

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

**Relação entre Resistência à Tração e à Compressão de um
Solo Fino Artificialmente Cimentado**

Daniela Aliati Rosa

Porto Alegre
2013

DANIELA ALIATI ROSA

**RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À
COMPRESSÃO DE UM SOLO FINO ARTIFICIALMENTE
CIMENTADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Porto Alegre

2013

DANIELA ALIATI ROSA

**RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À
COMPRESSÃO DE UM SOLO FINO ARTIFICIALMENTE
CIMENTADO**

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

Porto Alegre, 11 de outubro de 2013

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

Prof. Armando Miguel Awruch
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Karla Salvagni Heineck (UFRGS)
Dr. pela Universidade
Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Fernando Schnaid
Ph.D. pela Oxford University

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

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

Dedico este trabalho a meus pais:
Sidney e Lovani.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Nilo Consoli, orientador deste trabalho pelo conhecimento transmitido, incentivo, conselhos, dedicação e paciência.

Agradeço aos colegas do LEGG pela convivência e amizade em especial a Emanuele Gauer, Carina Silvani, Lucas Festugato. Agradeço aos bolsistas Bruno, Guilherme e Júlia.

Agradeço ao Capes/CNPq pelo suporte financeiro.

É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitórias nem derrotas.

Franklin D. Roosevelt

RESUMO

ROSA, D. A. Relação entre a Resistência à Tração e à Compressão de um Solo Artificialmente Cimentado. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O melhoramento de solos com cimento Portland para utilização em camadas de base de fundações rasas, *liners* de proteção ambiental ou proteção contra erosão em barragens de terra entre outros mostra grandes vantagens econômicas, evitando a necessidade de substituição do solo natural bem como, a necessidade de uma área de despejo. A presente pesquisa tem por objetivo quantificar a relação entre resistência à tração e a compressão de um solo fino (caulim) artificialmente cimentado bem como, quantificar a influência da porosidade, teor de cimento e teor de umidade na resistência à tração das misturas caulim-cimento. Um programa experimental foi delineado com esse objetivo. Dentro da faixa de valores estudados, os resultados mostram que o teor de umidade (ω) tem uma influência linear sobre a resistência à tração (q_t), ou seja, quanto maior o teor de umidade maior a resistência à tração da mistura estudada. Por fim, a relação vazios/cimento (η/C_{iv}) demonstrou ser válida no dimensionamento de misturas caulim-cimento à tração. A relação resistência à tração/resistência à compressão (q_t/q_u) não é única para o solo estudado. q_t/q_u varia em função do teor de umidade de modo não-linear.

Palavras-chave: solo-cimento, caulim, solos artificialmente cimentados, resistência à tração, resistência à compressão.

ABSTRACT

ROSA, D. A. Relação entre a Resistência à Tração e à Compressão de um Solo Artificialmente Cimentado. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The addition of Portland cement to soil in order to base layers for shallow foundations, liners for environmental protection or protection against erosion in earth dams has shown great economic advantages, avoiding the need of soil substitution as well as waste area. This research aim to quantify the relation between tensile and compressive strength for fine grained, artificially cemented soils as well as, quantify the influence of porosity, water content and cement content on tensile strength of kaolin-cement mixtures. An experimental program was designed with this objective. For the range of values studied, results show that water content (ω) affects linearly tensile strength (q_t) of specimens, bigger the water content bigger the tensile strength of the mixture studied. Besides that, the relation porosity/cement content (η/C_{iv}) has demonstrated to be valid for designing kaolin-cement mixtures under tensile strength. The relation between tensile and compressive strength (q_t/q_u) is not unique for the soil studied. q_t/q_u seems to be a function of water content in a non-linear function.

Key-words: soil-cement, kaolin, artificially cemented soils, compressive strength, tensile strength

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo Geral	18
1.2.2 Objetivos Específicos	18
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2 VISÃO GERAL SOBRE AS MISTURAS SOLO-CIMENTO	20
2.1 MATERIAIS CONSTITUINTES	20
2.1.1 Solo	20
2.1.2 Cimento	22
2.1.3 Água	22
2.1.4 Materiais Deletérios	22
2.2 DOSAGEM	23
2.2.1 Dosagem – resistência à compressão simples	23
2.2.2 Dosagem – resistência à tração	26
3 COMPORTAMENTO DO SOLO-CIMENTO	28
3.1 POROSIDADE	29
3.2 TEOR DE UMIDADE	30
3.3 TEOR DE CIMENTO	32
3.4 RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E A COMPRESSÃO	33
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	34
4.1 MATERIAIS	34

4.1.1 Solo	35
4.1.2 Cimento	36
4.1.3 Água	37
4.2 MÉTODOS	37
4.2.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova	37
4.2.2 Ensaio de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral	39
5 RESULTADOS	43
5.1 POROSIDADE	43
5.2 TEOR DE CIMENTO	45
5.3 TEOR DE UMIDADE	49
5.4 RELAÇÃO VAZIOS/CIMENTO	52
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
7 CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: representação de uma mistura argila-cimento	21
Figura 2.2: representação de uma mistura areia-cimento	22
Figura 2.3: variação da resistência à compressão simples com a relação vazios/cimento.....	25
Figura 2.4: razão vazios/cimento expressa em termos de porosidade e teor volumétrico de cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples.....	26
Figura 2.5: variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) e resistência à compressão simples (q_u) com a razão vazios/cimento	27
Figura 3.1: $(\eta/C_{iv})^{0,28}$ <i>versus</i> resistência à compressão simples	29
Figura 3.2: porosidade <i>versus</i> resistência à compressão simples	30
Figura 3.3: teor de umidade <i>versus</i> resistência à compressão simples	31
Figura 3.4: diferentes estruturas de solo	32
Figura 3.5: teor de cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples	33
Figura 4.1: caulim rosa	35
Figura 4.2: curva granulométrica do caulim	36
Figura 4.3: curva de compactação do caulim, caulim + cimento	37
Figura 4.4: evolução média da resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland	37
Figura 4.5: corpo-de-prova acondicionado em saco plástico identificado	38
Figura 4.6: ensaio de tração por compressão diametral	40
Figura 4.7: curva de compactação Proctor Normal do caulim e pontos de moldagem ...	41
Figura 5.1: resistência à tração (q_t) vs. porosidade (η) para 3, 5, 7 e 9% de cimento e teor de umidade (ω) de 23%	43
Figura 5.2: resistência à tração (q_t) vs. porosidade (η) para 3, 5, 7 e 9% de cimento e teor de umidade (ω) de 20%	44
Figura 5.3: resistência à tração (q_t) vs. porosidade (η) para 5, 7 e 9% de cimento e teor de umidade (ω) de 17%	44
Figura 5.4: resistência à tração (q_t) vs. teor de cimento (C) para pesos específicos aparentes secos de 14, 15 e 16 kN/m ³ e teor de umidade (ω) de 23%	46

Figura 5.5: resistência à tração (q_t) vs. teor de cimento (C) para pesos específicos aparentes secos de 14, 15 e 16 kN/m ³ e teor de umidade (ω) de 20%	46
Figura 5.6: resistência à tração (q_t) vs. teor de cimento (C) para pesos específicos aparentes secos de 14, 15 e 16 kN/m ³ e teor de umidade (ω) de 17%	47
Figura 5.7: resistência à tração (q_t) vs. teor de cimento (C) para teores de umidade de 17, 20 e 23% e peso específico aparente seco (γ) de 14 kN/m ³	48
Figura 5.8: resistência à tração (q_t) vs. teor de umidade (ω) para teores de cimento de 3, 5, 7 e 9% e peso específico aparente seco (γ) de 15 kN/m ³	48
Figura 5.9: resistência à tração (q_t) vs. teor de umidade (ω) para teores de cimento de 3, 5, 7 e 9% e peso específico aparente seco (γ) de 16 kN/m ³	49
Figura 5.10: resistência à tração (q_t) vs. teor de umidade (w) para teores de cimento de 3, 5, 7 e 9% e peso específico aparente seco (g) de 14kN/m ³	50
Figura 5.11: resistência à tração (q_t) vs. teor de umidade (w) para teores de cimento de 3, 5, 7 e 9% e peso específico aparente seco (g) de 15kN/m ³	50
Figura 5.12: resistência à tração (q_t) vs. teor de umidade (w) para teores de cimento de 3, 5, 7 e 9% e peso específico aparente seco (g) de 16kN/m ³	51
Figura 5.13: variação da resistência à tração (q_t) vs. relação vazios/cimento	53
Figura 5.14: variação da resistência à tração (q_t) vs. relação vazios/cimento com expoente ajustado ($\eta/C_{iv}^{0,35}$)	54
Figura 5.15: variação da resistência à tração (q_t) em função da porosidade (η), teor de cimento (C) e teor de umidade (ω)	56
Figura 6.1: resistência à compressão simples (q_u) vs. resistência à tração (q_t)	57
Figura 6.2: resistência à compressão simples (q_u) vs. resistência à tração (q_t) para 17% de teor de umidade (ω)	58
Figura 6.3: resistência à compressão simples (q_u) vs. resistência à tração (q_t) para 20% de teor de umidade (ω)	59
Figura 6.4: resistência à compressão simples (q_u) vs. resistência à tração (q_t) para 23% de teor de umidade (ω)	60
Figura 6.5: variação da resistência à compressão simples (q_u) e à tração (q_t) vs. relação vazios/cimento com expoente ajustado ($\eta/C_{iv}^{0,35}$) para teor de umidade (ω) de 17%	61
Figura 6.6: variação da resistência à compressão simples (q_u) e à tração (q_t) vs. relação vazios/cimento com expoente ajustado ($\eta/C_{iv}^{0,35}$) para teor de umidade (ω) de 20%	62
Figura 6.7: variação da resistência à compressão simples (q_u) e à tração (q_t) vs. relação vazios/cimento com expoente ajustado ($\eta/C_{iv}^{0,35}$) para teor de umidade (ω) de 23%	63

Figura 6.8: teor de umidade vs. relação q_t/q_u	63
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: indicativo da quantidade de cimento a ser utilizada conforme o tipo de solo	24
Quadro 2.2: expoente da relação η/C_{iv} para diferentes tipos de solo	26
Quadro 4.1: propriedades físicas do caulim	36
Quadro 4.2: parâmetros dos pontos de moldagem	41

LISTA DE SIGLAS

ASTM: American Society for Testing and Materials

CP: corpo-de-prova

CP-I: cimento Portland comum

CP-V ARI: cimento Portland de alta resistência inicial

LEGG: Laboratório de Geotecnia e Estudos Geoambientais

NBR: norma Brasileira

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

a = quantidade de água em massa

a/c_i = razão água cimento

C = teor de cimento em massa [%]

C_{iv} = teor de cimento volumétrico [%]

c_i = cimento em massa

q_t = resistência à tração [kPa]

q_u = resistência à compressão simples [kPa]

V_{ci} = volume de cimento

V_v = volume de vazios

γ_d = massa específica aparente seca [kN/m³]

η = porosidade [%]

ω = teor de umidade da amostra [%]

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório discorre-se sobre a relevância desta pesquisa, seus objetivos gerais e específicos, além da estrutura da dissertação.

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Não é raro que o solo em um dado local não seja adequado, do ponto de vista geotécnico, para utilização que se pretende atribuir ao mesmo. Ingles & Metcalf (1972) enumeram três possibilidades de solução:

- a) aceitar o solo e criar um projeto que atenda as restrições impostas pela qualidade do solo;
- b) remover o solo e substituí-lo;
- c) modificar as propriedades do solo.

Aceitar as condições do solo e assim limitar sua utilização não é uma alternativa viável atualmente. O aumento de preço de lotes de terra, em grandes centros urbanos, vem aumentado significativamente nos últimos anos, logo, limitar regiões a construções de pequeno porte inviabiliza economicamente a ocupação destas áreas.

A remoção do solo e, subsequente substituição por solos de melhor qualidade esbarra no remanejamento do solo que foi retirado do local. Cada vez mais a legislação ambiental se torna mais rígida

Modificar as propriedades do solo é uma alternativa que vem se mostrando cada mais viável economicamente. Possibilidade a utilização do terreno, evita a necessidade de uma área de despejo para o solo removido e de jazidas de solo para substituição do mesmo.

Os solos cimentados vem sendo utilizados com sucesso como reforço em base de rodovias, para evitar erosão em taludes de terra, como *liners* de contenção de resíduos entre outras aplicações.

1.2 OBJETIVOS

A seguir são descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta dissertação é avaliar a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão de solos finos artificialmente cimentados, especificamente, do caulim artificialmente cimentado.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) avaliar o comportamento à tração de uma mistura caulim-cimento quanto ao teor de umidade;
- b) avaliar a influência do teor de cimento na resistência à tração do caulim artificialmente cimentado;
- c) verificar como a porosidade relaciona-se com a resistência à tração de misturas caulim-cimento;
- d) validar a relação vazios/cimento como método racional de estimativa da resistência à tração de solos finos artificialmente cimentados.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em 7 capítulos. O capítulo 1 é constituído pela introdução, onde são apresentados a problemática e relevância da pesquisa e onde são definidos os objetivos geral e específicos desta dissertação.

O capítulo 2 e 3 são capítulos de revisão bibliográfica acerca dos aspectos relevantes do tema abordado, proporcionando uma visão geral sobre a técnica de solos artificialmente cimentados. O capítulo 2 foca nos componentes das misturas solo-cimento – água, solo, cimento e materiais deletérios, bem como as metodologias de dosagem existentes. Por sua vez o capítulo 3 foca no comportamento de resistência das misturas solo-cimento.

No capítulo 4 é apresentado o programa experimental realizado neste trabalho. Detalha-se os ensaios realizados bem como os materiais utilizados.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos no programa experimental.

O capítulo 6 consiste da análise dos resultados apresentados no capítulo anterior. Entenda-se por resultados a avaliação da relação entre resistência à tração e resistência à compressão simples das misturas caulim-cimento.

Por fim, o capítulo 7 trata-se do capítulo de conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 VISÃO GERAL SOBRE AS MISTURAS SOLO-CIMENTO

Na literatura, as misturas solo-cimento são denominadas das mais diversas formas: solos estabilizados com cimento, solos artificialmente cimentados, solos melhorados, solos tratados, por exemplo. Usualmente a denominação é função do grau de alteração que a adição de cimento causa ao solo, contudo, ao longo deste trabalho, essas denominações são usadas indistintamente.

Pela definição da norma NBR 12253 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), solo-cimento é o "Produto endurecido resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem, e executada de acordo com a NBR 12254 [Execução de sub-base ou base de solo-cimento - Procedimento]". Além disso, a NBR 12253 fixa a resistência média à compressão em 2,1 MPa aos 7 dias.

No item subsequente são descritos os materiais constituintes dos solos artificialmente cimentados e as características que os mesmos devem possuir. Posteriormente é apresentada uma visão geral sobre os métodos de dosagem existentes.

2.1 MATERIAIS CONSTITUINTES

Os solos artificialmente cimentados são constituídos basicamente por:

- a) solo;
- b) cimento;
- c) água;
- d) materiais deletérios.

Uma breve descrição dos materiais e as características que estes devem possuir para o uso nas misturas solo-cimento encontram-se a seguir.

2.1.1 Solo

A princípio, solos com qualquer granulometria podem ser estabilizados com cimento. Contudo, sabe-se que granulometrias mais finas exigem maiores quantidades de cimento para atingir resistências adequadas do que solos com granulometrias mais grossas. Segundo Lilley (1975), os solos coesivos agrupam-se em pequenos grumos, os quais são cobertos com cimento e então aproximados pela

compactação, formando uma massa, como ilustrado na figura 2.1. A resistência é dependente do esqueleto cimentício que se forma em torno dos grãos.

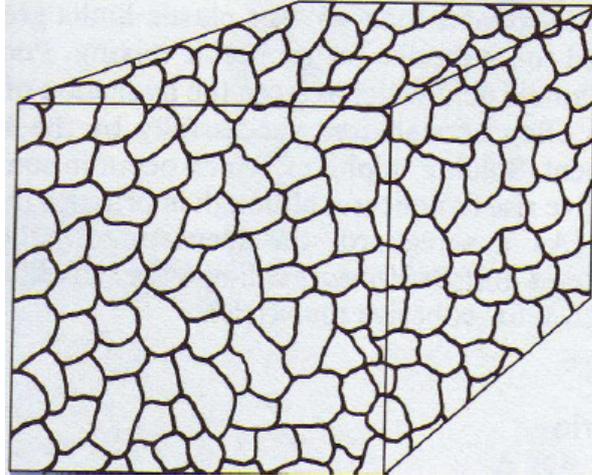


Figura 2.1: representação de uma mistura argila-cimento (LILLEY, 1975)

Já solos não-coesivos, ainda de acordo com Lilley (1975), têm um tamanho de grão superior aos grãos de cimento e por essa razão são envolvidos pela pasta de cimento (figura 2.2). Neste caso, a resistência depende dos pontos de contato entre os grãos de solo, os quais são ligados pela pasta de cimento.

