

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

Daniela Aliati Rosa

**VALIDAÇÃO DA RELAÇÃO VAZIOS/CIMENTO NA
ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES
DO CAULIM ARTIFICIALMENTE CIMENTADO**

Porto Alegre
dezembro 2010

DANIELA ALIATI ROSA

**VALIDAÇÃO DA RELAÇÃO VAZIOS/CIMENTO NA
ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES
DO CAULIM ARTIFICIALMENTE CIMENTADO**

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

Orientador: Nilo Cesar Consoli
Coorientador: Rodrigo Caberlon Cruz

Porto Alegre
novembro 2010

DANIELA ALIATI ROSA

**VALIDAÇÃO DA RELAÇÃO VAZIOS/CIMENTO NA
ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES
DO CAULIM ARTIFICIALMENTE CIMENTADO**

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, dezembro de 2010

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

Rodrigo Caberlon Cruz
Dr. UFRGS
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Amanda Dalla Rosa
Ma. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Rodrigo Caberlon Cruz
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Fernando Schnaid (UFRGS)
Ph. D. Oxford University

Dedico este trabalho a meus pais,
Sidney e Lovani.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Nilo Cesar Consoli pela dedicação na orientação deste trabalho, pelas palavras de estímulo e pelos ensinamentos transmitidos.

Agradeço ao Dr. Rodrigo Caberlon Cruz, coorientador deste trabalho, pelos conselhos valiosos para a elaboração desta pesquisa.

Agradeço a Profa. Carin Schmitt pelo auxílio na elaboração deste trabalho e pela paciência.

Agradeço a todos os colegas do LEGG, que por vez ou outra me auxiliaram e tornaram essa caminhada menos árdua, especialmente ao Rafael Moraes e a Amanda Dalla Rosa.

Agradeço a meus pais e meus amigos que estiveram constantemente ao meu lado, auxiliando-me de uma forma ou de outra.

Transportai um punhado de terra todos os dias e fareis
uma montanha.

Confúcio

RESUMO

ROSA, D. A. **Validação da Relação Vazios/Cimento na Estimativa da Resistência à Compressão Simples do Caulim Artificialmente Cimentado**. 2010. 79 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

As misturas solo-cimento vêm sendo utilizadas com sucesso como camada de base em rodovias, camada de suporte para fundações rasas, na proteção de taludes em barragens de terra e como *liners* de contenção para plumas de dissipação de resíduos. Os principais fatores que afetam o comportamento das misturas solo-cimento são: teor de cimento, porosidade e teor de umidade. A norma NBR 12253 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992, p. 2) propõe um critério de dosagem baseado em uma série de testes de laboratório a fim de determinar a quantidade mínima de cimento que proporcione uma resistência média à compressão igual ou superior a 2,1 MPa aos 7 dias. Já trabalhos recentes têm proposto uma dosagem baseada na razão vazios/cimento, mostrando que ela é eficiente na previsão da resistência à compressão simples de solos artificialmente cimentados. Portanto, este trabalho buscou validar a relação vazios/cimento como estimativa de resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado e, secundariamente, quantificar a influência do teor de cimento, porosidade e teor de umidade na resistência das misturas solo-cimento. Verificou-se um aumento linear da resistência com o aumento do teor de cimento. Já a redução da porosidade provoca um aumento exponencial da resistência à compressão simples. O teor de umidade provoca o aumento da resistência para todos os teores de umidade estudados. O presente trabalho mostrou que a razão vazios/cimento (η/C_{iv}) é válida para estimativa da resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado. Foi ajustado um expoente de 0,35 ao termo C_{iv} , este, possivelmente é função da quantidade de fino presente no solo. O teor de umidade se mostrou um parâmetro fundamental na estimativa da resistência de misturas solo-cimento siltosas, tendo sido determinadas três curvas distintas de q_u versus η/C_{iv} , uma para cada teor de umidade estudado. As equações encontradas permitem atingir a resistência necessária para um projeto de maneiras distintas, alterando-se o teor de umidade, teor de cimento ou porosidade da mistura compactada, ou ainda uma combinação destes.

Palavras-chave: solo-cimento; caulim; solos artificialmente cimentados; resistência à compressão simples.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama das etapas de pesquisa	20
Figura 2: representação de uma mistura argila-cimento	23
Figura 3: representação de uma mistura areia-cimento	24
Figura 4: curva granulométrica do caulim	25
Figura 5: curva de compactação do caulim, caulim+cimento	27
Figura 6: relação água/cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples	31
Figura 7: fator vazios/cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples	32
Figura 8: $\eta/(C_{iv})^{0,35}$ <i>versus</i> resistência à compressão simples	32
Figura 9: $\eta/(C_{iv})^{0,28}$ <i>versus</i> resistência à compressão simples	35
Figura 10: porosidade <i>versus</i> resistência à compressão simples	36
Figura 11: teor de umidade <i>versus</i> resistência à compressão simples	37
Figura 12: diferentes estruturas de solo	38
Figura 13: teor de cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples	39
Figura 14: caulim rosa	41
Figura 15: evolução média da resistência à compressão simples dos distintos tipos de cimento Portland	42
Figura 16: potes de cimento de 4 kg	43
Figura 17: corpo-de-prova acondicionado em saco plástico e identificado	45
Figura 18: ensaio de compressão simples	46
Figura 19: curva de compactação Proctor Normal do caulim e pontos de moldagem	47
Figura 20: corpo-de-prova com papel filtro	50
Figura 21: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> porosidade (η) para a mistura solo-cimento com C = 3, 5, 7 e 9% e teor de umidade de 20%	52
Figura 22: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> porosidade (η) para teor de cimento de 7% e teores de umidade de 17, 20 e 23%	53
Figura 23: variação da resistência à compressão simples (q_u) com o teor de cimento (C) para $\omega = 20\%$	54
Figura 24: variação da resistência à compressão simples (q_u) com o teor de cimento para $\omega = 23\%$	54
Figura 25: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> teor de cimento (C) com um $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ e teores de umidade de 17, 20 e 23%	55
Figura 26: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> teor de umidade (ω) com um $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$	56
Figura 27: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> teor de umidade (ω) com um $\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$	57

Figura 28: variação da resistência à compressão simples (q_u) com a relação vazios/cimento (η/C_{iv}), considerando todas as massas específicas aparentes secas e teores de cimento estudados, para teores de umidade de 17, 20 e 23%	59
Figura 29: variação da resistência à compressão simples (q_u) com o expoente da relação vazios/cimento (η/C_{iv}) ajustado, considerando massas específicas aparentes secas e diferentes teores de cimento e teores de umidade de 17, 20 e 23%	61
Figura 30: variação da resistência à compressão simples (q_u) com a porosidade (η), teor de cimento (C) e teor de umidade (ω)	63
Figura 31: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> porosidade (η), para teores de cimento de 3%, 5%, 7% e 9% e teor de umidade de moldagem de 17%	70
Figura 32: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> porosidade (η), para teores de cimento de 3%, 5%, 7% e 9% e teor de umidade de moldagem de 20%	70
Figura 33: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> porosidade (η), para teores de cimento de 3%, 5%, 7% e 9% e teor de umidade de moldagem de 23%	71
Figura 34: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> teor de cimento (C), para massas específicas aparentes secas (γ_d) de 14, 15 e 16 kN/m ³ e teor de umidade (ω) de 17%	73
Figura 35: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> teor de umidade (ω), para massa específica aparente seca (γ_d) de 16 kN/m ³ e teores de umidade de (ω) de 17%, 20% e 23%	75
Figura 36: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> razão vazios/cimento (η/C_{iv}), para teor de umidade (ω) de 17%	77
Figura 37: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> razão vazios/cimento com expoente $(\eta/C_{iv})^{0,35}$, para teor de umidade (ω) de 17%	77
Figura 38: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> razão vazios/cimento (η/C_{iv}), para teor de umidade (ω) de 20%	78
Figura 39: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> razão vazios/cimento com expoente $(\eta/C_{iv})^{0,35}$, para teor de umidade (ω) de 20%	78
Figura 40: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> razão vazios/cimento (η/C_{iv}), para teor de umidade (ω) de 23%	79
Figura 41: resistência à compressão simples (q_u) <i>versus</i> razão vazios/cimento com expoente $(\eta/C_{iv})^{0,35}$, para teor de umidade (ω) de 23%	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: indicativo da quantidade de cimento a ser utilizada conforme o tipo de solo.	29
Quadro 2: parâmetros dos pontos de moldagem	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: propriedades físicas do caulim	26
--	----

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_u = resistência à compressão simples (kPa)

V_{ci} = volume de cimento

V_v = volume de vazios

γ_d = massa específica aparente seca

η = porosidade

ω = teor de umidade da amostra (%)

w = teor de umidade do papel filtro (%)

S = sucção (kPa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 MÉTODO DE PESQUISA	18
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	18
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	18
2.2.1 Objetivo Principal	18
2.2.2 Objetivo Secundário	18
2.3 HIPÓTESE	19
2.4 DELIMITAÇÃO	19
2.5 LIMITAÇÕES	19
2.6 DELINEAMENTO	19
3 VISÃO GERAL SOBRE AS MISTURAS SOLO-CIMENTO	22
3.1 MATERIAIS CONSTITUÍNTES	22
3.1.1 Solo	23
3.1.1.1 Aspectos Gerais.....	23
3.1.1.2 Caulim	24
3.1.2 Cimento	27
3.1.3 Água	28
3.1.4 Materiais Deletérios	28
3.2 DOSAGEM	28
4 COMPORTAMENTO DAS MISTURAS SOLO-CIMENTO	34
4.1 POROSIDADE	35
4.2 TEOR DE UMIDADE	36
4.3 TEOR DE CIMENTO	38
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	40
5.1 MATERIAIS	41
5.1.1 Solo	41
5.1.2 Cimento	42
5.1.3 Água	43
5.2 MÉTODOS	43
5.2.1 Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova	43
5.2.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples	46
5.2.3 Medidas de Sucção	48

6 RESULTADOS E ANÁLISES	51
6.1 SUCCÃO	51
6.2 EFEITO DA POROSIDADE	52
6.3 EFEITO DO TEOR DE CIMENTO	53
6.4 EFEITO DO TEOR DE UMIDADE	56
6.5 EFEITO DA RAZÃO VAZIOS/CIMENTO	58
7 CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento dos centros urbanos surge a necessidade de utilização de áreas com condições geotécnicas desfavoráveis. Para tal existem três opções:

- a) adequação do projeto às condições do solo existente;
- b) remoção e substituição do solo por outro com características geotécnicas adequadas;
- c) melhoramento do solo local.

A adequação do projeto às condições do solo local exige a adoção de soluções tecnológicas mais caras, o que pode tornar o projeto oneroso ou inviável. A substituição do solo, por sua vez, só pode ser executada quando existe uma jazida com solo de boa qualidade a uma distância viável do local. Além disso, cria-se um problema ambiental, pois é necessária uma área de bota-fora para a deposição do solo removido. É uma técnica que se torna inviável no caso de camadas muito espessas.

A melhoria das propriedades do solo local pode ser efetuada através de diferentes métodos tais como (INGLES; METCALF, 1972, p. 1):

- a) químicos;
- b) mecânicos;
- c) termais.

Os solos artificialmente cimentados são misturas de solo, cimento e água, em proporções definidas de acordo com a resistência desejada, e compactadas. Eles combinam a estabilização química (através da adição de cimento Portland) com a estabilização mecânica (compactação).

As misturas solo-cimento já são utilizadas com sucesso na construção de bases em rodovias, nas quais as jazidas de solo de boa qualidade encontram-se muito distantes do local da

pavimentação, tornando assim, o custo de transporte proibitivo. Podem ser aplicadas como camada de suporte para fundações rasas em solos com baixa capacidade de suporte, nos casos em que é inviável, tanto pela impossibilidade de acesso de equipamentos quanto por questões econômicas, a execução de estacas. Também podem ser empregadas como camada de proteção contra erosão em barragens de terra e em aplicações ambientais, como por exemplo, em *liners* na contenção de plumas de dissipação de resíduos.

Apesar da elevada aplicabilidade dos solos artificialmente cimentados não existe, atualmente, nenhum método **racional** de dosagem para solos finos que considerem:

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

Inúmeras pesquisas a respeito vêm sendo desenvolvidas no Laboratório de Geotecnia e Estudos Geoambientais (LEGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Os métodos de dosagem que vêm sendo desenvolvidos baseiam-se na razão vazios/cimento para estimativa da resistência à compressão simples. Assim sendo, o presente trabalho busca avaliar se tal razão é válida na estimativa da resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado.

Este trabalho de diplomação é composto por sete capítulos. O capítulo 1 é introdutório, apresentando uma justificativa para esta pesquisa. No capítulo 2 é definido o método de pesquisa. São apresentados: questão de pesquisa, objetivos, hipóteses, delimitações e limitações deste trabalho. Nos capítulos 3 e 4 é feita uma revisão bibliográfica acerca do tema estudado. O capítulo 3 é composto por uma visão geral sobre as misturas solo-cimento, enfatizando os materiais constituintes (solo, cimento, água e materiais deletérios) e as técnicas de dosagem existentes. Enquanto que no capítulo 4 é abordado o comportamento das misturas solo-cimento principalmente em relação à resistência à compressão simples, enfatizando também, os principais fatores que influenciam este comportamento, tais como, porosidade da mistura compactada, teor de cimento e teor de umidade. O capítulo 5 é composto pelo programa experimental, onde são detalhados todos os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa, bem como as variáveis de interesse e de resposta. No capítulo 6 são expostos os

resultados deste programa experimental. Neste capítulo também são feitas as análises pertinentes. Por fim, no capítulo 7, são abordadas as conclusões desta pesquisa.

2 MÉTODO DE PESQUISA

Os itens a seguir apresentam a questão de pesquisa, objetivos do trabalho (principal e secundário), delimitação, limitações e o delineamento desta pesquisa.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: é válido o uso da razão vazios/cimento na estimativa da resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

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

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal desta pesquisa é a verificação da validade do uso da razão vazios/cimento na estimativa da resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário deste trabalho é a avaliação da influência isolada de cada uma das variáveis de interesse, tais como, quantidade de cimento, teor de umidade e porosidade da mistura compactada sobre a resistência à compressão simples da mistura solo-cimento estudada.

2.3 HIPÓTESE

É hipótese do trabalho que a razão vazios/cimento é válida para estimativa da resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado.

2.4 DELIMITAÇÃO

O trabalho delimita-se ao uso de caulim como solo a ser cimentado.

2.5 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se a estudar:

- a) teores de cimento de 3 a 9%;
- b) teores de umidade entre 17 e 23%;
- c) pesos específicos variando de 1,4 a 1,6 g/cm³.

2.6 DELINEAMENTO

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

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) moldagem, cura e rompimento dos corpos de prova;
- c) análise dos resultados obtidos;
- d) análise final e conclusões.

