia que considere os efeitos das diferentes variáveis pode ser centrada tanto em ensaios de compressão não-confinada quanto em ensaios de compressão diametral.

Figura 25 – Variação das resistências à tração por compressão diametral (q_t) e da compressão não-confinada (q_u) em relação à razão vazios/aglomerante da areia-cimento



(fonte: CONSOLI et al., 2010, p. 762)

3.3 CRITÉRIO DE RUPTURA DE GRIFFITH

Consoli et al. (2012, tradução nossa) comentam que o critério de ruptura de Griffith foi formulado considerando a mecânica da fratura de materiais frágeis. Basicamente, Griffith considerou um modelo conceitual de um meio bidimensional elástico contendo rachaduras elípticas distribuídas aleatoriamente das quais se deriva a ruptura. Os dois pontos chave desta formulação são: a pré-existência de rachaduras no meio e a suposição que uma rachadura se propagará de maneira instável, partindo dos pontos no limiar da rachadura, nos quais a

concentração da tensão máxima de ruptura atinge um valor limite que é característico do material.

Os autores indicam que este modelo leva a uma envoltória de ruptura parabólica, que pode ser em muitos aspectos mais realista que a envoltória de ruptura linear de Coulomb. Segundo estes, os poros nos solos artificialmente cimentados são espaços entre os grãos de solo que não foram completamente preenchidos por cimento. Estes vazios são responsáveis pelo enfraquecimento da mistura, influenciando diretamente na ruptura.

Consoli et al. (2012, tradução nossa) indicam que a envoltória parabólica de falha de Griffith no plano de Mohr (tensões tangenciais versus tensões normais) possui a seguinte equação:

$$\tau^2 = 4\sigma_t^2 + 4\sigma_t\sigma \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento;

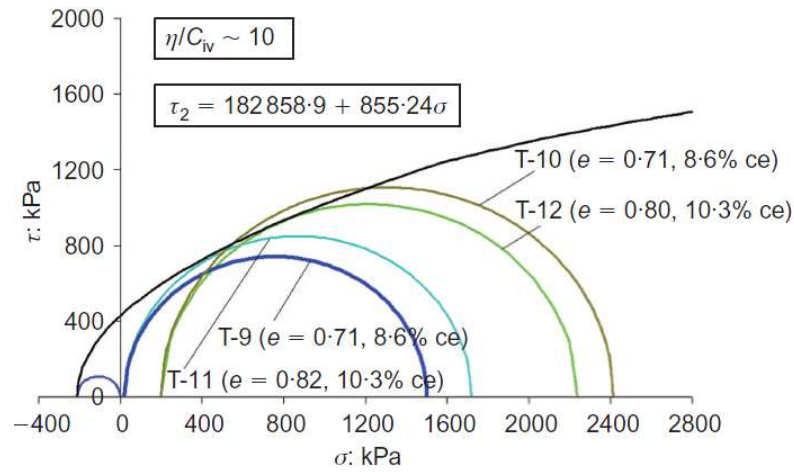
σ = tensão normal de compressão;

σ_t = resistência à tração.

De modo a ser possível traçar esta envoltória, são necessários ensaios de ruptura por compressão diametral. Sendo assim, Consoli et al. (2012, tradução nossa) moldaram corpos de prova de uma mistura areia-cimento e ensaiaram estes à tração por compressão diametral. Analisando os resultados, os autores ajustaram uma função potência entre a relação entre a resistência à tração com a razão vazios/cimento, utilizando esta fórmula juntamente com a equação 1. Deste modo, para uma razão η/C_{iv} específica, obtiveram uma equação que exprime a envoltória de ruptura no plano de Mohr.

Adicionalmente, os autores moldaram corpos de prova segundo os mesmos pontos de moldagem utilizados para as experiências à tração e executaram um programa de ensaios triaxiais, a fim de tornar possível a plotagem dos círculos de Mohr no plano τ - σ . A envoltória de ruptura e os círculos resultantes dos ensaios triaxiais são apresentados na figura 26.

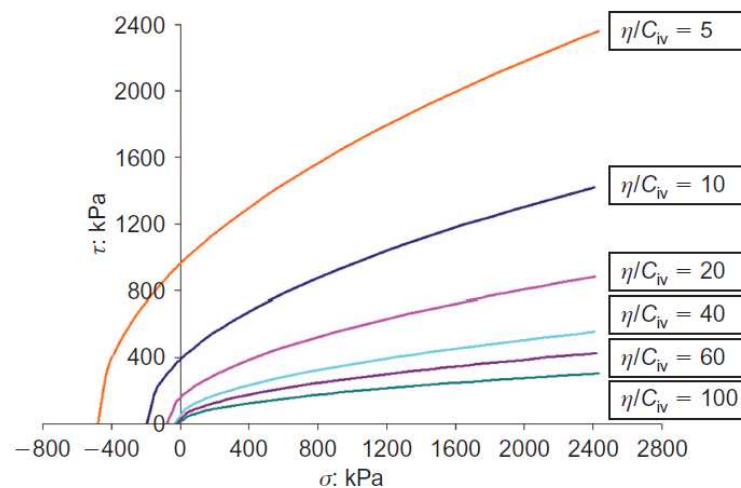
Figura 26 – Envoltória de ruptura da mistura areia-cimento no plano de Mohr para $\eta/C_{iv}=10$



(fonte: CONSOLI et al., 2012, p. 546)

Sobre os resultados da figura 26, Consoli et al. (2012, tradução nossa) indicam que o critério parabólico de ruptura de Griffith, com a correlação empírica da resistência à tração com a razão vazios/cal, representa perfeitamente a envoltória de ruptura não-linear da mistura areia-cimento estudada. De maneira análoga ao resultado da figura 26, os autores traçaram curvas para diferentes razões η/C_{iv} . Sobre tais resultados, apresentados na figura 27, os autores comentam que após um pequeno número de ensaios de ruptura à tração por compressão diametral é possível definir a envoltória de ruptura no plano de tensões $\tau-\sigma$ para todos os intervalos de teor de cimento, porosidade e razão vazios/cimento estudados.

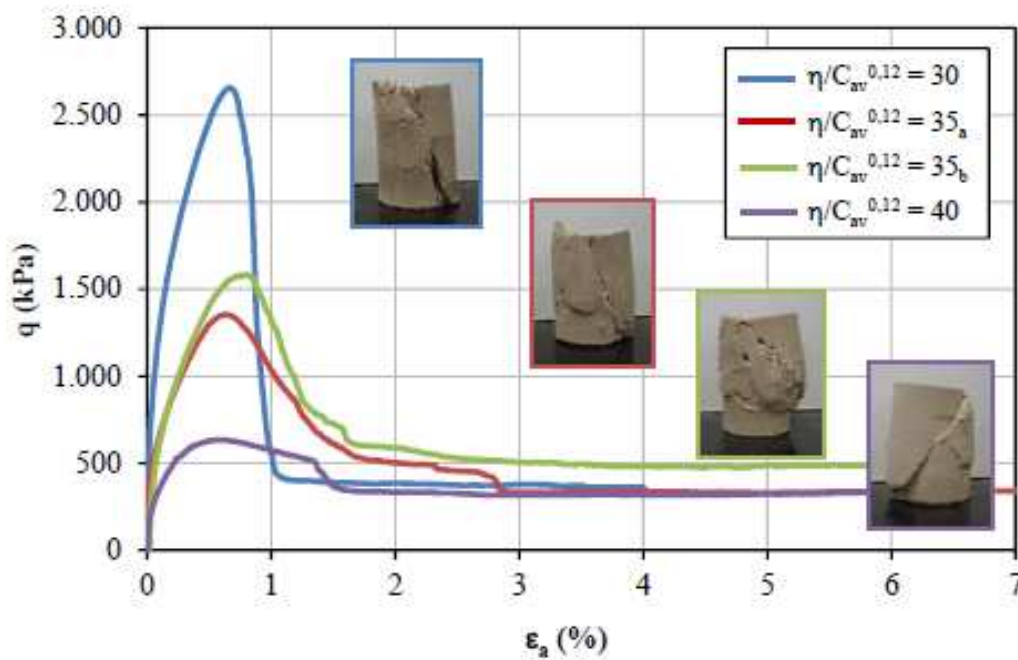
Figura 27 – Envoltórias de ruptura da mistura areia-cimento no plano de Mohr para diversos valores de η/C_{iv}



