

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

Guilherme Lima Righetto

**VALIDAÇÃO DO FATOR VAZIOS/AGENTE CIMENTANTE
NA ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM SOLO
TRATADO COM CAL, CIMENTO E RESÍDUO DE
BRITAGEM DE ROCHA**

Porto Alegre
novembro 2008

GUILHERME LIMA RIGHETTO

**VALIDAÇÃO DO FATOR VAZIOS/AGENTE CIMENTANTE
NA ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM SOLO
TRATADO COM CAL, CIMENTO E RESÍDUO DE
BRITAGEM DE ROCHA**

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

Orientador: Nilo Cesar Consoli

Porto Alegre
novembro 2008

GUILHERME LIMA RIGHETTO

**VALIDAÇÃO DO FATOR VAZIOS/AGENTE CIMENTANTE
NA ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM SOLO
TRATADO COM CAL, CIMENTO E RESÍDUO DE
BRITAGEM DE ROCHA**

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 pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, novembro de 2008

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

Prof. Inácio Benvegnu Morsch
Chefe do DECIV

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Ana Paula Silva dos Santos (UFRGS)
Dr^a. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Rodrigo Caberlon Cruz (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)
Ph.D. pela Concordia University - Canadá

Dedico este trabalho a meus pais, Oswaldo e Vera, pelo amor, carinho e incentivo incondicionais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha família, especialmente aos meus pais Oswaldo e Vera pelo amor, meus irmãos e a Viviane pelo carinho, incentivo e compreensão.

Agradeço as minhas mentoras Edna, Dona Cida e Nide por ajudar a trilhar o meu caminho nesta vida.

Agradeço a todos da Casa de João Pedro pela oportunidade de equilíbrio e evolução espiritual.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Nilo Consoli, pela confiança, ensinamentos, dedicação, incentivo e empenho para que essa pesquisa fosse realizada com sucesso.

Agradeço a Prof.(a) Carin pelos ensinamentos e, principalmente, pela paciência durante o desenvolvimento deste trabalho de diplomação.

Agradeço a minha “família” de Porto Alegre (Claire e Ellen) pelo apoio e compreensão durante o desenvolvimento dessa pesquisa.

Agradeço a minha querida namorada Ellen pelo carinho, incentivo e paciência.

Agradeço a todos os professores da Escola de Engenharia da UFRGS pelos ensinamentos ministrados.

Agradeço ao laboratorista João Diniz pela colaboração nas coletas de amostras e ensaios de laboratório.

Agradeço aos amigos Emmanuel e Luizmar pelo auxílio durante os processos de moldagem. Sem o empenho de vocês, esta pesquisa não teria sido realizada.

Agradeço a todos os meus amigos que contribuíram de forma direta ou indireta, especialmente a Carla Carrapatoso, Camila Rabassa, Tiago Salame, Aline Bronzatto, Marina Bergamaschi, Carla Henz, Marcelle Ribeiro, Guilherme Siqueira, Bruno (Chapecó), Juliana Ponticelli, Cristina Vitorino, Lucas Festugato, José Rojas, Amanda Dalla Rosa, Rodrigo (Alemão), Marcel Bassani e a todo o pessoal do LEGG-ENVIRONGEO.

Agradeço à UFRGS, ao RU e ao CNPq pelo suporte financeiro.

No meio de qualquer dificuldade encontra-se a
oportunidade.

Albert Einstein

RESUMO

RIGHETTO, G. L. **Validação do Fator Vazios/Agente Cimentante na Análise da Resistência Mecânica de um Solo Tratado com Cal, Cimento e Resíduo de Britagem de Rocha**. 2008. 91 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O solo natural é amplamente utilizado em obras de Engenharia Civil, principalmente pela sua grande disponibilidade e o seu baixo custo, entretanto, suas propriedades não cumprem, normalmente, os requisitos necessários. Além disso, tem-se uma grande dificuldade em generalizar seu comportamento devido à sua heterogeneidade. Uma possível solução seria o melhoramento das propriedades do solo através da adição de agentes cimentantes, de fibras, ou, ainda, combinações desses materiais. Apesar da grande aplicabilidade da técnica de estabilização com solo-cal e solo-cimento, ainda não existem metodologias racionais para dosagem do teor de cal e cimento: a norma apresenta somente sugestões referentes à execução de ensaios laboratoriais com diversos teores de cimento, para que se possa atingir a resistência desejada. Considerando a necessidade de determinação de um método racional de dosagem de solos artificialmente cimentados, este trabalho tem por objetivos quantificar a influência de cada parâmetro de controle isoladamente (teor de agente cimentante, tempo de cura, teor de umidade e porosidade) para as diferentes proporções de materiais utilizados, e verificar a validade do uso do fator vazios/agente cimentante na estimativa da resistência à compressão simples de um solo arenoso artificialmente tratado, simultaneamente, com cal, cimento e resíduo de britagem de rocha. Os resultados mostraram que a resistência mecânica aumentou linearmente com o aumento do teor de agente cimentante e exponencialmente com a diminuição da porosidade das amostras. A variação no teor de umidade de moldagem não afetou significativamente a resistência à compressão simples das misturas, as quais se mantiveram praticamente constantes. Em relação ao tempo de cura, observou-se uma grande influência, onde as amostras com maiores períodos de cura mostraram resistências mais elevadas. Através das análises efetuadas validou-se o fator vazios/agente cimentante, para os tempos de cura definidos, obtendo assim, um parâmetro adequado e seguro para estimativa da resistência mecânica de misturas de solo-cal-cimento-resíduo de britagem de rocha.

Palavras-chave: fator vazios/cimento; solo-cal; solo-cimento; resistência à compressão simples.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: mecanismo de troca de cátions.....	19
Figura 2: mecanismo de estabilização solo-cal.....	19
Figura 3: efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal.....	21
Figura 4: fator vazios/cimento pela resistência à compressão simples.....	26
Figura 5: curva de resistência à compressão simples versus fator vazios/cimento.....	27
Figura 6: resistência à compressão simples versus fator vazios/cimento expressa em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento.....	28
Figura 7: fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 90 dias de cura.....	30
Figura 8: resistência à compressão simples versus fator vazios/cimento expressa em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento.....	30
Figura 9: formações geológicas ao norte do estado do RS.....	32
Figura 10: curva granulométrica do SRAB.....	33
Figura 11: jazida de extração do SRAB.....	34
Figura 12: local de retirada da amostra de resíduo.....	35
Figura 13: curva granulométrica do resíduo.....	36
Figura 14: gráfico da resistência à compressão simples versus idade da amostra para diferentes tipos de cimento.....	38
Figura 15: delineamento da pesquisa.....	41
Figura 16: distribuição granulométrica dos materiais.....	44
Figura 17: programa de ensaios de compressão simples.....	45
Figura 18: corpo-de-prova submetido ao ensaio de resistência à compressão simples.....	52
Figura 19: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de agente cimentante adicionado para amostras com 90 dias de cura.....	54
Figura 20: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 90 dias de cura.....	55
Figura 21: resistência à compressão simples em relação ao fator volume de vazios/volume de agente cimentante para amostras com 90 dias de cura.....	56
Figura 22: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de agente cimentante adicionado para amostras com 60 dias de cura.....	57
Figura 23: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 60 dias de cura.....	58
Figura 24: resistência à compressão simples em relação ao fator volume de vazios/volume de agente cimentante para amostras com 60 dias de cura.....	59

Figura 25: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de agente cimentante adicionado para amostras com 28 dias de cura.....	60
Figura 26: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 28 dias de cura.....	61
Figura 27: resistência à compressão simples em relação ao fator volume de vazios/volume de agente cimentante para amostras com 28 dias de cura.....	62
Figura 28: resistência à compressão simples em relação ao teor de umidade de moldagem para amostras com 28 dias de cura.....	62
Figura 29: resistência à compressão simples em relação ao teor de agente cimentante para os diferentes teores de umidade de moldagem.....	63
Figura 30: plano de ruptura típico dos corpos-de-prova.....	64
Figura 31: resistência à compressão simples em relação ao teor de agente cimentante para os diferentes tempos de cura.....	66
Figura 32: efeito do teor volumétrico de agente cimentante sobre a resistência à compressão simples para as amostras com 90 dias de cura.....	68
Figura 33: efeito do teor volumétrico de agente cimentante sobre a resistência à compressão simples para as amostras com 60 dias de cura.....	68
Figura 34: efeito do teor volumétrico de agente cimentante sobre a resistência à compressão simples para as amostras com 28 dias de cura.....	69
Figura 35: variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura ($\gamma_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$).....	73
Figura 36: variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura ($\gamma_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$).....	73
Figura 37: variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura ($\gamma_d = 1,8 \text{ g/cm}^3$).....	74
Figura 38: variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura ($\gamma_d = 1,88 \text{ g/cm}^3$).....	74
Figura 39: razão entre o volume de vazios e volume de agente cimentante para as amostras com 90 dias de cura.....	75
Figura 40: razão entre o volume de vazios e volume de agente cimentante para as amostras com 60 dias de cura.....	76
Figura 41: razão entre o volume de vazios e volume de agente cimentante para as amostras com 28 dias de cura.....	76
Figura 42: relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples de amostras com 90 dias de cura.....	77
Figura 43: relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples de amostras com 60 dias de cura.....	78
Figura 44: relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples de amostras com 28 dias de cura.....	78
Figura 45: relação entre o inverso do volume de agente cimentante e a resistência à compressão simples de amostras com 90 dias de cura.....	79