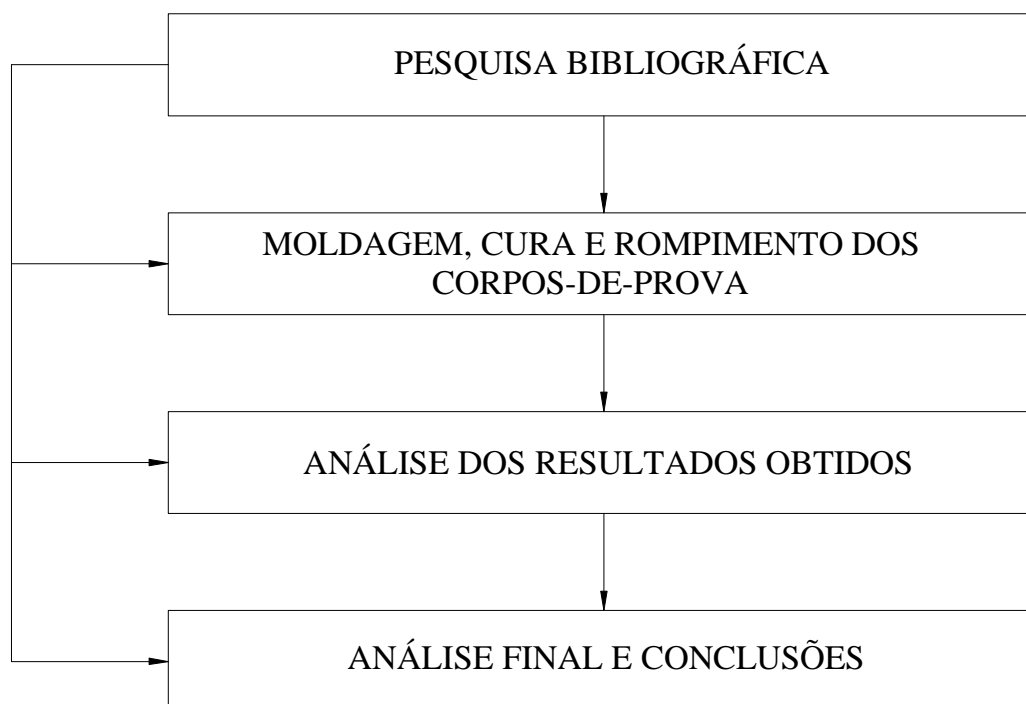


Figura 1: diagrama das etapas de pesquisa

A pesquisa bibliográfica foi direcionada à obtenção de informações sobre as misturas solo-cimento, materiais constituintes e métodos de dosagem existentes na literatura. Procurou-se também verificar o comportamento dos solos artificialmente cimentados quando submetidos a testes de resistência à compressão simples e quais são as variáveis que influenciam essa resistência.

Os corpos-de-prova foram moldados de acordo com a porosidade, teor de cimento e teor de umidade definidos, curados por 7 dias – um dos quais imerso em água para reduzir os efeitos provocados pela sucção – e então rompidos para verificar a resistência à compressão simples. Em parte dos CP, após o ensaio de resistência à compressão simples foi realizado o ensaio de sucção a fim de verificar se o processo de imersão dos corpos-de-prova em água foi eficaz.

A análise dos resultados obtidos visou verificar a consistência dos dados obtidos a partir da ruptura dos corpos de prova. Nos casos em que foi necessário, ou seja, os resultados encontrados foram discrepantes ou verificou-se algum erro experimental, os ensaios foram repetidos nesta etapa.

A última etapa trata da análise final e conclusões, na qual se pretendeu validar a razão vazios/cimento como estimativa de resistência para o caulim artificialmente cimentado. Também foi avaliada a influência de parâmetros, tais como, teor de cimento, porosidade e teor de umidade, nos valores de resistência à compressão simples da mistura solo-cimento estudada.

3 VISÃO GERAL SOBRE AS MISTURAS SOLO-CIMENTO

Diferentes autores denominam as misturas solo-cimento de formas diferentes: 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, mas, neste trabalho, essas denominações são usadas indistintamente.

Pela definição da norma NBR 12253 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992, p. 1), 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 ideia geral sobre os métodos de dosagem existentes.

3.1 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.

3.1.1 Solo

Nos itens subsequentes será discutido a influência das características do solo nas misturas solo-cimento e, as características do caulim, ao qual é dado ênfase visto ser o objeto de estudo desta pesquisa.

3.1.1.1 Aspectos Gerais

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, p. 174), 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. A resistência é dependente do esqueleto cimentício que se forma em torno dos grumos.

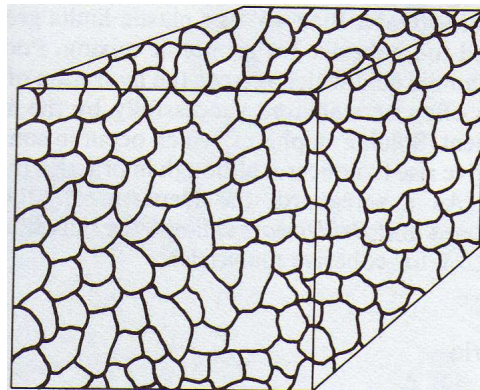


Figura 2: representação de uma mistura argila-cimento (LILLEY, 1975, p. 175)

Já solos não-coesivos, ainda de acordo com Lilley (1975, p. 174), têm um tamanho de grão superior aos grãos de cimento e por essa razão são envolvidos pela pasta de cimento (figura 3). Neste caso, a resistência depende dos pontos de contato entre os grãos de solo, os quais são ligados pela pasta de cimento.

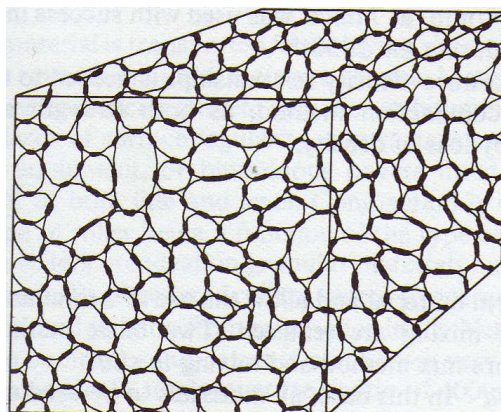


Figura 3: representação de uma mistura areia-cimento (LILLEY, 1975, p. 175)

Plaster e Noble¹ (1970 apud FOPPA, 2005, p. 28) 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, p. 2) 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.

3.1.1.2 Caulim

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

¹ PLASTER, R. W.; NOBLE, D. F. Reactions and Strength Development in Portland Cement-Soil Mixtures. **Highway Research Record: Soil Stabilization - Multiple Aspects**, Washington D.C., n. 315, p. 46-63, 1970.

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 a estabilização com cimento por apresentar um adequado desenvolvimento de resistência.

Feuerharmel (2000, p. 64) caracterizou o caulim denominado comercialmente de caulim rosa. A figura 4 mostra a curva granulométrica do caulim rosa, e a tabela 1 apresenta as propriedades físicas do material.

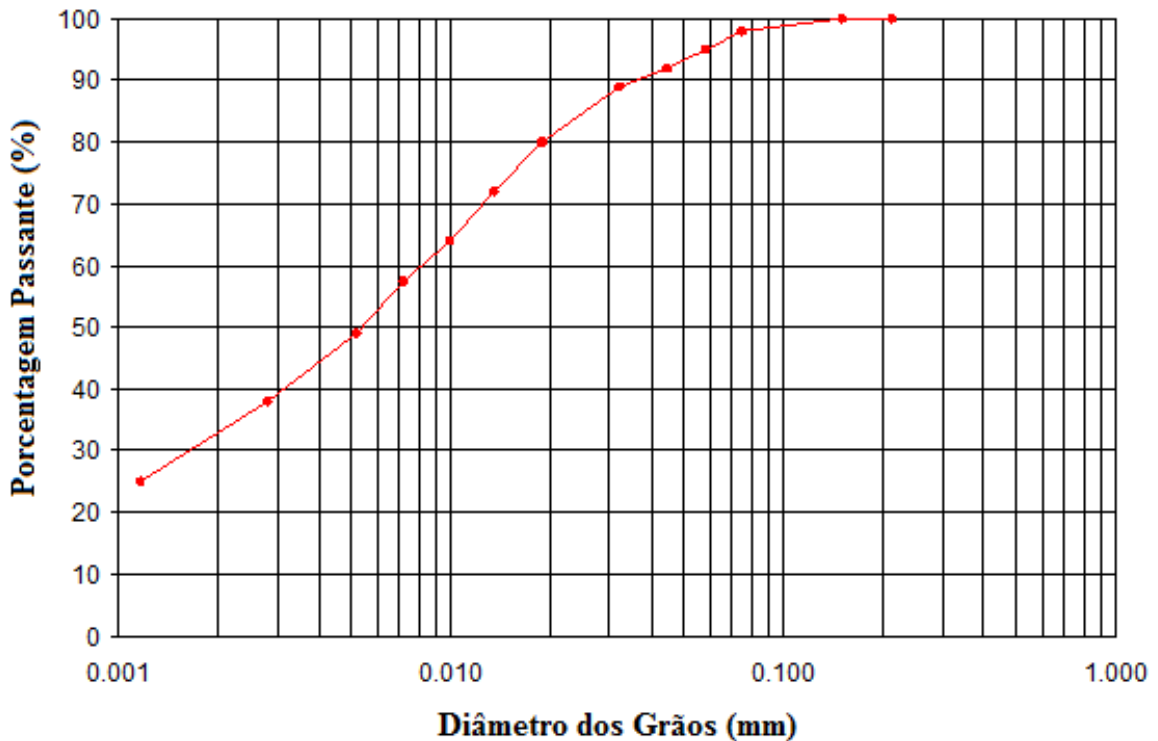


Figura 4: curva granulométrica do caulim
(adaptado de FEUERHARMEL, 2000, p. 65)

Tabela 1: propriedades físicas do caulim

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%

(fonte: FEUERHARMEL, 2000, p. 64)

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.

A figura 5 mostra a curva de saturação e as curvas de compactação (energia modificada) para o caulim e para uma mistura de caulim+7% de cimento. Percebe-se que a adição de cimento ao caulim praticamente não modifica o formato da curva de compactação, contudo, ela é levemente transladada na vertical, indicando que a massa específica aparente seca máxima da mistura caulim-cimento é ligeiramente inferior a do caulim sem adições.

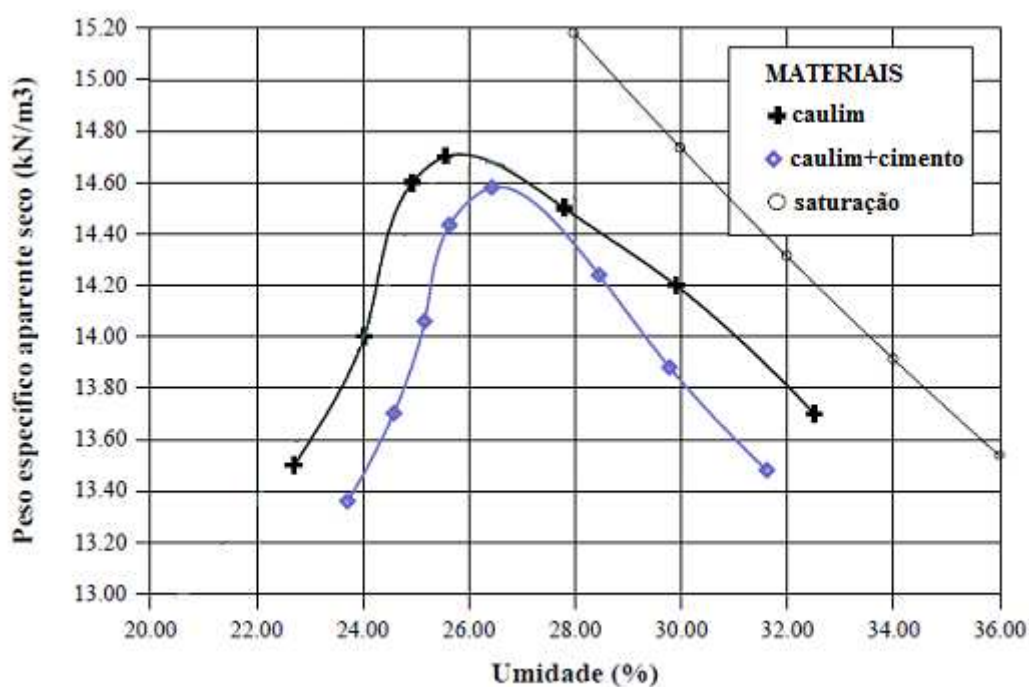


Figura 5: curvas de compactação do caulim, caulim + cimento (adaptado de FEUERHARMEL, 2000, p. 69)

3.1.2 Cimento

De acordo com Foppa (2005, p. 29) “[...] 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.

3.1.3 Água

Segundo Ingles e Metcalf (1972, p. 106), 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.

3.1.4 Materiais Deletérios

Para Croft² (1967 apud FOPPA, 2005, p. 28) 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, p. 106). Outra restrição são solos podzólicos, pois estes contêm pequenas quantidades de ácido húmico, o que retarda a hidratação do cimento Portland.

3.2 DOSAGEM

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, p. 2) 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, p. 119). Apesar dos testes de durabilidade serem de difícil correlação com a resistência faz sentido que quanto

² CROFT, J. B. The influence of Soil Mineralogical Composition on Cement Stabilization. **Geotéchnique**, London, v. 17, p. 119-135, 1967.

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, p. 119).

O quadro 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 1: indicativo da quantidade de cimento a ser utilizada conforme o tipo de solo (adaptado de INGLES; METCALF, 1972, p. 123)

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, p. 122) sugerem que em campo se utilize uma quantidade de cimento 1,66 vezes superior do que a encontrada em laboratório.

Larnach³ (1960 apud CRUZ, 2008, p. 45) em seu trabalho utilizou uma areia fina, limpa e mal graduada combinada com uma fração argila pulverizada na proporção de 9:1. Foppa (2005) e Lopes Junior (2007) utilizaram arenito Botucatu e arenito Botucatu com basalto pulverizado, respectivamente, em suas pesquisas.

³ LARNACH, W. J. Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strength of Soil-cement Mixtures. **Civil Engineering and Public Works Reviews**, London, v. 55, n. 648, p. 903-905, 1960.

Larnach⁴ (1960 apud CRUZ, 2008, p. 45) sugeriu a equação 1, correlacionando a resistência à compressão com um fator vazios/cimento:

$$S=5600/(V/C)^{1,54} \quad \text{(equação 1)}$$

Onde:

S = a resistência à compressão simples;

V = volume de vazios (água + ar);

C = volume de cimento.

O uso de um fator vazios/cimento ao invés de água/cimento, como seria utilizado no caso da tecnologia dos concretos, é explicado por Larnach⁵ (1960 apud FOPPA, 2005, p. 40):

[...] como a compactação em solos ou solo-cimento nunca consegue expulsar completamente o ar do sistema solo-água-ar ou solo-cimento-água-ar, a resistência não pode ser correlacionada com a relação água/cimento, pois esta só se aplica a materiais onde o ar foi totalmente expulso e os vazios existentes estão preenchidos por água.

Os resultados experimentais obtidos por Foppa (2005) e Lopes Junior (2007) corroboram com a afirmação de Larnach⁶ (1960 apud FOPPA, 2005, p. 40). A figura 6 – relação água/cimento (a/c_i) *versus* resistência à compressão simples (q_u) – demonstra que q_u não pode ser relacionada com a/c_i conforme previsto. Os resultados mostram que o comportamento da resistência à compressão simples em relação ao fator água/cimento modifica bruscamente para diferentes teores de cimento (C).

⁴ op. cit.

⁵ op. cit.

⁶ op. cit.

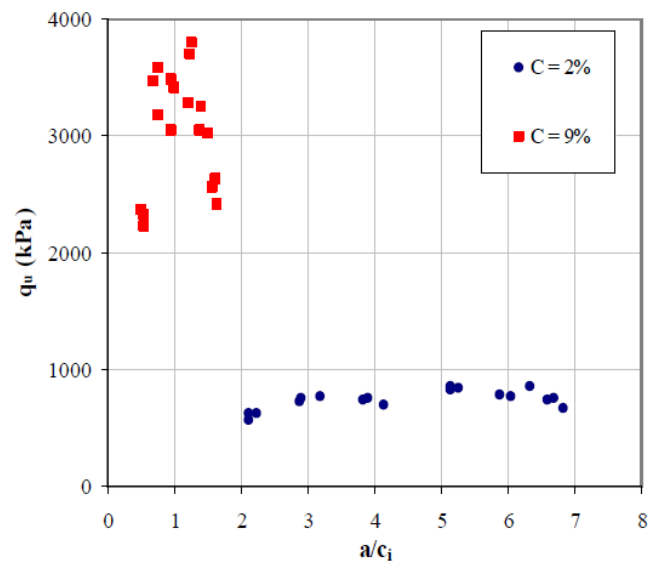


Figura 6: relação água/cimento *versus* resistência à compressão simples (FOPPA, 2005, p. 86)

Foppa (2005), estudando teores de cimento variando entre 1 e 12%, conclui que um método de dosagem baseada no fator vazios/cimento (figura 7) é mais coerente, pois propicia um melhor ajuste da curva aos pontos experimentais. Cabe ressaltar que os pontos plotados na figura 7 possuem o mesmo teor de umidade de moldagem ($\omega=10\%$)

O autor definiu o fator vazios/cimento de maneira uma pouco diferente de Larnach⁷ (1960 apud CRUZ, 2008, p. 45), expressou a quantidade de vazios em termos de porosidade da mistura compactada e o teor de cimento é volumétrico (η/C_{iv}). Ajustou, neste fator, a potência 0,28 para diminuir a dispersão.