(fonte: CONSOLI et al., 2012, p. 546)

Seguindo esta mesma linha de pesquisa, Lopes Junior (2011), moldou corpos de prova da mistura de solo residual de arenito Botucatu, cinza volante e cal, nas mesmas proporções utilizadas no presente trabalho. Então, o autor utilizou estes em ensaios triaxiais, os quais são apresentados na figura 28. A análise conjunta destes resultados com dados de ensaios de tração da mesma mistura levaria às envoltórias de ruptura, analogamente ao supracitado para a mistura areia-cimento.

Figura 28 – Tensão-deformação para diferentes razões vazios/cal da mistura de arenito Botucatu, cinza volante e cal com 28 dias de cura



(fonte: LOPES JUNIOR, 2011, p. 151)

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa experimental tem como objetivo a definição de um método de dosagem racional para a mistura de arenito Botucatu, cinza volante e cal. Para tal, pretende-se avaliar a influência isolada de alguns dos parâmetros que influenciam na resistência à tração por compressão diametral: o teor de cal, a porosidade e a razão vazios/cal. Posteriormente, a comparação com resultados indicados na bibliografia para a mesma mistura em ensaios de compressão simples possibilitou a criação de um método de dosagem baseado em qualquer um dos dois tipos de ensaios. Para tal elencou-se parâmetros e variáveis. Estas últimas, presentes nesta pesquisa, podem ser divididas em dois tipos: independentes e dependentes.

As variáveis independentes são:

- a) compactação da mistura solo-cal, representada pela porosidade (η) ou pela massa específica aparente seca (γ_d);
- b) quantidade de cal (C_a): massa de cal dividida pela massa do solo seco;

A variável dependente é a resistência à tração por compressão diametral q_t .

Nos próximos itens são descritos os materiais e a metodologia empregados no programa experimental.

4.1 MATERIAIS

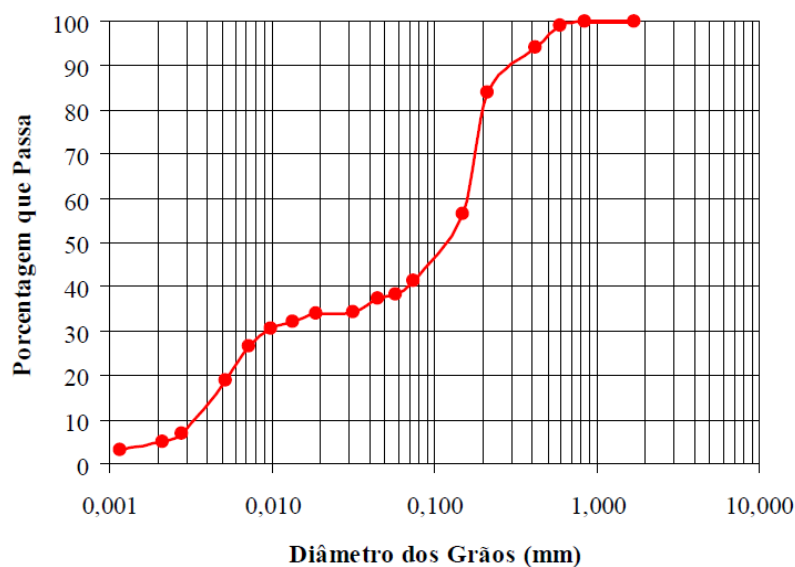
As misturas solo-cal presentes neste trabalho são constituídas por: solo, cal, água. Os materiais que foram utilizados nesta pesquisa estão descritos a seguir.

4.1.1 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi um solo residual de arenito pertencente à formação Botucatu. Este solo tem sido utilizado em pesquisas realizadas no Laboratório de Pesquisas em Geodésia (LAGEO) e no Laboratório de Geotécnia e Geotecnologia Ambiental (LEGG)

da UFRGS, o que contribuiu para o conhecimento e caracterização das propriedades, bem como, seu comportamento à compressão não-confinada, o qual foi utilizado para fins de comparação. Na figura 29 está representada a curva granulométrica obtida por Foppa (2005) para o solo residual de arenito Botucatu.

Figura 29 – Curva granulométrica da amostra de solo



(fonte: FOPPA, 2005, p. 67)

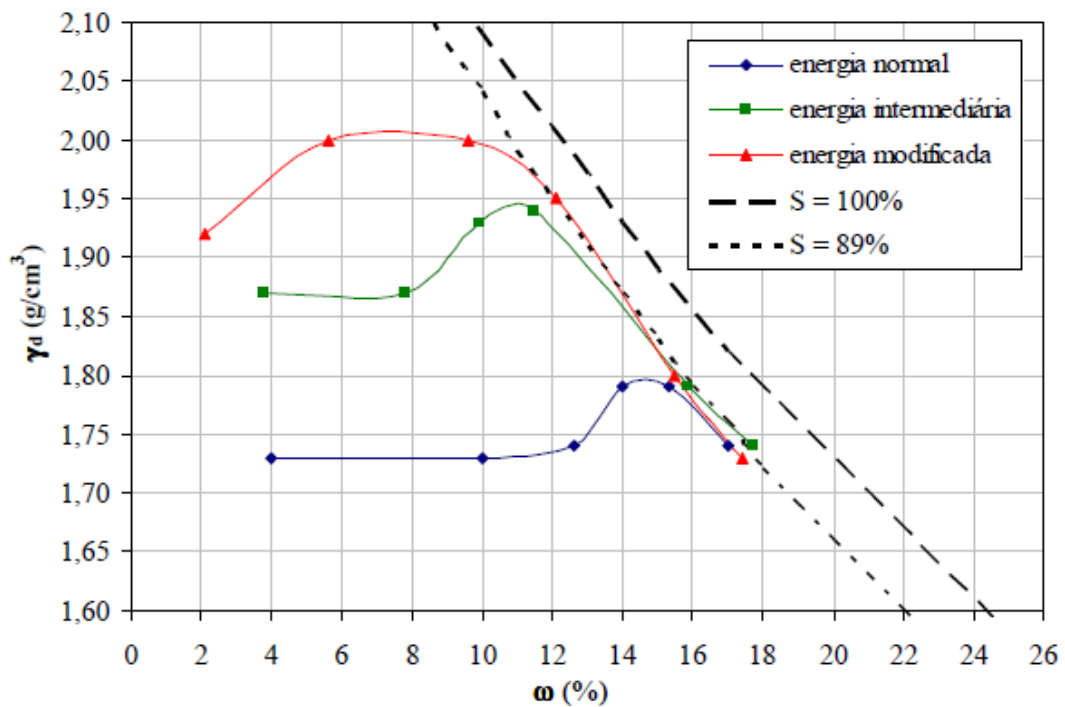
As frações granulométricas e demais resultados obtidos nos ensaios de caracterização realizados por Foppa (2005) estão representados na tabela 1. Adicionalmente, o autor realizou ensaios de compactação do solo residual de arenito Botucatu, os resultados estão na figura 30. Pode-se observar as curvas de compactação obtidas por Foppa (2005) para as energias normal, intermediária e modificada do ensaio de Proctor e as curvas de 89% e 100% de saturação.