Figura 46: relação entre o inverso do volume de agente cimentante e a resistência à compressão simples de amostras com 60 dias de cura.....	80
Figura 47: relação entre o inverso do volume de agente cimentante e a resistência à compressão simples de amostras com 28 dias de cura.....	80
Figura 48: relação entre o inverso do volume de agente cimentante ajustado e a resistência à compressão simples de amostras com 90 dias de cura.....	81
Figura 49: relação entre o inverso do volume de agente cimentante ajustado e a resistência à compressão simples de amostras com 60 dias de cura.....	82
Figura 50: relação entre o inverso do volume de agente cimentante ajustado e a resistência à compressão simples de amostras com 90 dias de cura.....	82
Figura 51: fator vazios/agente cimentante expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 90 dias de cura.....	83
Figura 52: fator vazios/agente cimentante expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 60 dias de cura.....	84
Figura 53: fator vazios/agente cimentante expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 28 dias de cura.....	84
Figura 54: fator vazios/agente cimentante expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 90, 60 e 28 dias de cura.....	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: propriedades físico-químicas do arenito Botucatu.....	27
Quadro 2: compostos químicos do resíduo.....	30
Quadro 3: caracterização da cal dolomítica.....	31
Quadro 4: pontos de moldagem.....	40
Quadro 5: parcela de resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 90 dias de cura.....	70
Quadro 6: parcela de resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 60 dias de cura.....	70
Quadro 7: parcela de resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 28 dias de cura.....	71

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 O ESTADO DA TÉCNICA DO SOLO-CAL E DO SOLO-CIMENTO.....	15
2.1 VARIÁVEIS INFLUENTES NO COMPORTAMENTO DO COMPÓSITO SOLO-CAL.....	17
2.1.1 Efeito da Cal.....	17
2.1.2 Efeito da Densidade e Compactação.....	20
2.1.3 Efeito do Teor de Umidade e do Fator Água/Cal.....	20
2.1.4 Efeito do Tempo de Cura.....	21
2.2 VARIÁVEIS INFLUENTES NO COMPORTAMENTO DO COMPÓSITO SOLO-CIMENTO.....	22
2.2.1 Efeito do Cimento.....	22
2.2.2 Efeito da Densidade e Compactação.....	24
2.2.3 Efeito do Teor de Umidade e do Fator Água/Cimento.....	24
2.3 OS FATORES VAZIOS/CAL E VAZIOS/CIMENTO.....	25
3 MATRIZ DE SOLO E AGENTE CIMENTANTE.....	31
3.1 SOLO.....	31
3.2 RESÍDUO.....	34
3.3 CAL.....	37
3.4 CIMENTO.....	37
3.5 ÁGUA.....	38
4 MÉTODO DE PESQUISA.....	39
4.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	39
4.2 OBJETIVOS.....	39
4.3 HIPÓTESE.....	40
4.4 PREMISSAS.....	40
4.5 PRESSUPOSTO.....	40
4.6 DELIMITAÇÕES.....	40
4.7 LIMITAÇÕES.....	40
4.8 DELINEAMENTO.....	41
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	43
5.1 TEORES DE CAL E CIMENTO.....	43
5.2 TEOR DE RESÍDUO DE BRITAGEM DE ROCHA.....	43
5.3 PROGRAMA DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES.....	44

5.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA POROSIDADE E DA QUANTIDADE DE AGENTE CIMENTANTE.....	46
5.5 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE.....	47
5.6 AVALIAÇÃO DO FATOR VAZIOS/AGENTE CIMENTANTE.....	47
6 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO.....	48
6.1 MATERIAIS.....	48
6.2 MÉTODOS DE ENSAIO.....	48
6.2.1 Coleta de Amostras.....	48
6.2.2 Preparação das Amostras.....	49
6.2.3 Ensaios de Caracterização.....	49
6.2.4 Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova.....	50
6.2.5 Ensaios de Compressão Simples.....	51
7 RESULTADOS.....	54
7.1 TEMPO DE CURA DE 90 DIAS.....	54
7.2 TEMPO DE CURA DE 60 DIAS.....	57
7.3 TEMPO DE CURA DE 28 DIAS.....	60
7.4 MODO DE RUPTURA.....	64
8 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	65
8.1 EFEITO DO TEOR DE AGENTE CIMENTANTE.....	65
8.2 EFEITO DA POROSIDADE.....	67
8.3 EFEITO DO TEOR DE UMIDADE.....	71
8.4 EFEITO DO TEMPO DE CURA.....	72
8.5 FATOR VAZIOS/AGENTE CIMENTANTE.....	75
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
9.1 CONCLUSÕES.....	86
9.1.1 Representatividade dos corpos-de-prova.....	86
9.1.2 Influência da quantidade de agente cimentante.....	86
9.1.3 Influência da porosidade.....	87
9.1.4 Influência do teor de umidade.....	87
9.1.5 Influência do tempo de cura.....	87
9.1.6 Fator vazios/agente cimentante.....	87
9.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

As inovações tecnológicas, aliadas ao desenvolvimento econômico, implicam, principalmente na Engenharia Civil, na construção de obras de grande porte, desde conjuntos residenciais até as mais diversas obras de arte, como barragens e metrô. A implementação de obras de grande porte esbarra, muitas vezes, em limitações referentes às técnicas tradicionais da Engenharia Geotécnica. Visando a viabilidade técnica e econômica e a adequação entre a Engenharia Estrutural e de Fundações, têm-se realizado inúmeras pesquisas buscando soluções para os mais diversos casos.

Rotineiramente, tem-se a necessidade de execução de fundações em terrenos de baixa capacidade de suporte, onde a utilização de fundações profundas pode tornar-se inviável em função dos custos, que podem ser incompatíveis com o porte do empreendimento. Nesses casos, de acordo com o tipo de solicitação, opta-se por uma alternativa de melhoramento das propriedades de solos, como a adição de agentes cimentantes, quando se deseja uma maior resistência de pico e rigidez do material, ou a adição de fibras, quando se tem a necessidade de acréscimo de resistência a grandes deformações, ou ainda, combinações desses materiais. A utilização dessas técnicas é limitada, devido, principalmente, à complexidade das dosagens e ao grande número de ensaios para obter-se uma estimativa razoável da sua resistência, pois é grande a dificuldade em generalizar seu comportamento para demais tipos de solos em função da sua heterogeneidade.

Apesar da consagrada aplicabilidade desses reforços em base para pavimentos e estabilidade de taludes, ainda não existem metodologias de dosagem dessas misturas baseadas em critérios racionais como existe, por exemplo, para o concreto, onde o fator água/cimento desempenha papel fundamental na obtenção da resistência. No entanto, acredita-se que se possa estabelecer uma relação, através de parâmetros fundamentais de comportamento, entre a resistência e o material reforçado.

Diversas pesquisas sobre melhoramento das propriedades de solos têm sido desenvolvidas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, visando seu emprego como camada de suporte para fundações superficiais e investigando seu comportamento sob diferentes condições de

carregamento, como ensaios de placa e provas de carga em verdadeira grandeza. Os resultados têm se mostrado satisfatórios em relação aos ganhos de capacidade de suporte e na redução de recalques.

O foco da presente pesquisa está na análise de um novo parâmetro de controle da resistência, para um solo reforçado com cal, cimento e resíduo de britagem de rocha basáltica. Este parâmetro, denominado de Fator Vazios/Cimento, foi proposto por Foppa (2005) como uma variável de controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados e foi estendida para solos tratados com cal por Lopes Junior (2007). Portanto, a análise desta variável contribuirá para uma estimativa confiável da resistência mecânica de uma mistura de solo reforçado com cal, cimento e resíduo de britagem de rocha.

O capítulo 1 consiste em uma introdução, onde são apresentados o problema e a relevância da pesquisa.

No capítulo 2 é feita uma pesquisa bibliográfica acerca dos aspectos mais relevantes do tema. Objetiva-se dar uma visão geral sobre o estado da arte das técnicas de estabilização de solos com cal e cimento, e delinear a influência dos parâmetros de maior influência no comportamento desses materiais.

No capítulo 3 é feita uma descrição detalhada dos materiais utilizados para confecção dos corpos-de-prova.

No capítulo 4 é delineada a metodologia de pesquisa, onde são apresentados a questão de pesquisa, objetivos, hipótese, premissas, delimitações, limitações e delineamento.

O capítulo 5 contém a descrição detalhada do programa experimental adotado, especificando as dosagens utilizadas utilizados.

No capítulo 6 estão descritos os métodos de confecção das amostras e de ensaio utilizados.

O capítulo 7 apresenta os resultados obtidos experimentalmente, com uma breve análise.