⁷ LARNACH, W. J. Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strength of Soil-cement Mixtures. **Civil Engineering and Public Works Reviews**, London, v. 55, n. 648, p. 903-905, 1960.

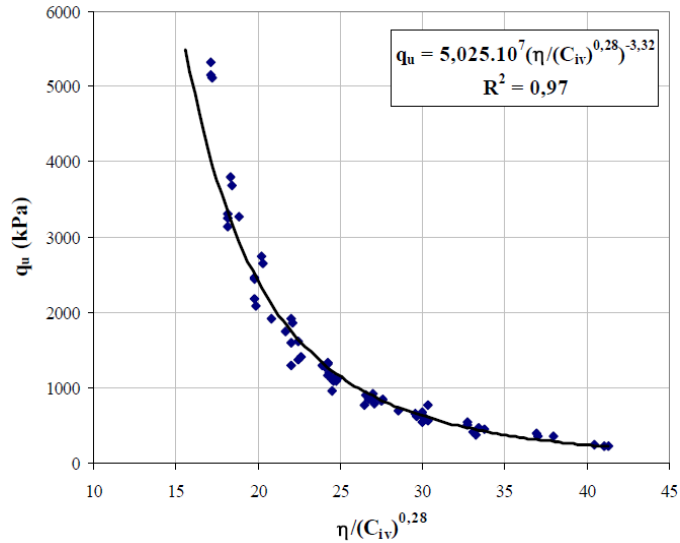


Figura 7: fator vazios/cimento *versus* q_u (FOPPA, 2005, p. 126)

Lopes Junior (2007), utilizando teores de cimento variando de 3 a 11%, encontrou resultados semelhantes aos de Foppa (2005). Também empregou o fator η/C_{iv} para expressar seus resultados (figura 8). Contudo para o ajuste da curva utilizou um expoente de 0,35, diferente do utilizado por Foppa (2005).

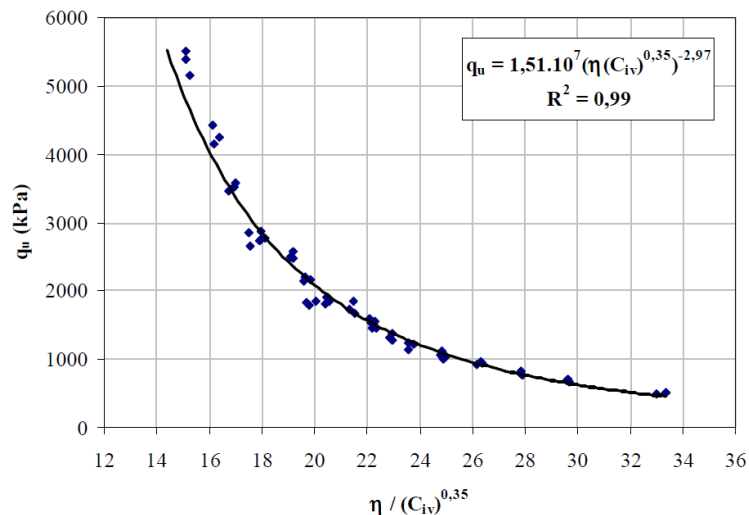


Figura 8: $\eta/(C_{iv})^{0,35}$ *versus* resistência à compressão simples (LOPES JUNIOR, 2007, p. 115)

Segundo Cruz (2008, p. 49) a diferença no valor dos expoentes de η/C_{iv} pode ser função do tipo de solo e de cimento utilizados. O que é coerente visto que Foppa (2005) e Lopes Junior (2007) utilizaram materiais diferentes em seus trabalhos.

A relação η/C_{iv} tem se mostrado como um parâmetro eficiente na determinação da resistência à compressão simples, visto que os pontos experimentais apresentados nas figuras 7 e 8 ajustam-se bem as curvas. Outros trabalhos (CONSOLI et al., 2007; CONSOLI et al., 2009) apresentam resultados similares, corroborando para a adoção do fator η/C_{iv} como parâmetro de dosagem.

4 COMPORTAMENTO DO SOLO-CIMENTO

Os solos cimentados exibem um comportamento mecânico complexo, que é influenciado por diversos fatores, dentre os quais se destacam a quantidade de cimento adicionada, a porosidade da mistura e o teor de umidade. Na presente revisão bibliográfica, visa-se o comportamento mecânico das misturas solo-cimento em relação à resistência à compressão simples. Ela é uma das medidas mais comuns da efetividade da estabilização conhecida, além de ser um ensaio simples e barato.

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.⁸, 2003 apud CONSOLI et al., 2007, p. 199). 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.⁹, 1981 apud CONSOLI et al., 2007, p. 199; CONSOLI et al.¹⁰, 2001 apud CONSOLI et al. 2007, p. 199; DASS et al.¹¹, 1994 apud CONSOLI et al., 2007, p. 199; INGLES; METCALF, 1972).

A figura 9 – $\eta/(C_{iv})^{0,28}$ versus q_u – mostra os resultados obtidos por Consoli et al. (2007) que utilizaram arenito 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. Foppa (2005, p. 126), figura 7 e Lopes Junior (2007, p. 115), figura 8, obtiveram resultados similares.

⁸ CONSOLI, N. C.; VENDRUSCOLO, M. A.; PRIETTO, P. D. M. Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 129, n. 1, p. 96-101, 2003.

⁹ CLOUGH, G. W.; RAD, N. S.; BACHUS, R. C.; SITAR, N. Cemented sands under static loading. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, New York: ASCE, v. 107, n. GT6, p. 799-817, 1981.

¹⁰ CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; CARRARO, J. A. H.; HEINECK, K. S. Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime-fly ash mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 127, n. 9, p. 774-782, 2001.

¹¹ DASS, R. N.; YEN, S. C.; DASS, B. N.; PURI, V. K.; WRIGHT, M. A. Tensile stress-strain characteristics of lightly cemented sand. **Geotechnical Testing Journal**, Philadelphia: ASTM, v. 17, n. 3, p. 305-314, 1994.

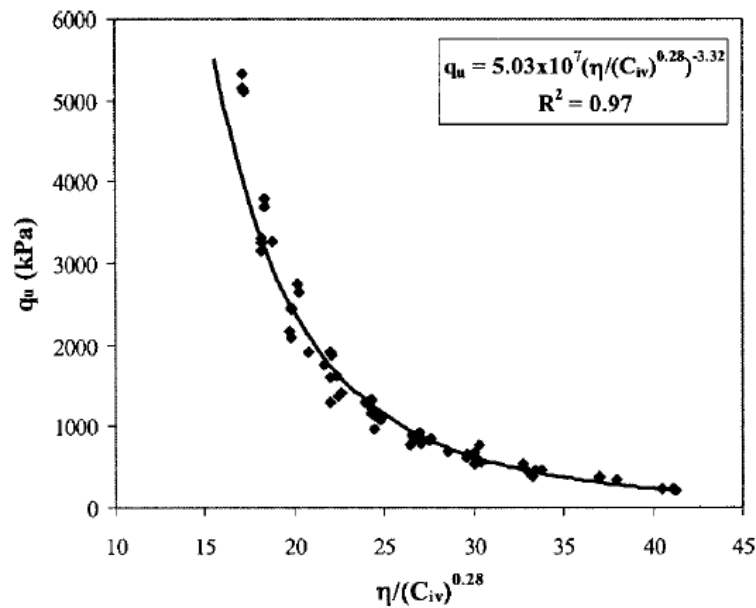


Figura 9: $\eta/(C_{iv})^{0.28}$ versus resistência à compressão simples (CONSOLI et al., 2007, p. 202)

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.

4.1 POROSIDADE

A porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência à compressão simples dos solos artificialmente cimentados. Felt¹² (1955 apud FOPPA, 2005, p. 37) 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 10 mostra os resultados encontrados por Foppa (2005). Observa-se que pequenas variações na porosidade, principalmente em corpos-de-prova com teores de cimento maiores,

¹² FELT, E. J. Factors Influencing Physical Properties of Soil-cement Mixtures. **Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association**: Bulletin D5. Authorized Reprint from Bulletin 108 of the Highway Research Board, 1955.

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.

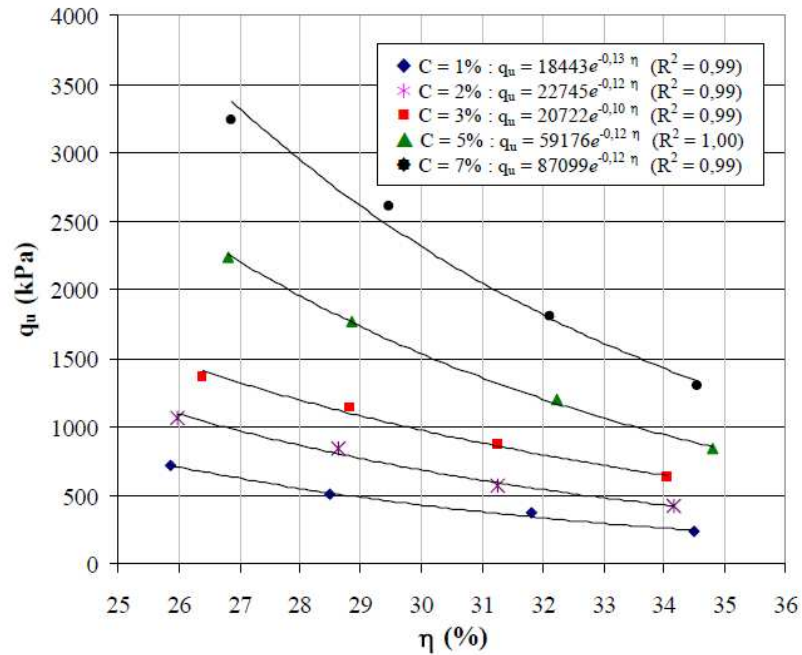


Figura 10: porosidade *versus* resistência à compressão simples (FOPPA, 2005, p. 84)

Segundo Clough et al.¹³ (1981 apud FOPPA, 2005, p. 112), 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.

4.2 TEOR DE UMIDADE

A quantidade de água necessária nas misturas solo-cimento é função da necessidade à compactação e não à hidratação do cimento. Foppa (2005, p. 85) observou que, utilizando espécimes com o mesmo peso específico, há um aumento da resistência com o aumento do teor de umidade até um valor a partir do qual a resistência decresce (figura 11).

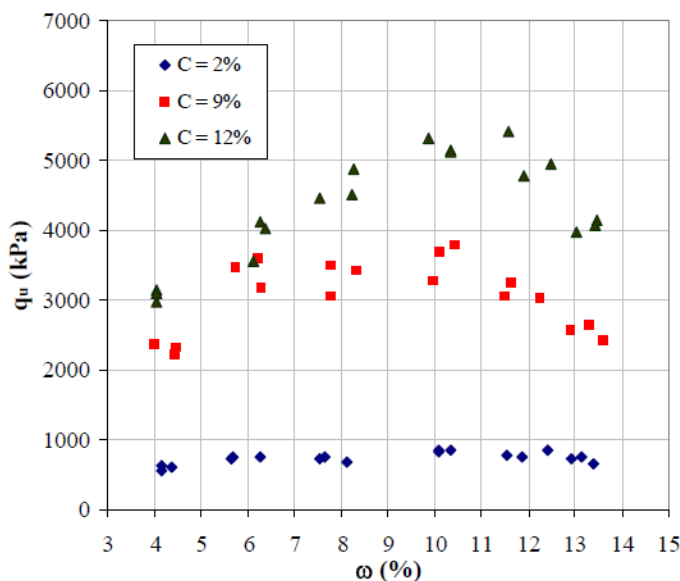


Figura 11: teor de umidade *versus* resistência à compressão simples. (FOPPA, 2005, p. 86)

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.¹⁴ (1970 apud FOPPA, 2005, p. 37), 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 flocoado 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, p. 517). O que explicaria os resultados encontrados por Foppa (2005) e confirmaria a afirmação de Lightsey et al. (1970 apud FOPPA, 2005, p. 37).

¹³ CLOUGH, G. W.; RAD, N. S., BACHUS, R. C.; SITAR, N. Cemented sands under static loading. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, New York: ASCE, v. 107, n. GT6, p. 799-817, 1981.

¹⁴ LIGHTSEY, G. R.; ARMAN, A.; CALLIHAN, C. D. Changes in the Characteristics of Cement-stabilized Soils by the Additions of Excess Compaction Moisture. **Highway Research Record: Soil Stabilization: Multiple Aspects**. Washington D.C., n. 315, p. 36-45, 1970.

Para Mitchell¹⁵ (1976 apud FOPPA, 2005, p. 118), a estrutura do solo é dependente também do tamanho dos grãos. Em solos argilosos e siltosos podem-se observar estruturas floculadas, figura 12a, e estruturas dispersas, figura 12b. Já em solos arenosos e siltosos observa-se um arranjo granular, figura 12c, com maior ou menor grau de compactidade.

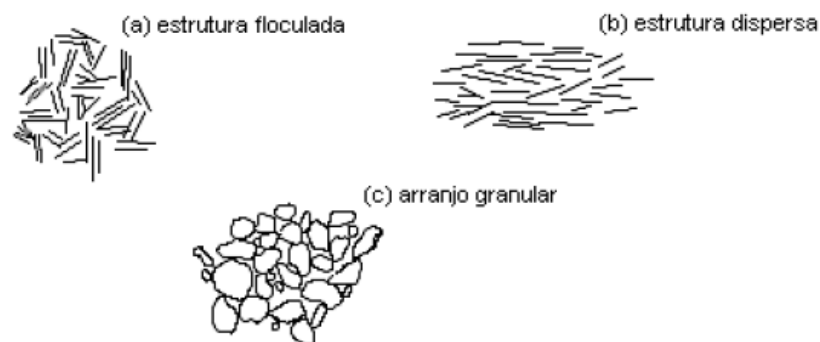


Figura 12: diferentes estruturas de solo
(MITCHELL, 1976 apud FOPPA, 2005, p. 118)

4.3 TEOR DE CIMENTO

A quantidade de cimento presente nas misturas solo-cimento afeta tanto sua resistência quanto durabilidade. Ingles e Metcalf (1972, p. 103) afirmam que a adição de pequenas quantidades de cimento, até 2%, 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.¹⁶ (1967 apud FOPPA, 2005, p. 105) sugerem que a cimentação pode ser imaginada com a combinação de dois tipos de ligações. Ligações mecânicas entre o cimento

¹⁵ MITCHELL, J. K.. **Fundamental Soil Behavior**. New York: John Wiley, 1976.

¹⁶ 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, p. 195-208, 1967.

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, p. 200; 2009, p.114) 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) e Lopes Junior (2007) chegaram aos mesmos resultados (figura 13).

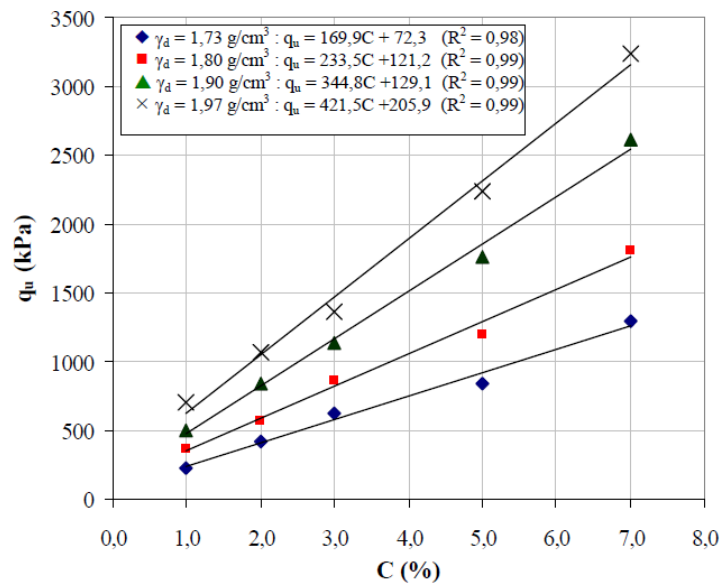


Figura 13: teor de cimento *versus* resistência à compressão simples (FOPPA., 2005, p. 82)

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.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa experimental teve por objetivo validar a razão vazios/cimento como estimativa de resistência à compressão simples para o 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 compressão simples.