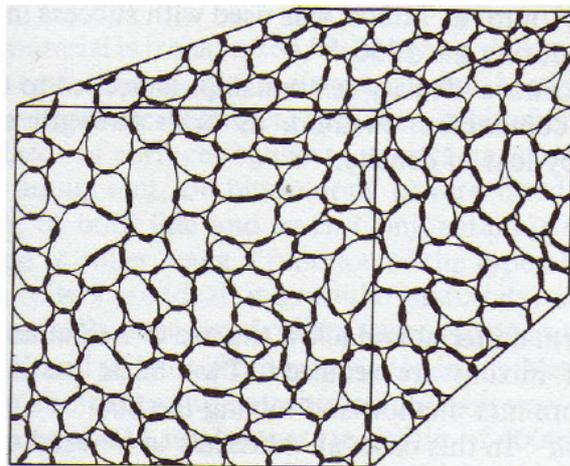


Figura 2.2: representação de uma mistura areia-cimento (LILLEY, 1975)

Plaster e Noble (1970) verificaram que em solos argilosos a fração argila sofre ataque e deterioração quando em contato com o cimento Portland. Observou-se que o tipo de argilo-mineral mais suscetível a esse ataque é a montmorilonita. No entanto, ensaios de compressão simples indicaram

que a quantidade de argila presente no solo é mais importante, em relação ao ganho de resistência de curto prazo do solo-cimento, do que o tipo de argilo-mineral presente.

A norma NBR 12253 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) limita os tipos de solos a serem empregados nas misturas solo-cimento a solos que:

- a) enquadrem-se nas classificações A1, A2, A3 e A4 da norma ASTM D 3282 - *Classification of soils and soil aggregate mixtures for highway construction purposes*;
- b) tenham 100% do material passando na peneira de abertura 76 mm;
- c) tenham no máximo 45% de material retido na peneira de abertura 4,8 mm.

Croft (1967) observa que alguns argilominerais interferem nas reações do cimento, especialmente solos que contem argilas muito expansivas são difíceis de estabilizar com cimento. Argilas caulínicas ou ilíticas são as mais apropriadas para estabilização com cimento, segundo o mesmo autor.

2.1.2 Cimento

De acordo com Foppa (2005) "[...] não existem restrições quanto ao tipo de cimento para uso em solo-cimento.". O uso de cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V ARI) permite, no caso de ensaios de laboratório, que os corpos-de-prova sejam rompidos em um tempo inferior se comparado com a utilização de outros tipos de cimento Portland, visto que, atinge grande parte de sua resistência aos 7 dias.

2.1.3 Água

Segundo Ingles e Metcalf (1972), o uso de água potável nas misturas solo-cimento é satisfatório. A vantagem da utilização de água de torneira, nos ensaios laboratoriais, é que representa melhor as condições encontradas em campo.

2.1.4 Materiais Deletérios

Para Croft (1967) a composição química e mineralógica do solo condiciona o sucesso de sua estabilização com cimento. Portanto, existem restrições quanto à presença de materiais deletérios nas misturas solo-cimento.

A presença de matéria orgânica e sal em excesso, especialmente sulfatos, pode retardar ou até mesmo evitar a hidratação do cimento (INGLES; METCALF, 1972). Outra restrição são solos podzólicos, pois estes contêm pequenas quantidades de ácido húmico, o que retarda a hidratação do cimento Portland.

2.2 DOSAGEM

As metodologias de dosagem de misturas solo-cimento foram desenvolvidas com o intuito de atingir uma determinada resistência à compressão simples. E portanto apesar do foco deste trabalho ser a resistência à tração de misturas solo-cimento, são apresentadas também técnicas de dosagem que visam atingir dado valor de resistência à compressão simples, pois as metodologias de dosagem surgiram com essa finalidade.

2.2.1 Dosagem – resistência à compressão simples

As **técnicas tradicionais** de dosagem das misturas solo-cimento consistem na realização de uma bateria de testes de laboratório a fim de determinar a quantidade mínima de cimento necessária para atingir a resistência desejada. A norma NBR 12253 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) prescreve a execução de ensaios de resistência à compressão simples a fim de verificar qual o teor mínimo de cimento que proporciona uma resistência de 2,1 MPa aos 7 dias. Independentemente dos resultados dos testes de resistência essa Norma sugere que devam ser utilizados no mínimo 5% de cimento em massa. Admite teores de até 3,5% contanto que a resistência atinja o mínimo prescrito, e que a mistura se processe em usina.

O critério americano adota testes de durabilidade, no qual corpos-de-prova (CP) são curados por 7 dias antes de serem submetidos a 12 ciclos de gelo/degelo ou de molhagem/secagem e ao final, após a remoção do material que se soltou durante o procedimento é verificada a perda de peso e o aumento de volume. A quantidade de cimento é determinada como aquela em que as variações de volume e peso são satisfatórias (INGLES; METCALF, 1972). Apesar dos testes de durabilidade serem de difícil correlação com a resistência faz sentido que quanto maior a durabilidade - menor perda de peso e menor variação volumétrica - das misturas solo-cimento maior seja sua resistência.

No Reino Unido, têm sido utilizados amplamente testes de resistência à compressão simples. Deve-se atingir no mínimo 250 lbf/in² (17,6 kgf/cm²) após cura a temperatura constante - de 25° C - e umidade constante por 7 dias (INGLES; METCALF, 1972).

O quadro 2.1 apresenta um indicativo do teor de cimento necessário de acordo com o tipo de solo. Verifica-se que quanto mais argiloso o material maior é a quantidade de cimento necessária para estabilizá-lo, como já foi discutido anteriormente.

Solo	Quantidade de Cimento
Pedra finamente britada	0,5 - 1%
Pedregulho areno-argiloso bem graduado	2 - 4%
Areia bem graduada	2 - 4%
Areia mal graduada	4 - 6%
Argila arenosa	4 - 6%
Argila siltosa	6 - 8%
Argila	8 - 15%

Quadro 2.1: indicativo da quantidade de cimento a ser utilizada conforme o tipo de solo (adaptado de INGLES; METCALF, 1972)

Um fator que deve ser considerado para a dosagem é de que a eficiência do processo em campo é inferior à em laboratório. Portanto, Ingles e Metcalf (1972) sugerem que em campo se utilize uma quantidade de cimento 1,66 vezes superior do que a encontrada em laboratório.

A primeira **metodologia racional de dosagem** para misturas solo-cimento foi apresentada por Consoli et al. (2007) levando em consideração a relação vazios/cimento (η/C_v), definida como a porosidade da mistura compactada dividida pelo teor volumétrico de cimento, para a estimativa da resistência à compressão de misturas solo-cimento.

Estudando uma areia argilosa, os autores demonstraram não haver relação entre resistência à compressão simples da mistura areia-cimento estudada com a relação água cimento (a/c)- definida como a massa de água dividida pela massa de cimento. Consoli et al. (2007) mencionam que a relação água cimento não é válida pois os vazios estão parcialmente preenchidos por água, ao contrário dos estudos anteriores de Horpibulsuk et al. (2003) e Azambuja (2004).

Consoli et al. (2007) plotaram resistência à compressão simples (q_u) *versus* vazios/cimento (V_v/V_{c_i}), figura 2.3. Observa-se uma boa correlação entre os dados. Porém, estes observaram que pontos com a mesma relação vazios/cimento mas obtidos a partir de combinações diferentes de teor de cimento e peso específico aparente seco apresentaram resistências diferentes. Perceberam assim que, a taxa de crescimento da resistência à compressão simples com o volume de vazios (V_v) e com o volume de cimento (V_{c_i}) é substancialmente diferente. O modo que estes encontraram para compatibilizar estas taxas de crescimento é através da aplicação de um expoente a um dos fatores. Aplicando o expoente (0,28) ao volume de cimento e expressando a relação V_v/V_{c_i} de uma forma mais elegante – conforme a equação, obtiveram uma boa correlação e redução da dispersão (figura 2.4). O expoente utilizado parece ser função do tipo de solo, como mostra o quadro 2.2.

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{V_v/V_{total}}{V_c/V_{total}} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad (\text{equação 2.1})$$

Onde:

V_v = volume de vazios (água + ar) do corpo-de-prova;

V_c = volume de cimento do corpo-de-prova;

V_{total} = volume total do corpo-de-prova.

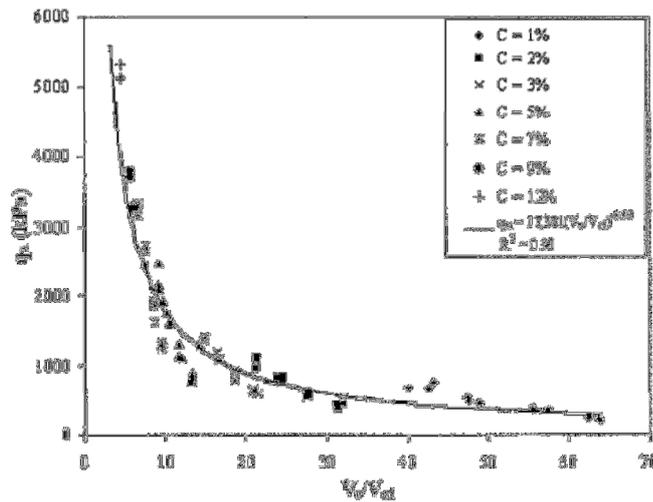


Figura 2.3: variação da resistência à compressão simples com a relação vazios/cimento

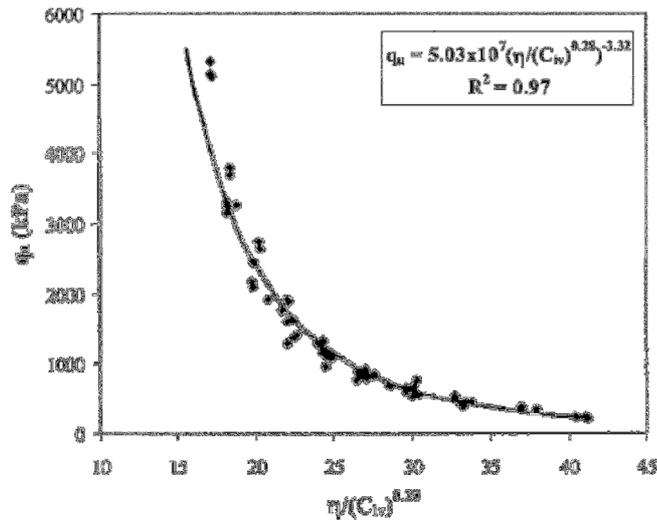


Figura 2.4: razão vazios/cimento expressa em termos de porosidade e teor volumétrico de cimento *versus* resistência à compressão simples

Os autores ainda sugerem que o expoente de 0,28 é função do tipo de solo e o tipo de solo utilizado.

Solo	Expoente	Referência
Areia siltosa do Porto	0,21	Consoli et al. (2011)
Areia argilosa Botucatu	0,28	Consoli et al. (2010)
Caulim	0,35	Consoli et al. (2011b)
Areia uniforme de Osório	1,00	Consoli et al. (2010)

Quadro 2.2: expoente da relação η/C_{iv} para diferentes tipos de solo

A relação entre vazios/cimento e a resistência à compressão simples encontrada por Consoli et al. (2007) pode ser utilizada como metodologia de dosagem para a areia argilosa estudada pelos mesmos.

2.2.2 Dosagem – resistência à tração

Consoli et al. (2010) estudaram a areia de Osório (areia uniforme) cimentada quanto à suas características de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral, afim de verificar a existência de proporcionalidade linear entre q_u e q_t . Os autores observaram que o padrão de comportamento da areia-cimento quando submetida à tração é o mesmo do que quando submetida à compressão simples, só mantém-se a diferença no valor absoluto encontrado (figura 2.5)

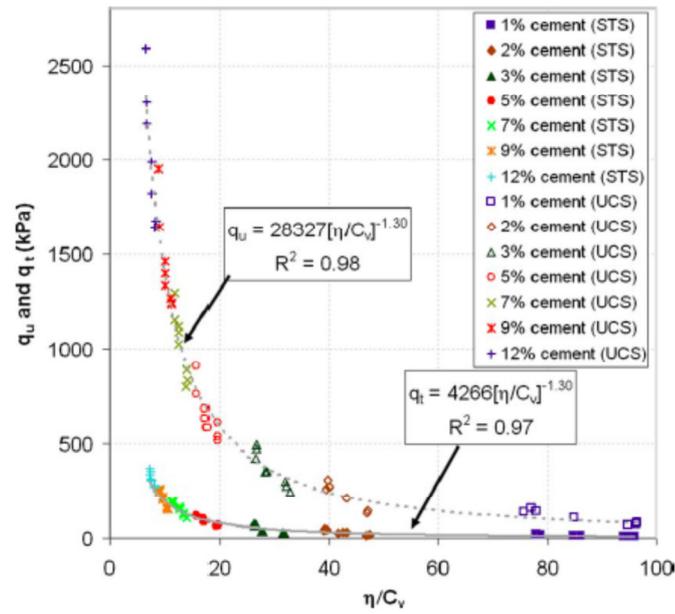


Figura 2.5: variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) e resistência à compressão simples (q_u) com a razão vazios/cimento

A relação encontrada entre pelos autores entre resistência à tração e resistência à compressão simples foi de 0,15.

3 COMPORTAMENTO DO SOLO-CIMENTO

Os solos cimentados exibem um comportamento mecânico complexo, que é influenciado por diversos fatores dentre os quais se destacam o tipo de solo, a quantidade de cimento adicionada, a porosidade da mistura e para solos siltosos o teor de umidade. Levando-se em consideração que o solo-cimento quando submetido à esforços de tração tem comportamento idêntico ao caso em que é submetido à compressão, apenas com valores de resistência sensivelmente menores.

Nos casos em que os solos artificialmente cimentados são usados como camadas compactadas sobre solos de baixa capacidade de suporte a falha do sistema, normalmente, ocorre por tensões de tração na base da camada melhorada (CONSOLI et al., 2003). Pareceria então mais razoável usar ensaio de tração como medida de resistência do solo-cimento. Porém pesquisas têm demonstrado que a tensão de tração do solo cimento varia entre 9 e 14% da resistência à compressão simples (CLOUGH et al., 1981; CONSOLI et al, 2007; INGLES; METCALF, 1972).

A figura 3.1 - $\eta/(C_{iv})^{0,28}$ versus q_u - mostra os resultados obtidos por Consoli et al. (2007) que utilizaram solo residual de arenito da formação Botucatu em seu trabalho. Observa-se um crescimento exponencial da resistência com a redução do fator vazios/cimento. Essa redução no fator vazio/cimento pode-se dar tanto pelo aumento do teor de cimento quanto pela redução da porosidade da mistura compactada.

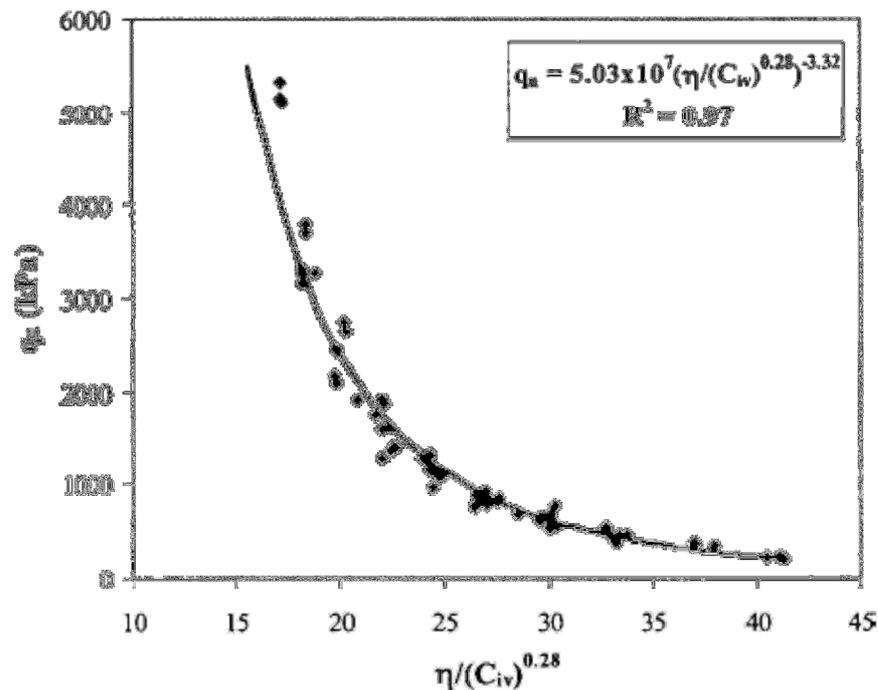


Figura 3.1: $(\eta/(C_{iv})^{0,28}$ versus resistência à compressão simples (CONSOLI et al., 2007)

Nos próximos itens são descritos os efeitos que cada parâmetro - porosidade, teor de umidade e teor de cimento - exerce isoladamente sobre a resistência à compressão simples.