O capítulo 8 apresenta uma discussão detalhada dos resultados obtidos, embasada na pesquisa bibliográfica.

No capítulo 9 são apresentadas as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

2 O ESTADO DA TÉCNICA DO SOLO-CAL E DO SOLO-CIMENTO

A utilização da cal como aditivo no melhoramento das propriedades de solos consiste no método mais antigo de estabilização química, sendo utilizado pelos Romanos na construção da Via Ápia. Pode-se definir solo-cal como o produto resultante da mistura íntima compactada de solo (geralmente argila), cal e água, em proporções estabelecidas através de dosagem (UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION, 1998 apud LOPES JUNIOR, 2007).

Utilizam-se aditivos como cal e cimento quando o solo de um determinado local não apresenta as qualidades exigidas pelo projeto de Engenharia, que geralmente são estabilidade volumétrica, resistência, permeabilidade e durabilidade. A estabilização de solos com cal ou com cimento é vastamente empregada na infra-estrutura rodoviária, como base ou sub-base de pavimentos (INGLES; METCALF, 1972).

Outra importante aplicação do solo-cal tem sido na proteção de taludes contra erosão em obras hidráulicas, como, por exemplo, no canal de irrigação de Friant-Kern, na Califórnia, no qual foi utilizada cal virgem pulverizada (3% a 5%). Tanto no aspecto de estanqueidade como no de estabilidade, o canal, com vazão de 150 m³/min, não apresentou nenhuma erosão significativa após um ano de serviços contínuos (LITTLE, 1999 apud LOPES JUNIOR, 2007); GUIMARÃES, 2002). Ingles e Metcalf (1972) afirmam que, em fundações de edificações, a técnica de melhoramento aplica-se a solos com baixa capacidade suporte e baixa estabilidade volumétrica, evitando patologias provocadas por recalques diferenciais.

Segundo Thomé et al. (2005), a escolha da infra-estrutura deve levar em consideração o fator econômico, ou seja, em solos de baixa capacidade de suporte, utilizam-se, normalmente, fundações profundas. Entretanto, esta escolha pode inviabilizar economicamente construções como habitações populares, por exemplo. Como alternativa, pode-se reforçar esse solo com cal ou cimento, gerando uma grande economia. Os autores sugerem a utilização de fundações apoiadas em sistemas de dupla camada, sendo a superior constituída de solos cimentados compactados, como uma técnica alternativa que pode ser utilizada nos casos em que existam camadas de solos de baixa resistência e quando o bulbo de tensões referentes às cargas das edificações for pequeno.

Segundo a NBR 12024, solo-cimento é definido como sendo o “Produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem executada conforme NBR 12253.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992b).

A Norma apresenta algumas limitações, como uma faixa granulométrica de aplicações e valores empíricos de resistência mínima à compressão simples aos sete dias de cura e de teores de cimento mínimos recomendados. Esta configuração pode ser favorável à segurança, porém onerosa, justificando, assim, a adição de cal nas misturas, devido, principalmente, à sua viabilidade econômica em relação ao cimento. Além disso, tem-se uma grande demanda de ensaios para a determinação de um teor de cimento que atenda às especificações de Norma ou projeto, uma vez que não existem relações capazes de estimar a resistência de compósitos desse tipo.

A diferença fundamental entre o concreto e o solo-cimento é que, no concreto, a quantidade de pasta (cimento e água) é suficiente para recobrir a superfície dos agregados e para preencher todos os vazios existentes entre eles. Em misturas de solo-cimento, a quantidade de pasta é insuficiente para recobrir toda a superfície de todas as partículas de solo e preencher os vazios existentes, resultando numa matriz cimentícia que une agregados não cimentados (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 2008).

De acordo com Senço (2001 apud FOPPA, 2005), a utilização da técnica do solo-cimento iniciou-se no estado de São Paulo, na década de 40, devido à necessidade de expansão da malha rodoviária pelo interior do Estado. Como a técnica mostrou-se satisfatória, rapidamente tornou-se a mais utilizada na execução de base e sub-base dos leitos rodoviários de São Paulo, atingindo cerca de 50% das camadas executadas.

Além de reduzir significativamente a quantidade de recursos naturais utilizados no processo de pavimentação, a técnica do solo-cimento mantém um desempenho similar a um custo menor, comparativamente com material granular, isto é, 90% do material utilizado (solo) são obtidos no próprio local da obra e apenas 10% (cimento) requerem transporte para o local (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 2008).

Além das aplicações destacadas anteriormente para os materiais reforçados com cal ou cimento, outras utilizações podem ser destacadas, como, por exemplo, execução de fundações

profundas, reforço de aterros, contenção de escavações, confecção de blocos de alvenaria ou, ainda, estabilização de revestimentos de canais de irrigação (GUIMARÃES, 1997).

2.1 VARIÁVEIS INFLUENTES NO COMPORTAMENTO DO COMPÓSITO SOLO-CAL

A estabilização com adição de cal (solo-cal) é uma técnica fundamentada em reações químicas e físico-químicas que se desencadeiam entre os compostos constituintes da cal, hidróxido de cálcio ou cálcio e magnésio, e os compostos constituintes do solo, principalmente sua fração argilosa, capazes de reduzir a sensibilidade dos materiais à ação da água e aumentar a sua capacidade de suporte (NÓBREGA, 1995).

A adição de cal a um solo argiloso faz com que ocorram alterações em suas propriedades, sendo essas dependentes de diversos fatores, como: tipo de solo, tipo e teor de cal, energia de compactação e tempo e condições de cura (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 1987).

2.1.1 Efeito da Cal

Guimarães (1997) afirma que a adição de cal afeta favoravelmente algumas propriedades dos solos, sendo que essas alterações implicam em variações das seguintes características físicas: granulometria, plasticidade, contração e retração, umidade de campo, densidade, trabalhabilidade, permeabilidade e resistência. Por exemplo, Consoli et al. (2001 apud LOPES JUNIOR, 2007), ao estudarem um solo arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, verificaram que, para uma mesma tensão confinante, o aumento da quantidade de cal provoca o aumento da resistência de pico e a diminuição da deformação na qual o pico é atingido.

Lopes Junior (2007) constatou, em suas amostras, que pequenas adições de cal promoveram ganhos substanciais de resistência, tanto para as amostras de 28 dias como para as de 90 dias de cura. Quando se adiciona cal a um solo fino, em presença de água, ocorrem reações químicas que podem ser divididas em duas etapas: uma etapa inicial rápida, que dura de horas

a dias, e outra mais lenta que pode se estender por anos (CASTRO, 1995 apud LOPES JUNIOR, 2007).

A etapa inicial rápida, para um solo fino estabilizado com cal, é composta pela sucessão de alguns fenômenos:

- a) troca catiônica;
- b) floculação-aglomeração;
- c) compressão da dupla camada elétrica;
- d) adsorção de cal;
- e) reações químicas.

A etapa lenta é caracterizada pelas reações de carbonatação e pelas reações pozolânicas, sendo as primeiras prejudiciais e as segundas responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica, esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro, presentes no solo, reagem com a cal e água formando produtos cimentantes.

Segundo Rogers e Glendinning (2000 apud LOPES JUNIOR, 2007), os íons hidroxila liberados da cal elevam o pH da mistura a um valor suficientemente alto, de modo que a sílica e a alumina sejam dissolvidas da argila.

Essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio, que continuará ocorrendo enquanto houver Ca(OH)_2 reagindo e sílica disponível no solo (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 1987).

Prusinski e Bhattacharja (1999) afirmam que a troca catiônica inicia o processo de estabilização seguida pela floculação e aglomeração; sendo a superfície do argilo-mineral deficiente em carga, e para neutralizá-la, cátions e moléculas de água são atraídos para a superfície de clivagem carregada negativamente. Isso resultará em uma separação de duas camadas, chamada de dupla camada difusa como pode ser observado na figura 1.

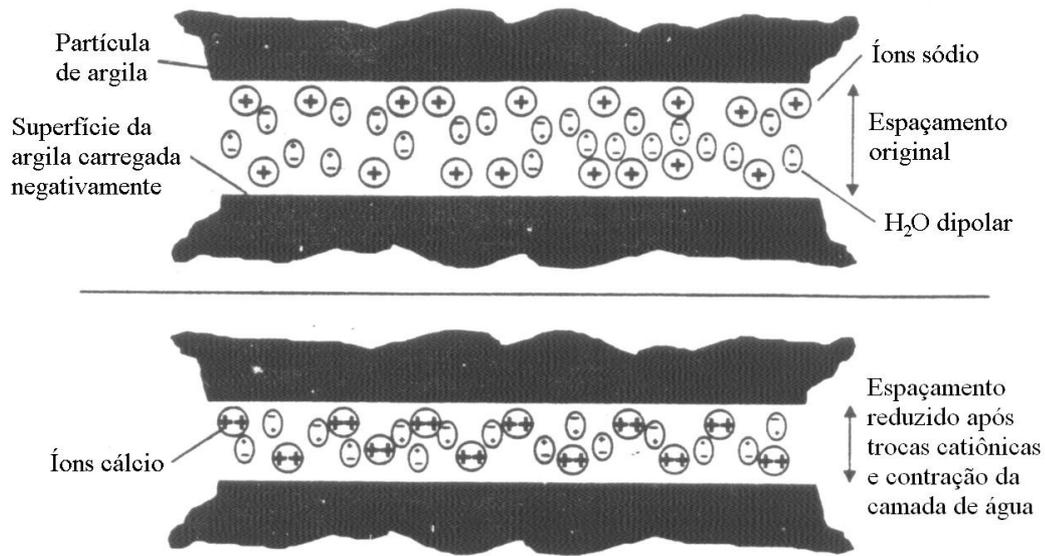


Figura 1: mecanismo de troca de cátions (PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1999)

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que os géis de silicato cobrem e ligam as partículas de argila bloqueando os vazios. Esses géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos. Essa reação só ocorre em presença de água, cuja função é carregar os íons de cálcio e hidroxila para a superfície da argila, conforme a figura 2.