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

As variáveis investigadas são:

- a) densidade da mistura solo-cimento, expressa através da porosidade (η) ou da massa específica aparente seca (γ_d) 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;
- d) relação vazios/cimento (V_v/V_{ci}), definida como sendo o volume absoluto de vazios (V_v) dividido pelo volume absoluto de cimento (V_{ci}), presente na mistura de solo-cimento compactada.

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 deformação nos ensaios de compressão simples, 1,14 mm por minuto.

As variáveis de resposta são:

- a) resistência à compressão simples (q_u);
- b) sucção matricial (S).

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

5.1 MATERIAIS

5.1.1 Solo

No presente trabalho o solo utilizado foi o caulim rosa (figura 14). Este solo trata-se de um silte de baixa plasticidade cuja caracterização foi realizada por Feuerharmel (2000) e encontra-se no capítulo de revisão bibliográfica.



Figura 14: caulim rosa

5.1.2 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 15.

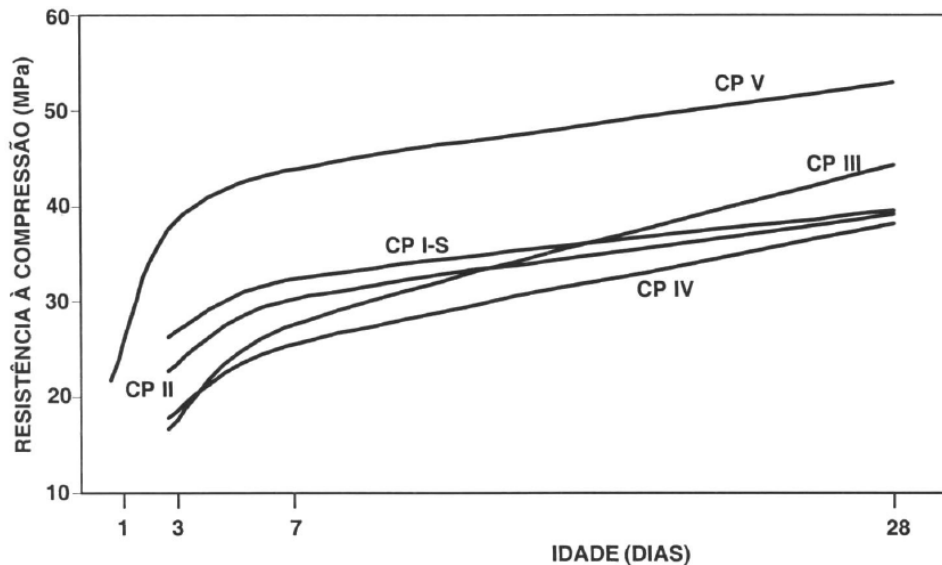


Figura 15: evolução média da resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002)

A obtenção de 80% da resistência final aos 7 dias permitiu que os ensaios de compressão simples fossem realizados nesta idade. Além disso, o avançado estágio de hidratação nesta fase tende a gerar uma menor dispersão nos resultados (LOPES JUNIOR, 2007, p. 62).

O cimento foi armazenado em potes de 4 kg conforme mostra a figura 16, para evitar carbonatação do mesmo.



Figura 16: potes de cimento de 4 kg

5.1.3 Água

No processo de moldagem dos corpos-de-prova foi utilizada água do sistema de abastecimento público. O uso desta foi considerado satisfatório visto que, visa reproduzir as condições encontradas em campo.

5.2 MÉTODOS

Os métodos utilizados no presente trabalho são detalhados a seguir.

5.2.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Nesta pesquisa foram utilizados corpos-de-prova com 10 cm de altura e 5 cm 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 6457/86¹⁷. Retirou-se duas cápsulas da mistura solo-cimento devidamente pesadas as quais foram colocadas em estufa a 100 graus Celsius por 24 horas e, posteriormente pesadas novamente. O teor de umidade higroscópica foi obtido através da equação 2.

$$\omega = \frac{P_{\text{úmido}} - P_{\text{seco}}}{P_{\text{seco}} - P_{\text{cápsula}}} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

ω = teor de umidade;

$P_{\text{úmido}}$ = peso da cápsula + solo úmido;

P_{seco} = peso da cápsula + solo seco;

$P_{\text{cápsula}}$ = peso da cápsula.

O molde foi lubrificado com óleo a fim de evitar que o material grude 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

¹⁷NBR 6457/86: Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

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 17).



Figura 17: 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 os 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 mátrica. 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% do 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.

5.2.2 Ensaio de resistência à compressão simples

Para os ensaios de resistência à compressão simples foi utilizada uma prensa automática (figura 18) 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 deformação utilizada para realização dos ensaios foi da ordem de 1,14 mm por minuto. O procedimento de ensaio de compressão simples seguiu a norma NBR 12025/90¹⁸.



Figura 18: ensaio de compressão simples

¹⁸NBR 12025/90: Solo-Cimento: Ensaio de resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos.

Como critério de aceitação do ensaio de resistência à compressão simples 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 simples são mostrados na figura 19 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 localizados ao longo de três 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 $\omega=23\%$.

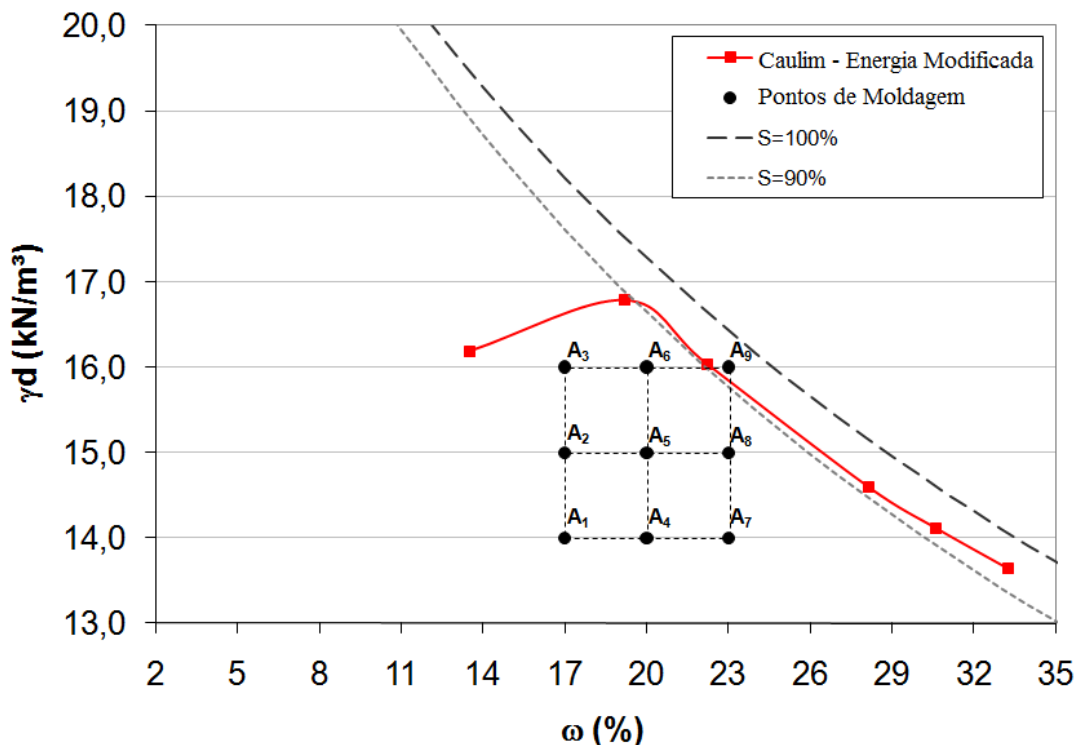


Figura 19: curva de compactação (energia Proctor Modificada) do caulim e pontos de moldagem

O quadro 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 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, três corpos-de-prova foram moldados para cada ponto.

5.2.3 Medidas de Sucção

A sucção medida foi a matricial, ou seja, a proveniente das forças capilares existentes no interior da amostra. Foi utilizada a técnica do papel filtro, o qual se baseia no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso, com deficiência de umidade, é posto em contato com um papel filtro, com umidade menor. O papel passa a absorver água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de sucção.

A técnica do papel filtro foi empregada por ser simples e de baixo custo. Foi utilizado o papel filtro marca Whatman N° 42 e as equações de equilíbrio apresentadas por Chandler et al. (1992) e recomendadas por Marinho (1995):

a) para umidades do papel filtro $\omega > 47\%$, $S = 10^{(6,05-2,48\log w)}$;

b) para umidades do papel filtro $\omega \leq 47\%$, $S = 10^{(4,84-0,0622w)}$.

Onde:

S = sucção em kPa;

w = teor de umidade do papel filtro.

O procedimento para realização do ensaio é descrito a seguir. Após a realização do ensaio de compressão simples, dos três CP com mesmas características (teor de umidade, teor de cimento e massas específicas iguais) foi escolhido para medição da sucção o que apresentou o valor de resistência intermediário.

Separou-se, então, uma parte do CP, preferencialmente do meio deste, para realização do ensaio de sucção. Dois pedaços de papel filtro, com área total de aproximadamente 2cm², foram colocados na parte superior do pedaço retirado do CP, sem sobreposição (figura 20). O manuseio do papel filtro foi todo realizado com uma pinça metálica, a fim de evitar a contaminação do papel. Após, cada conjunto de papel filtro + CP foi protegido com filme plástico de PVC e selado com fita crepe para garantir que o conjunto não trocasse umidade com o ar.



Figura 20: corpo-de-prova com o papel filtro
(DALLA ROSA, 2009)

Os pedaços de CP embrulhados e identificados foram então colocados em uma caixa de isopor por um período de 7 dias para que o equilíbrio de sucção entre o solo e o papel filtro fosse alcançado. Após esse período de 7 dias, o papel filtro foi removido do CP e colocado imediatamente em um pote plástico com tampa, para evitar que o mesmo trocasse umidade com o ar. O conjunto papel filtro-pote foi pesado utilizando uma balança com resolução de 0,0001g.

Depois da pesagem o papel filtro foi retirado do recipiente plástico e colocado em uma cápsula metálica. Esta então foi levada à estufa (60 graus Celsius) por um período de 48 horas. Após o período na estufa, o papel filtro foi colocado novamente no mesmo recipiente plástico e o peso foi novamente anotado.

De posse dessas informações, foi possível calcular o teor de umidade do papel filtro. Com esses dados é possível entrar nas equações de calibração e calcular o valor da sucção mátrica.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados desta pesquisa são apresentados a seguir.

6.1 SUCCÃO

O processo de submergir os corpos-de-prova por 24 horas antes do ensaio de resistência à compressão simples mostrou-se satisfatório para assegurar um alto grau de saturação. O grau de saturação médio medido foi de 90%, obtido para os CP após a imersão, independentemente de porosidade, teor de cimento e teor de umidade de moldagem. Os valores de sucção foram baixos, variando entre 1 e 7% da resistência à compressão simples.

Essas medidas foram feitas nos corpos-de-prova após a realização do ensaio de resistência à compressão simples e, portanto, tendem a superestimar o valor real, pois os CP perdem uma parcela de umidade entre o início do ensaio de compressão simples e o momento em que a medida da sucção é realizada. Dado os pequenos valores de sucção mátrica medida nos corpos-de-prova, o efeito da não saturação dos CP foi desconsiderado

6.2 EFEITO DA POROSIDADE

A figura 21 mostra como a porosidade afeta a resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado considerando um teor de umidade de 20% e teores de cimento de 3, 5, 7 e 9%. Verifica-se que uma função exponencial proporciona um bom ajuste entre a resistência à compressão simples (q_u) e a porosidade (η) para todos os teores de cimento estudados. A resistência à compressão simples diminui com o aumento da porosidade para todas as misturas estudadas. O efeito benéfico da redução da porosidade em solos

artificialmente cimentados foi reportado também por outros pesquisadores como Clough et al.¹⁹ (1981 apud FOPPA, 2005) e Foppa (2005).

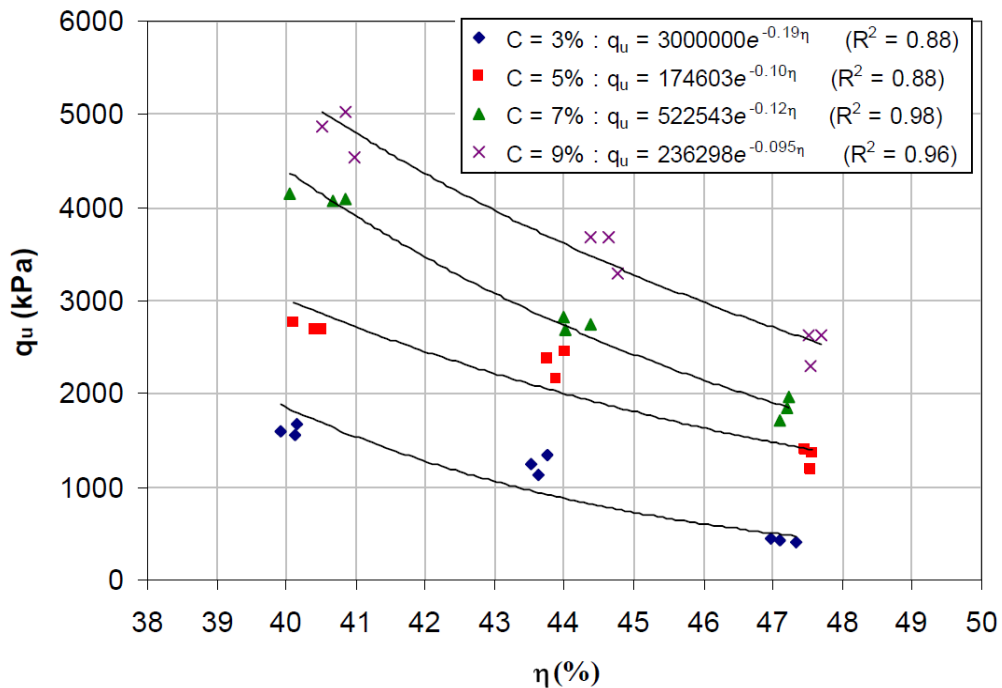


Figura 21: resistência à compressão simples (q_u) versus a porosidade (η) para a mistura solo-cimento com C = 3, 5, 7 e 9% e teor de umidade de 20%

A q_u versus η , para um teor de cimento de 7% e considerando três diferentes teores de umidade ($\omega = 17, 20$ e 23%) é apresentada na figura 22. Observa-se que para as porosidades estudadas e um teor de cimento de 7% a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova compactados com teor de umidade superiores ($\omega = 23\%$) tem maior resistência que os corpos-de-prova com teor de umidade de 20%, os quais possuem resistência superior aos CP moldados com teor de umidade de 17%. Essa diferença nos valores de resistência possivelmente está relacionada com diferentes estruturas formadas pela mistura solo-cimento durante a compactação.

¹⁹ CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, N. S. Cemented sands under static loading. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, New York: ASCE, v. 107, n. GT6, p. 799-817, 1981.