Tabela 1 – Propriedades físicas da amostra de arenito Botucatu

PROPRIEDADES	VALORES	NORMA SEGUIDA PARA CLASSIFICAÇÃO E/ OU ENSAIO	OBSERVAÇÕES
Limite de Liquidez (LL)	23%	NBR 6459/84	-
Limite de Plasticidade (LP)	13%	NBR 7180/84	-
Índice de Plasticidade (IP)	10%	-	-
Densidade Real dos Grãos (G)	2,64	NBR 6508/84	Média de 3 determinações
% de Areia Média ($0,2 < \phi < 0,6$ mm)	16,2%	NBR 6502/95	Com uso de defloculante
% de Areia Fina ($0,06 < \phi < 0,2$ mm)	45,4%		
% de Silte ($0,002 < \phi < 0,06$ mm)	33,4%		
% de Argila ($\phi < 0,002$ mm)	5,0%		
Diâmetro Efetivo (D_{10})	0,0032 mm	NBR 6502/95	-
Coefficiente de Uniformidade (C_u)	50	NBR 6502/95	-

(fonte: FOPPA, 2005, p. 68)

Figura 30 – Curvas de compactação do solo residual de arenito Botucatu



(fonte: FOPPA, 2005, p. 69)

4.1.2 Cal

Nesta pesquisa utilizou-se cal hidratada dolomítica, produzida na cidade de Caçapava do Sul, no Rio Grande do Sul. Lopes Junior (2007) executou ensaios para determinação da massa específica real dos grãos deste material, seguindo as recomendações da NBR NM 23/2001 e obteve o valor médio de 2,49 g/cm³.

4.1.3 Cinza volante

A escolha da utilização da cinza volante neste trabalho ocorreu devido aos seguintes motivos: a existência de trabalhos prévios para posterior comparação dos resultados, a larga utilização deste material na estabilização de solos por sua alta reatividade potencial e a reutilização deste material poluente nocivo ao ambiente.

A cinza volante utilizada neste trabalho foi proveniente da Usina Termelétrica de Charqueadas, localizada no município de Charqueadas, no estado do Rio Grande do Sul. Os resultados de caracterização deste material, realizados por Lopes Junior (2011), estão apresentados na coluna CV da tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas da amostra de cinza volante

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

(fonte: LOPES JUNIOR, 2011, p. 81)

4.1.4 Água

A água utilizada na moldagem dos corpos de prova foi a água potável proveniente da rede de abastecimento pública da cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

4.2 PROGRAMA DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nesta seção apresenta-se as dosagens estudadas, o programa de ensaios e os métodos de avaliação da influência da porosidade, da quantidade de cal e da razão vazios/cal.

4.2.1 Dosagem das misturas

As porcentagens de 3, 5, 7, 9 e 11% de cal e de 25% de cinza volante foram escolhidas a partir da experiência brasileira e internacional com a mistura de solo, cinza volante e cal.

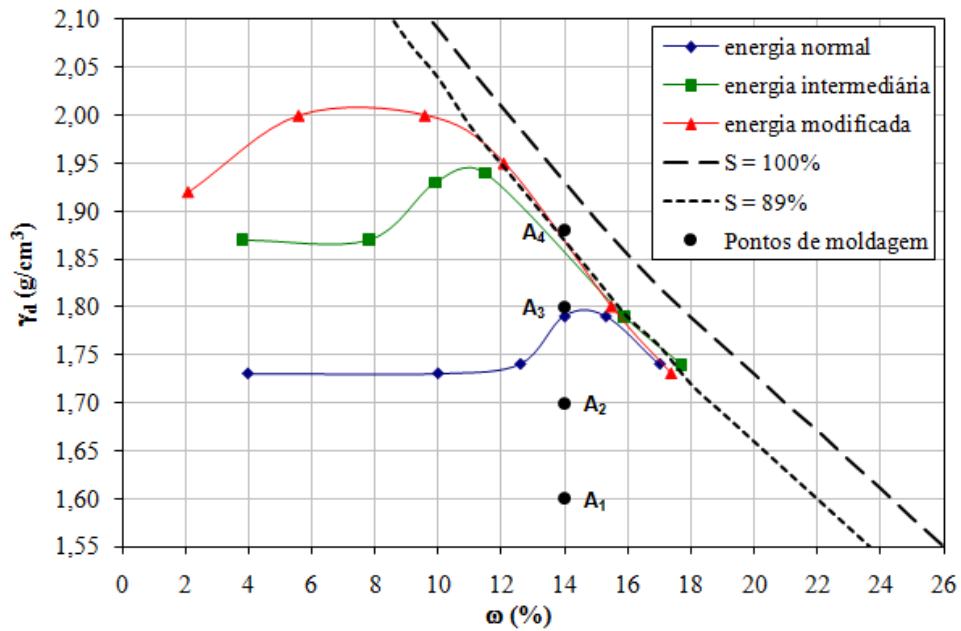
4.2.2 Programa de ensaios

O programa de ensaios de compressão diametral constituiu umas das principais etapas deste trabalho e teve como objetivo avaliar a influência da porosidade e do teor de cal na resistência à tração por compressão diametral, bem como a relação com a razão vazios/cal da mistura de solo residual de arenito Botucatu, cinza volante e cal. Para tal fim, foi necessário analisar cada variável isoladamente, mantendo as outras constantes.

A fim de atingir os objetivos propostos foi elaborado o programa de ensaios apresentado na figura 31. Nela observa-se as curvas de compactação obtidas por Foppa (2005) para o solo residual de arenito Botucatu e a localização dos pontos de moldagem.

Pode-se observar que os pontos de moldagem foram colocados em uma linha vertical (pontos: A₁, A₂, A₃, A₄), denominada linha A, com o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$) e diferentes massas específicas secas aparentes. A tabela 3 apresenta os pontos de moldagem e seus respectivos valores de massa específica aparente seca. A moldagem dos corpos de prova seguiu os padrões da NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Figura 31 – Programa de ensaios de compressão diametral



(fonte: adaptado de FOPPA, 2005, p. 69)

Tabela 3 – Pontos de moldagem dos corpos de prova

PONTOS DE MOLDAGEM	
PONTO	γ_d (g/cm ³)
A1	1,6
A2	1,7
A3	1,8
A4	1,88

(fonte: elaborado pelo autor)

Para cada ponto da linha A moldou-se corpos de prova com cinco diferentes teores de cal C_a : 3, 5, 7, 9 e 11%. A posição dos pontos de moldagem foi estabelecida de modo que estes ficassem compreendidos dentro de uma faixa de massas específicas aparentes secas possível de ser executada em campo. A fim de obter uma maior confiabilidade nos dados, foram moldados mais um de corpo de prova para cada ponto e porcentagem, tendo em vista a dispersão característica dos ensaios de compressão diametral, os quais seguiram os padrões da NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011).