3.1 POROSIDADE

A porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência à compressão simples dos solos artificialmente cimentados. Felt (1955) observou:

[...] um aumento exponencial da resistência à compressão simples com o aumento da densidade da mistura, mantendo-se constante o teor de umidade. Verificou também que as misturas testadas apresentam características satisfatórias quando compactadas no teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima do ensaio de compactação.

A figura 3.2 mostra os resultados encontrados por Foppa (2005). Observa-se que pequenas variações na porosidade, principalmente em corpos-de-prova com teores de cimento maiores, causam um aumento significativo na resistência à compressão simples. Esse comportamento deve-se ao fato de que a redução da porosidade proporciona um maior número de contatos entre as partículas.

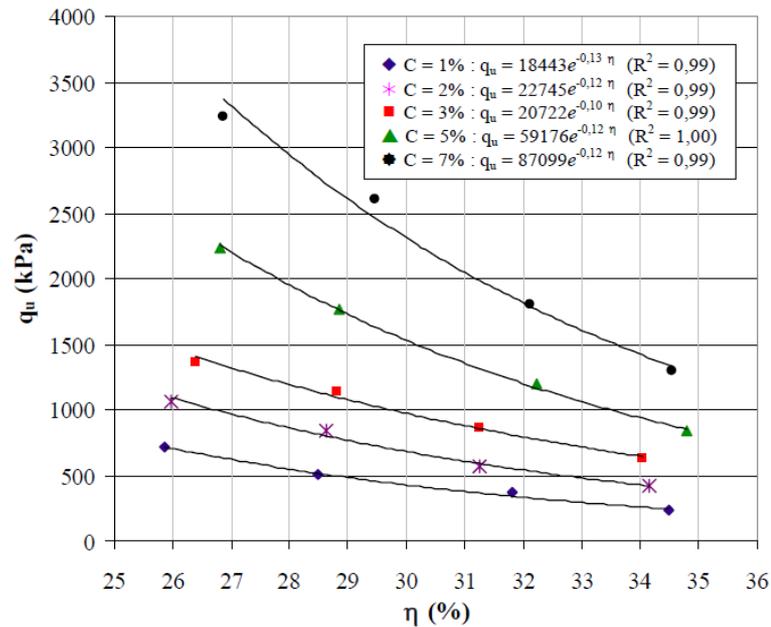


Figura 3.2: porosidade *versus* resistência à compressão simples (FOPPA, 2005)

Segundo Clough et al. (1981), a introdução de um agente cimentante produz um material com duas componentes de resistência: uma devido à cimentação e outra devido ao atrito. Em pequenas deformações a cimentação é mobilizada, enquanto em grandes deformações o atrito é mobilizado.

3.2 TEOR DE UMIDADE

Segundo a literatura, a quantidade de água necessária nas misturas solo-cimento é função da água necessária para a compactação e não à hidratação do cimento. Foppa (2005) observou que, utilizando espécimes com o mesmo peso específico, há um pequeno aumento da resistência com o aumento do teor de umidade até um valor a partir do qual a resistência decresce (figura 3.3).

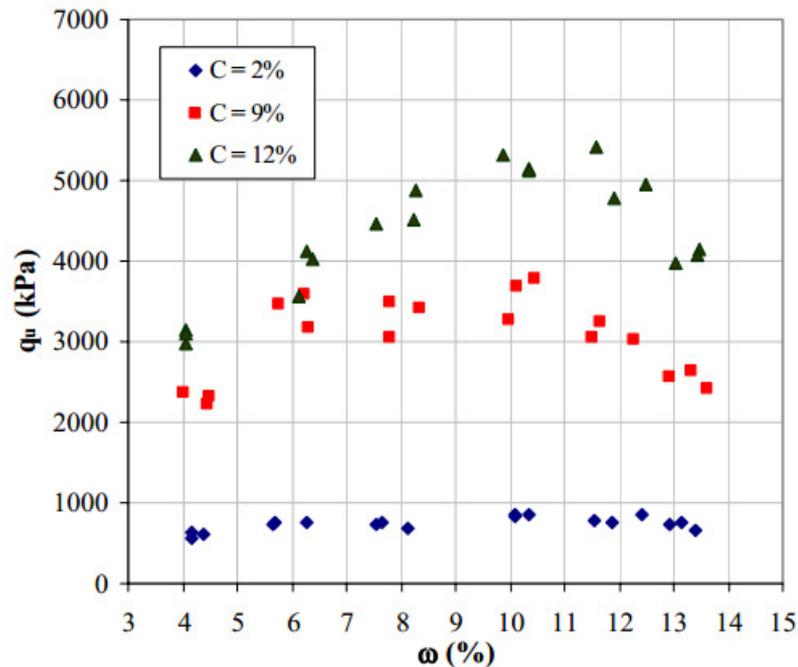


Figura 3.3: teor de umidade *versus* resistência à compressão simples (FOPPA, 2005)

Acredita-se que a diferença na resistência provocada pela variação no teor de umidade é relacionada à estrutura criada na compactação, no qual a quantidade de água teria um papel fundamental. Lightsey et al. (1970), em seus estudos, percebeu que em alguns casos, o teor de umidade que proporciona máxima resistência e durabilidade não é necessariamente igual ao teor de umidade que gera a maior massa específica aparente seca.

Para um dado esforço de compactação e massa específica aparente seca, o solo tende a ser mais floculado por compactação no tramo seco se comparado a compactação no tramo úmido. O aumento no teor de umidade tende a aumentar a repulsão entre partículas, assim permitindo um arranjo mais ordenado das partículas do solo. Aumentando a energia de compactação com um teor de umidade constante tende-se a arranjar as partículas de forma mais paralela (LAMBE; WHITMAN, 1969). O que explicaria os resultados encontrados por Foppa (2005) e confirmaria a afirmação de Lightsey et al. (1970).

Para Mitchell (1976), a estrutura do solo é dependente também do tamanho dos grãos. Em solos argilosos e siltosos podem-se observar estruturas floculadas, figura 3.4a, e estruturas dispersas, figura 3.4b. Já em solos arenosos e siltosos observa-se um arranjo granular, figura 3.4c, com maior ou menor grau de compactidade.

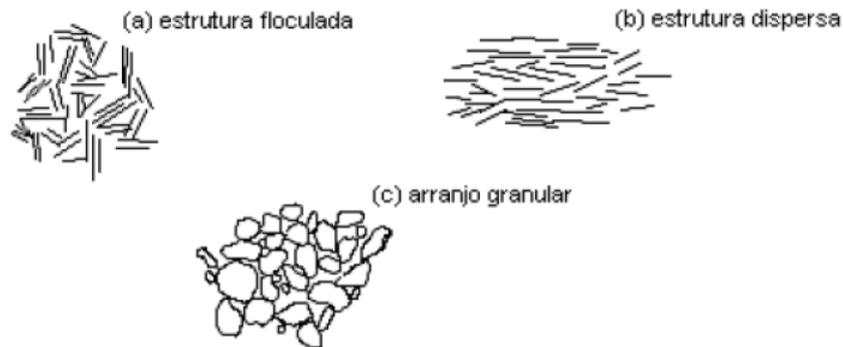


Figura 3.4: diferentes estruturas de solos (MITCHELL, 1976)

3.3 TEOR DE CIMENTO

A quantidade de cimento presente nas misturas solo-cimento afeta tanto sua resistência quanto durabilidade. Ingles e Metcalf (1972) afirmam que a adição de pequenas quantidades de cimento modifica as propriedades do solo, ao passo que grandes quantidades modificam radicalmente as propriedades do solo. De acordo com os mesmos autores:

[...] as propriedades do solo mudam com o aumento da quantidade de cimento: a capacidade de carga aumenta, durabilidade a ciclos de molhagem e secagem aumenta, em geral a permeabilidade diminui, porém, aumenta em solos argilosos, a tendência à retração aumenta em solos granulares e a tendência à expansão de solos argilosos será reduzida.

El Rawi et al. (1967) sugerem que a cimentação pode ser imaginada com a combinação de dois tipos de ligações. Ligações mecânicas entre o cimento hidratado e a superfície rugosa dos grãos e ligações químicas desenvolvidas entre o cimento hidratado e a superfície dos grãos.

Os estudos de Consoli et al. (2007; 2009) utilizando uma areia siltosa e uma argila respectivamente, mostram que o aumento do teor de cimento na mistura solo-cimento provoca um aumento linear na resistência à compressão simples. Foppa (2005), figura 3.5, e Lopes Junior (2007) chegaram aos mesmos resultados.

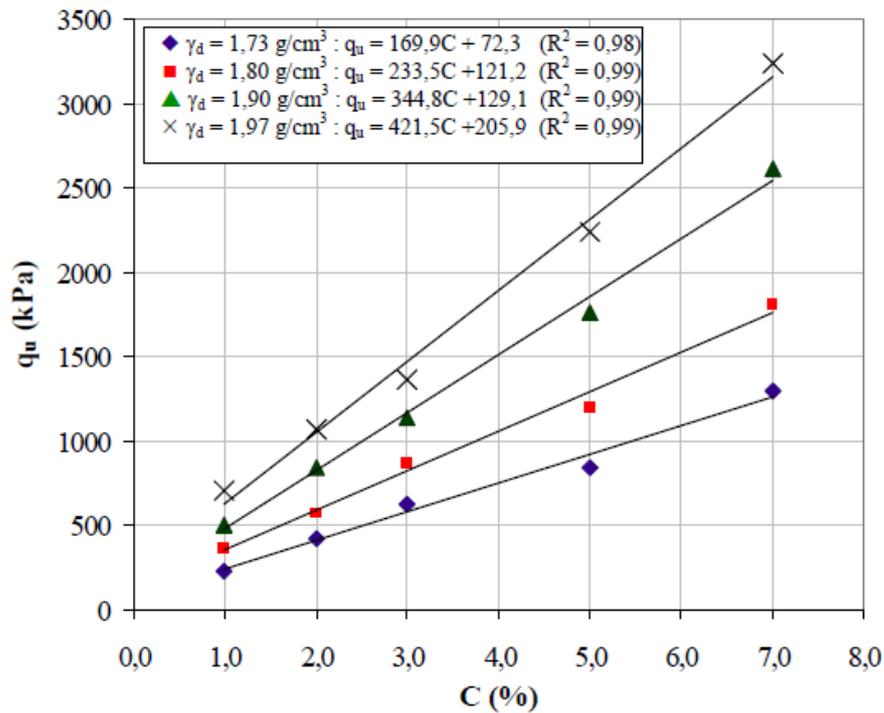


Figura 3.5: teor de cimento *versus* resistência à compressão simples (FOPPA., 2005)

Pode-se perceber que a inclinação das retas ajustadas aumenta para os CP com maior massa específica (redução da porosidade), demonstrando que o efeito do cimento é mais pronunciado em misturas mais compactadas. Acredita-se que isso ocorra porque misturas mais densas possuem um maior número de contatos entre as partículas, portanto, maiores possibilidades do cimento promover a união das partículas nesses contatos.

3.4 RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO

Estudos mostrando a relação entre resistência à compressão e resistência à tração em solos artificialmente cimentados foram feitos por Consoli et al. (2010), utilizando areia de Osório (areia fina, uniforme e não plástica e cimento) em suas misturas solo-cimento. Os autores observaram que as equações encontradas para q_t e q_u são ambas funções exponenciais da porosidade e do teor de cimento sendo diferenciadas apenas por um escalar.

Assim sendo, os autores (CONSOLI et al., 2010) mostram existir uma relação linear entre resistência à compressão e resistência à tração para a mistura solo-cimento estudada considerando a faixa de teores de cimento e de porosidade estudadas. O valor que os autores encontraram para a relação q_t/q_u é de 0,15.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa experimental teve por objetivo estabelecer a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado. Secundariamente, pretendeu-se quantificar a influência isolada de parâmetros como teor de umidade, teor de cimento e porosidade (peso específico) dos CP na resistência à tração.

As variáveis presentes nesta pesquisa podem ser classificadas em três grupos: variáveis investigadas, variáveis fixas e variáveis de resposta.

As variáveis investigadas são:

- a) peso específico aparente seco (γ_d) da mistura solo-cimento, expressa através da porosidade (η) da mistura compactada;
- b) teor de umidade (ω), massa de água (a) dividida pela massa de material seco (solo+cimento), expresso em porcentagem;
- c) teor de cimento (C), massa de cimento (c_i) dividida pela massa de solo seco, expresso em porcentagem;

As variáveis fixas são:

- a) tipo de solo, caulim rosa;
- b) agente cimentante, sendo este cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI);
- c) tempo de cura, 7 dias;
- d) taxa de deslocamento nos ensaios de compressão diametral, 1,14 mm por minuto.

As variáveis de resposta são:

- a) resistência à tração (q_t);

Os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa são descritos nos itens a seguir.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Solo

No presente trabalho o solo utilizado foi o caulim rosa (figura 4.1), da marca Haabe Calcáreos, proveniente do município de Pantano Grande. O caulim apresenta uma cor branca ou rosada, de acordo com o teor de ferro presente. É composto por silicatos de alumínio ($Al_2 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), principalmente caulinita e haloisita e, em menor proporção, ilita. Podem ocorrer outros também silício, hidrogênio, oxigênio, etc., além de materiais absorvidos ou impurezas, tais como: areia, palhetas de mica, grãos de feldspato e óxidos de ferro. Devido a sua composição mineralógica, os solos caoliníticos - tal como o caulim - não apresentam expansividade sendo, portanto adequados à estabilização com cimento por apresentar um adequado desenvolvimento de resistência.



Figura 4.1: caulim rosa

Feuerharmel (2000) caracterizou o caulim denominado comercialmente de caulim rosa. A figura 4.2 mostra a curva granulométrica do caulim, determinada através de ensaio de granulometria com e sem defloculante. O quadro 4.1 apresenta as propriedades físicas do material.

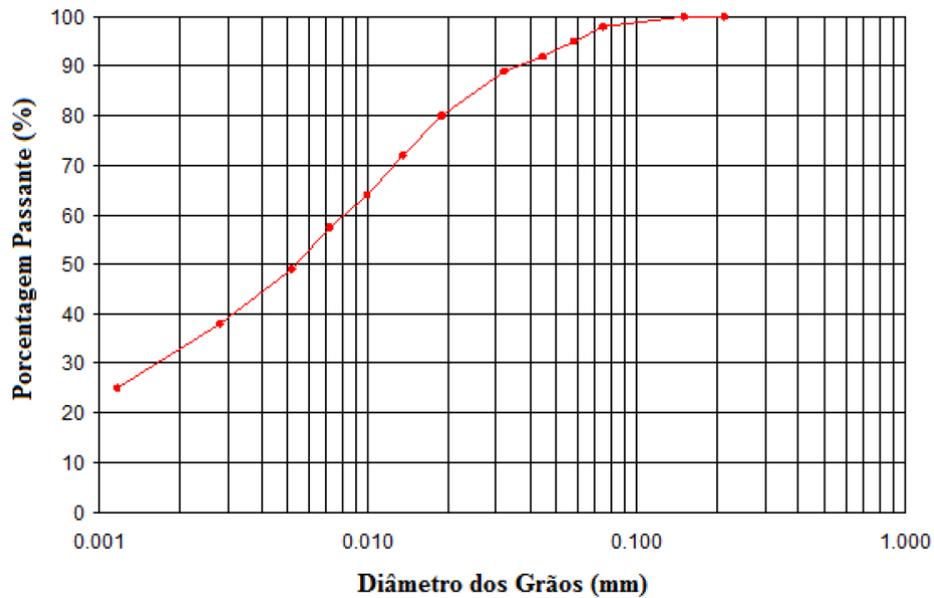


Figura 4.2: curva granulométrica do caulim (adaptado de FEUERHARMEL, 2000)

Propriedades Físicas	Valores Médios
Peso específico real dos grãos	24,4 kN/m ³
% areia fina	1,5%
% silte	47,5%
% argila	51%
Limite de liquidez	39%
Limite de plasticidade	34%
Índice de plasticidade	5%

Quadro 4.1: propriedades físicas do caulim

A partir da análise da curva granulométrica e da tabela de propriedades físicas percebe-se que mais de 90% do material passa na peneira 200, e que essa percentagem passante se distribui de maneira relativamente uniforme entre as frações silte e argila. O limite de liquidez (39%) é baixo, considerando a média apresentada pelas argilas. O índice de plasticidade (5%) indica um solo fracamente plástico ($1 < \text{Índice de Plasticidade} < 5$). Portanto, o caulim rosa, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos, é classificado como um **silte** de baixa plasticidade.