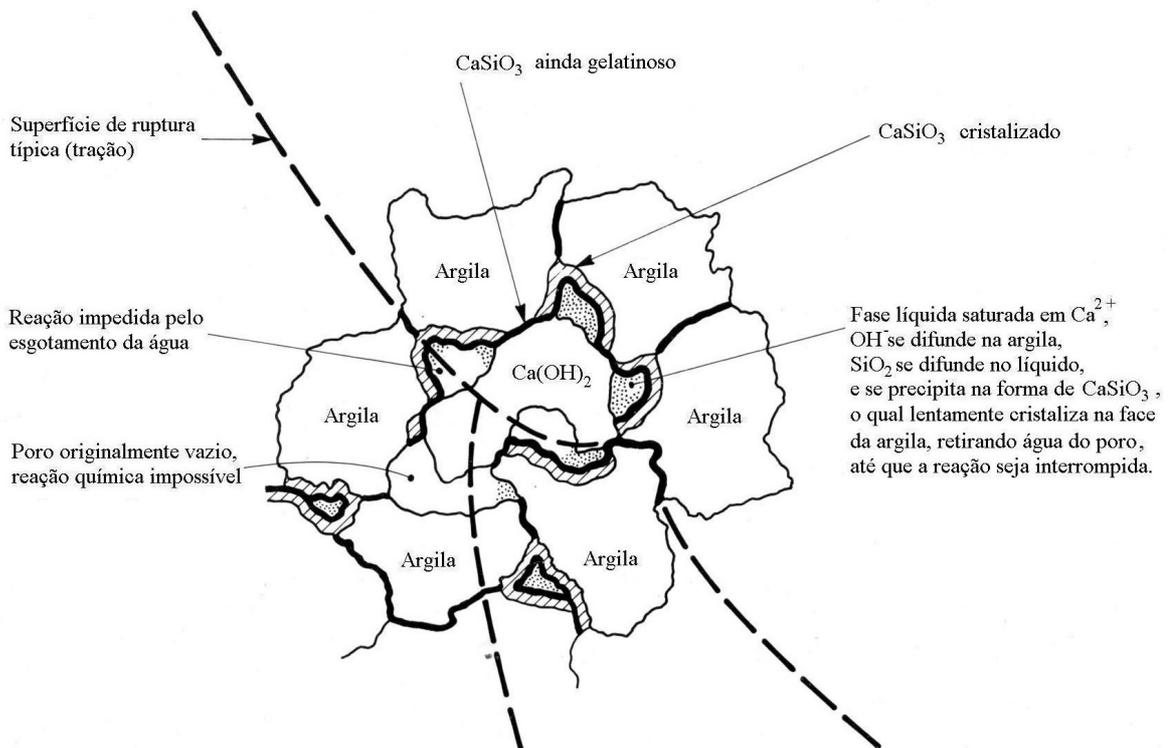


Figura 2: mecanismo de estabilização solo-cal (INGLES; METCALF, 1972)

2.1.2 Efeito da Densidade e Compactação

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que, com o aumento da densidade da mistura de solo-cal, há um aumento da resistência e diminuição da permeabilidade até um valor mínimo, próximo à umidade ótima, que depois começa a aumentar novamente.

Quando a cal é adicionada ao solo, ocorre o fenômeno de troca de bases com os minerais de argila. Essa reação leva à floculação das partículas argilosas, causando o aumento do ângulo de atrito da massa de solo (FOSSBERG; GREG, 1963 apud NÓBREGA, 1995).

Essa reação que acarreta na floculação das partículas argilosas aumenta a quantidade de vazios e o tamanho dos vazios existentes na amostra. Essa estrutura floculada tem resistência suficiente para resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios elevado, reduzindo o peso específico aparente seco da amostra. Quanto mais vazios existirem na amostra, maior será a necessidade de adição de água para preenchê-los, resultando em uma umidade ótima maior e uma curva de compactação mais achatada (SIVAPULLAIAH et al., 1998 apud LOPES JUNIOR, 2007).

2.1.3 Efeito do Teor de Umidade e do Fator Água/Cal

Em estudos com solo-cal e solo-cimento, Foppa (2005) corroborou com Carraro (1997), que, em alguns casos, o teor de umidade que proporciona máxima resistência e durabilidade não é necessariamente igual ao teor de umidade que gera o maior peso específico aparente seco, e sim um valor um pouco inferior ao teor ótimo de umidade. Kézdi (1979) observou a inexistência de correlação entre o teor ótimo de umidade de moldagem, que confere aos corpos-de-prova o máximo valor de resistência, e aquele que permite a compactação na máxima densidade.

O tipo de cal utilizada também tem grande influência no teor ótimo de umidade. Para um solo com 38% de argila e 32% de silte, estabilizado com cales cálcica e dolomítica, observou-se uma umidade ótima em média 1,3% maior para as misturas com cal cálcica do que para as misturas com cal dolomítica (GUIMARÃES, 1971 apud LOPES JUNIOR, 2007).

Lopes Junior (2007) verificou a inexistência de uma relação bem definida entre o fator água/cal e a resistência à compressão simples. Essa tendência também foi observada, por Foppa (2005), nas amostras com cimento. Os autores atribuem essa inexistência de relação entre o fator água/cal e o fator água/cimento pelo fato dos vazios estarem parcialmente preenchidos por água, acarretando na inexistência de relação entre a quantidade de vazios e a quantidade de água.

2.1.4 Efeito do Tempo de Cura

Carraro (1997), ao estudar um solo silto-arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, observou que o teor de cal presente nas amostras não exerceu influência significativa sobre os valores médios de resistência à compressão simples até o tempo de cura de 90 dias. Para o tempo de cura de 180 dias, a resistência à compressão simples mostra-se dependente do teor de cal de carbureto, através de uma relação aproximadamente linear.

Ingles e Metcalf (1972) apresentaram um estudo sobre a influência do tempo de cura em diferentes tipos de solos, tratados com 5% de cal hidratada, em que as maiores taxas de ganhos de resistência foram observadas nos pedregulhos arenosos, conforme a figura 3.

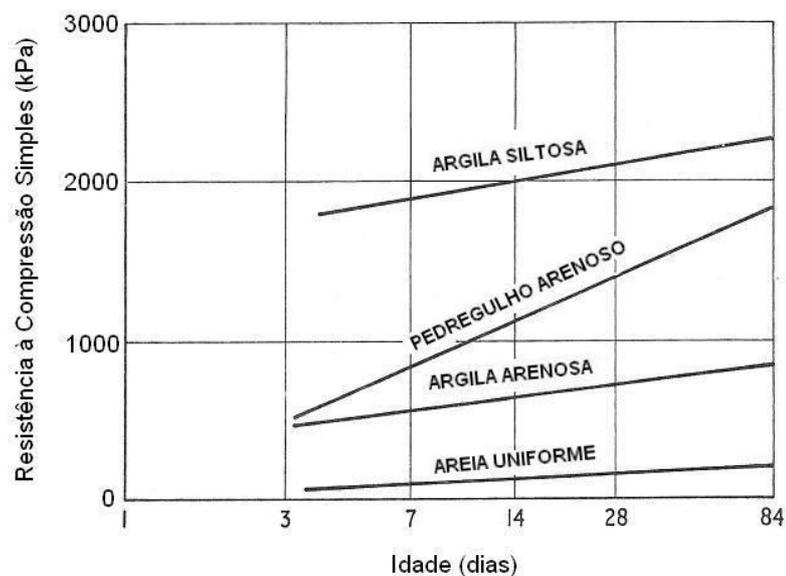


Figura 3: efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal (adaptado de INGLES; METCALF, 1972)

2.2 VARIÁVEIS INFLUENTES NO COMPORTAMENTO DO COMPÓSITO SOLO-CIMENTO

Felt (1955 apud FOPPA, 2005) afirma que o tipo de composição química do solo, a quantidade de cimento e águas adicionados, a densidade de compactação, o tempo de mistura do solo, cimento e água e o teor de finos, no caso de solos argilosos, são fatores que mais influenciam o comportamento das misturas de solo-cimento.

Devido às divergências entre os autores no que se refere às variáveis que têm maior influência sobre a resistência mecânica do solo-cimento, têm sido realizadas pesquisas com o intuito de identificar os parâmetros que são determinantes no comportamento destas misturas.