4.2.3 Método de avaliação da influência da quantidade de cal

A avaliação da influência da quantidade de cal na resistência à tração por compressão diametral do solo artificialmente tratado foi feita através dos pontos da linha A. Visto que para cada ponto desta linha foram moldados corpos de prova com os teores de cal propostos, foi possível avaliar a influência desta variável, pois para um mesmo ponto foi constante a massa específica aparente seca, apenas aumentando a quantidade de cal.

4.2.4 Método de avaliação da influência da porosidade

Analogamente a avaliação da quantidade de cal, a avaliação da influência da porosidade foi feita através dos pontos da linha A. Tais pontos foram moldados com os mesmos teores de cal, deste modo, mantendo os teores de cal constantes e variando a massa específica aparente seca, variar-se-á a porosidade, sendo possível inferir conclusões sobre a influência desta na resistência à tração por compressão diametral da mistura solo, cinza volante e cal.

4.2.5 Método de avaliação da razão vazios/cal

Neste trabalho adotou-se a razão vazios/cal como a divisão da porosidade η pelo teor volumétrico de cal C_a , de modo que a razão foi definida como η/C_a . Para avaliar a relação entre este quociente e a resistência à tração por compressão diametral foram utilizados os resultados obtidos nos ensaios de ruptura à tração por compressão diametral dos corpos de prova.

4.2.6 Método de avaliação da relação entre as resistências à tração e compressão

Para avaliação da relação entre ambas as resistências primeiramente verificou-se a consistência do ajuste da função potência para a relação entre a resistência à tração com a razão vazios/cal com os coeficientes propostos por Lopes Junior (2011), variando apenas seu escalar. Comprovado que o ajuste pode ser utilizado, comparou-se a equação encontrada e a curva proposta por Lopes Junior (2011) para a relação entre a resistência à compressão com a

razão vazios/cal. Deste modo, a relação entre ambas as resistências pôde ser expressida por um fator escalar, que é a inclinação da reta ajustada entre ambos os resultados representados no gráfico q_t versus q_u .

4.2.7 Método racional de dosagem e critério de ruptura de Griffith

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver um método de dosagem racional para a mistura de solo, cinza volante e cal estudada. Sendo assim, fez-se necessário compreender o critério de ruptura desta mistura. Para isto, utilizaram-se resultados de ensaios triaxiais de pesquisas anteriores e compararam-se estes com os resultados obtidos nos ensaios de ruptura à tração por compressão diametral.

Deste modo, foi possível traçar as envoltórias de ruptura no plano de tensões para os valores de η/C_a que possuíam resultados de ensaios triaxiais na literatura. O método de dosagem proposto consiste nestas curvas, de maneira que, com poucos ensaios de tração, pode-se encontrar a envoltória de ruptura e, a partir desta, determinar o ponto de equilíbrio ótimo entre a concentração de aglomerante e a porosidade do solo. Assim, torna-se possível encontrar a solução mais econômica para atingir a resistência necessária por projeto.

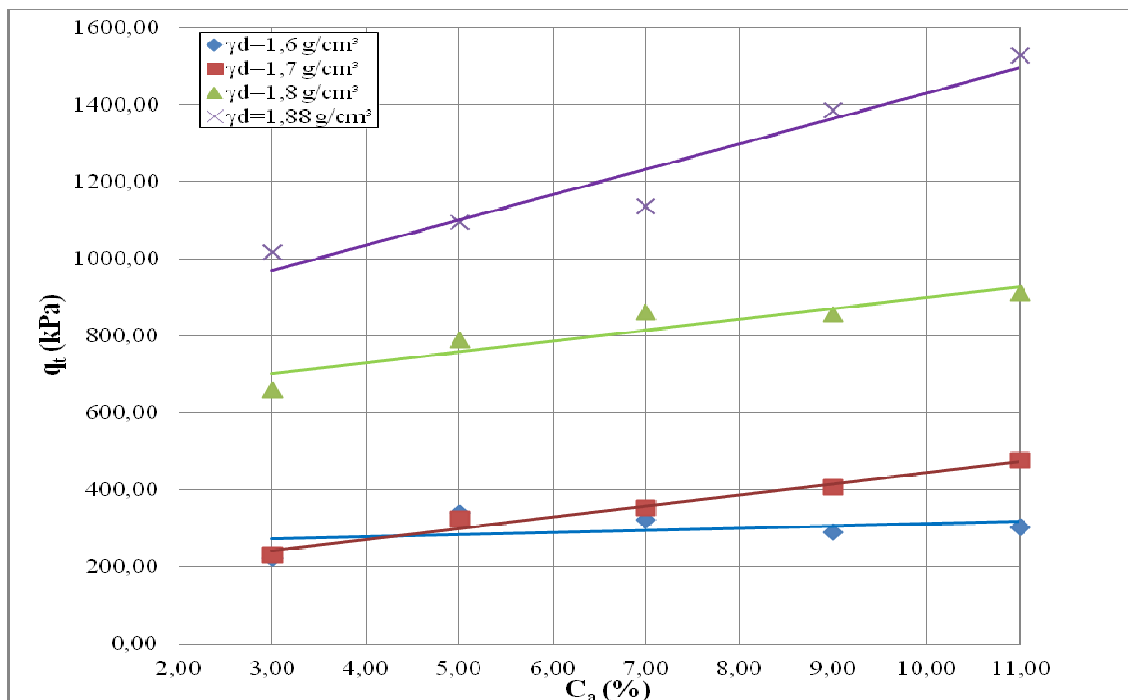
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos através dos ensaios de compressão diametral realizados. Primeiramente, são apontados os efeitos das diferentes variáveis de influência, e então, utilizar-se-ão estes resultados e valores obtidos na literatura de maneira comparativa, visando o estabelecimento de um método de dosagem racional.

5.1 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE CAL

A variação da resistência à tração q_t da mistura solo, cinza volante e cal, com o teor de cal, considerando diferentes massas específicas aparentes secas ($\gamma_d = 1,6; 1,7; 1,8$ e $1,88 \text{ g/cm}^3$) e teor de umidade $\omega = 14\%$ está indicada na figura 32. Uma função linear ajusta-se bem as relações de q_t versus C_a para a mistura estudada.