4.1.2 Cimento

Nesta pesquisa foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI). Este foi escolhido por atingir aproximadamente 80% de sua resistência aos 7 dias, conforme mostra a figura 4.4.

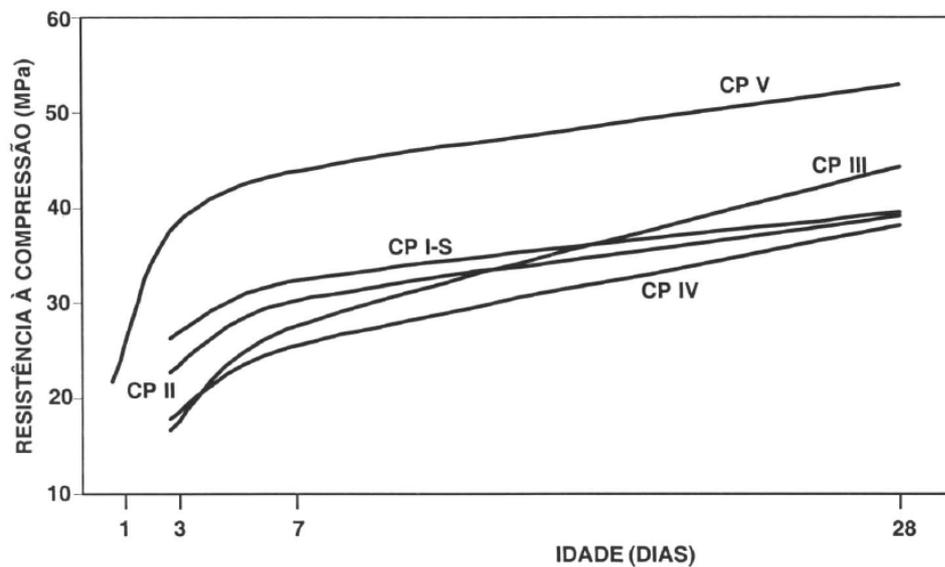


Figura 4.4: evolução média da resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002)

A obtenção de 80% da resistência final aos 7 dias permitiu que os ensaios de tração por compressão diametral fossem realizados nesta idade. Além disso, o avançado estágio de hidratação nesta fase tende a gerar uma menor dispersão nos resultados (LOPES JUNIOR, 2007).

4.1.3 Água

No processo de moldagem dos corpos-de-prova foi utilizada água do sistema de abastecimento público.

4.2 MÉTODOS

Os métodos utilizados no presente trabalho são detalhados a seguir.

4.2.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Nesta pesquisa foram utilizados corpos-de-prova com 10cm de altura e 5cm de diâmetro. O procedimento de moldagem de cada CP se dá pela pesagem dos materiais, mistura e compactação dos mesmos.

Os materiais – solo e cimento – foram pesados com resolução de 0,01 g e misturados com uma espátula metálica até terem todos os grumos desmanchados e a mistura tornar-se

homogêneos. A água foi pesada com a mesma resolução e então incorporada à mistura de solo e cimento. Os materiais foram então misturados até sua completa homogeneização.

Na sequência a mistura solo-água-cimento foi pesada novamente a fim de separar a quantidade necessária para moldagem do corpo-de-prova. As três camadas utilizadas na compactação foram pesadas e colocadas em potes tampados para evitar a perda de umidade.

Do restante da mistura solo-cimento-água foram retiradas duas amostras para verificação do teor de umidade. A determinação do teor de umidade do solo seguiu o procedimento descrito pelo anexo da Norma NBR 6457/86.

O molde foi lubrificado com óleo a fim de evitar que o material fique aderido no mesmo e o CP seja danificado no momento da desmoldagem. A mistura solo-cimento foi então compactada estaticamente com uma prensa em três camadas dentro de um molde metálico tripartido. Após a execução da primeira e da segunda camada, estas foram escarificadas, com o intuito de proporcionar uma melhor adesão entre as mesmas. A compactação é realizada em três camadas para proporcionar níveis de compactação similares em todo o corpo-de-prova.

Subsequentemente os corpos-de-prova eram extraídos do molde (através do desmonte do mesmo), pesados com uma resolução de 0,01 g e tiveram sua altura e diâmetro medidos com um paquímetro, proporcionando uma resolução de 0,1 mm. Os corpos-de-prova foram, então, acondicionados em sacos plásticos devidamente fechados e identificados (figura 4.5).



Figura 4.5: corpo-de-prova acondicionado em saco plástico e identificado

A cura dos corpos-de-prova foi realizada à temperatura de 22 graus Celsius, durante o período de 7 dias, no qual o CP V-ARI atinge cerca de 80% de sua resistência final. No sexto dia de

cura dos corpos-de-prova foram imersos em água destilada, para realizar as últimas 24 horas de cura imersos. Esse procedimento reduz significativamente os valores de sucção, fazendo com que o corpo-de-prova, tenha uma redução significativa dos valores de sucção mátrica, o que influencia os resultados dos testes de compressão simples e compressão diametral. Esse procedimento não prejudica o desenvolvimento da resistência por parte do cimento CP V – ARI.

Foram considerados aptos para a realização dos testes os corpos-de-prova que atenderam as seguintes condições:

- a) grau de compactação de 99 a 101% de especificado, sendo o grau de compactação definido como o valor de γ_d obtido efetivamente na moldagem dividido pelo γ_d especificado como meta;
- b) teor de umidade de $\pm 0,5\%$ do teor de umidade especificado;
- c) diâmetro especificado $\pm 0,5$ mm;
- d) altura especificada ± 1 mm.

Os corpos-de-prova- que não atenderam as especificações acima foram descartados e um novo CP com as mesmas características foi moldado.

4.2.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foi utilizada uma prensa automática (figura 4.6) com capacidade máxima de 100 kN, além de anéis dinamométricos calibrados com capacidade de 10 e 50 kN e resolução de 0,005 kN (0,5 kgf) e 0,023 (2,3kgf) respectivamente. A velocidade de deslocamento utilizada para realização dos ensaios foi da ordem de 1,14 mm por minuto. O procedimento de ensaio de tração por compressão diametral seguiu a NBR NM 8/94.



Figura 4.6: ensaio de tração por compressão diametral

Como critério de aceitação do ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi definido que a resistência de corpos-de-prova moldados com as mesmas características (peso específico, teor de umidade e teor de cimento), não deveria desviar mais de 10% da média dos três corpos-de-prova. Este é o critério adotado pela Norma NBR 12253/92. Os ensaios que não atingiram o critério estabelecido foram desconsiderados.

Os pontos de moldagem dos ensaios de resistência à compressão diametral são mostrados na figura 4.7 juntamente com a curva de compactação do caulim para energia Proctor modificada (2700 kN m/m³), e as curvas de saturação a 90% e a 100%. Os pontos de moldagem foram locados ao longo de 4 verticais, nas quais cada uma apresenta teor de umidade constante e massa específica aparente seca variando:

- a) A₁, A₂, A₃ para $\omega=17\%$;
- b) A₄, A₅, A₆ para $\omega=20\%$;
- c) A₇, A₈, A₉ para $\omega=23\%$;

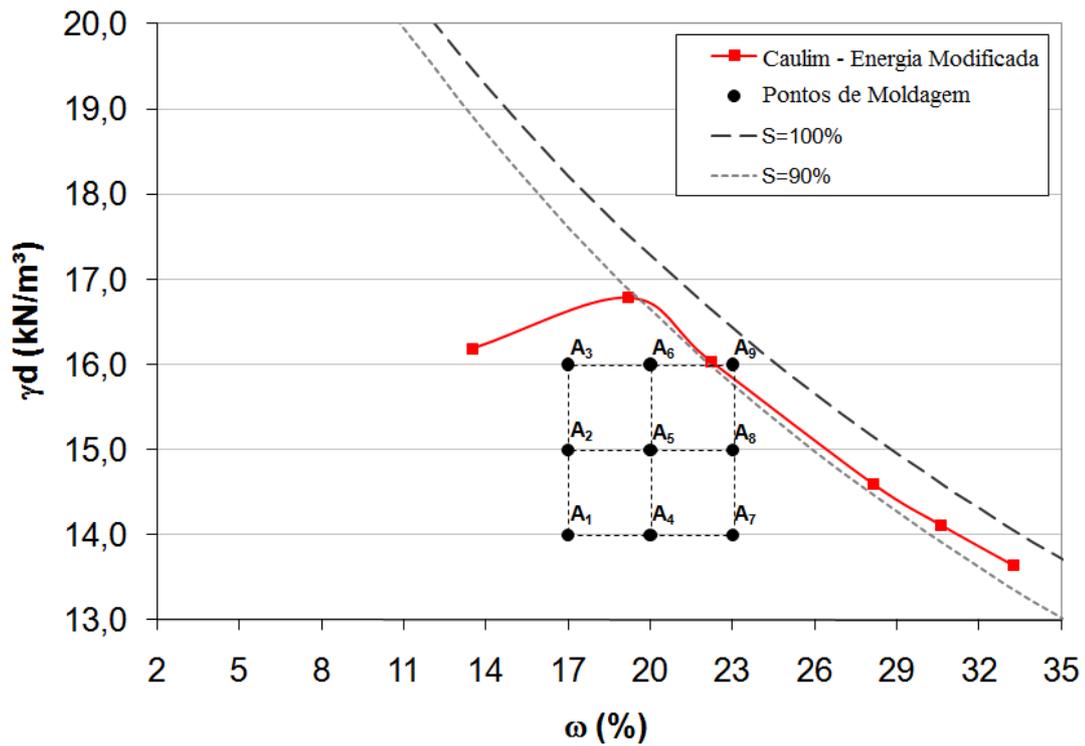


Figura 4.7: curva de compactação Proctor Normal do caulim e pontos de moldagem

O quadro 4.2 apresenta os valores de massa específica aparente seca e teor de umidade para todos os pontos de moldagem. Os pontos de moldagem foram escolhidos considerando possíveis condições de campo.

Pontos	Caulim (argila siltosa)	
	Massa específica aparente seca (kN/m ³)	Teor de umidade (%)
A ₁	14,0	17
A ₂	15,0	17
A ₃	16,0	17
A ₄	14,0	20
A ₅	15,0	20

A ₆	16,0	20
A ₇	14,0	23
A ₈	15,0	23
A ₉	16,0	23

Quadro 4.2: parâmetros dos pontos de moldagem

Cada ponto “A” foi moldado com quatro teores de cimento: 3%, 5%, 7% e 9%. Devido à dispersão típica de ensaios de resistência à compressão simples, 3 corpos-de-prova foram moldados para cada ponto.

5 RESULTADOS

Neste capítulo encontram-se os resultados do caulim artificialmente cimentado submetido à tração conforme o programa experimental.

5.1 POROSIDADE

A figura 5.1 mostra como a porosidade (η) afeta a resistência à tração (q_t) do caulim artificialmente cimentado para um teor de umidade (ω) de 23% e teores de cimento (C) de 3, 5, 7 e 9%. Verifica-se que para níveis de porosidade mais elevados a resistência à tração diminui. O ajuste exponencial mostra-se o mais adequado para relacionar a resistência à tração e a porosidade, sendo isso, confirmado pelos valores de R^2 de 0,92 à 0,98 apresentados na figura.

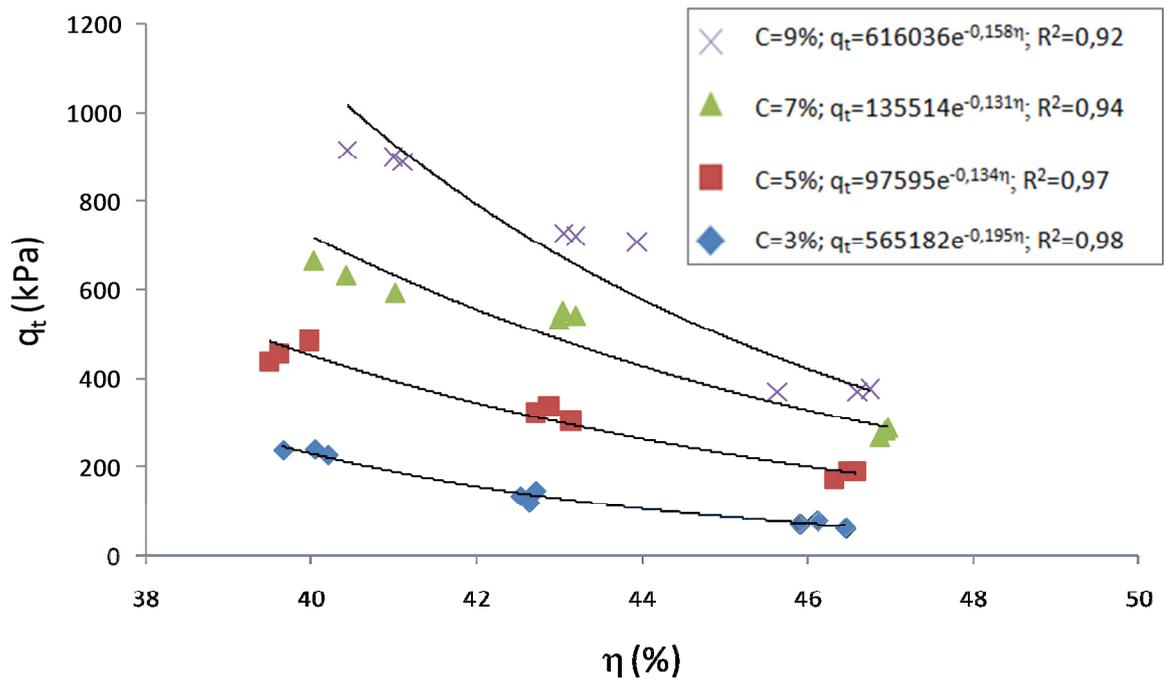


Figura 5.1: resistência à tração (q_t) vs. porosidade (η) para 3, 5, 7 e 9% de cimento e teor de umidade (ω) de 23%

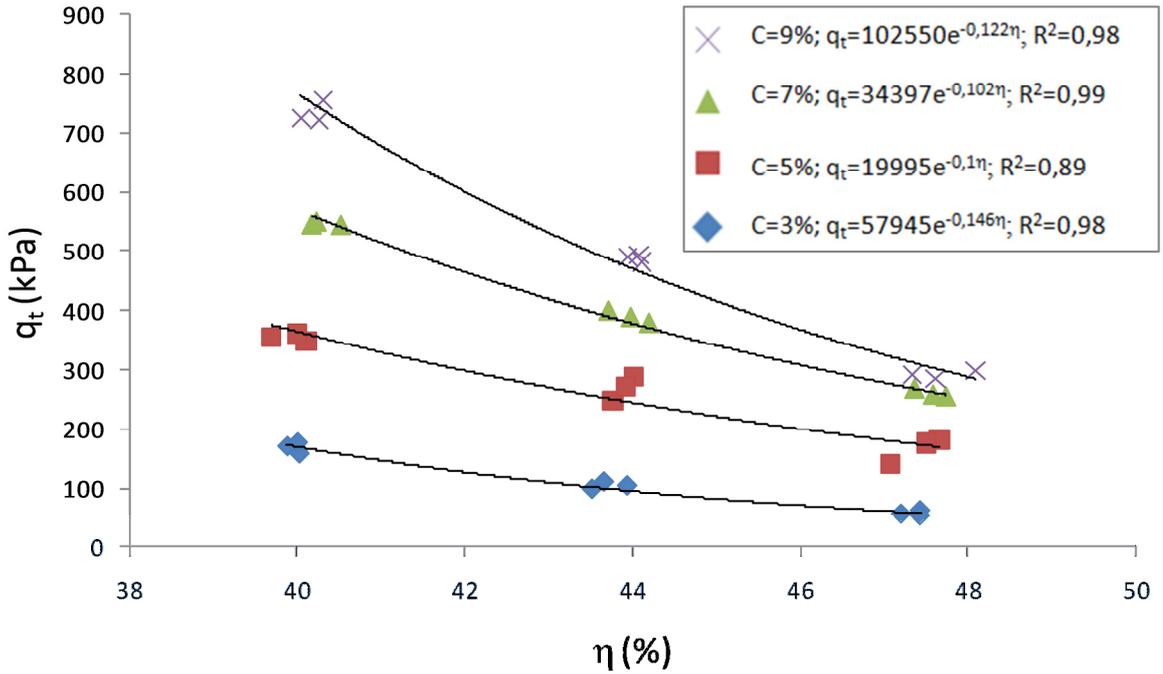


Figura 5.2: resistência à compressão à tração (q_t) vs. porosidade (η) para 3, 5, 7 e 9% de cimento e teor de umidade (ω) de 20%