Neste trabalho, serão detalhados os efeitos de alguns parâmetros que têm grande influência na determinação da resistência mecânica de solos cimentados, os quais têm relação com as variáveis de estudo desta pesquisa.

2.2.1 Efeito do Cimento

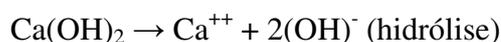
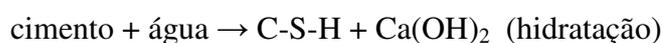
Segundo Ingles e Metcalf (1972), as propriedades dos solos são alteradas com o aumento da quantidade de cimento adicionada, ou seja, há um aumento da capacidade de carga, aumento da durabilidade a ciclos de molhagem e secagem e diminuição da permeabilidade. Porém, há um aumento da última em solos argilosos, e existe um aumento da tendência à retração em solos granulares e uma redução da tendência à expansão de solos argilosos.

Ao adicionar pequenas quantidades de cimento, observa-se um aumento do tamanho das partículas, redução da capacidade de retenção de água e redução do índice de plasticidade (CATTON, 1962 apud FOPPA, 2005).

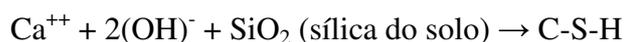
O solo-cimento se difere do concreto, pois nele as partículas de cimento são rodeadas pelos grãos de solo, gerando ligações mais fracas e resultando em resistências menores. Já no concreto, a pasta de cimento envolve os agregados, preenchendo seus vazios e cimentando-os, formando um material de alta resistência (KÉZDI, 1979).

Conforme Moh (1965 apud NÚÑEZ, 1991) as reações que ocorrem em um material compósito de solo-cimento-água são:

a) reações primárias:



b) reações secundárias:



Sendo que o C-S-H (silicato hidratado de cálcio) e o C-A-H (aluminato hidratado de cálcio) são os compostos cimentantes responsáveis pela resistência.

Primeiramente ocorre a hidratação do cimento com a formação do C-S-H e a liberação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que dissocia-se em água elevando o pH do meio para aproximadamente 12. Os produtos da hidratação do cimento, formados nos primeiros instantes, são gelatinosos e amorfos; com o aumento do tempo de cura, o processo de dissecação dos compostos gelatinosos e a cristalização de novos minerais promove o endurecimento dos produtos da hidratação. Numa fase subsequente (reações secundárias), o cálcio liberado pela hidratação do cimento, reage gradualmente com a sílica e a alumina presentes no solo, formando produtos cimentantes (CROFT, 1967 apud FOPPA, 2005).

De acordo com El Rawi (1967 apud FOPPA, 2005), a cimentação é uma combinação de dois tipos de ligações: as ligações mecânicas entre o cimento hidratado e a superfície rugosa dos grãos e as ligações químicas desenvolvidas entre o cimento hidratado e a superfície dos grãos.

Para o caso de areias artificialmente cimentadas, uma cimentação fraca acarreta em um recobrimento parcial da superfície das partículas de solo, pelos produtos da hidratação, e promovem a ligação de alguns pontos de contato. Para um nível médio de cimentação, a maior parte dos contatos entre as partículas estão unidos pelos produtos da cimentação. Quando a cimentação é forte, os produtos cimentantes começam a preencher os vazios existentes entre as partículas do solo dificultando a distinção entre as partículas de solo e os produtos cimentantes (CHANG; WOODS, 1992).

2.2.2 Efeito da Densidade e Compactação

As densidades em que as misturas de solo-cimento são compactadas são de fundamental importância no que diz respeito ao ganho de resistência e à diminuição da permeabilidade até um valor mínimo, próximo da umidade ótima, assim como ocorre para as misturas de solo-cal. Segundo Ingles e Metcalf (1972), a adição de pequenas quantidades de cimento ao solo (até 2%) apenas modificam suas propriedades, enquanto adições de quantidades superiores alteram significativamente suas propriedades.

Felt (1955 apud FOPPA, 2005) observou, em relação à resistência, um aumento exponencial da resistência à compressão simples com o aumento da densidade da mistura, mantendo-se constante o teor de umidade. O autor também percebeu que em solos siltosos e argilosos, o aumento da densidade da mistura compactada acarretava na redução da perda de massa das amostras submetidas aos ensaios de durabilidade.

2.2.3 Efeito do Teor de Umidade e do Fator Água/Cimento

O ganho de resistência de um solo cimentado está intimamente ligado ao teor de umidade em que ele foi moldado. A água adicionada deve ser suficiente para que possa atender as necessidades exigidas pelas reações de hidratação do cimento, caso contrário, poderá comprometer a resistência prevista para determinada quantidade de cimento adicionada.

O tempo de mistura e a demora na compactação afetam a relação entre o teor de umidade, a resistência, a densidade e a durabilidade. Esse intervalo de tempo entre a mistura e a compactação é observado, principalmente, em campo. No entanto, a perda de resistência e durabilidade do solo-cimento pode ser reduzida, geralmente, pela adição de uma porcentagem adicional de água para compensar as perdas por evaporação (LIGHTSEY et al., 1970 apud FOPPA, 2005).

Horpibulsuk et al. (2003 apud FOPPA, 2005), ao estudarem argilas moles com altos teores de umidade (106% a 185%), através de ensaios de compressão simples, verificaram que o fator água/cimento é um parâmetro apropriado para a análise da resistência, pois leva em consideração as interações físico-químicas entre a água, argila e o cimento.

Entretanto, Larnach (1960) afirma que a resistência de um solo artificialmente cimentado não pode ser relacionada diretamente com o fator água/cimento. Segundo o autor, as misturas são moldadas na condição não saturada, isto é, os vazios não estão totalmente preenchidos por água, e para que se possa correlacionar a resistência e o fator água/cimento, assim como se observa para as argamassas e concretos, todos os vazios devem ser preenchidos por água.

Considerando-se a necessidade de estabelecer uma relação entre parâmetros que considerem a influência do volume de vazios na resistência mecânica de solos artificialmente cimentados, Foppa (2005) estudou a aplicabilidade do fator vazios/cimento, devido à ineficiência do fator água/cimento, para compósitos parcialmente saturados, baseado na relação direta entre volume de vazios/volume de cimento proposta por Larnach (1960).

Como essa variável é de fundamental importância nessa pesquisa, os fatores vazios/cimento e vazios/cal têm um item à parte nessa revisão bibliográfica.

2.3 OS FATORES VAZIOS/CAL E VAZIOS/CIMENTO

O fator vazios/cal foi estendido, para solos tratados com cal, a partir do fator vazios/cimento, que, por sua vez, surgiu através da necessidade de uma metodologia racional de dosagem do teor de cimento a ser utilizado em solos artificialmente cimentados, devido, principalmente, ao seu emprego em larga escala.

Larnach (1960) realizou os primeiros estudos voltados para a obtenção de uma relação entre volume de vazios e volume de cimento. Através da relação entre volume de vazios e volume de cimento, expressa na equação 1, que está relacionada com a resistência à compressão simples de vigotas compostas de areia fina, argila e cimento, chegou-se à curva de tendência da figura 4. Observa-se um bom ajuste da curva aos pontos obtidos.

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{VolumeAbsolutodeVazios}(ar + \text{água})}{\text{VolumeAbsolutodeCimento}} \quad (\text{equação 1})$$

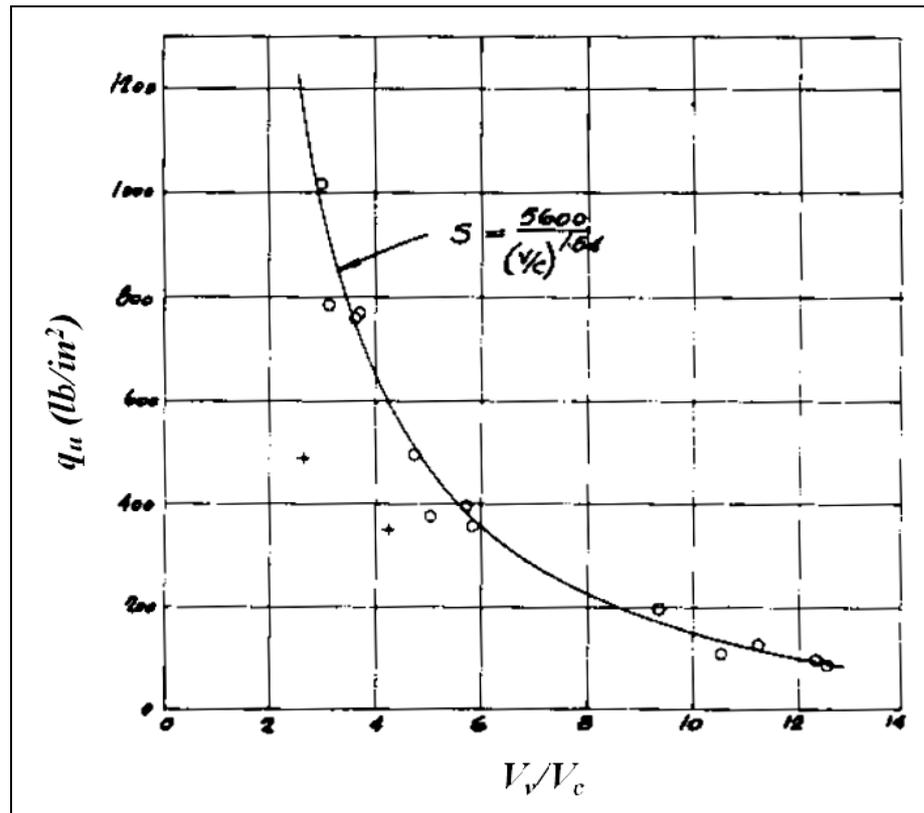


Figura 4: fator vazios/cimento pela resistência à compressão simples (adaptado de LARNACH, 1960)