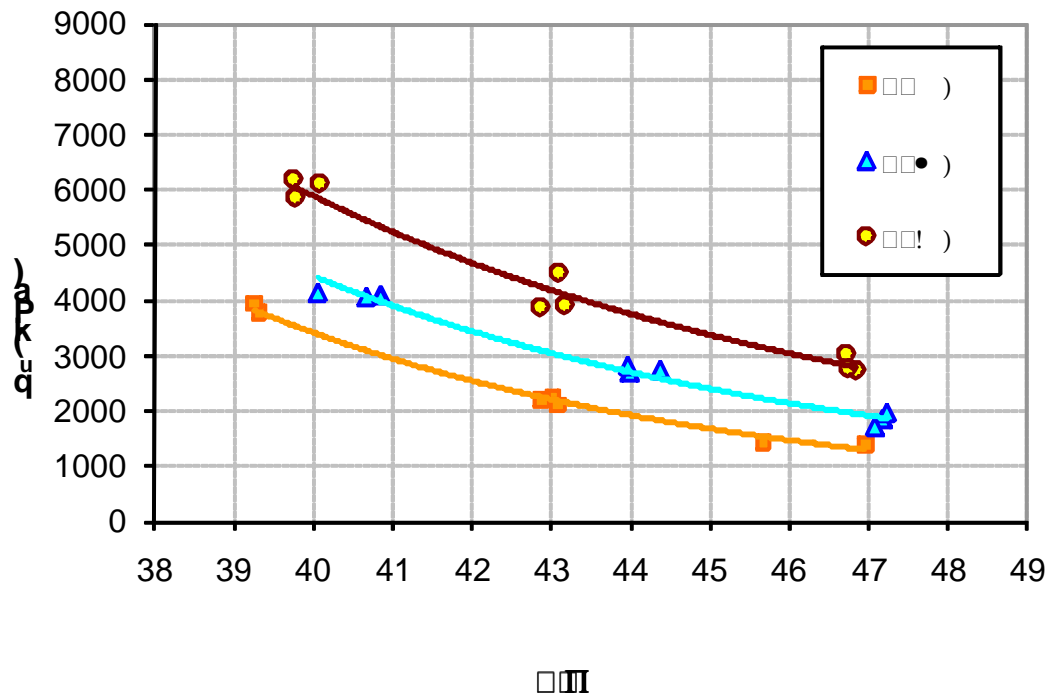


Figura 22: resistência à compressão simples (q_u) versus porosidade (η), para teor de cimento de 7% e teores de umidade de moldagem de 17, 20 e 23%

Os resultados complementares encontram-se no Apêndice 1 – Efeito da Porosidade.

6.3 EFEITO DO TEOR DE CIMENTO

A variação da resistência à compressão simples (q_u) do caulim com o teor de cimento, considerando diferentes massas específicas aparentes secas ($\gamma_d = 14, 15$ e 16 kN/m^3) e teor de umidade (ω) de 20% é apresentada na figura 23. Uma função linear ajusta-se bem a relação q_u versus C para o solo estudado.

Verifica-se que independentemente da γ_d da mistura solo-cimento estudada, a resistência aumenta com o aumento do teor de cimento, porém a taxa de crescimento da resistência é variável de acordo com massa específica aparente seca. Pode-se observar o mesmo efeito na figura 24 que relaciona a q_u com C para um teor de umidade de 23%. Isso demonstra que a cimentação é mais efetiva para valores mais altos de massa específica aparente seca.

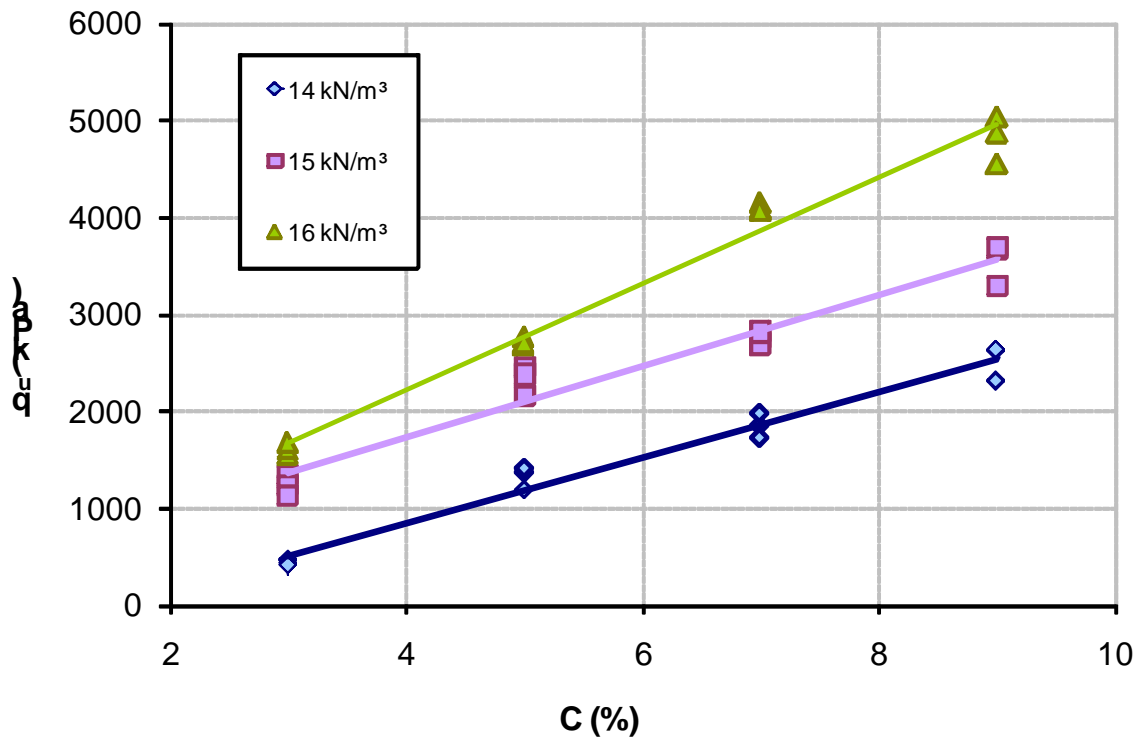


Figura 23: variação da resistência à compressão simples (q_u) com o teor de cimento (C) para $\omega = 20\%$

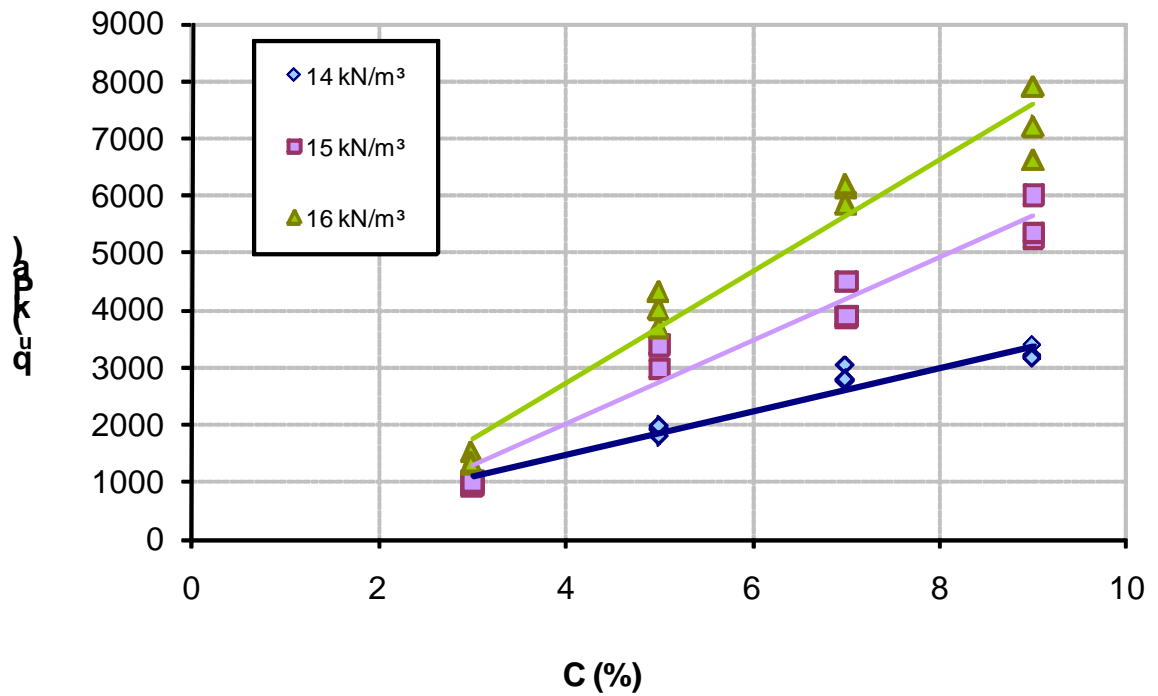


Figura 24: variação da resistência à compressão simples (q_u) com o teor de cimento (C) para $\omega = 23\%$

A figura 25 compara q_u versus C , com uma massa específica aparente seca de $16,0 \text{ kN/m}^3$ e teores de umidade de 17, 20 e 23%. Pode-se observar que para os teores de cimento estudados e uma dada massa específica aparente seca, q_u aumenta com o aumento do teor de umidade – levando em consideração os teores de umidade estudados. Uma possível explicação para tais resultados pode ter relação com a estrutura criada durante a compactação. Para um dado teor de umidade uma estrutura única é formada durante a compactação e ligações cimentícias conectam cada estrutura, de acordo com o teor de umidade e a massa específica aparente seca de cada corpo-de-prova no momento da compactação.

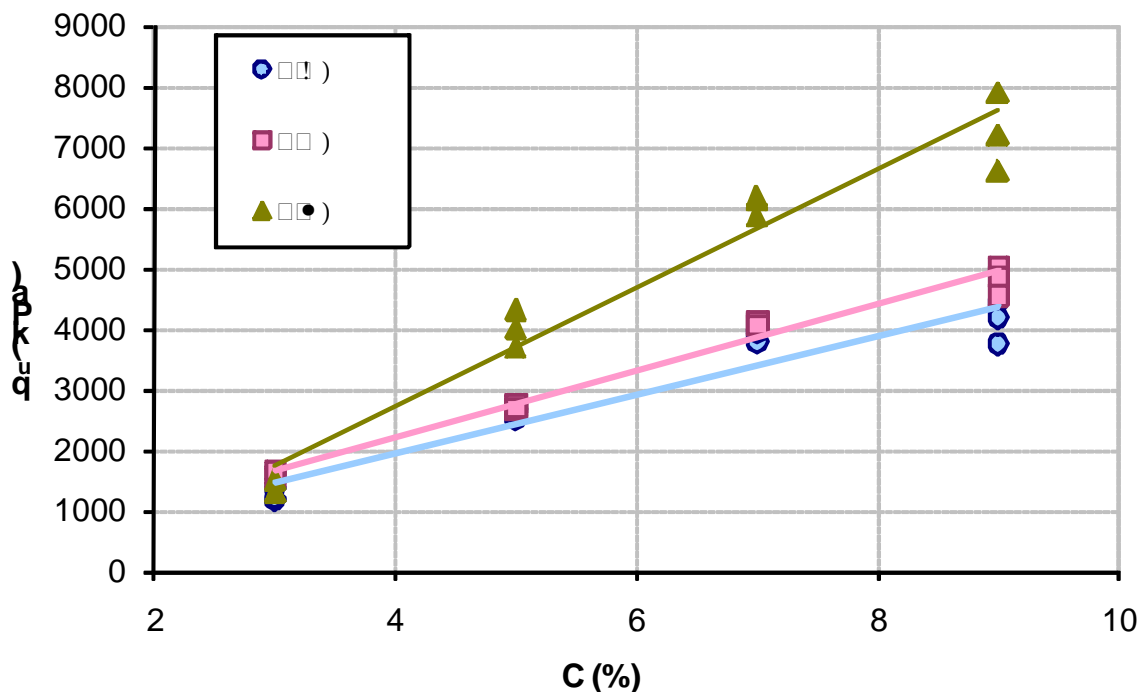


Figura 25: resistência à compressão simples (q_u) versus teor de cimento (C) com uma $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ e teores de umidade de 17, 20 e 23%

Os resultados complementares encontram-se no Apêndice 2 – Efeito do Teor de Cimento.

6.4 TEOR DE UMIDADE

A figura 26 mostra a resistência à compressão simples (q_u) versus o teor de umidade (ω) para uma massa específica aparente seca (γ_d) de 14 kN/m^3 . Uma reta oferece um bom ajuste aos

pontos. Observa-se que para mesmos valores de massa específica aparente seca e teores de cimento iguais a resistência é superior para teores de umidade mais elevados, levando em consideração os teores de umidade estudados.

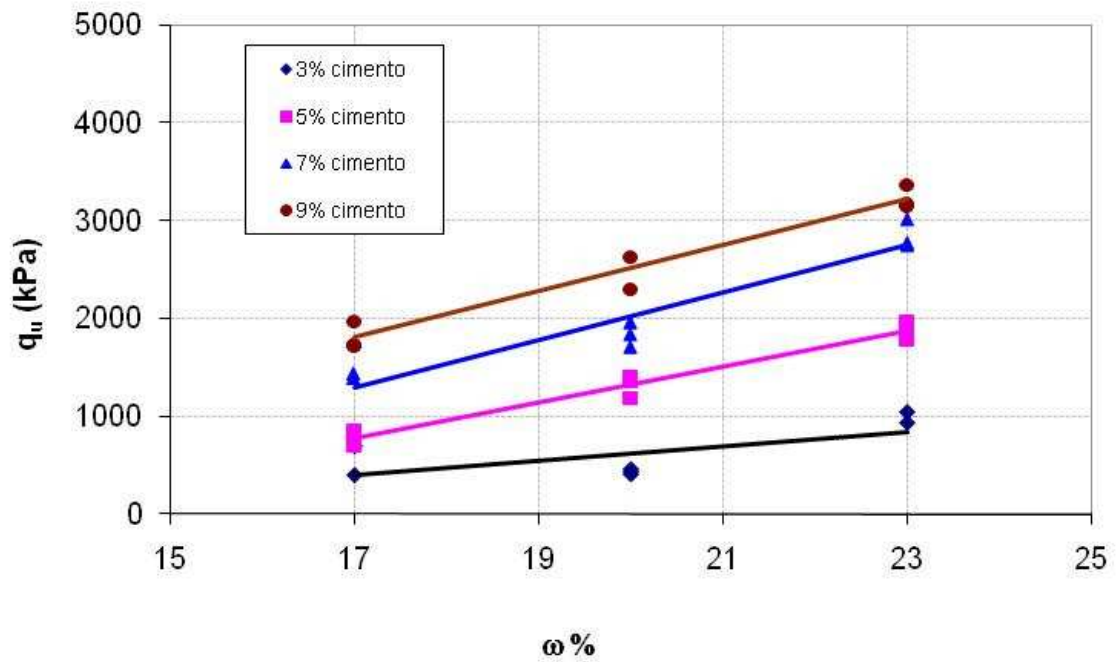


Figura 26: resistência à compressão simples (q_u) versus teor de umidade (ω) com um $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$

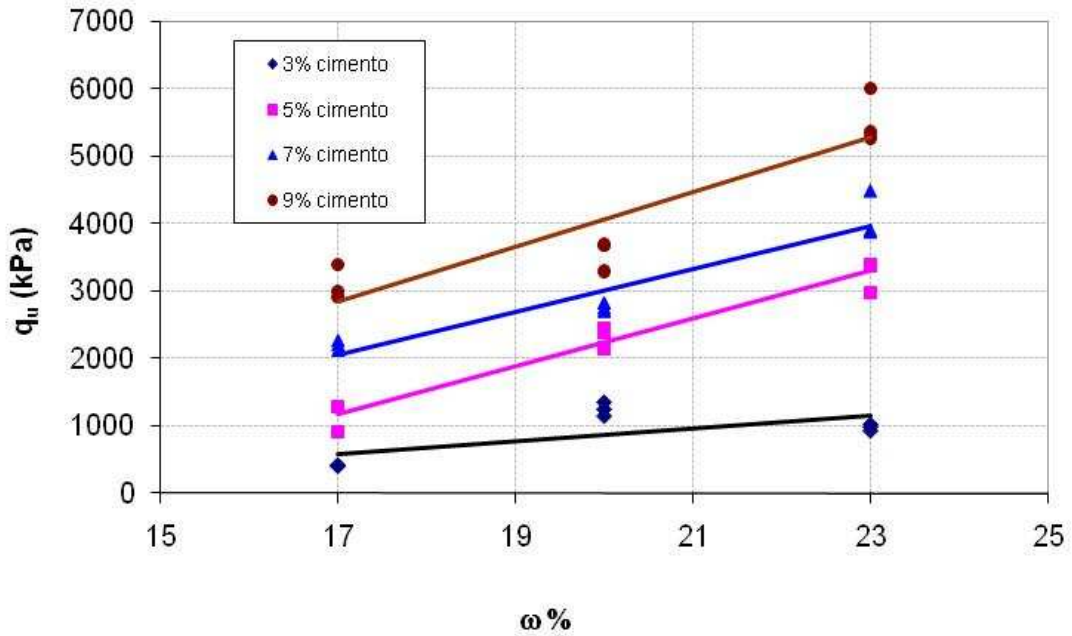


Figura 27: resistência à compressão simples (q_u) versus teor de umidade (ω) com um $\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$

A figura 27 – resistência à compressão simples (q_u) versus teor de umidade (ω) para uma massa específica aparente seca de 15 kN/m^3 – apresenta resultados similares aos da figura 26, mostrando que a q_u aumenta para corpos-de-prova moldados com as mesmas características, porém com teores de umidade diferentes, para os teores de umidade estudados.