Figura 32 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com o teor de cal (C_a)



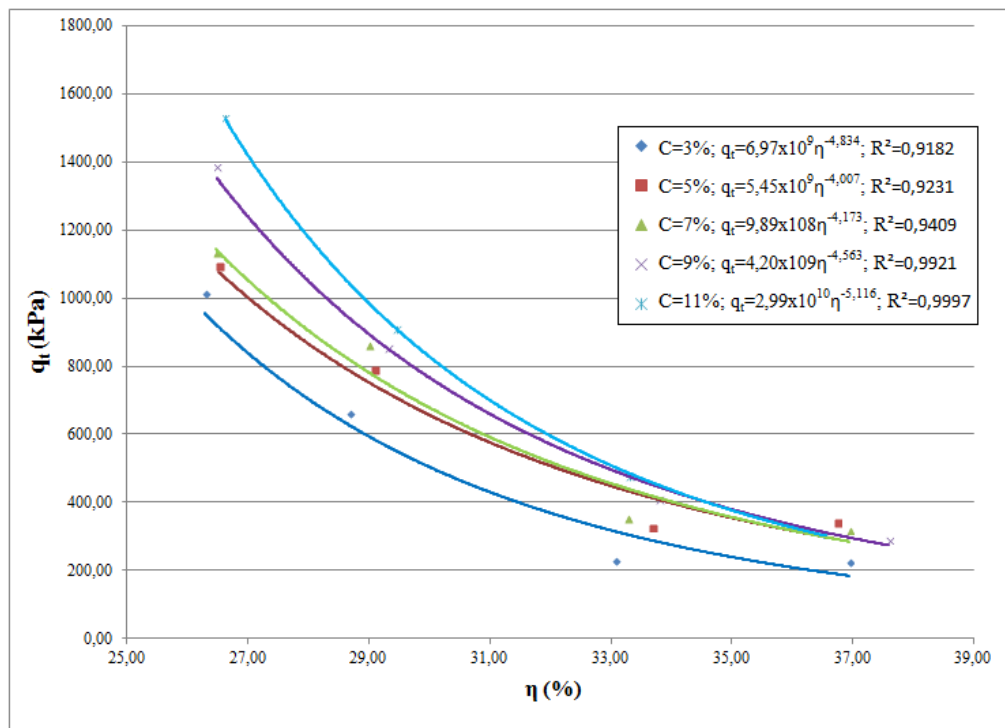
(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando os resultados apresentados na figura 32, verifica-se que independentemente do γ_d da mistura solo, cinza volante e cal estudada, a resistência à tração por compressão diametral aumenta com o aumento do teor de cal. Entretanto, a taxa de crescimento da resistência é variável de acordo com o γ_d , de modo que valores maiores resultam em maiores taxas de crescimento da resistência q_t . Isto demonstra que as reações entre a cal, a cinza volante e o solo são mais efetivas para maiores valores de massa específica.

5.2 EFEITO DA POROSIDADE

A figura 33 demonstra como a porosidade afeta a resistência à tração da mistura de solo, cinza volante e cal estudada para o teor de umidade de 14% e teores de cal de 3, 5, 7, 9 e 11%. Verifica-se que funções potência ajustam-se proporcionam bons ajustes entre os valores de resistência à tração q_t e a porosidade η para todos os teores de cimento estudados.

Figura 33 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com a porosidade (η)



(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados apresentados na figura 33 indicam que a resistência à tração aumenta com a diminuição da porosidade para todos os teores de cal estudados, pois quanto maior a porosidade, maior é o número de vazios da mistura, os quais não oferecem resistência e dão início ao processo de ruptura. Adicionalmente, quanto menor a porosidade, maior o número de contatos entre a cal, a cinza volante e os grãos de solo. Sendo assim, as reações que levam ao aumento da resistência da mistura se dão em maior escala, proporcionando um aumento adicional na resistência.

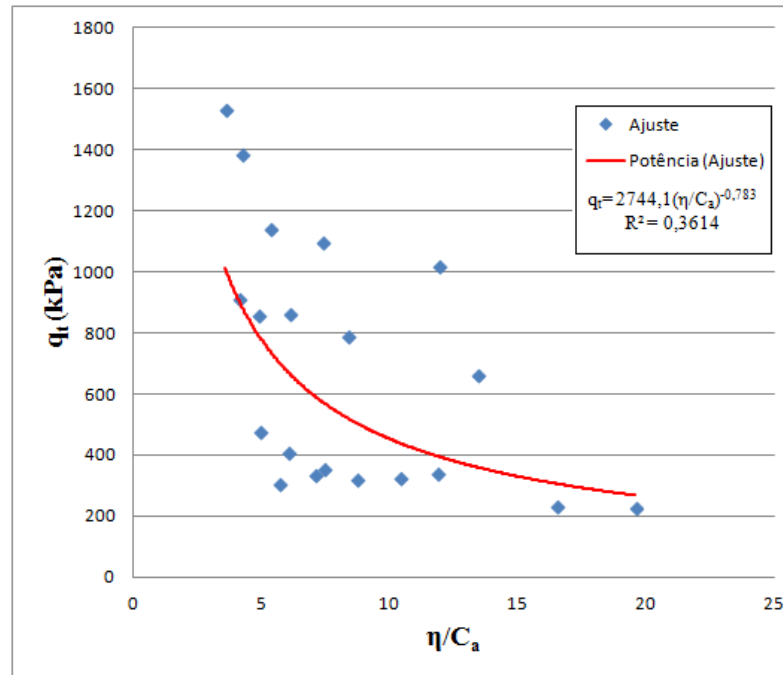
5.3 EFEITO DA RAZÃO VAZIOS/CAL

Conforme apresentado nos resultados das figuras 32 e 33, a resistência à tração por compressão diametral q_t depende do teor de cal da mistura e da porosidade, para um dado teor de umidade ($\omega=14\%$). Para a mesma massa específica, maiores valores de concentração de cal resultam em valores superiores de resistência q_t . Entretanto, para maiores valores de porosidade, resistências menores são atingidas, de modo que, a resistência à tração q_t é inversamente proporcional à porosidade.

Sendo assim, pode-se analisar a variação da resistência à tração através da relação desta com a razão η/C_a . Os resultados apresentados na figura 34 demonstram que sem o uso do expoente 0,12, recomendado pela literatura, os dados não parecem suficientemente consistentes para o ajuste de uma curva.

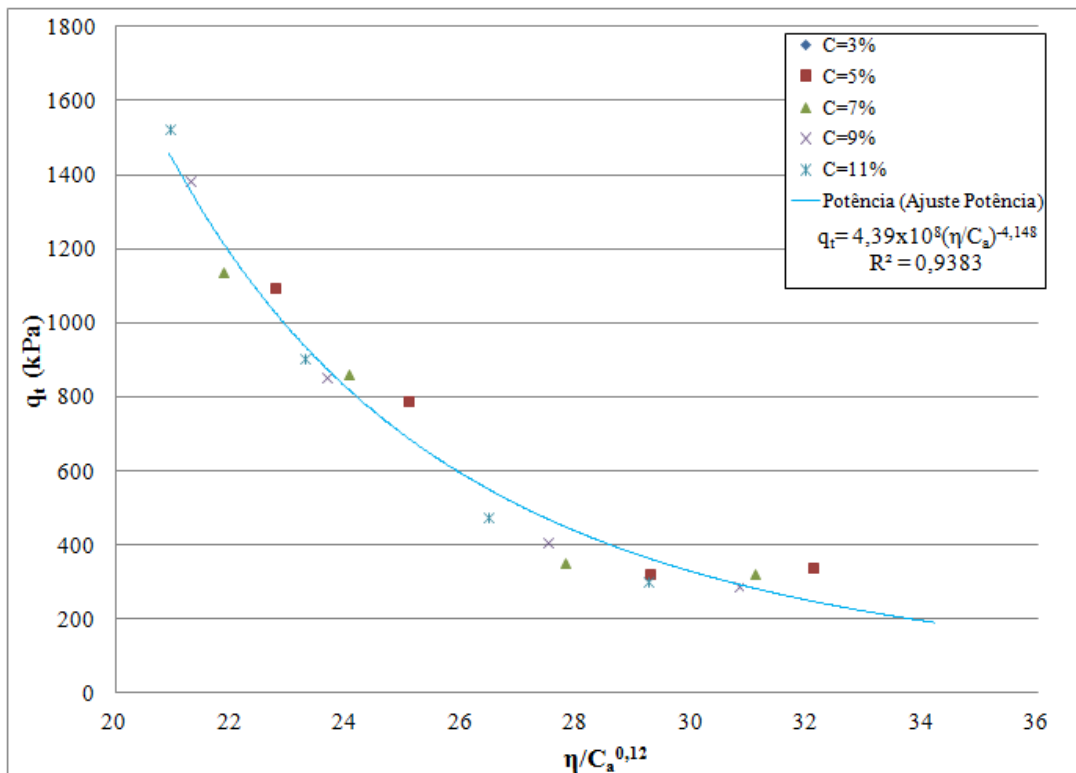
Entretanto, utilizando-se o coeficiente proposto na bibliografia, torna-se evidente a relação entre a razão vazios/cal e a resistência à tração. Na figura 35 são apresentados os resultados dos ensaios de ruptura à tração por compressão diametral com relação à razão ajustada $\eta/C_a^{0,12}$.