Baseado na relação proposta por Larnach (1960), Foppa (2005) estudou a validade dessa relação para um solo areno-siltoso (solo residual de arenito da formação Botucatu - SRAB) com 2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12% de cimento. Foi realizada uma série de ensaios de compressão simples, para cada porcentagem de cimento, moldados para diferentes teores de umidade e massas específicas aparente secas. As variáveis analisadas foram o teor de umidade, o teor de cimento e o grau de compactação das amostras. Para que se pudesse avaliar e quantificar a influência de cada variável isoladamente, manteve-se fixa uma delas enquanto variavam-se as outras duas. Após a quantificação de cada variável sobre a resistência mecânica, foi possível elaborar as curvas de resistência *versus* fator vazios/cimento, mostradas na figura 5, para um determinado teor de umidade, conforme o modelo proposto por Larnach (1960).

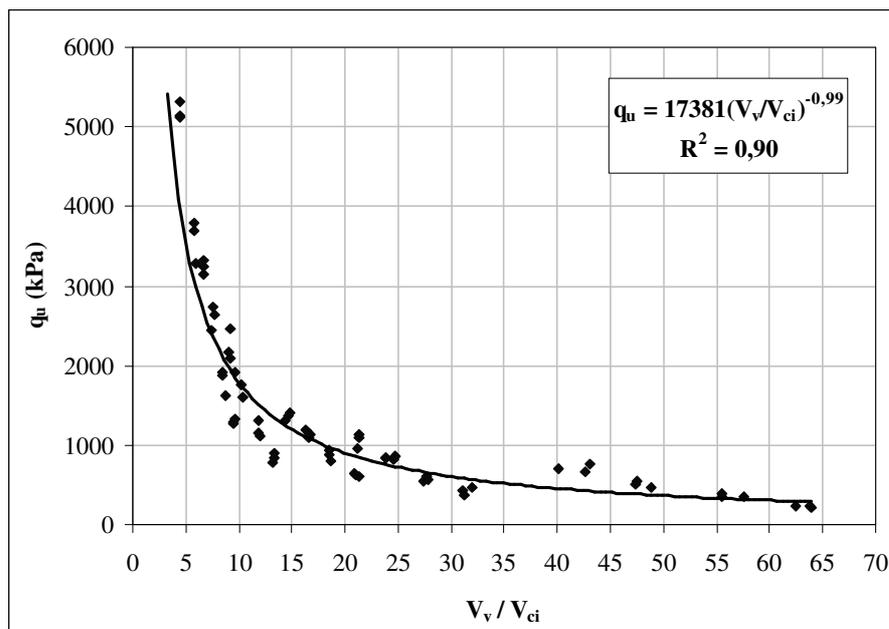


Figura 5: curva de resistência à compressão simples versus fator vazios/cimento modelo de Larnach (1960) (FOPPA, 2005)

Constatou-se que corpos-de-prova com o mesmo fator vazios/cimento (obtidos através de índice de vazios e teores de cimento diferentes entre si) apresentaram valores de resistência diferentes nos ensaios de compressão simples, sendo que os pontos com menor porosidade e menor quantidade de cimento atingiram resistências maiores. Esse fato ocorreu devido à proporcionalidade, assumida pela relação estabelecida por Larnach (1960), entre o volume de vazios e o volume de cimento.

A forma usada para compatibilizar essas diferentes taxas de variação foi a aplicação de um expoente sobre uma delas (neste caso, o volume de cimento), resultando num melhor ajuste para o fator vazios/cimento, de modo a serem obtidos valores de resistência com maior precisão.

Portanto, o novo fator vazios/cimento, mostrado na figura 6, pôde ser apresentado pelo quociente entre o volume de vazios e o volume de cimento ajustado pela potência 0,28, ou, ainda, através da adimensionalização das variáveis, pela razão entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cimento (C_{iv}) na potência 0,28 sem alteração na qualidade dos resultados, devido à proporcionalidade entre as variáveis. A relação que define o fator vazios/cimento é mostrada na equação 2.

$$\text{Fator vazios / cimento} = \frac{\eta}{(C_{iv})^{0,28}} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

η = porosidade do material, expressa em porcentagem;

C_{iv} = teor volumétrico de cimento, expresso em porcentagem sobre o volume total.

Através do gráfico de resistência à compressão simples *versus* fator vazios/cimento, demonstrado na figura 6, percebe-se um ótimo ajuste da linha de tendência aos pontos.

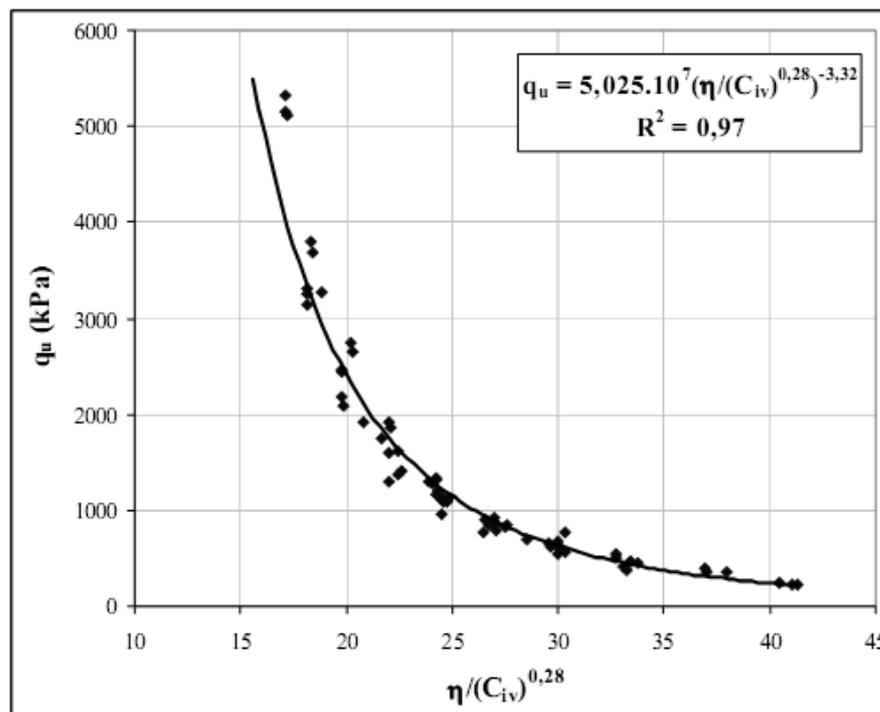


Figura 6: curva resistência à compressão simples versus fator vazios/cimento expressa em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento (FOPPA, 2005)

Diversos estudos vêm sendo realizados por pesquisadores do Laboratório de Resíduos, Novos Materiais e Geotecnia Ambiental – ENVIRONGEO – UFRGS, utilizando o fator vazios/cimento e o fator vazios/cal como parâmetros de controle da resistência mecânica de solos reforçados, em que se varia o tipo de solo e o agente cimentante. Foppa (2005) sugeriu o expoente 0,28 para o fator vazios/cimento, para a matriz de solo e de agente cimentante

utilizados. Lopes Junior (2007) manteve a mesma matriz de solo utilizada por Foppa (2005), o solo residual da formação Botucatu, porém utilizou cal como agente cimentante e adicionou uma porcentagem de resíduo de britagem de rocha basáltica à matriz de solo, obtendo um expoente para o fator vazios/cal igual a 0,06 (equação 3). Cruz (2008) utilizou como matriz de solo areia fina e manteve o agente cimentante (cimento), e obteve um expoente igual a 1,00 (equação 4).

$$Fatorvazios / cal = \frac{\eta}{(C_{iv})^{0,06}} \quad (\text{equação 3})$$

$$Fatorvazios / cimento = \frac{\eta}{(C_{iv})} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

η = porosidade do material, expressa em porcentagem;

C_{iv} = teor volumétrico de cimento, expresso em porcentagem sobre o volume total.

A curva ajustada de resistência à compressão simples *versus* fator vazios/cal para amostras com 90 dias de cura, determinada por Lopes Junior (2007), está apresentada na figura 7.