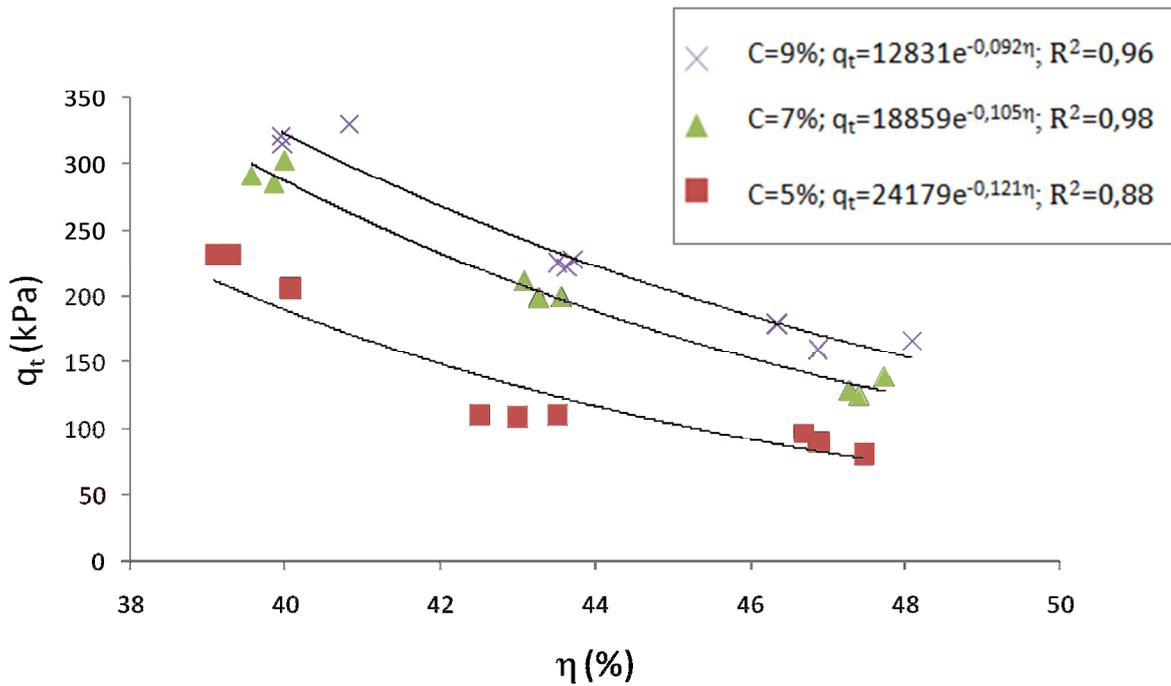


Figura 5.3: resistência à tração (q_t) vs. porosidade (η) para 5, 7 e 9% de cimento e teor de umidade (ω) de 17%

Observa-se, na figura 5.2, a influência da porosidade na resistência à tração do caulim artificialmente cimentado para um teor de umidade de 20% e na figura 5.3 para 17%. Deve-se atentar para o fato de que não são apresentados resultados para 3% de teor de cimento (figura 5.3), pois os corpos-de-prova com essas características não resistiram ao processo de imersão por 24h.

O efeito benéfico da redução da porosidade sobre a resistência das misturas solo-cimento já foram demonstrados por inúmeros autores como Clough et al.(1981) e Consoli et al. (2006). O resultado desta pesquisa está em linha com os existentes na literatura.

A figura correlacionando porosidade e resistência à tração para 20% de teor de umidade pode ser encontrada no apêndice.

5.2 TEOR DE CIMENTO

A figura 5.4 mostra a resistência à tração do caulim cimentado *versus* o teor de cimento para um teor de umidade de 23% e 14, 15 e 16kN/m³. Pode-se perceber uma relação linear entre a resistência à tração e o teor de cimento para a mistura silte-cimento estudada, porém, a relação linear não é paralela. A taxa de crescimento da resistência à tração é superior para espécimes com peso específico aparente seco maior.

O aumento da taxa de crescimento da resistência à tração conforme o aumento do peso específico aparente seco é visível também na figura 5.5, a qual mostra a relação entre a resistência à tração do caulim artificialmente cimentado e a teor de cimento, considerando um teor de umidade de 20%.

Para $\omega=17\%$ (figura 5.6) este comportamento não é tão claro pois os pontos com teor de cimento de 3% não resistiram ao processo de imersão.

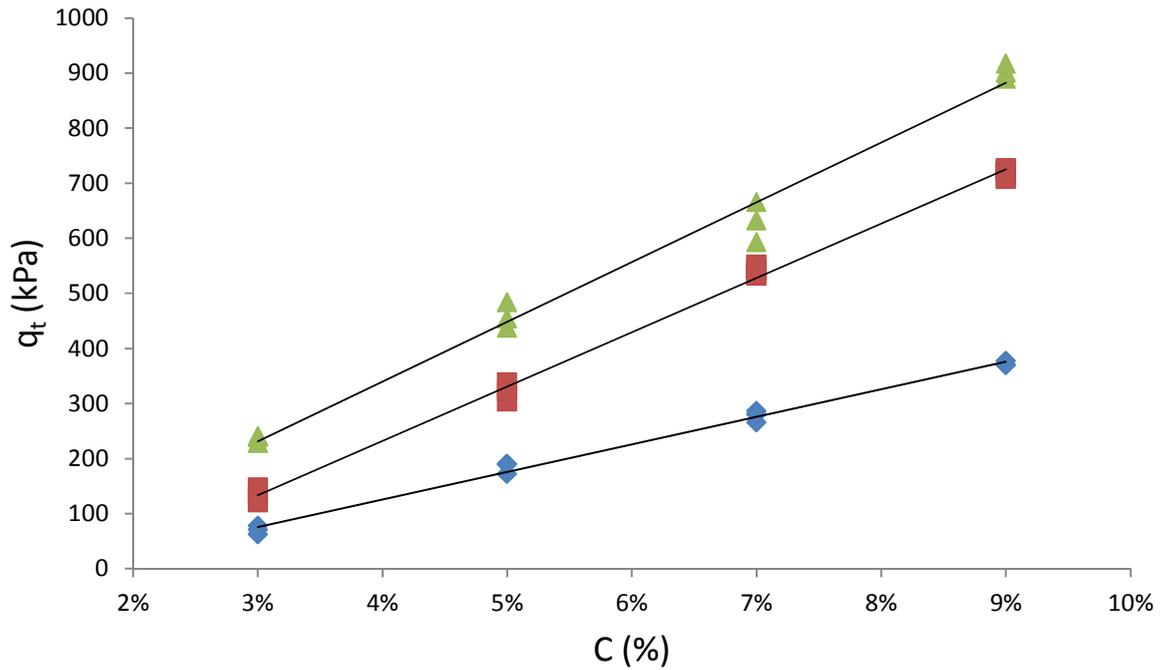


Figura 5.4: resistência à tração (q_t) vs. teor de cimento (C) para pesos específicos aparentes secos de 14, 15 e 16 kN/m³ e teor de umidade (ω) de 23%

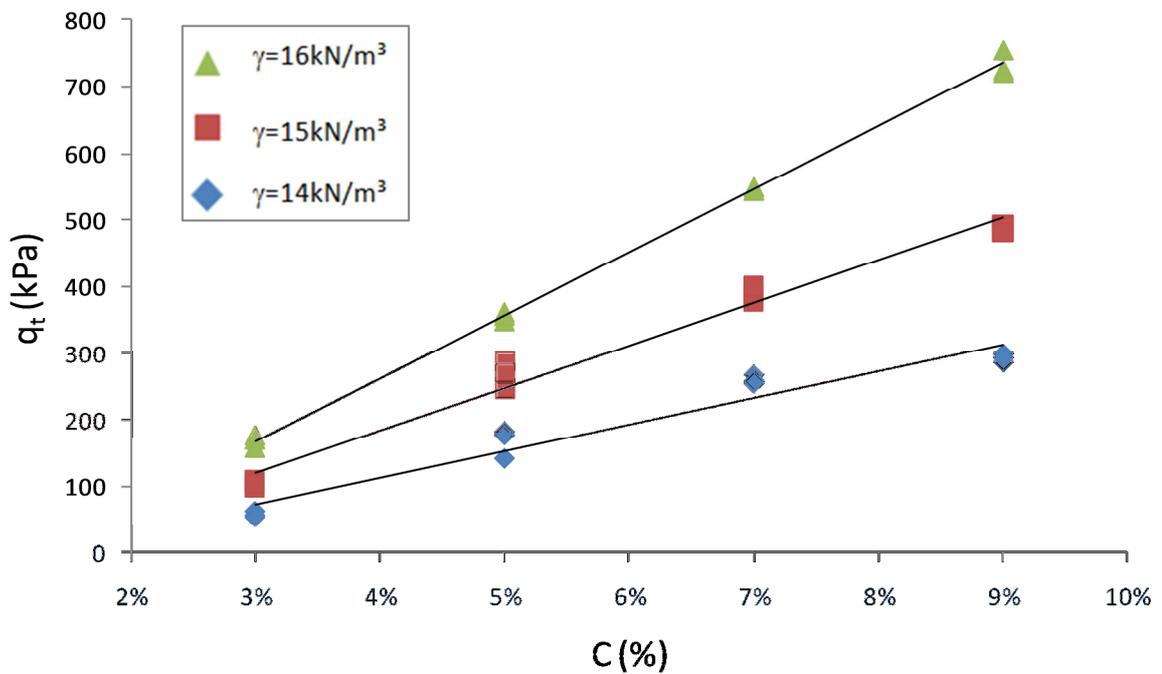


Figura 5.5: resistência à tração (q_t) vs. teor de cimento (C) para pesos específicos aparentes secos de 14, 15 e 16 kN/m³ e teor de umidade (ω) de 20%

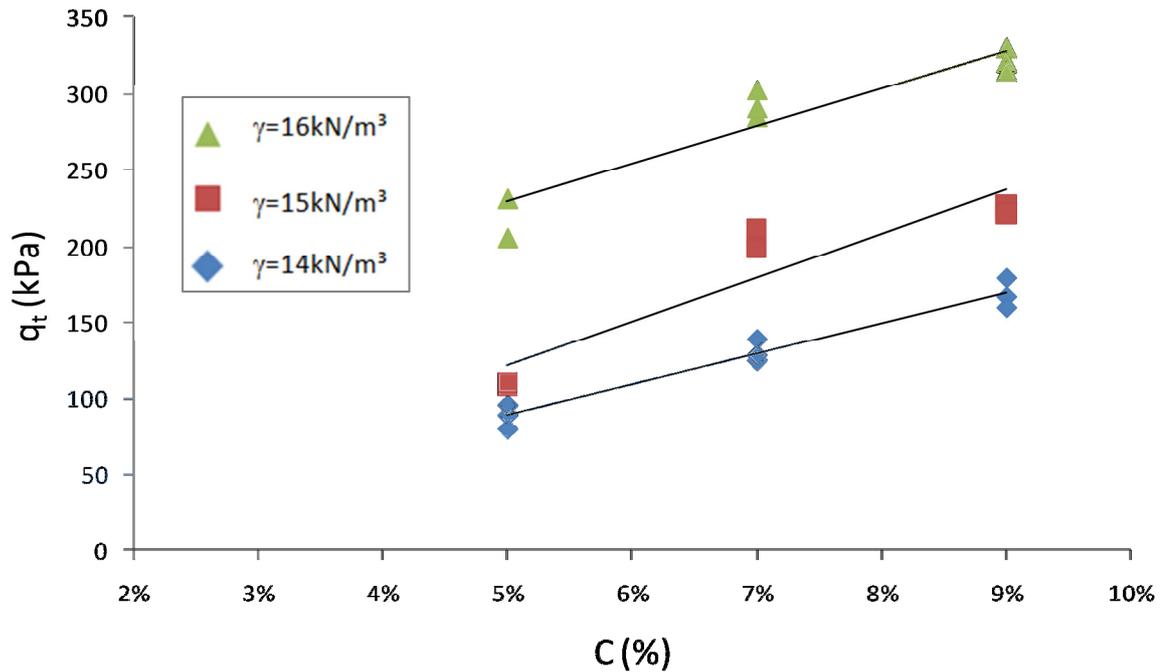


Figura 5.6: resistência à tração (q_t) vs. teor de cimento (C) para pesos específicos aparentes secos de 14, 15 e 16 kN/m^3 e teor de umidade (ω) de 17%

Plotando-se os dados fixando o peso específico (14 kN/m^3) como na figura 5.7 (resistência à tração vs. teor de cimento, para um peso específico aparente seco de 14 kN/m^3 e variando o teor de umidade) verifica-se novamente o aumento da resistência com o aumento do teor de cimento, para o intervalo estudado.

O mesmo comportamento é observado para 15 e 16 kN/m^3 respectivamente, figura 5.8 e 5.9.

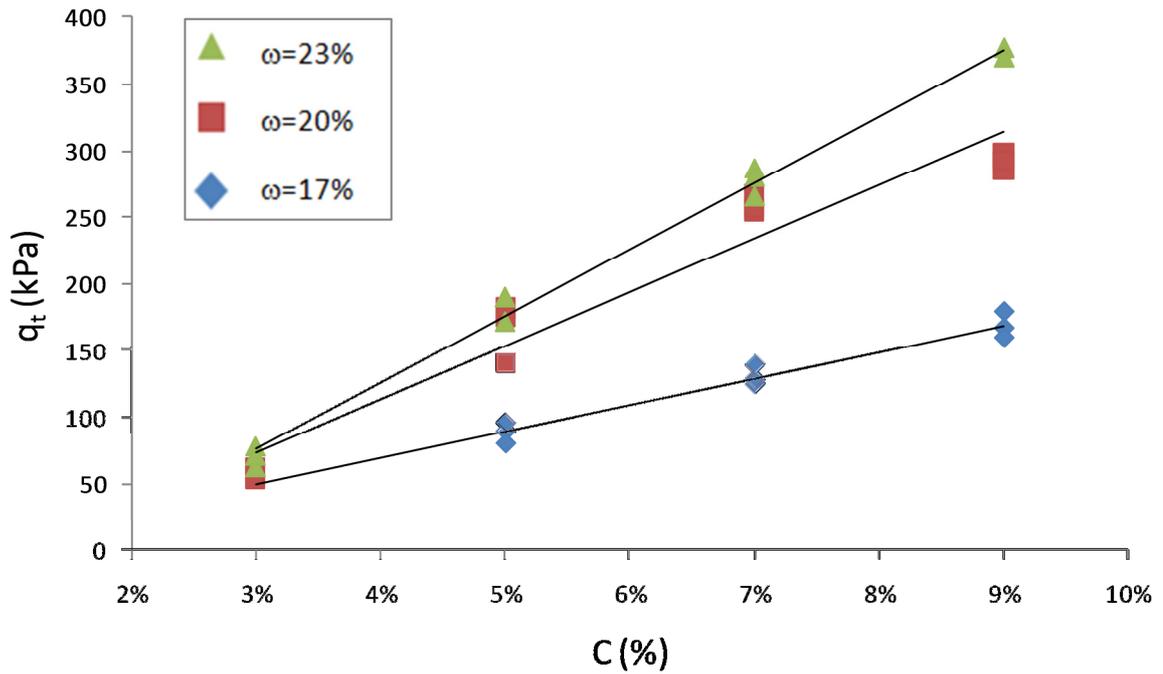


Figura 5.7: resistência à tração (q_t) vs. teor de cimento (C) para teores de umidade de 17, 20 e 23 e peso específico aparentes seco (γ) de 14 kN/m^3