Figura 34 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com a razão vazios/cal (η/C_a)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 35 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com a razão vazios/cal ajustada ($\eta/C_a^{0,12}$)



(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando a figura 35 nota-se que uma função potência ajusta-se bem à relação entre a resistência à tração q_t e a razão $\eta/C_a^{0,12}$. Deste modo, os resultados desta pesquisa validam utilização desta razão na estimativa da resistência à tração da mistura de solo, cinza volante e cal estudada.

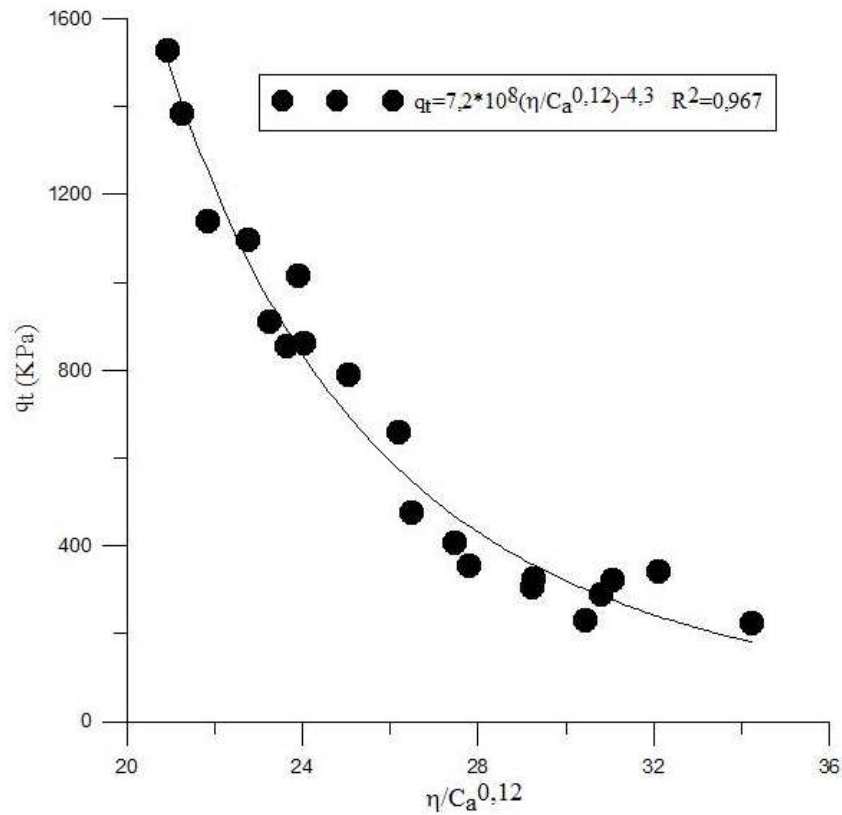
Sendo assim, apenas alguns poucos ensaios de tração por compressão diametral são necessários para estabelecer a relação entre esta e a razão vazios/cal. Então, para a obtenção de um valor alvo de resistência, pode-se tanto modificar o teor de cal da mistura, quanto a energia de compactação que é aplicada à esta.

5.4 RELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO

Para a comparação entre ambas as resistências faz-se necessária a obtenção de dois tipos de curvas de ajuste, uma para cada, que possuam a mesma variável independente, neste caso a razão $\eta/C_a^{0,12}$. Sendo assim, plotou-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão diametral e então verificou-se a consistência do ajuste de uma função potência com o coeficiente proposto por Lopes Junior (2011) em sua curva de ajuste para testes de compressão simples (-4,3), variando-se apenas o fator escalar. Estes resultados são apresentados na figura 36.

Através da análise da figura 36, verifica-se que a função potência com os coeficientes propostos adapta-se bem aos resultados dos ensaios de compressão diametral ($R^2=0,967$). Desta maneira, torna-se possível a comparação entre as resistências à tração e compressão através de um gráfico de massa onde são apresentados valores de q_t versus q_u .

Figura 36 – Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com a razão vazios/cal ($\eta/C_a^{0,12}$) e o coeficiente indicado por Lopes Junior (2011)