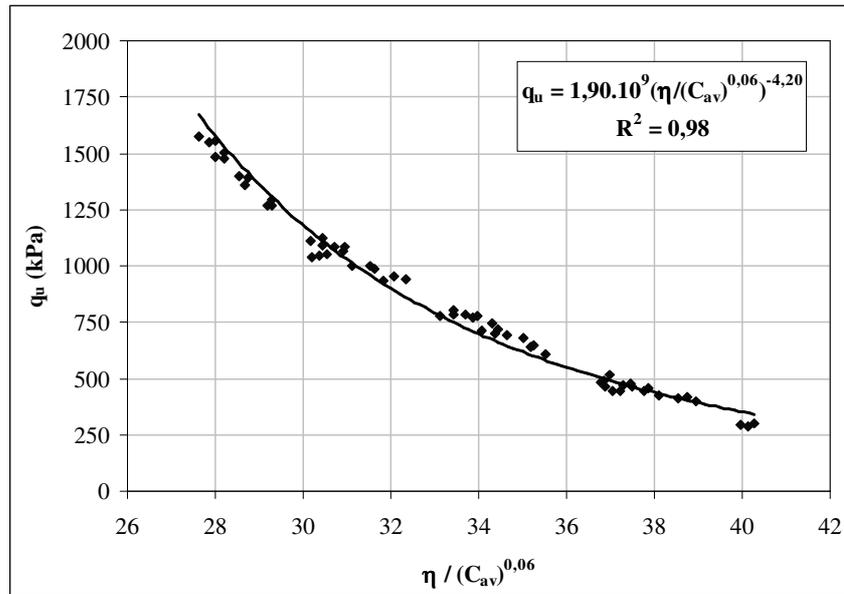


Figura 7: fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 90 dias de cura (LOPES JUNIOR, 2007)

Na figura 8, é apresentada a curva de resistência à compressão simples *versus* fator vazios/cimento obtida por Cruz (2008), para uma areia reforçada com cimento.

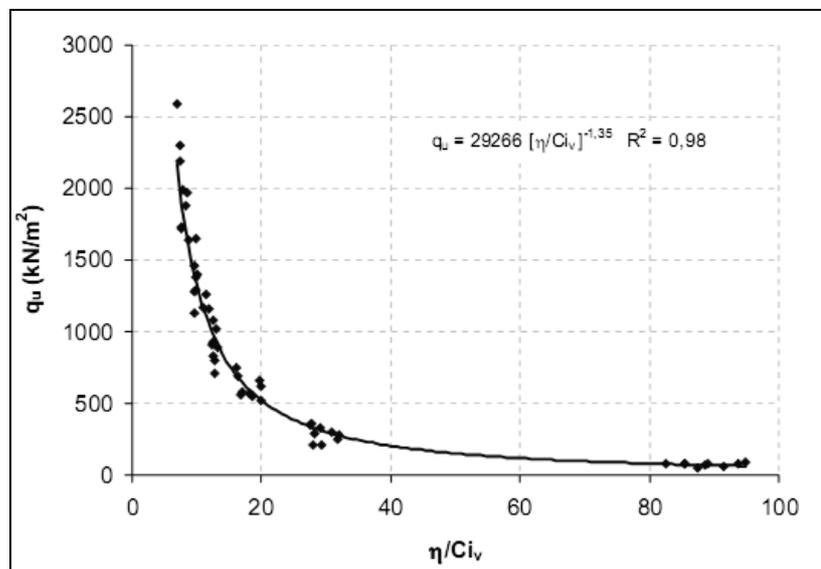


Figura 8: resistência à compressão simples *versus* fator vazios/cimento expressa em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento (CRUZ, 2008)

Acredita-se que os valores desses expoentes estejam intimamente ligados aos parâmetros constitutivos do material compósito, como ângulo de atrito interno e coesão (LAUTENSCHLÄGER, 2007).

3 MATRIZ DE SOLO E AGENTE CIMENTANTE

Conforme Ingles e Metcalf (1972), o melhoramento das propriedades do solo com a adição de agentes cimentantes, como cal e cimento, pode ser aplicado a qualquer tipo de solo, porém uma melhor eficiência é observada quando a técnica é aplicada a solos granulares, devido à facilidade de homogeneização da mistura.

Nesta revisão, serão abordadas as características da formação do solo adotado, o solo residual de arenito da formação Botucatu (SRAB), o tipo de cimento utilizado (CP V – ARI, cimento Portland de Alta Resistência Inicial), o tipo de cal adotada (hidratada dolomítica) e o resíduo adicionado, proveniente da britagem de rocha basáltica. A utilização destes materiais deve-se a fatores como o amplo banco de dados na literatura, e por terem sido usados por Foppa (2005) e por Lopes Junior (2007) em suas dissertações de mestrado, as quais servirão como embasamento para as análises que serão efetuadas posteriormente.

3.1 SOLO

O solo utilizado nessa pesquisa foi um solo residual de arenito pertencente à denominada formação Botucatu, que abrange uma área superior a 1.300.000 km², no estado do Rio Grande do Sul. Essa formação se desenvolve a partir da fronteira com o Uruguai, na região de Santana do Livramento, constituindo uma faixa de afloramento que se prolonga para o norte até São Francisco de Assis, onde apresenta uma inflexão para o leste, ocorrendo ao longo da escarpa basáltica conformando uma estreita e alongada faixa (figura 9).

O grupo de Geotecnia da UFRGS, representado pelo LMS – Laboratório de Mecânica dos Solos, LEGG – Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental e ENVIRONGEO – Laboratório de Resíduos, Novos Materiais e Geotecnia Ambiental, apresenta inúmeras pesquisas relacionadas a este solo, contribuindo para o conhecimento de suas propriedades físicas, químicas (NÚÑEZ, 1991), seu comportamento mecânico (DALLA ROSA, 2006; FERREIRA, 2002; LAUTENSCHLÄGER, 2007; PRIETTO, 1996) e de suas aplicações em engenharia rodoviária e de fundações (CRUZ, 2008; FOPPA, 2005; LOPES JUNIOR, 2007).

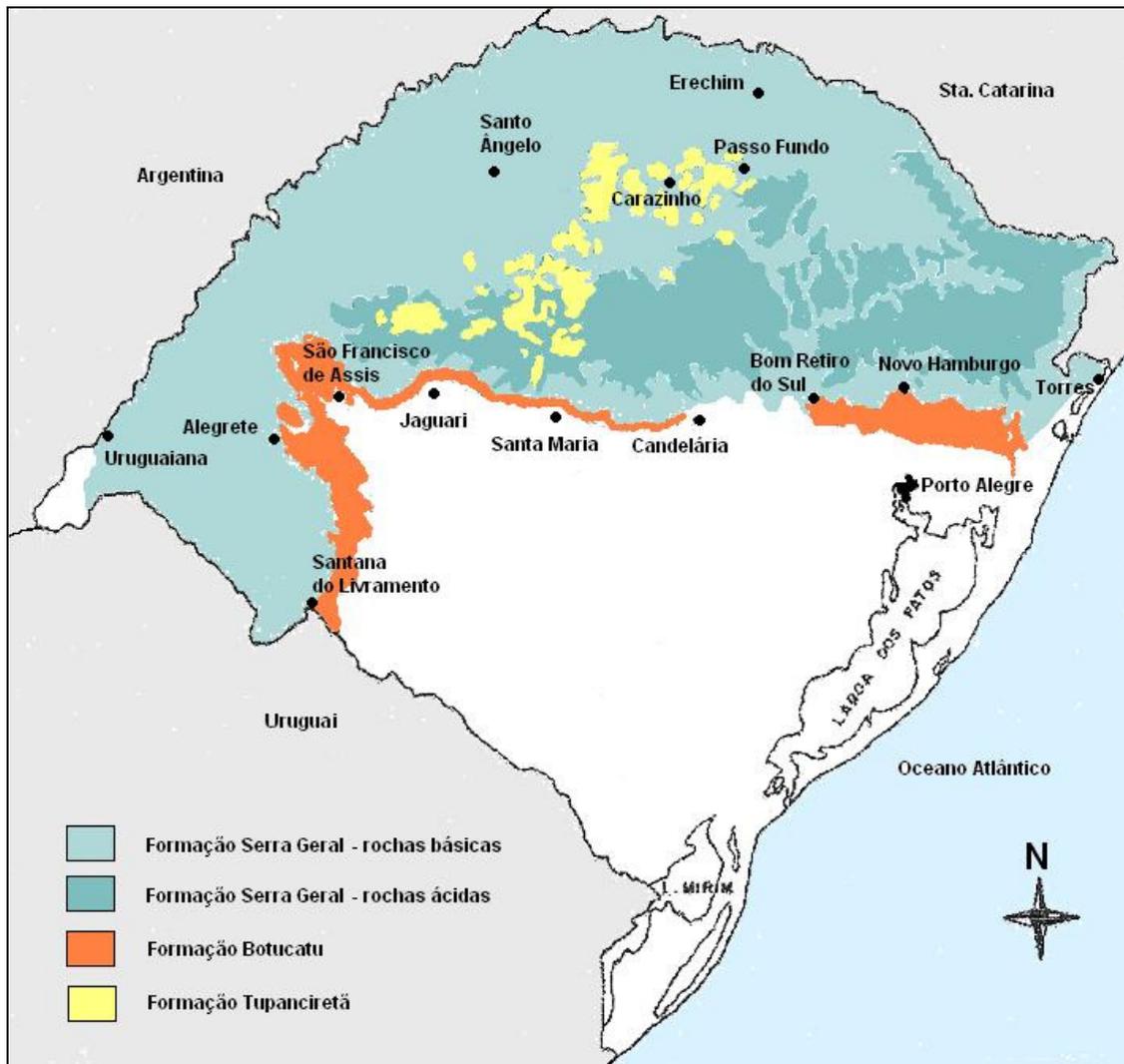


Figura 9: formações geológicas ao norte do estado do RS (LOPES JUNIOR, 2007)

Além dos conhecimentos sobre suas propriedades, a escolha desse solo baseou-se em outras razões, como o fato de ser um solo que cobre grande área do território do Estado, encontrado sob regiões de grande importância econômica, possuir características como baixa capacidade de suporte e erodibilidade, fazendo com que necessite de algum tipo de estabilização para seu emprego em obras de Engenharia, e por sua uniformidade e boa trabalhabilidade em laboratório.