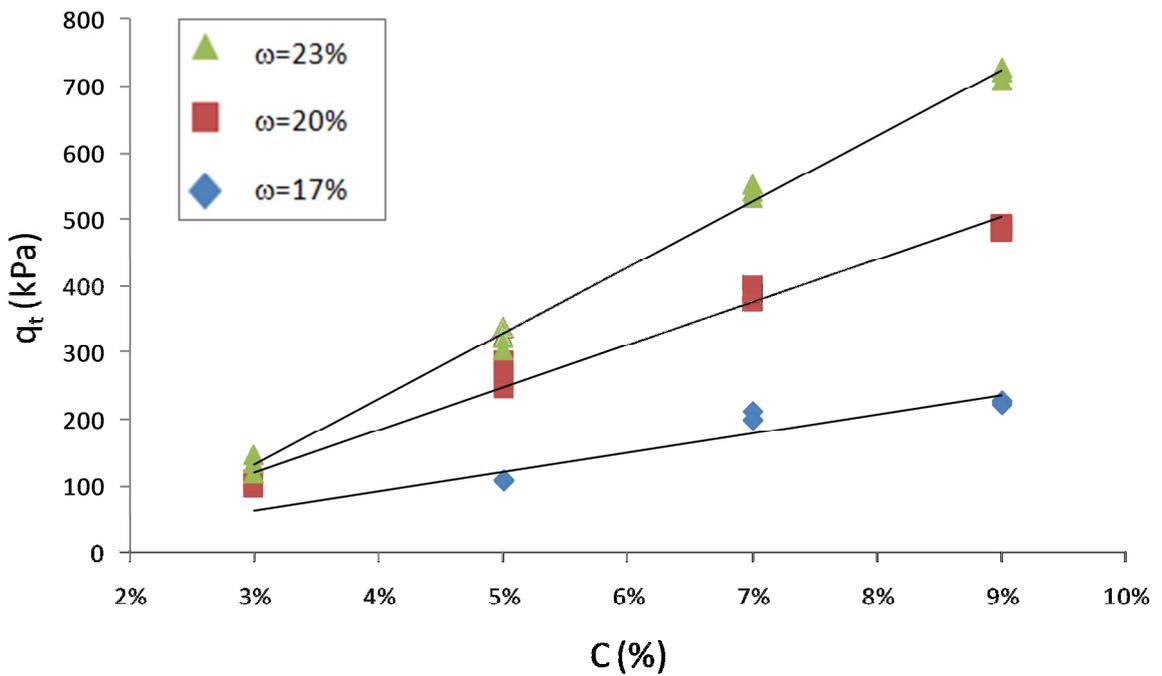


Figura 5.8: resistência à tração (q_t) vs. teor de cimento (C) para teores de umidade de 17, 20 e 23 e peso específico aparentes seco (γ) de 15 kN/m^3

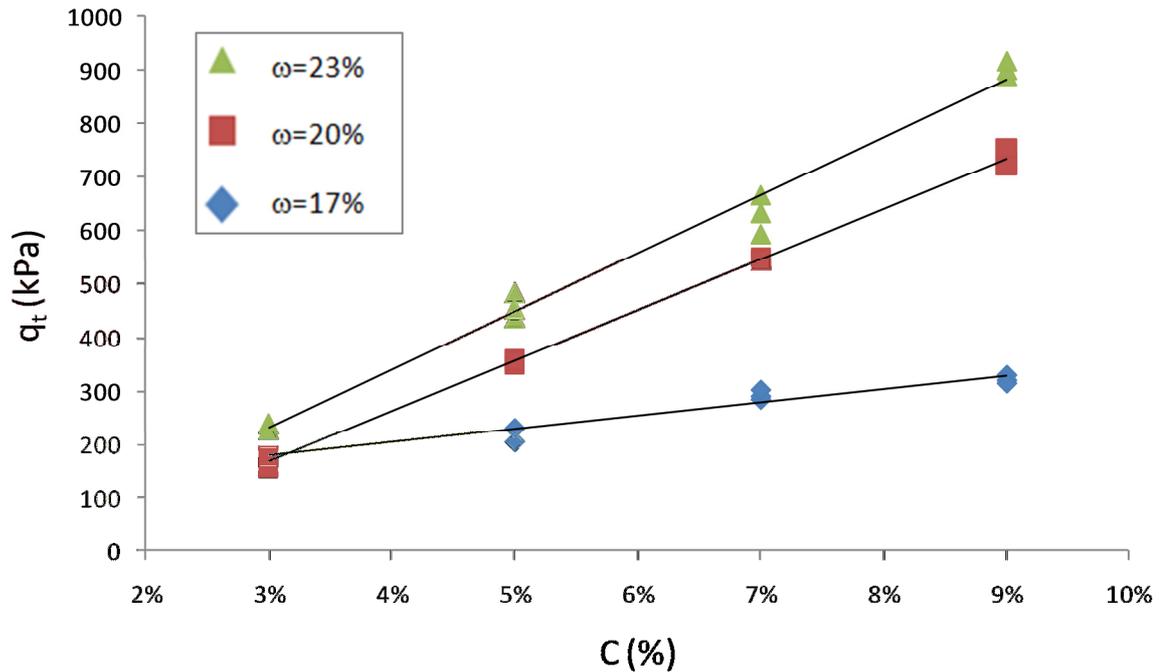


Figura 5.9: resistência à tração (q_t) vs. teor de cimento (C) para teores de umidade de 17, 20 e 23 e peso específico aparentes seco (γ) de 16kN/m^3

5.3 TEOR DE UMIDADE

Na figura 5.10 tem-se a resistência à tração plotada vs. o teor de umidade para um peso específico aparente seco de 14kN/m^3 e teores de cimento de 3, 5, 7 e 9%. Verifica-se que para um mesmo peso específico e mesmo teor de cimento a resistência à tração da mistura caulim-cimento é superior para teores de umidade mais elevados, na faixa de valores estudados.

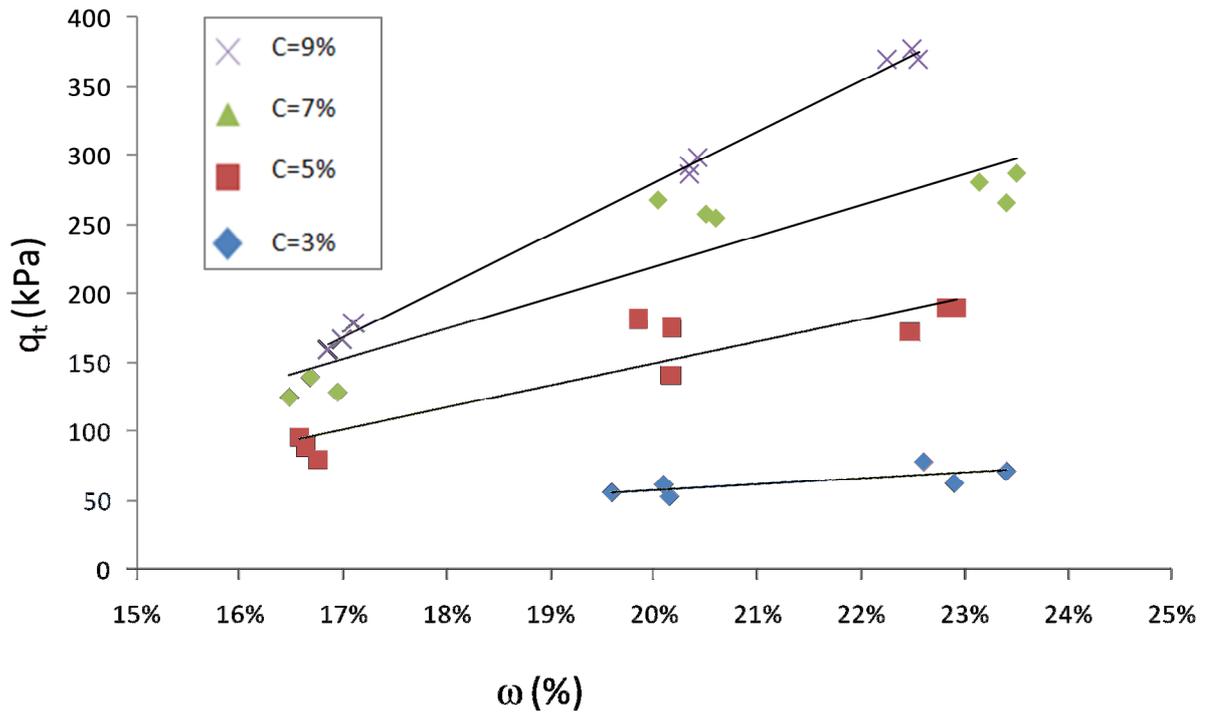


Figura 5.10: resistência à tração (q_t) vs. teor de umidade (ω) para teores de cimento de 3, 5, 7 e 9% e peso específico aparente seco (γ) de 14kN/m³

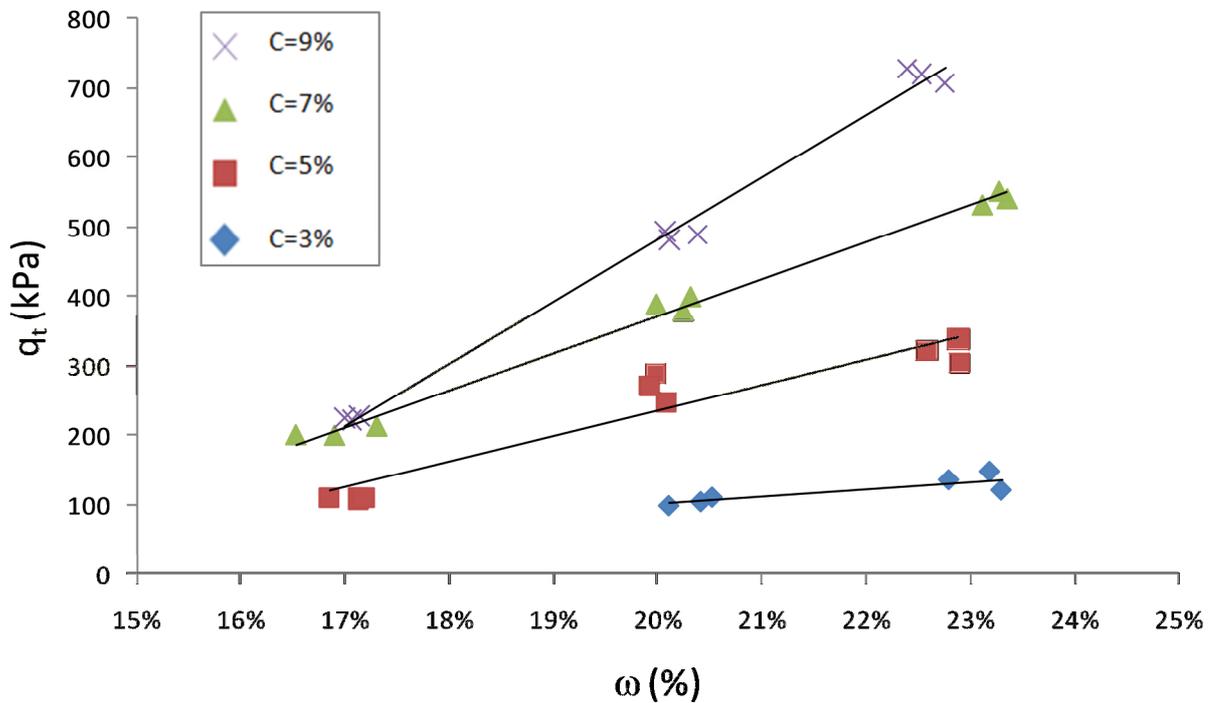


Figura 5.11: resistência à tração (q_t) vs. teor de umidade (ω) para teores de cimento de 3, 5, 7 e 9% e peso específico aparente seco (γ) de 15kN/m³

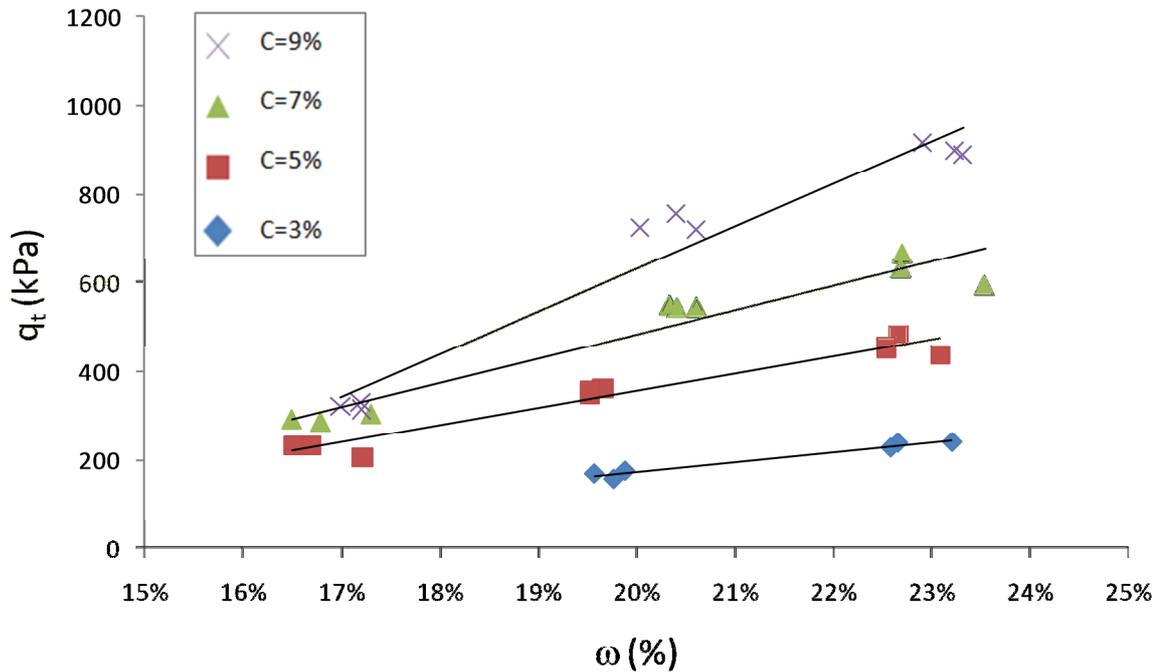


Figura 5.12: resistência à tração (q_t) vs. teor de umidade (ω) para teores de cimento de 3, 5, 7 e 9% e peso específico aparente seco (γ) de 16kN/m³

Observando-se a variação da resistência à tração com o teor de umidade, para 15kN/m³ e 16kN/m³ de peso específico aparente seco e teores de cimento de 3, 5, 7 e 9% (figura 5.11 e 5.12 respectivamente) verifica-se, novamente, o aumento da resistência frente ao aumento do teor de umidade da mistura em questão.

Nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12, percebe-se que os espécimes com $\omega=17\%$ e $C=3\%$ não estão presentes. Isso ocorre pois, tais corpos-de-prova, durante o processo de submersão para reduzir o efeito da sucção desmancharam-se.

Na literatura a única referência que menciona um claro e consistente o aumento da resistência com o teor de umidade é Consoli et al. (2011) – que inclui este autor. Este, estudando o mesmo solo siltoso desta pesquisa (caulim), porém realizando ensaios de resistência à compressão simples também verificou o aumento da resistência com o aumento do teor de umidade. É importante ressaltar que os teores de umidade, cimento, e peso específico aparente seco utilizados nas duas pesquisas são os mesmos.

O aumento da resistência com o aumento do teor de umidade pode estar relacionado com as diferenças na estrutura formada pelo solo, durante o processo de compactação com diferentes teores de umidade. Em solos argilosos e siltsos podem-se observar estruturas floculadas ou estruturas dispersas.

Outra possibilidade, dado que o este fenômeno, com esta intensidade, foi registrada na literatura apenas com o caulim, que é um silte, é de que nas misturas com menor teor de umidade, não exista água, em quantidade suficiente para a hidratação do cimento. A água disponível, na mistura caulim-cimento seria adsorvida pelo solo, assim diminuindo a quantidade de água disponível para a hidratação do cimento.

Os resultados para peso específico aparente seco de 16kN/m^3 encontram-se no Apêndice

5.4 RELAÇÃO VAZIOS/CIMENTO

Foi demonstrado nesta pesquisa que a resistência à tração do caulim artificialmente cimentado é função de três parâmetros:

- a) porosidade;
- b) teor de cimento;
- c) teor de umidade.

Como visto anteriormente para cada teor de umidade, a resistência à tração do caulim artificialmente cimentado depende tanto da porosidade quanto do teor de cimento da mistura. Quando se aumenta a porosidade a resistência à tração (q_u) cai, enquanto, ao aumentar-se o teor de cimento a resistência à tração aumenta.