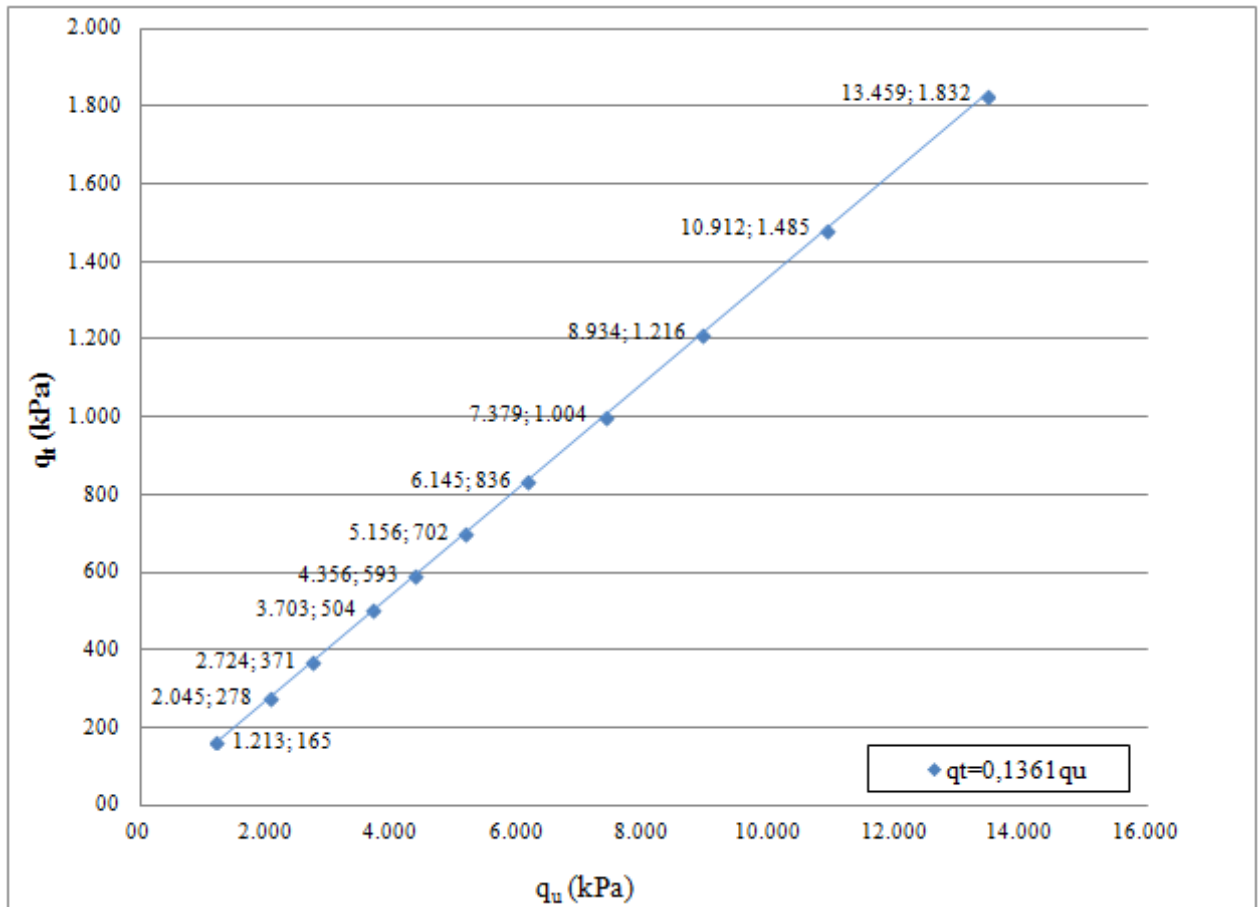


(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 37 apresenta os valores de q_t versus q_u e a reta que passa por todos os pontos. Pode-se considerar q_t como uma função linear com variável independente q_u . Sendo assim, a inclinação da reta proposta na figura exprime a relação escalar entre ambas as resistências. Deste modo, pode-se afirmar que a resistência à tração é aproximadamente 13,61% da resistência à compressão simples.

Esta análise permite afirmar que pode-se estimar a resistência à compressão através de valores de ensaios de tração. Adicionalmente, valida que a relação entre as resistências para misturas de solos argilosos e cal ocorre de maneira análoga ao exposto na literatura para misturas de areia e cimento.

Figura 37 – Comparação entre as resistências à tração e à compressão



(fonte: elaborado pelo autor)

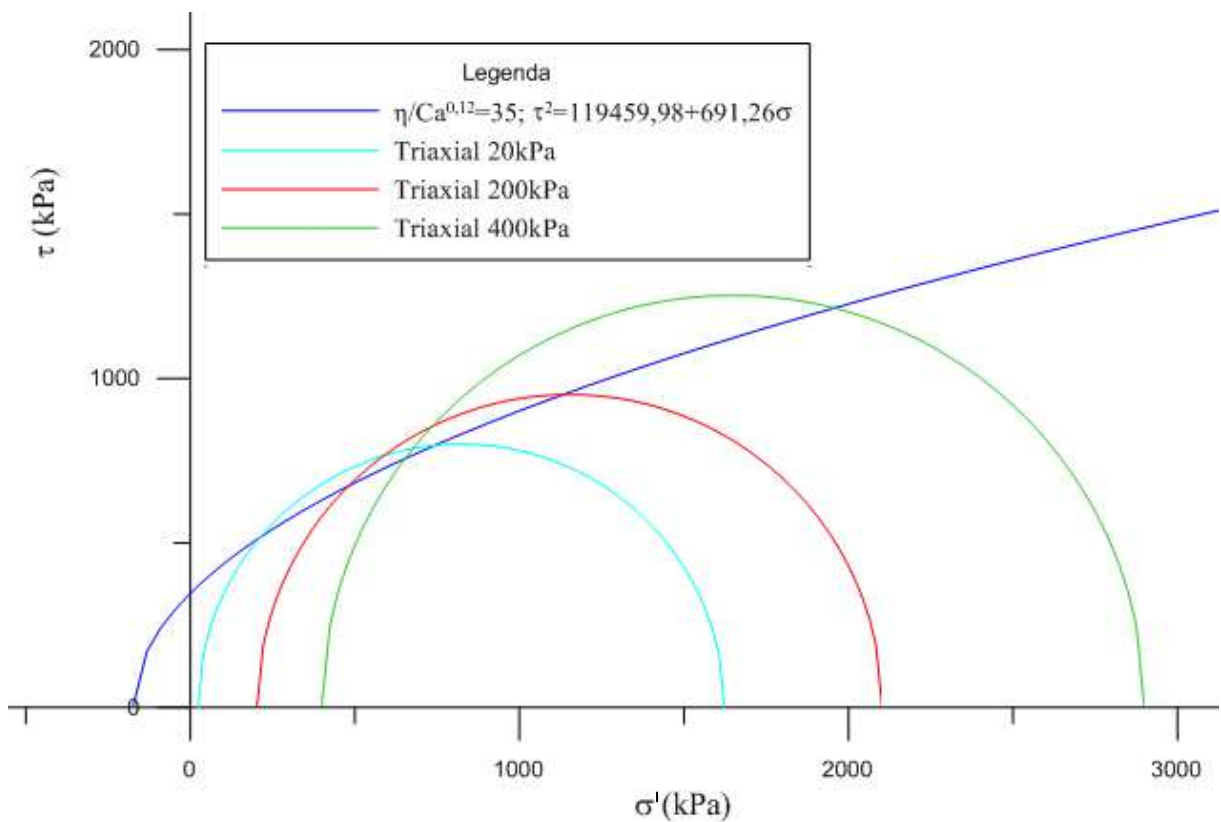
5.5 CRITÉRIO DE RUPTURA DE GRIFFITH E MÉTODO RACIONAL DE DOSAGEM

Uma metodologia de dosagem racional para a mistura solo, cinza volante e cal necessita compreender a mecânica da ruptura deste material. Pesquisas anteriores indicam que o critério de ruptura de Griffith é o mais correto para solos artificialmente melhorados, porém faz-se necessária a confirmação desta conclusão para a mistura de solo residual de arenito Botucatu, cinza volante e cal estudada no presente trabalho.

Para tal fim, inseriu-se a equação da função potência da relação entre a resistência à tração q_t e a razão $\eta/C_a^{0,12}$, presente na figura 35, na formulação do critério de ruptura de Griffith, indicada na equação 1. A equação resultante e sua curva, para $\eta/C_a^{0,12}=35$, estão representadas na figura 38.

Nesta figura também estão representados os círculos de Mohr referentes aos ensaios triaxiais executados por Lopes Junior (2011), para a mesma mistura de solo, cinza volante e cal, e $\eta/C_a^{0,12}=35$. A análise desta figura permite afirmar que o critério de ruptura de Griffith, juntamente com a curva empírica dos resultados dos ensaios à tração, representa bem a envoltória de ruptura para a mistura de solo artificialmente melhorado estudada, para tensões de confinamento de até 200 kPa. Sendo assim, é possível determinar a envoltória de ruptura para um determinado teor de cal e de porosidade.