Os resultados encontrados diferem dos apresentados por Foppa (2005), que demonstrou que a resistência cresce até um determinado teor de umidade a partir do qual tende a decrescer. Essa diferença nos resultados pode ser derivada do tipo de solo estudado, visto que a presente pesquisa utilizou um solo siltoso enquanto Foppa (2005) obteve seus resultados utilizando arenito. Ou ainda, pode ser resultado da escolha dos teores de umidade utilizados nesta pesquisa, englobando apenas os ω para os quais a q_u tende a crescer.

6.5 EFEITO DA RAZÃO VAZIOS/CIMENTO

Como visto nos resultados apresentados nas figuras 21 a 25 para um dado teor de umidade, a resistência à compressão simples (q_u) é dependente tanto da porosidade como do teor de cimento da mistura. Maiores valores de porosidade causam a redução de q_u enquanto maiores teores de cimento resultam em valores superiores de q_u . Os resultados desta pesquisa mostram a existência de uma relação entre a resistência à compressão simples (q_u) e a razão vazios/cimento (η/C_{iv}), para cada teor de umidade, sendo a razão η/C_{iv} definida pela equação 3.

$$\frac{\eta}{C_{iv}} = \frac{\text{porosidade}}{\text{teor} \cdot \text{volumétrico} \cdot \text{de} \cdot \text{cimento}} \quad (\text{equação 3})$$

A relação q_u versus η/C_{iv} demonstra que o fator η/C_{iv} agrega o efeito das duas variáveis (η e C_{iv}) em um único fator. Isso significa que η e $1/C_{iv}$ afetam de maneira separada q_u , e que o efeito sobre q_u resultando do aumento dos valores de porosidade pode ser contra balanceado pelo aumento no teor volumétrico de cimento, resultando em η/C_{iv} governando q_u .

A figura 28 apresenta a resistência à compressão simples como função da razão vazios/cimento (η/C_{iv}) para cada teor de umidade estudado ($\omega=17, 20$ e 23%), diferenciando ainda, os diferentes teores de cimento.

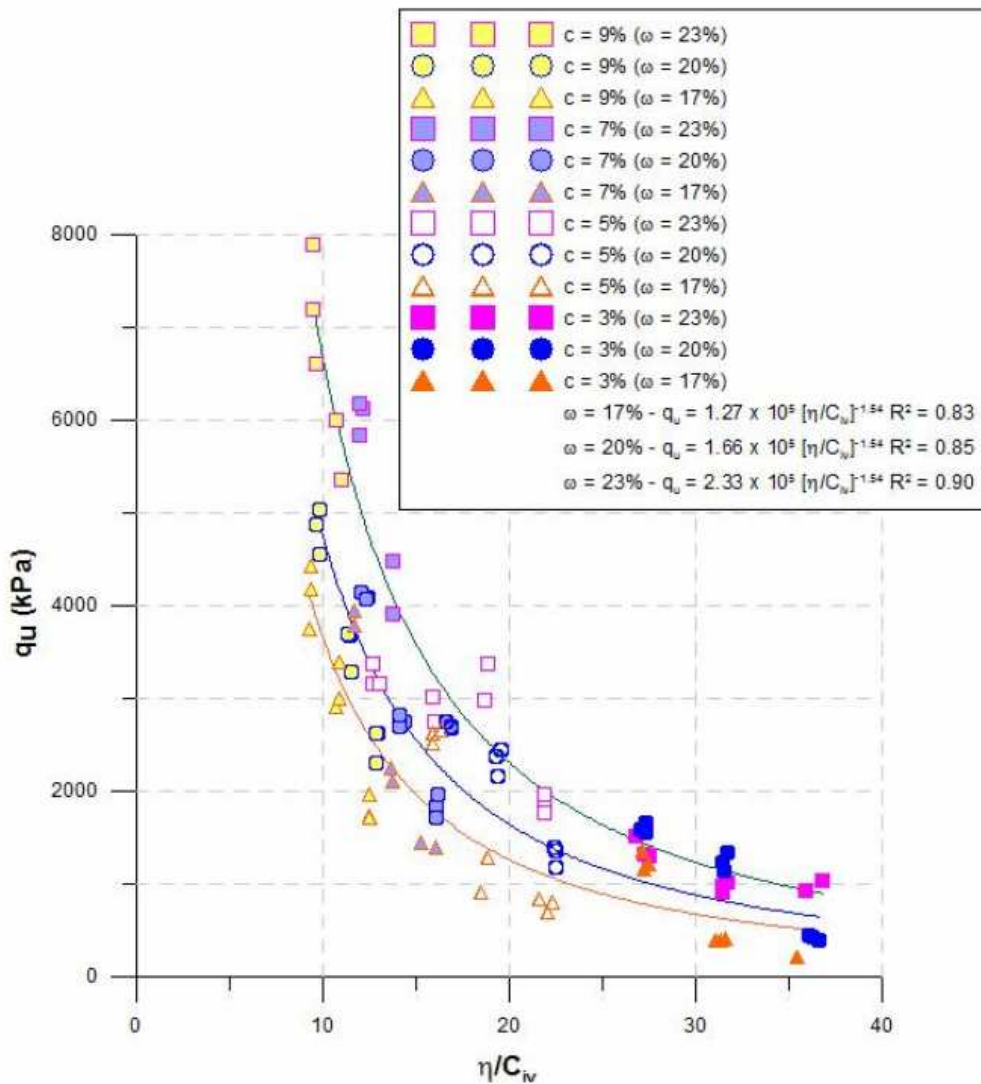


Figura 28: variação da resistência à compressão simples (q_u) com a relação vazios/cimento (η/C_{iv}), considerando todas as massas específicas aparentes secas e teores de cimento estudados, para teores de umidade de 17, 20 e 23%

As curvas exponenciais ajustadas para os três teores de umidade estudados apresentam uma boa concordância com os dados experimentais, possuindo os seguintes coeficientes de determinação:

- a) $R^2 = 0,83$ para $\omega = 17\%$ (equação 4);
- b) $R^2 = 0,85$ para $\omega = 20\%$ (equação 5);
- c) $R^2 = 0,90$ para $\omega = 23\%$ (equação 6).

$$q_u = 1,27 \cdot 10^5 \left[\frac{\eta}{C_{iv}} \right]^{-1,54} \quad (\text{equação 4})$$

$$q_u = 1,66 \cdot 10^5 \left[\frac{\eta}{C_{iv}} \right]^{-1,54} \quad (\text{equação 5})$$

$$q_u = 2,33 \cdot 10^5 \left[\frac{\eta}{C_{iv}} \right]^{-1,54} \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

q_u = resistência à compressão simples em kPa;

η = porosidade da mistura solo-cimento;

C_{iv} = teor de cimento volumétrico.

A figura 28 distingue, para cada teor de umidade estudado, os pontos pelo seu teor de cimento. Verifica-se que pontos com η/C_{iv} similares, mas obtidos com diferentes combinações de densidade e teor de cimento, apresentam diferentes q_u para cada teor de cimento, isto se deve a diferenças substanciais na taxa de crescimento da resistência à compressão simples com a porosidade (η) e com o inverso do teor volumétrico de cimento ($1/C_{iv}$). Uma maneira de fazer com que a variação das taxas de crescimento, de η e C_{iv} , se tornem compatíveis é através da aplicação de uma potência a um deles.

No presente trabalho, decidiu-se por aplicar a potência ao teor volumétrico de cimento, por este método ter sido usado por outros pesquisadores (CONSOLI et al., 2007). O melhor ajuste foi encontrado aplicando-se uma potência igual a 0,35 aos três teores de umidade estudados, como mostra a figura 29.

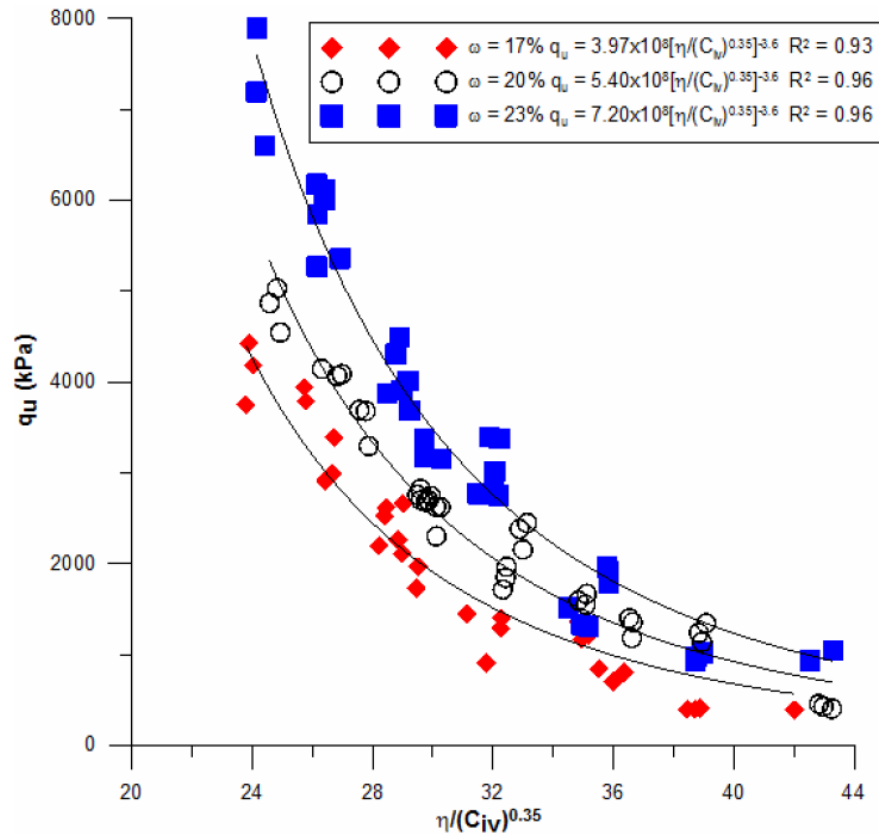


Figura 29: variação da resistência à compressão simples (q_u) com expoente da relação vazios/cimento (η/C_{iv}) ajustado, considerando todas as massas específicas aparentes secas e diferentes teores de cimento e teores de umidade de 17, 20 e 23%

Tal coeficiente pode ser função dos finos existentes no solo. Um coeficiente próximo da unidade foi encontrado por Consoli et al. (2010) para misturas areia-cimento. Os coeficientes de determinação (R^2) são de:

- 0,93 para $\omega = 17\%$ (equação 7);
- 0,96 para $\omega = 20\%$ (equação 8);
- 0,96 para $\omega = 23\%$ (equação 9).

$$q_u = 3,97 \cdot 10^8 \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,35}} \right]^{-3,60} \quad (\text{equação 7})$$

$$q_u = 5,40 \cdot 10^8 \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,35}} \right]^{-3,60} \quad (\text{equação 8})$$

$$q_u = 7,20 \cdot 10^8 \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,35}} \right]^{-3,60} \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

q_u = resistência à compressão simples em kPa;

η = porosidade da mistura solo-cimento;

C_{iv} = teor de cimento volumétrico.

Comparando as curvas q_u versus η/C_{iv} para $\omega = 17\%$, $\omega = 20\%$ e $\omega = 23\%$, observa-se que para um dado $\eta/(C_{iv})^{0,35}$ os resultados das misturas solo-cimento moldadas com teores de umidade superiores ($\omega = 23\%$) são mais resistentes (34%) do que os espécimes moldados com 20% de teor de umidade, as quais são 39% mais resistentes que os CP moldados com teores de umidade de 17%. Uma possível explicação pode estar relacionada com as distintas estruturas da mistura solo-cimento formadas durante a compactação. Portanto, o uso da porosidade da mistura compactada dividida pelo teor volumétrico de cimento para estimar a resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado é válido para todos os teores de umidade estudados ($\omega = 17, 20$ e 23%).

O resultado apresentado acima indica a existência de relações distintas para a mistura caulim-cimento compactada a um teor de umidade de 17%, para a mistura caulim-cimento compactada a um teor de umidade de 20% e para a mistura caulim-cimento compactada a um teor de umidade de 23%. Comparando as equações 7, 8 e 9 pode-se observar que q_u tem uma

relação direta com $\left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,35}} \right]^{-3,60}$ para os três teores de umidade estudados e, apenas um

escalar difere, indicando este o efeito do teor de umidade. Portanto, uma relação única pode

ser obtida relacionando a resistência à compressão simples com η , C_{iv} e ω conforme é apresentado na figura 30 e na equação 10:

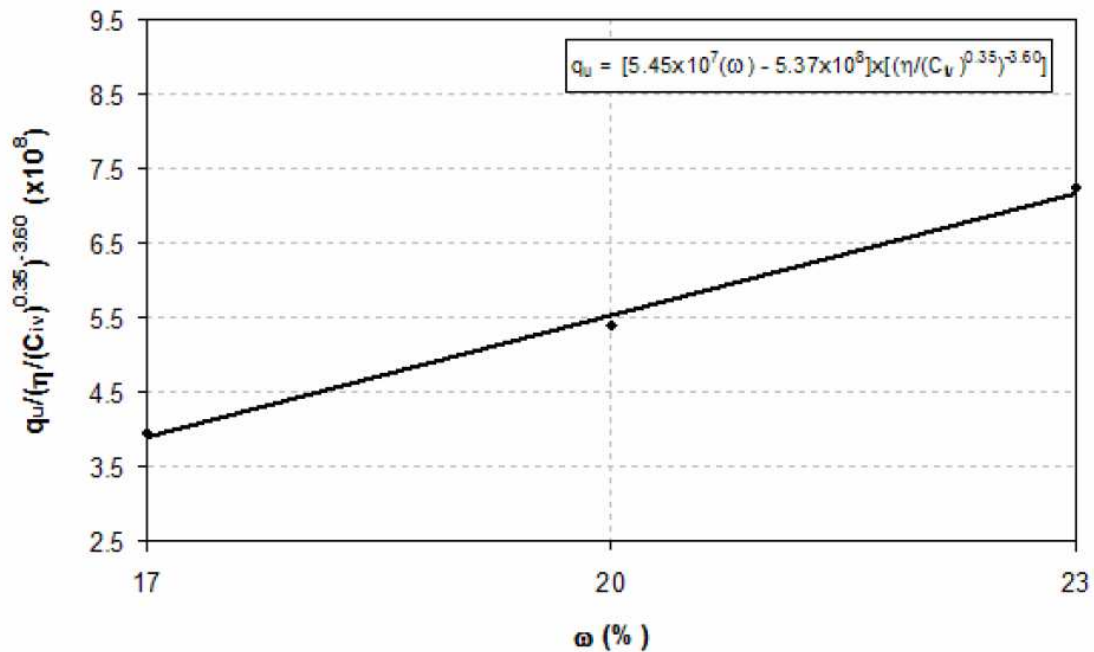


Figura 30: variação da resistência à compressão simples (q_u) com a porosidade (η), teor de cimento (C) e teor de umidade (ω)

$$q_u = [5,45 \cdot 10^7 \cdot \omega - 5,37 \cdot 10^8] \cdot \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,35}} \right]^{-3,60} \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

q_u = resistência à compressão simples em kPa;

ω = teor de umidade;

η = porosidade da mistura solo-cimento;

C_{iv} = teor de cimento volumétrico.