Ao utilizar-se a relação vazios/cimento (η/C_{iv}), definida conforme a equação 5.1, agrupa-se dois dos parâmetros que afetam a resistência à tração do caulim artificialmente cimentado em uma única relação (para cada teor de umidade específico). Do ponto de vista mecânico, isso significa que embora a porosidade e o teor volumétrico de cimento afetem de maneiras distintas à resistência à tração, um aumento na porosidade da mistura pode ser contra balanceado por um aumento no teor de cimento do caulim cimentado.

$$\frac{\eta}{C_{iv}} = \frac{\text{porosidade}}{\text{teor volumetrico de cimento}} \quad (\text{equação 5.1})$$

Ao plotar-se a variação da resistência à tração *versus* a relação vazios/cimento (figura 5.13) verificam-se três curvas distintas, uma para cada um dos teores de umidade estudados (17, 20 e 23%). O ajuste exponencial é o que melhor se adequa aos dados experimentais.

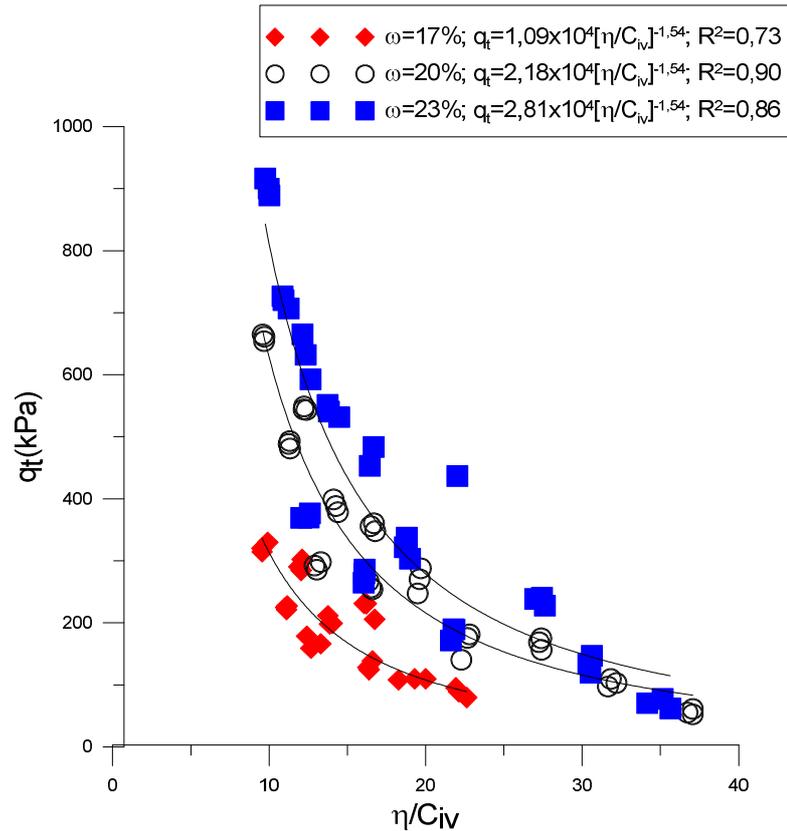


Figura 5.13: variação da resistência à tração (q_t) vs. relação vazios/cimento (η/C_{iv})

As curvas justadas apresentam uma boa concordância com os dados, possuindo os seguintes coeficientes de determinação (R^2):

a) $R^2=0,73$ para $\omega=17\%$ (equação 5.2);

b) $R^2=0,90$ para $\omega=20\%$ (equação 5.3);

c) $R^2=0,86$ para $\omega=23\%$ (equação 5.4);

$$q_t = 1,09 \cdot 10^4 \left[\frac{\eta}{C_{iv}} \right]^{-1,54} \quad (\text{equação 5.2})$$

$$q_t = 2,18 \cdot 10^4 \left[\frac{\eta}{C_{iv}} \right]^{-1,54} \quad (\text{equação 5.3})$$

$$q_t = 2,81 \cdot 10^4 \left[\frac{\eta}{C_{iv}} \right]^{-1,54} \quad (\text{equação 5.4})$$

Onde:

q_t = resistência à tração em kPa;

η = porosidade da mistura solo-cimento em %;

C_{iv} = teor volumétrico de cimento em %.

A porosidade apresenta uma relação exponencial com resistência à tração da mistura solo-cimento de caulim, quanto maior a porosidade (menor peso específico aparente seco), menor a resistência à tração. Por outro lado, quanto maior o teor de cimento, maior a resistência à tração, sendo a relação entre os dois linear. É preciso atentar para o fato de que as taxas de crescimento da resistência à tração com a porosidade e com o teor de cimento são diferentes. Uma forma de compatibilizar as duas taxas de crescimento é aplicar um expoente ao parâmetro C_{iv} (teor de cimento), como já foi feito em trabalhos anteriores, deste mesmo autor (CONSOLI et al., 2011) – figura 5.14.

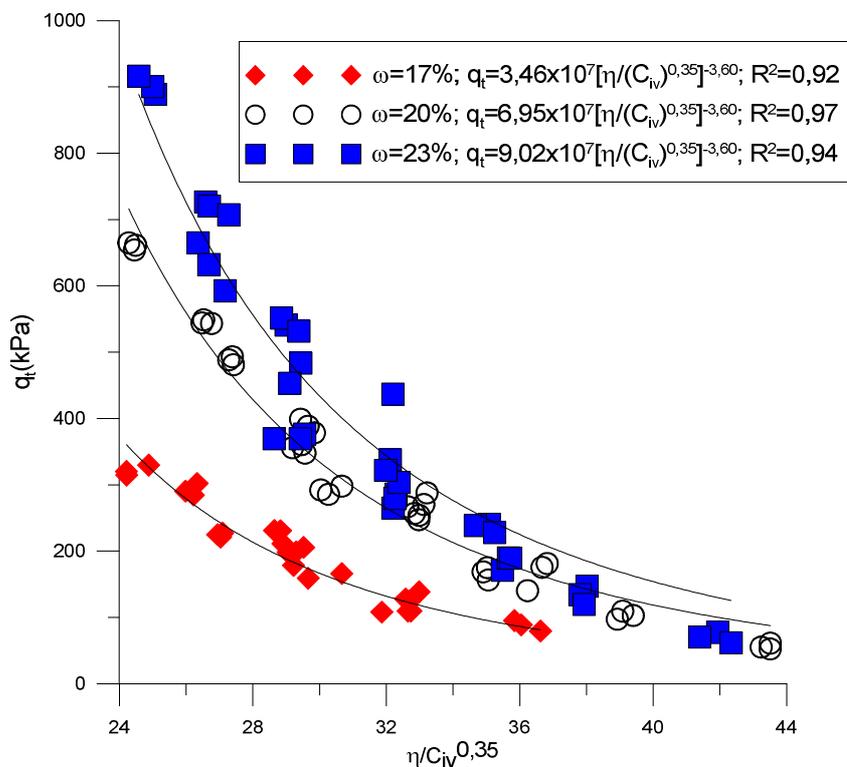


Figura 5.14: variação da resistência à tração (q_t) com a relação vazios/cimento com expoente ajustado ($\eta/C_{iv}^{0,35}$)

O valor do expoente, aplicado ao parâmetro C_{iv} , foi definido iterativamente, verificando-se a cada iteração o coeficiente de determinação (R^2). O valor de 0,35 resultou nos maiores valores

de R^2 , ressaltando que o mesmo expoente foi encontrado para os 3 teores de umidade estudados. Os coeficientes de determinação podem ser encontrados a seguir:

a) $R^2=0,92$ para $\omega=17\%$ (equação 5.5);

b) $R^2=0,97$ para $\omega=20\%$ (equação 5.6);

c) $R^2=0,94$ para $\omega=23\%$ (equação 5.7);

Na literatura o consenso é de que o expoente utilizado na relação porosidade/teor de cimento é função da granulometria do solo. O que, a partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, pode ser reafirmado, já que encontrou-se um expoente igual ao encontrado por Consoli et al. (2011) que estudou o mesmo solo.

Para possibilitar a comparação das equações entre si e a comparação entre os resultados de tração e os de compressão (CONSOLI et al, 2011), que é feita no capítulo subsequente, o ajuste foi das curvas foi feito utilizando-se sempre o mesmo expoente, -3,60. As mesmas encontram-se a seguir:

$$q_t = 3,46 \cdot 10^7 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,35}} \right]^{-3,60} \quad (\text{equação 5.5})$$

$$q_t = 6,95 \cdot 10^7 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,35}} \right]^{-3,60} \quad (\text{equação 5.6})$$

$$q_t = 9,02 \cdot 10^7 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,35}} \right]^{-3,60} \quad (\text{equação 5.7})$$

Onde:

q_t = resistência à tração em kPa;

η = porosidade da mistura solo-cimento em %;

C_{iv} = teor volumétrico de cimento em %.

O resultado apresentado acima indica a existência de relações distintas entre a resistência à tração do caulim artificialmente cimentado e teor de umidade. Observou-se que quanto maior o teor de umidade maior a resistência à tração. Tal efeito **só** foi observado para o mesmo solo

siltoso quanto testado à compressão simples por Consoli et al. (2011) no qual este autor se inclui.

Quando se compara as equações 5.5, 5.6 e 5.7 observa-se que elas possuem uma relação direta com $[\eta/(C_{iv})^{0,35}]^{-3,60}$ para teores de umidade de 17, 20 e 23%, tendo apenas o escalar diferente. Sendo assim, pode-se obter uma relação única entre a resistência à tração e os parâmetros η , C_{iv} e ω . Apresenta-se essa relação na figura 5.15 e equação 5.8, tendo um coeficiente de determinação de 0,98.

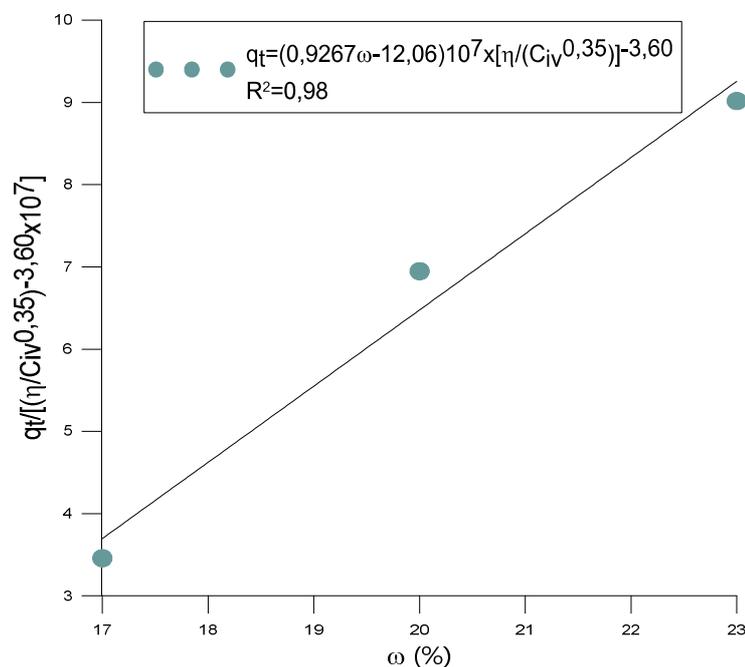


Figura 5.15: variação da resistência à tração (q_t) em função da porosidade (η), teor de cimento (C) e teor de umidade (ω)

$$q_t = (0,9267 \cdot \omega - 12,06) 10^7 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,35}} \right]^{-3,60} \quad (\text{equação 5.8})$$

Onde:

q_t = resistência à tração em kPa;

ω = teor de umidade em %;

η = porosidade da mistura solo-cimento em %;

C_{iv} = teor volumétrico de cimento em %.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo compara-se a resistência à tração com os dados de resistência à compressão simples apresentados por Consoli et al. (2011), no qual este mesmo autor está incluído. Tal comparação para um solo siltoso artificialmente cimentado trata-se de um trabalho pioneiro.

Na figura 6.1 tem-se plotado a resistência à compressão simples *versus* a resistência à tração com o intuito de avaliar a correlação entre ambos. Foi verificado que a relação resistência à tração/resistência à compressão é de, na média, 0,12. Porém, observa-se um grau de dispersão dos dados experimentais considerável, dado que o R^2 é de 0,85.

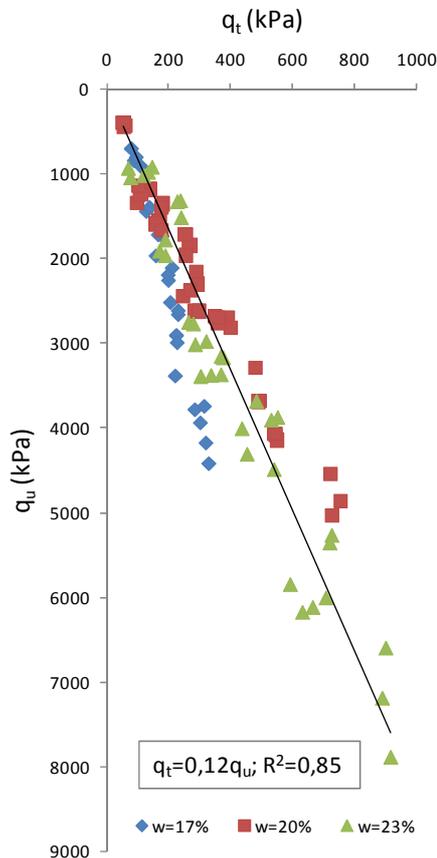


Figura 6.1: resistência à compressão simples (q_u) vs. resistência à tração (q_t)

Na intenção de aclarar o motivo da dispersão dos dados experimentais, na figura apresentada anteriormente e se a relação resistência à tração/resistência à compressão simples tem alguma influência do teor de umidade decidiu-se por plotar a relação q_t/q_u para os diferentes teores de umidade estudados.

Abaixo, na figura 6.2, é apresentado a resistência à compressão simples *versus* a resistência à tração apenas para 17% de umidade. Observa-se que o ajuste é bom (R^2 de 0,93) e que a relação q_t/q_u é de 0,08.

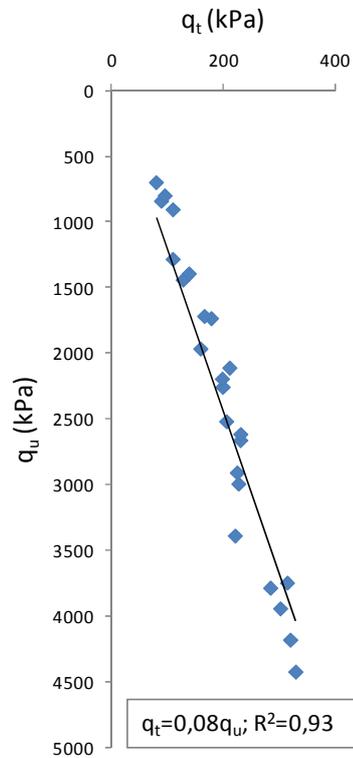


Figura 6.2: resistência à compressão simples (q_u) vs. resistência à tração (q_t) para 17% de teor de umidade (ω)

A resistência à tração *versus* resistência à compressão simples para um umidade de 20% é apresentada na figura 6.3. Observa-se um coeficiente de determinação de 0,93 e que a relação q_t/q_u é de 0,14, valor superior ao encontrado para o teor de umidade de 17% que é de 0,08.

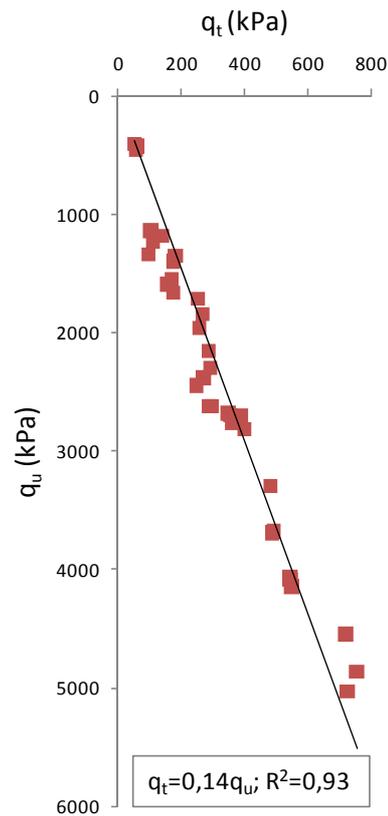


Figura 6.3: resistência à compressão simples (q_u) vs. resistência à tração (q_t) para 20% de teor de umidade (ω)

Para o teor de umidade de 23% (figura 6.4) a relação q_t/q_u é de 0,12 com um coeficiente de determinação de 0,93. Percebe-se que a relação entre resistência à tração e resistência à compressão simples varia com o teor de umidade. Tendo um pico para uma umidade de 20%.