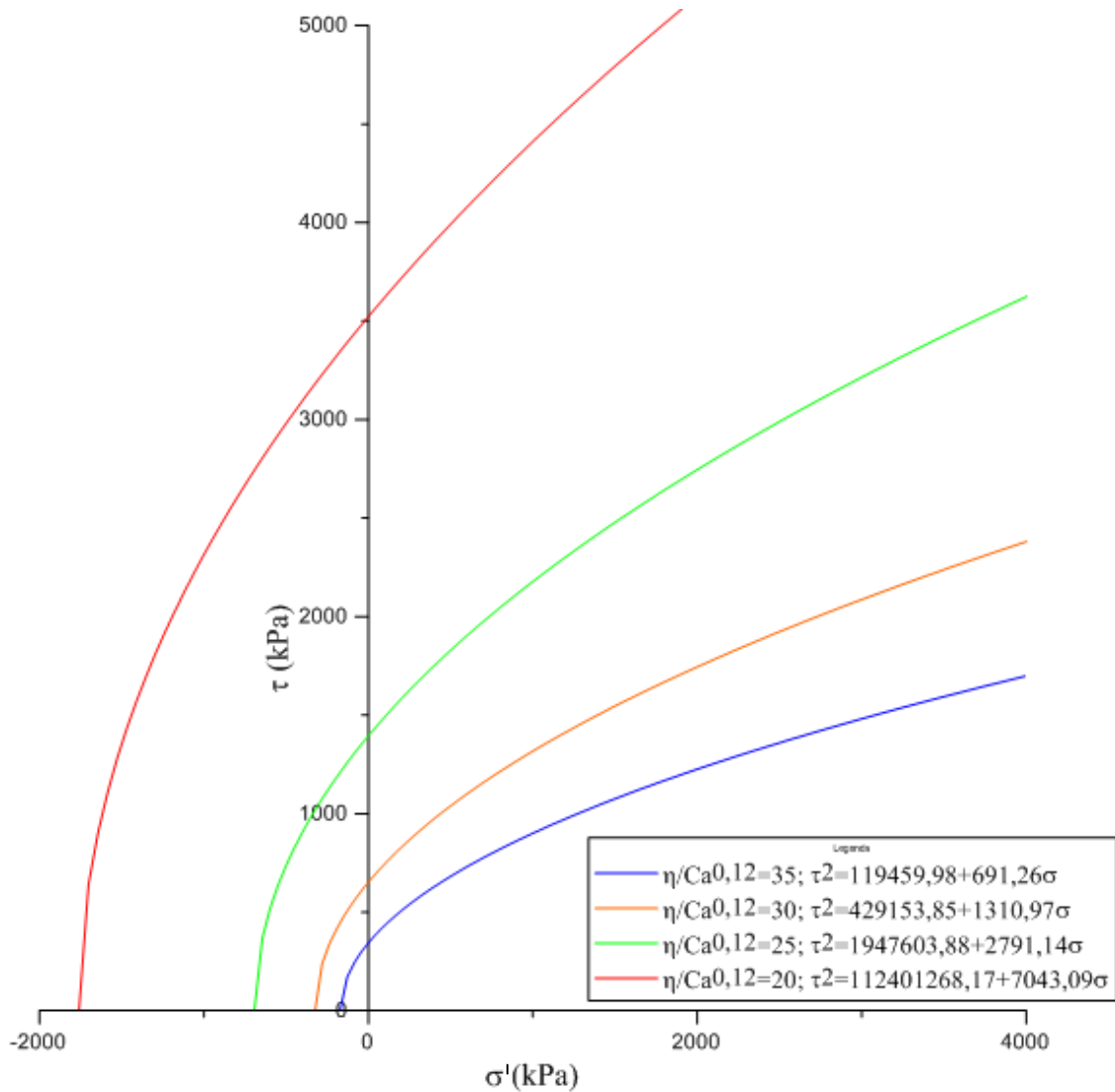
Figura 38 – Envoltória de ruptura e círculos de Mohr para $\eta/C_a^{0,12}=35$



(fonte: elaborado pelo autor)

Para efeitos de generalização, a figura 39 apresenta envoltórias de ruptura geradas através da aplicação do mesmo conceito para diferentes valores de $\eta/C_a^{0,12}$, cobrindo toda a gama de valores desta razão estudada no presente trabalho. A análise destas curvas indica que após um pequeno número de ensaios de ruptura à tração por compressão diametral é possível definir as envoltórias de ruptura no plano de tensões τ - σ para todos os intervalos de teor de cal, porosidade e razão $\eta/C_a^{0,12}$.

Figura 39 – Envolvórias de ruptura para $\eta/C_a^{0,12}=20, 25, 30$ e 35



(fonte: elaborado pelo autor)

A definição das envoltórias de ruptura representa o método racional de dosagem proposto. O uso destas permite atingir uma resistência alvo de projeto tanto pela variação do teor de cal, quanto da porosidade ou uma combinação entre as duas, de tal modo que se obtenha a resistência pretendida juntamente com a otimização do custo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados e da comparação com outros dados de pesquisas anteriores, presentes na literatura, foram estabelecidas as conclusões a seguir, para as misturas estudadas.

A resistência à tração por compressão diametral q_t aumenta de forma linear com o aumento do teor de cal C_a para o solo artificialmente melhorado utilizado nesta pesquisa. Pode-se perceber também que a taxa de aumento da resistência à tração também é função da massa específica aparente seca, quanto maior esta última, maior é a taxa de crescimento da resistência com o aumento do teor de cal.

A porosidade se relaciona com a resistência à tração de maneira potencial. Quanto maior a porosidade da mistura de solo, cinza volante e cal, menor a resistência à tração q_t . Adicionalmente, as curvas para diferentes teores de cal são crescentes.

Uma função potência ajusta-se bem à relação entre a resistência à tração q_t e a razão $\eta/C_a^{0,12}$. Os resultados desta pesquisa validam a utilização desta razão na estimativa da resistência à tração da mistura de solo, cinza volante e cal estudada.

Para a mistura de solo residual de arenito Botucatu, cinza volante e cal estudada pode-se afirmar que a resistências à tração e à compressão são linearmente relacionadas. Deste modo, é possível estimar a resistência à compressão através de valores de ensaios de tração.

O critério de ruptura de Griffith, juntamente com a curva empírica dos resultados dos ensaios à tração, representa bem a envoltória de ruptura para a mistura de solo artificialmente melhorado estudada, para tensões de confinamento de até 200 kPa. É possível determinar as envoltórias de rupturas para determinados teores de cal e de porosidade através de alguns poucos ensaios de tração por compressão diametral. Com isto, pode-se prever o comportamento mecânico do solo melhorado, tornado possível atingir uma resistência alvo de projeto tanto pela variação do teor de cimento, quanto da porosidade ou uma combinação entre as duas, de tal modo que se obtenha a resistência pretendida juntamente com a otimização do custo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7222**: concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

CONSOLI, N. C.; LOPES JUNIOR, L. S.; FOPPA, D.; HEINECK, K. S. Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils. **Proceedings of the ICE – Geotechnical Engineering**. London: Institution of Civil Engineers, v. 162, n. 2, p. 111-118, Apr. 2009.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; 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.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F. Variables controlling strength of artificially cemented sand: influence of curing time. **Journal of Materials in Civil Engineering**. New York: ASCE, v. 23, n. 5, p. 692-696, May 2011.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; CONSOLI, B. S.; MAGHOUS, S. Failure envelope of artificially cemented sand. **Géotechnique**. London: ICE, v. 62, n. 6, p. 543-547, June 2012.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: principles and practice**. Sidney: Butterworths, 1972.

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.

_____. **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.