Portanto, para as misturas solo-cimento estudadas nesta pesquisa, pode-se concluir que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento do teor de umidade (para a faixa de teores de umidade estudados, solo e agente cimentante).

A equação 10, função de ω , η , e C_{iv} pode ser utilizada para estimativa da resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado, assim sendo, como critério de dosagem para a mistura solo-cimento estudada.

Para a mistura silte-cimento estudada, existem diversas maneiras de atingir a q_u desejada: variando porosidade e/ou teor de cimento e/ou teor de umidade na compactação. Os resultados apresentados nesta pesquisa sugerem que se pode escolher o teor de cimento, o teor de umidade na compactação e a porosidade apropriados para encontrar a resistência desejada de maneira econômica. A melhor opção pode mudar de acordo com a situação, dependendo da acessibilidade e disponibilidade de equipamento para transferir uma maior energia de compactação, disponibilidade de água, custo de cimento e de mão-de-obra.

O método apresentado neste trabalho também pode ser utilizado como controle de campo de camadas de solo-cimento. Quando uma compactação abaixo do especificado é reconhecida, esta pode ser imediatamente levada em conta, identificando através da equação 10 a resistência à compressão simples que será atingida e, medidas corretivas, como reforço da camada cimentada ou redução das cargas a serem transmitidas podem ser tomadas.

7 CONCLUSÕES

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

Os valores de sucção medidos mostraram-se irrelevantes frente aos valores de resistência à compressão simples estudados.

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

A q_u 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_u 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 simples do caulim artificialmente cimentado como consequência da estrutura criada pela compactação em diferentes teores de umidade. Com o aumento do teor de umidade verificou-se um aumento da resistência à compressão simples para os teores de umidade estudados.

A razão vazios/cimento (η/C_{iv}) apresentou um papel fundamental na estimativa da resistência à compressão simples de misturas de solos finos e cimento. Uma relação única [equação 10] foi encontrada para o silte estudado (caulim), conectando q_u com η , C_{iv} e ω . Resultado que demonstra importância do teor de umidade de moldagem (ω) na estimativa da resistência à compressão simples da mistura silte-cimento estudada, diferentemente dos resultados encontrados na bibliografia, que demonstram não existir influência do teor de umidade de moldagem na resistência à compressão simples. Essa diferença é função do tipo de solo estudado.

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 compressão simples do solo estudado. Tal relação sugere que o ajuste deste expoente pode ser 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 compressão simples estabelecida nesta pesquisa, para a mistura silte-cimento estudada, existem várias maneiras de atingir a q_u 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.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.253**: solo-cimento – dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 1992.
- CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S., MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proc., Institute of Civil Engineers**, p. 82-89, 1992.
- CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key parameters for strenght control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York, v. 133, n. 2, p. 197-205, Feb. 2007.
- CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V.; CRUZ, R. C.; HEINECK, K. S. Fundamental parameters for the stiffness and strenght control of artificially cemented sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 135, n. 9, p. 1347-1353, Sept. 2009.
- CONSOLI, N. C., CRUZ, R. C., FLOSS, M. F., FESTTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strenght of artificially cemented sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 136, n. 5, p. 759-764, 2010.
- CRUZ, R. C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente cimentada**. 2008. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- DALLA ROSA, A. **Estudos dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- FOPPA, D. **Análise da 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.
- INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practice**. Sydney: Butterworths, 1972.
- LAMBE, W. T.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**. 2 ed. New York: John Wiley, 1969.

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

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.

MARINHO, F. A. A. A técnica do Papel Filtro para Medição da Sucção. In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 1995, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: CPGE/CNPQ/FINEP/FAPERGS/ABMS, 1995, p. 111-125.

APÊNDICE 1 – Efeito da Porosidade

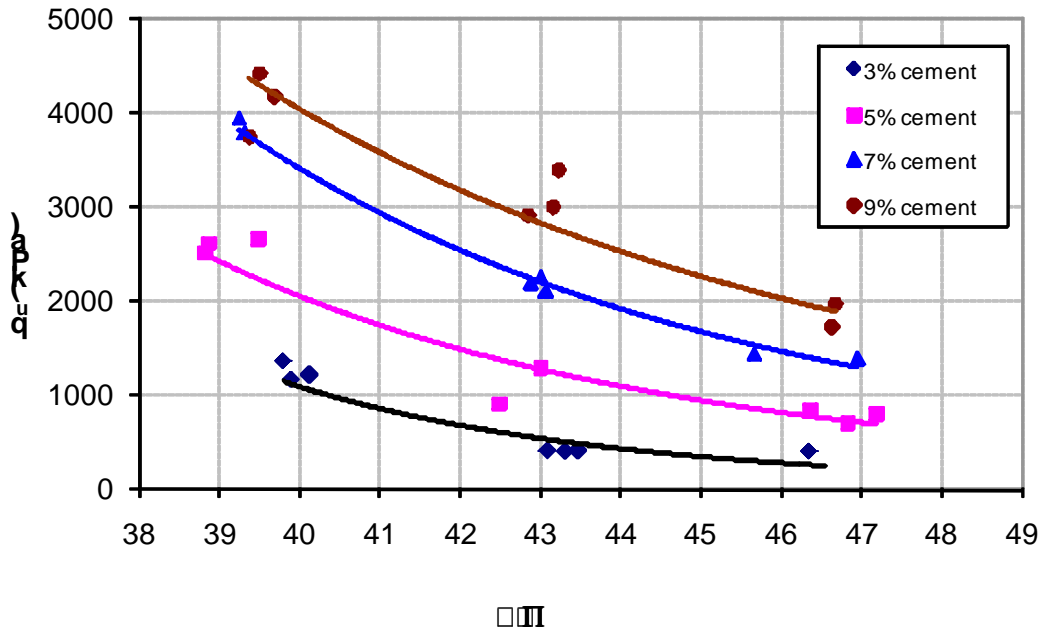


Figura 31: resistência à compressão simples (q_u) versus porosidade (η), para teores de cimento de 3%, 5%, 7% e 9% e teor de umidade de moldagem de 17%

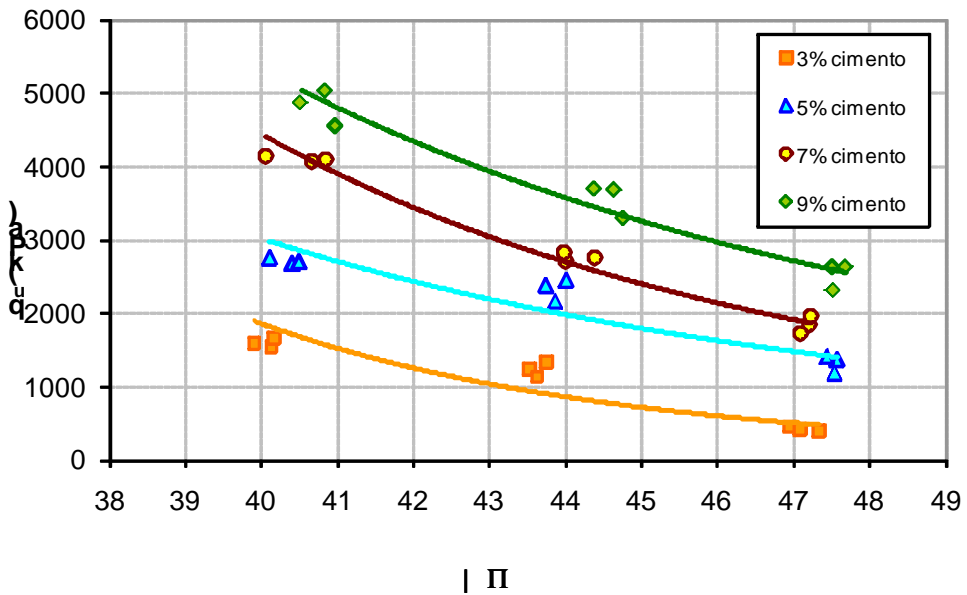


Figura 32: resistência à compressão simples (q_u) versus porosidade (η), para teores de cimento de 3%, 5%, 7% e 9% e teor de umidade de moldagem de 20%

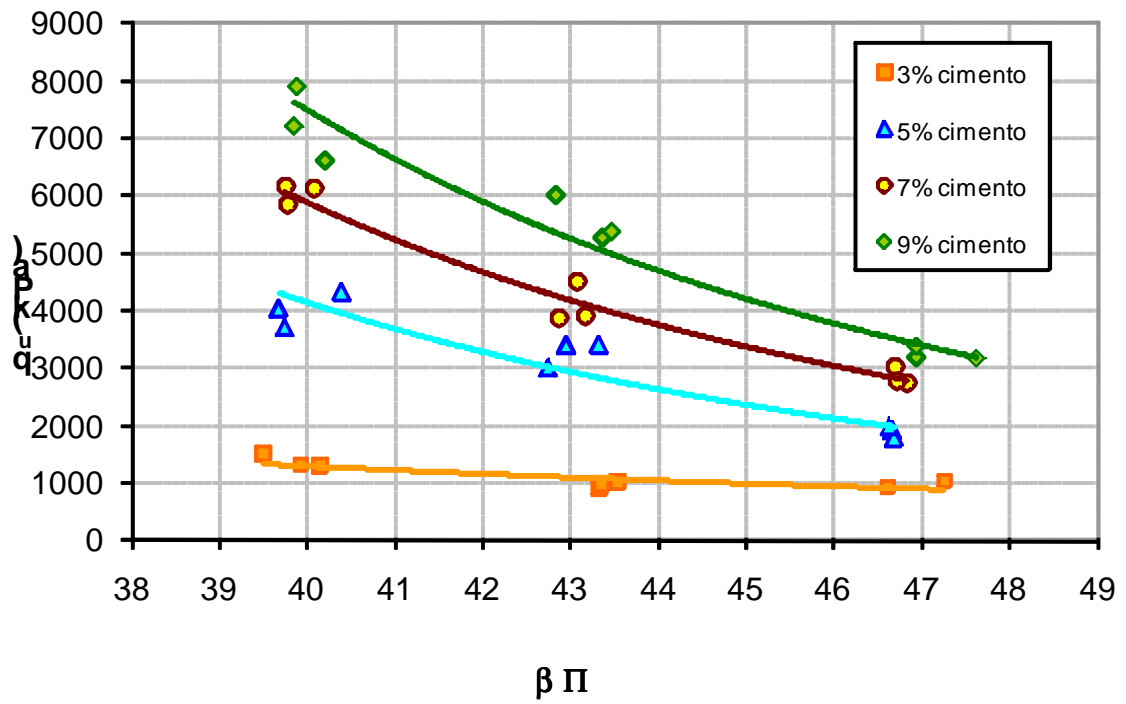


Figura 33: resistência à compressão simples (q_u) versus porosidade (η), para teores de cimento de 3%, 5%, 7% e 9% e teor de umidade de moldagem de 23%

APÊNDICE 2 – Efeito do Teor de Cimento

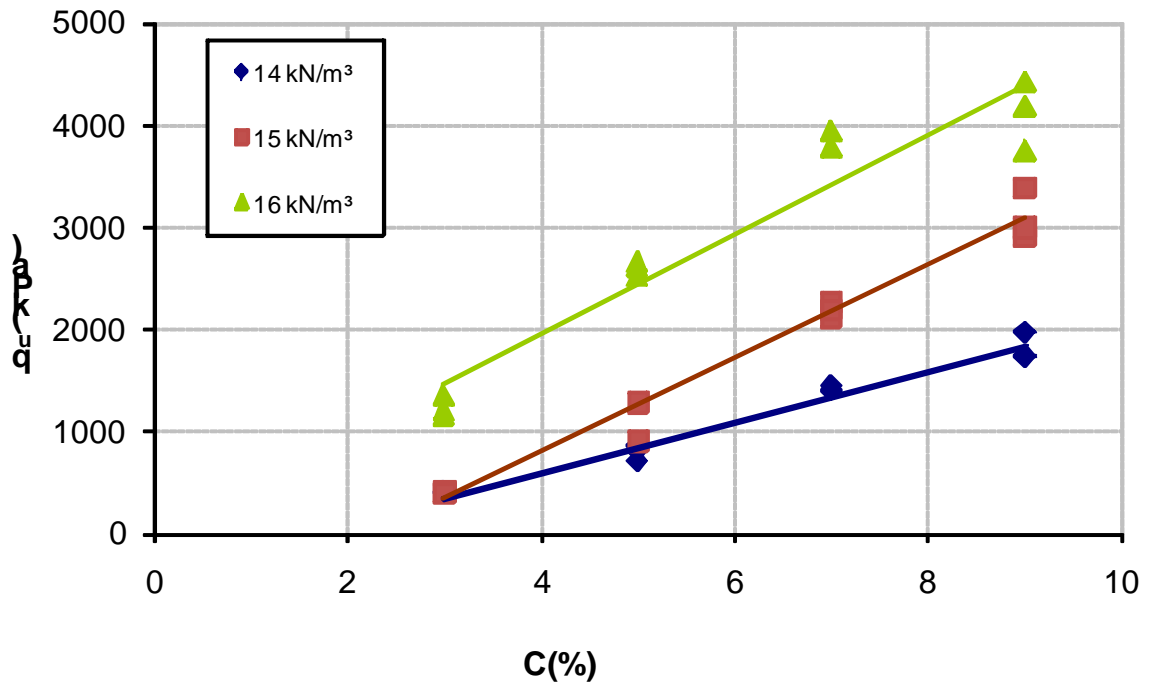


Figura 34: resistência à compressão simples (q_u) versus teor de cimento (C), para massas específicas aparentes secas (γ_d) de 14, 15 e 16 kN/m³ e teor de umidade (ω) de 17%

APÊNDICE 3 – Efeito do Teor de Umidade

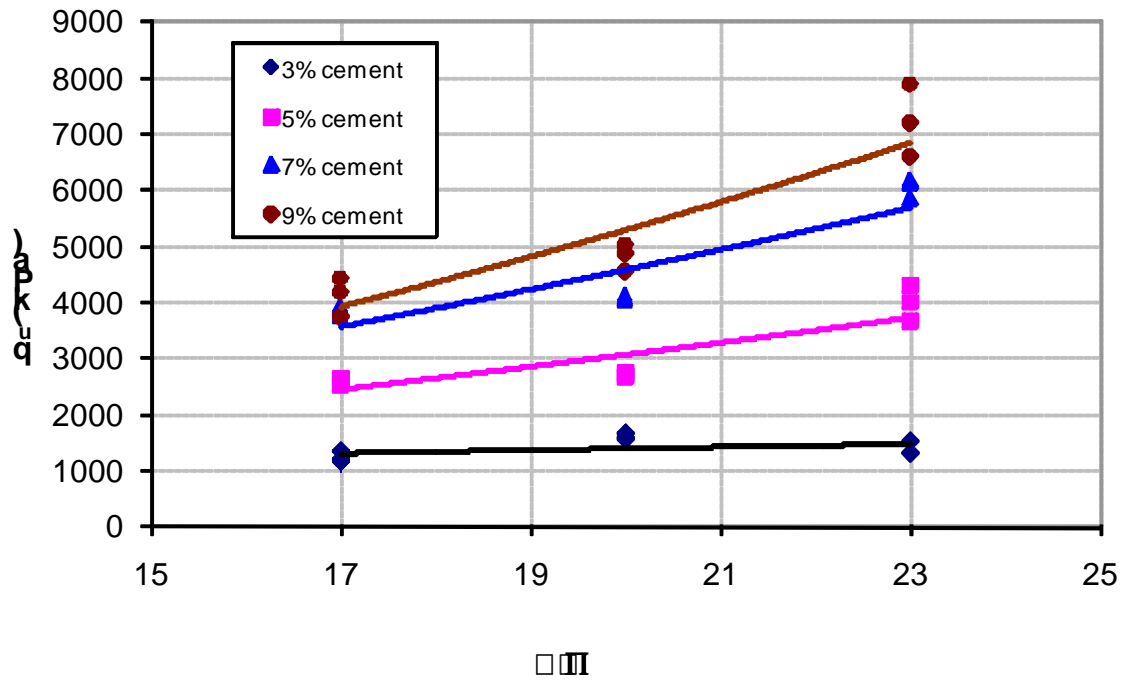


Figura 35: resistência à compressão simples (q_u) versus teor de umidade (ω), para massa específica aparente seca (γ_d) de 16 kN/m^3 e teores de umidade (ω) de 17%, 20% e 23%