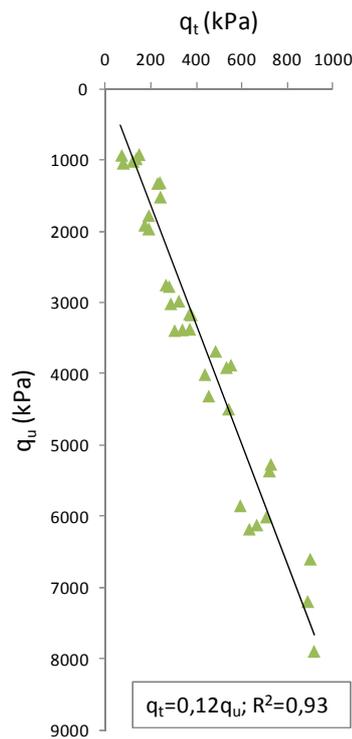


Figura 6.4: resistência à compressão simples (q_u) vs. resistência à tração (q_t) para 23% de teor de umidade (ω)

Na figura 6.5, observa-se as curvas de ajuste da resistência à compressão simples e da resistência à tração, para um teor de umidade de 17%. Ambas apresentam um coeficiente de determinação de 0,93 e 0,92 respectivamente. Dividindo-se as equações encontra-se uma relação q_t/q_u de 0,087, similar a encontrando no gráfico da figura 6.2.

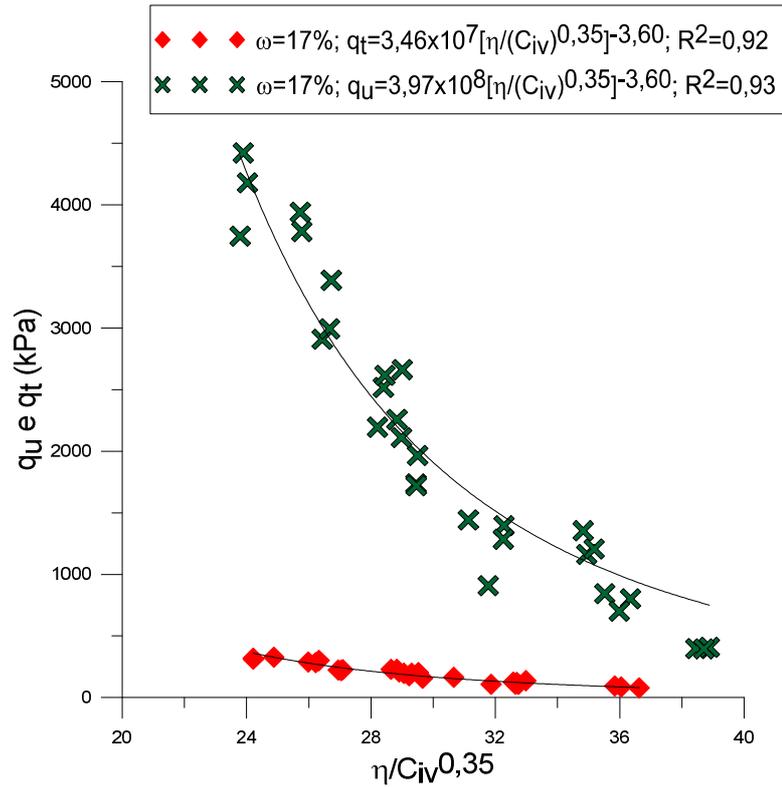


Figura 6.5: variação da resistência à compressão simples (q_u) e à tração (q_t) vs. teor de vazios cimento com expoente ajustado ($\eta/C_{iv}^{0,35}$) para teor de umidade (ω) de 17%

Para o teor de umidade de 20%, as curvas de ajuste de q_t e q_u são apresentadas na figura 6.6. Quando divide-se as equações apresentadas no gráfico o valor encontrado para q_t/q_u é de 0,13, muito próximo aos 0,14 anteriormente (figura 6.3).

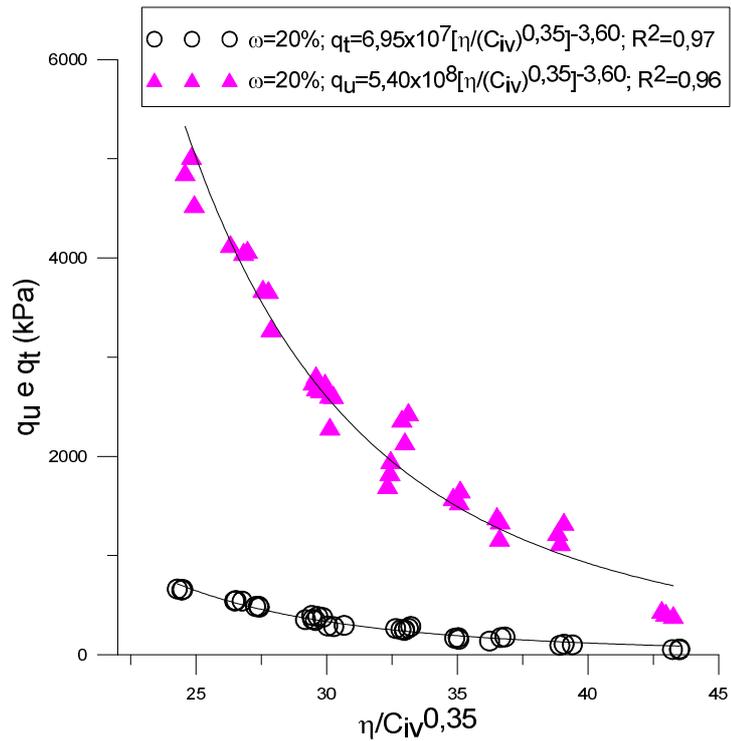


Figura 6.6: variação da resistência à compressão simples (q_u) e à tração (q_t) vs. teor de vazios cimento com expoente ajustado ($\eta/C_{iv}^{0,35}$) para teor de umidade (ω) de 20%

A figura 6.7 apresenta $\eta/C_{iv}^{0,35}$ vs. q_t e q_u para um teor de umidade de 23%. Dividindo-se as equações apresentadas no gráfico tem-se 0,12, tal com apresentado anteriormente (figura 6.4).

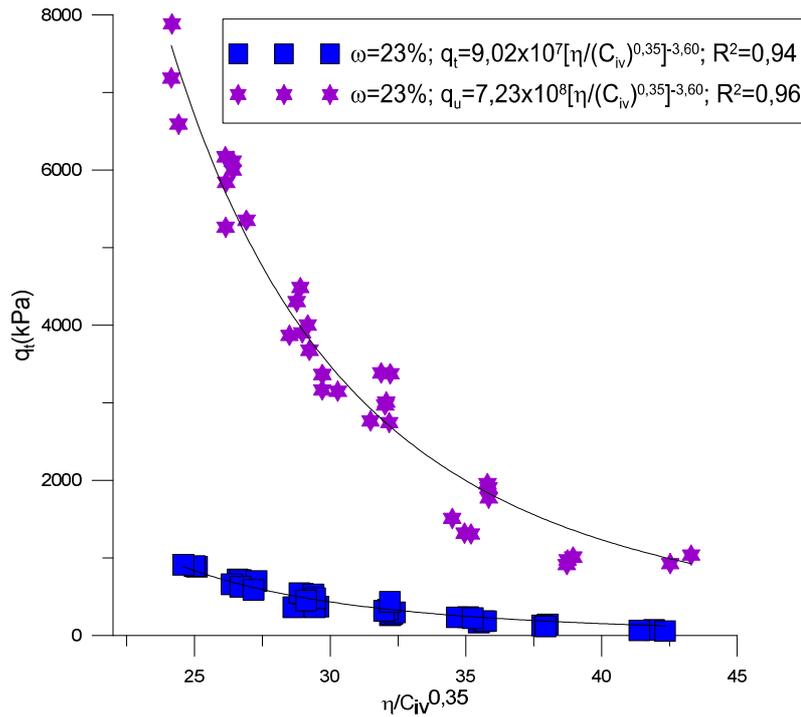


Figura 6.7: variação da resistência à compressão simples (q_u) e à tração (q_t) vs. teor de vazios cimento com expoente ajustado ($\eta/C_{iv}^{0,35}$) para teor de umidade (ω) de 23%

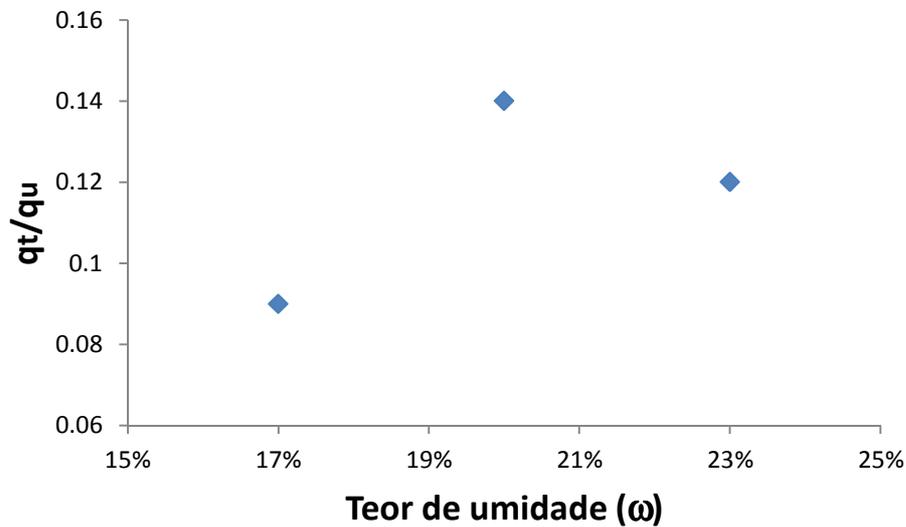


Figura 6.8: teor de umidade vs. relação q_t/q_u

A relação q_t/q_u demonstra ser uma função, não linear, do teor de umidade da mistura caulim-cimento estudada (figura 6.8). q_t/q_u tem seu menor valor – 0,09 – para um teor de umidade de 17%, crescendo para 0,14 em 20% de teor de umidade e caindo para 0,12 nos 23% de umidade. Tal comportamento não condiz com o esperado porém, para entender melhor a razão deste comportamento mais estudos são necessários.

7 CONCLUSÕES

A partir do programa experimental e da análise dos resultados foram estabelecidas as conclusões a seguir.

A porosidade (η) se relaciona com a resistência à tração (q_t) de maneira exponencial. Quanto maior a porosidade da mistura solo-cimento compactada menor é a tração da mesma. As curvas para diferentes teores de cimento são paralelas e crescentes, bem como, as curvas para diferentes teores de umidade.

A resistência à tração aumenta de forma linear com o aumento do teor de cimento (C) para o solo artificialmente cimentado desta pesquisa. Pode-se perceber também que a taxa de crescimento da resistência à compressão simples é função da massa específica seca aparente (γ_d), para γ_d maiores a taxa de crescimento da q_t com o aumento do teor de cimento é superior.

O teor de umidade de moldagem demonstrou ter papel fundamental na estimativa da resistência à compressão tração do caulim artificialmente cimentado. Com o aumento do teor de umidade verificou-se um aumento da resistência para os teores de umidade estudados. A causa deste comportamento pode estar relacionada com a estrutura criada pela compactação em diferentes teores de umidade ou com a indisponibilidade de água, na mistura solo-cimento, para hidratação do cimento em consequência da adsorção de partículas de água pelo solo siltoso.

A razão vazios/cimento, ajustada por um expoente, 0,35 para o solo siltoso estudado em cada uma das três umidades de compactação, mostrou ser um bom parâmetro na estimativa da resistência à tração do solo estudado. Tal relação sugere que o ajuste deste expoente é função das características do tipo de solo e do agente cimentante utilizado. Esse expoente não é função do teor de umidade, considerando os teores de umidade estudados no presente trabalho.

Com base na equação de estimativa da resistência à tração estabelecida nesta pesquisa, para a mistura silte-cimento estudada, existem várias maneiras de atingir a q_t desejada para um determinado projeto. Pode ser feitas diferentes combinações de teor de cimento, porosidade e teor de umidade, e a melhor solução varia de projeto para projeto, dependendo da acessibilidade de equipamentos para atingir um determinado índice de vazios, custo do cimento e disponibilidade de água.

A razão vazios/cimento (η/C_{iv}) apresentou um papel fundamental na estimativa da resistência à tração de misturas de solos finos e cimento. Uma relação única [equação 10] foi encontrada para o silte estudado (caulim), conectando q_t com η , C_{iv} e ω . Resultado que demonstra importância do teor de umidade de

moldagem (ω) na estimativa da resistência à tração da mistura silte-cimento estudada, diferentemente dos resultados encontrados na bibliografia, que demonstram não existir influência do teor de umidade de moldagem na resistência de solos artificialmente cimentados. Essa diferença é função do tipo de solo estudado.

Para o silte estudado, caulim, a relação entre resistência à compressão e resistência à tração (q_t/q_u) não é única, variando de acordo com o teor de umidade. Para:

a) $\omega=17\% \rightarrow q_t/q_u=0,08$;

b) $\omega=20\% \rightarrow q_t/q_u=0,14$;

c) $\omega=23\% \rightarrow q_t/q_u=0,12$.

A relação entre resistência à tração e resistência à compressão média fica em 0,12. Para entender a causa desta variação mais estudos são necessários.

Sugestões para trabalhos futuros:

- a) realizar comparação entre resistência à compressão e à tração para outros tipos de solo;
- b) realizar ensaio de microscopia eletrônica nos espécimes para entender diferenças na estrutura formada em espécimes com diferentes teores de umidade;
- c) avaliação da quantidade de água adsorvida pelo solo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7 ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12253: **Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento**. Rio de Janeiro. 1992.

____ NBR NM 8. **Concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro. 1994.

____ NBR 6457. **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro. 1986

____ NBR 12024: **Solo-cimento- Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 1992.

____ NBR 12025: **Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 1992.

AZAMBUJA, R. M. B. **Comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo-cimento-bentonita para aplicação em barreiras verticais de contenção de contaminantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

CONSOLI, N. C.; VENDRUSCOLO, M. A.; PRIETTO, P. D. M. **Behavior of plate load test on soil layers improved with cement and fiber**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. V.129(1). 2003.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. **Key parameters for strength control of artificially cemented soil**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(2). 2007.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, F.; FONINI, A. **Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering V. 133(2). 2009.

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, v.136(5), p. 759-763, 2010.

CONSOLI, N. C.; ROSA, D. A.; CRUZ, R. C.; DALLA ROSA, A. **Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil.** Engineering Geology, v. 122, p. 328-333, 2011.

CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R.; RAD, N. S. **Cemented sands under static loading.** Journal of Geotechnical Engineering Division. New York: ASCE, v.107, n.GT6. 1981.

CROFT, J. B. **The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization.** Géotechnique. Londres: v.17. 1967.

EL-RAWI, N. M.; HALIBURTON, A.; JANES, R. L. **Effect of compaction on strength of soil-cement.** Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. New York: ASCE, v. 93, n.6. 1967.

FELT, E. J. **Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures.** Research and development laboratories of the Portland cement association: Bulletin D5. Authorized reprint of the Bulletin 108 of the Highway Research Board. 1955.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2000.

HORPIBLUDUK, S.; MIURA, N.; NAGARAJ, T. S. **Assesment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abram's law as a basis.** Geotechnique. London: v.53, n.4. 2003.

INGLES, O. G. **Soil Stabilization – Principles and Practice.** Butterworths, Sydney, 1972.

LAMBE, W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics.** New York: John Wiley. 1969.

LIGHTSEY, G. R.; ARMAN, A.; CALLIHAN, C. D. **Changes in the Characteristics of Cement-Stabilized Soils by Addition of Excess Compaction Moisture.** Highway Research Record: Soil Stabilization – Multiple Aspects. Washington: n. 315. 1970.

LILEY, A. A. **Stabilisation os soil by cement**. In: BELL; F. G. B. *Methods of Treatment of Unstable Ground*. London: Butterworhs, 1975.

LOPES JUNIOR; L. S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

MITCHELL, J. K. *Fundamental of Soil Behavior*. New York: John Wiley & Sons Inc. 1976.

PLASTER, R. W.; NOBLE, D. F. **Reactions and strength development in Portland cement-soil mixtures**. Highway Research Record: Soil stabilization – Multiple aspects. Washington, n. 315. 1970.

PENDOLA, H. J.; KENNEDY, T. W.; HUDSON, W. R. **Evaluation of Factors Affecting the Tensile Properties of Cement-Treated Materials**. Center for Highway Research. The University of Texas at Austin. 1969.