APÊNDICE 4 – Efeito da Relação Vazios/Cimento

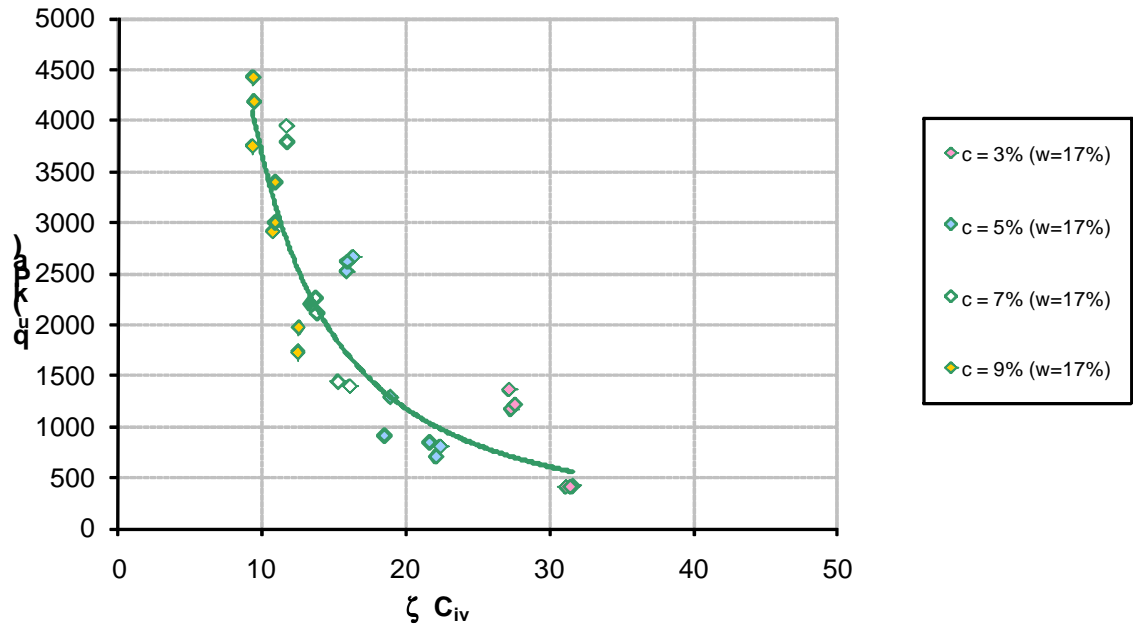


Figura 36: resistência à compressão simples (q_u) versus razão vazios/cimento (η/C_{iv}), para teor de umidade (ω) de 17%

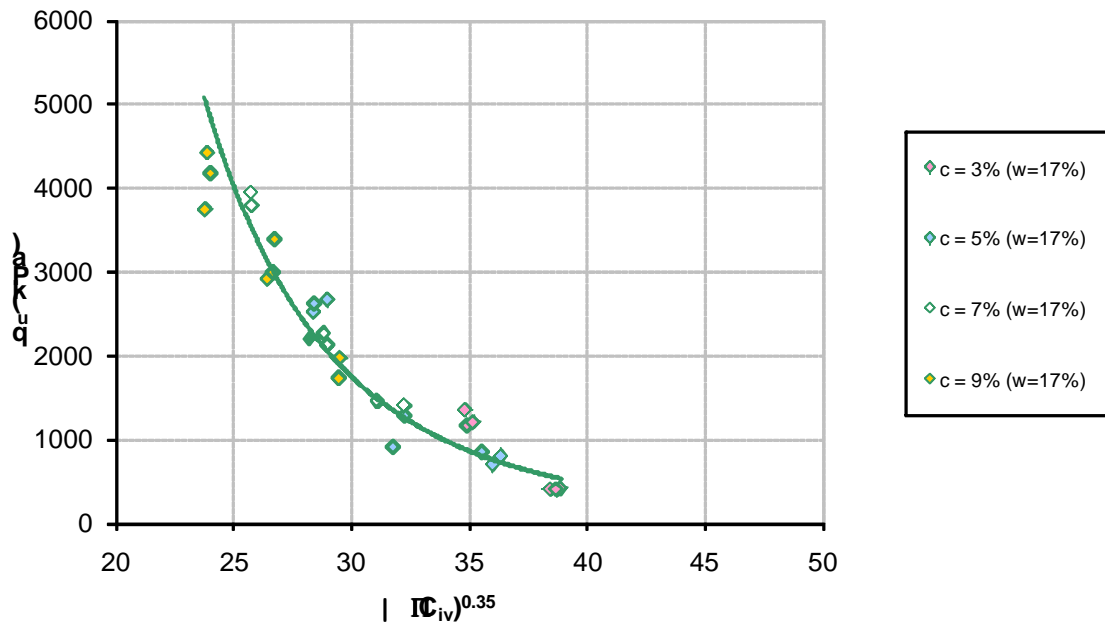


Figura 37: resistência à compressão simples (q_u) versus razão vazios/cimento com expoente $(\eta/C_{iv})^{0.35}$, para teor de umidade (ω) de 17%

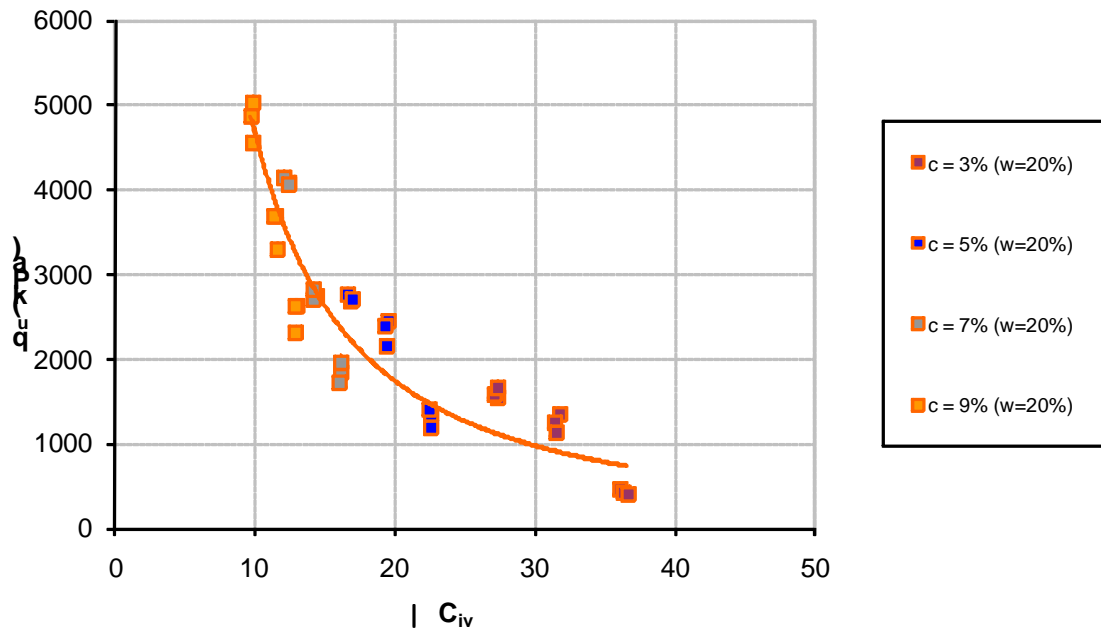


Figura 38: resistência à compressão simples (q_u) versus razão vazios/cimento (η/C_{iv}), para teor de umidade (ω) de 20%

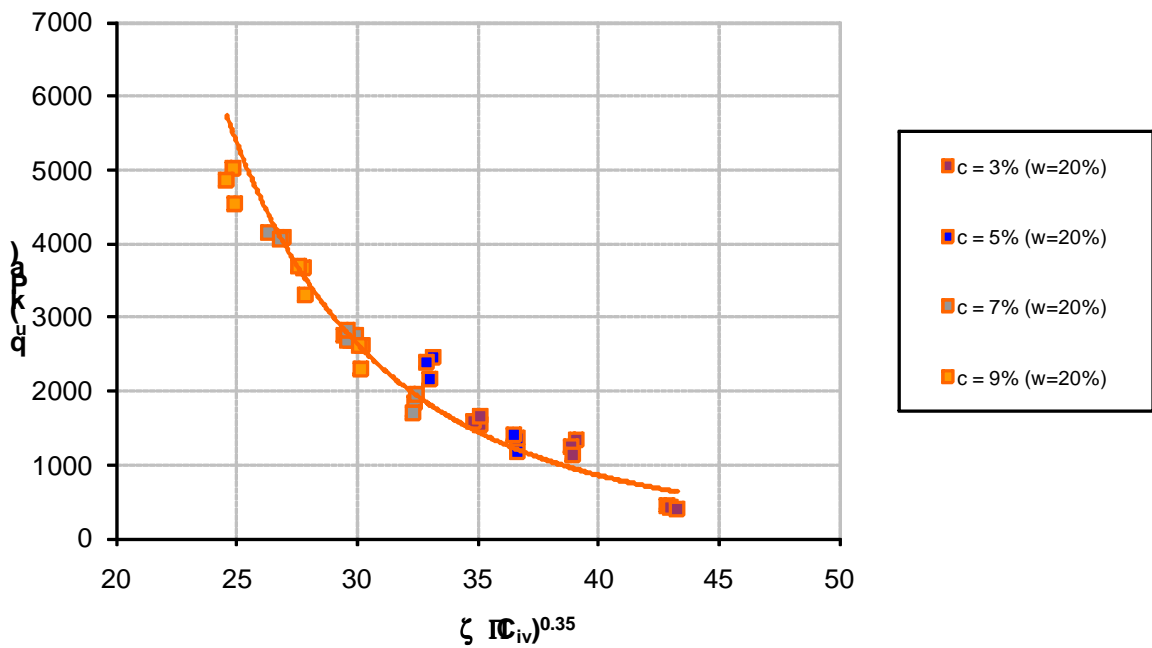


Figura 39: resistência à compressão simples (q_u) versus razão vazios/cimento com expoente $(\eta/C_{iv})^{0.35}$, para teor de umidade (ω) de 20%

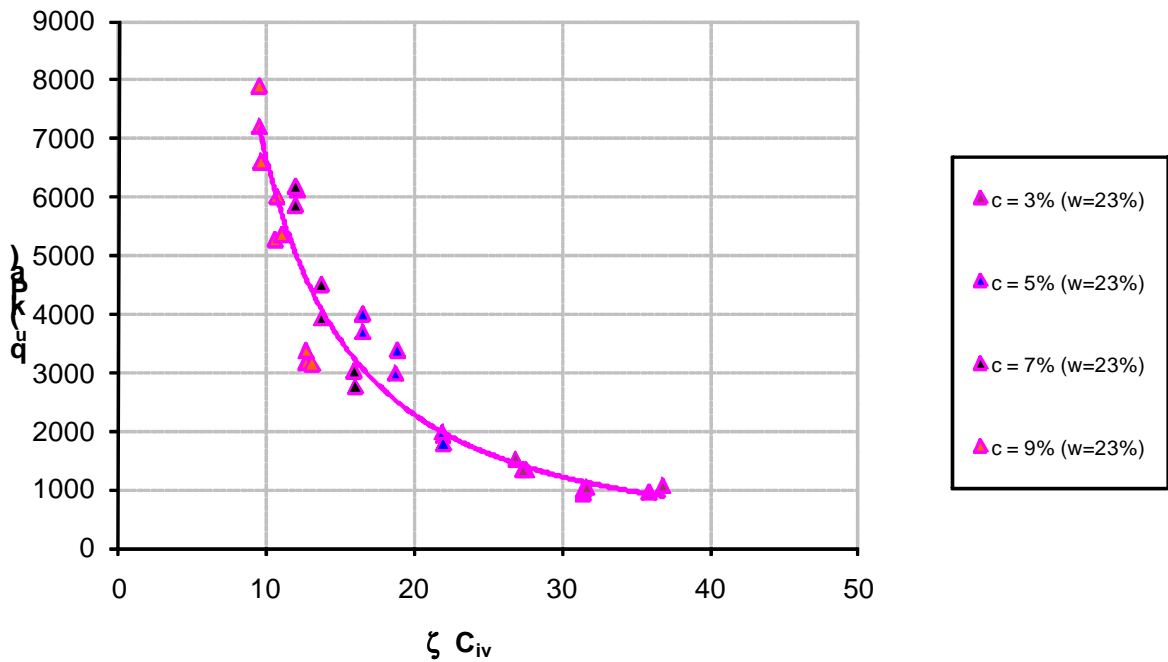


Figura 40: resistência à compressão simples (q_u) versus razão vazios/cimento (η/C_{iv}), para teor de umidade (ω) de 23%

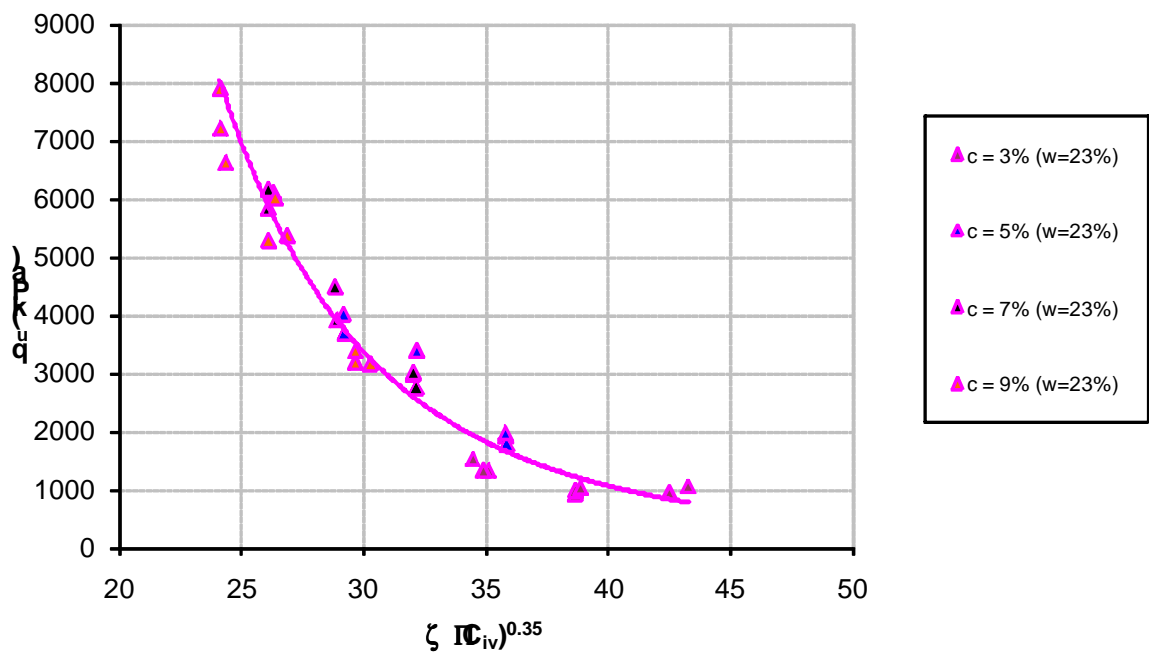


Figura 41: resistência à compressão simples (q_u) versus razão vazios/cimento com expoente (η/C_{iv})^{0.35}, para teor de umidade (ω) de 23%