A caracterização mineralógica e físico-química realizada por Nuñez (1991) está apresentada no quadro 1. O autor denota que a perda da cimentação, entre os grãos de quartzo constituintes deste solo, que lhe conferem boa resistência, deve-se ao efeito da erosão e intemperização, adquirindo um comportamento similar ao de uma areia.

Difratograma de Raios-X da Fração Argila	Fração Cristalina	15,70 %
	Caolinita	9,20 %
	Hematita	3,20 %
	Micas e Ilitas	2,10 %
	Quartzo	1,20 %
	Fração Amorfa	84,30 %
Análise Química da Fração Argila	SiO ₂	9,70 %
	Al ₂ O ₃	6,69 %
	Fe ₂ O ₃	1,21 %
Análise Físico-química do Solo	pH	4,7
	Matéria Orgânica	0 %

Quadro 1: propriedades físico-químicas do arenito Botucatu (NÚÑEZ, 1991)

Através da curva granulométrica, apresentada na figura 10, obtida por Foppa (2005), percebe-se que o solo residual de arenito da formação Botucatu é uma areia fina siltosa fracamente plástica e mal graduada.

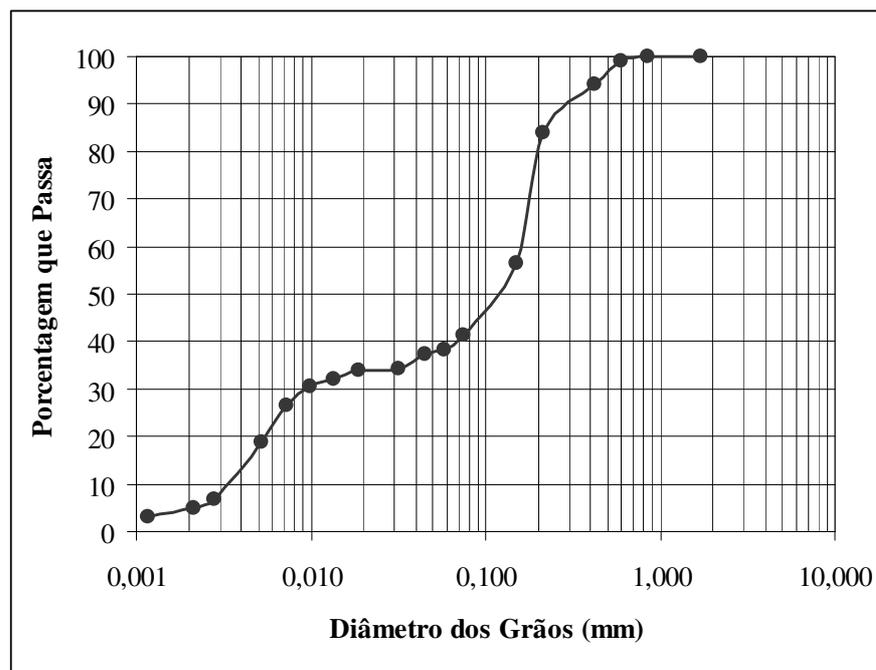


Figura 10: curva granulométrica do SRAB (FOPPA, 2005)

A jazida de onde é extraído o solo está localizada no município de São Leopoldo, região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. A figura 11 mostra a jazida e o aspecto deste solo.



Figura 11: jazida de extração do SRAB (LOPES JUNIOR, 2007)

3.2 RESÍDUO

O resíduo utilizado nesta pesquisa, oriundo do município de Erechim, região norte do estado do Rio Grande do Sul, pertence à denominada formação Serra Geral, que abrange praticamente toda a região norte do Estado (figura 9) e é proveniente do processo de britagem de rocha basáltica. Essa formação se desenvolve nas regiões de Uruguaiana e Alegrete, constituindo o Planalto da Campanha, se estendendo até o leste do Estado, na região de Torres.

Essa rocha é empregada em larga escala em obras de Engenharia, servindo como agregados para argamassas, concretos e obras rodoviárias, porém tem-se dificuldade no que se refere à disposição e ao reaproveitamento do resíduo gerado pelo processo de britagem. A

preocupação com os resíduos provenientes de qualquer tipo de indústria tem sido alvo de diversas pesquisas atualmente.

Lopes (2002 apud LOPES JUNIOR, 2007) estudou a influência da granulometria do resíduo de britagem em concretos, obtendo valores mais elevados de resistência para as amostras em que o resíduo foi utilizado como agregado miúdo. O autor também realizou uma caracterização das propriedades químicas do resíduo proveniente do processo de britagem da rocha. Na figura 12, é mostrado o local de onde as amostras de resíduo foram retiradas, e no quadro 2 são apresentadas as propriedades químicas desse resíduo.



Figura 12: local de retirada da amostra de resíduo (LOPES JUNIOR, 2007)

COMPOSTOS DO RESÍDUO	%
Óxido de silício (SiO_2)	54,1%
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	12,0%
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	15,7%
Óxido de cálcio (CaO)	10,0%
Óxido de potássio (K_2O)	1,0%
Óxido de magnésio (MgO)	4,9%
Óxido de sódio (Na_2O)	2,3%

Quadro 2: compostos químicos do resíduo
(LOPES, 2002 apud LOPES JUNIOR, 2007)

Através da curva granulométrica, apresentada na figura 13, obtida por Lopes Junior (2007), percebe-se, no resíduo, uma predominância de silte e areia fina.

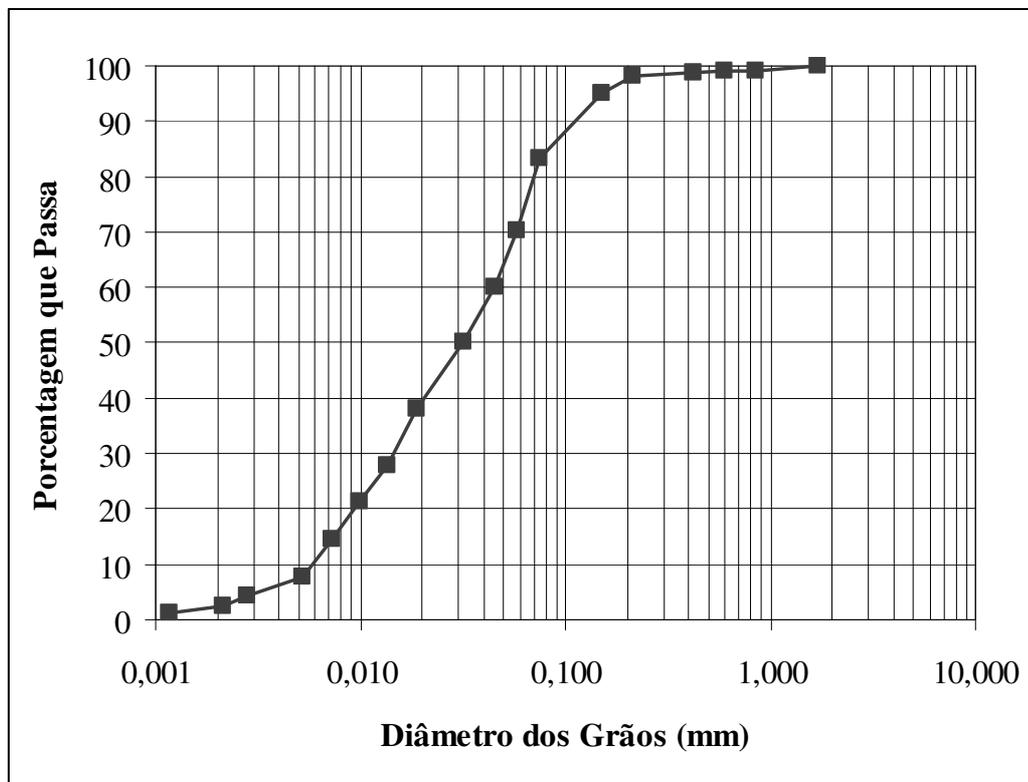


Figura 13: curva granulométrica do resíduo (LOPES JUNIOR, 2007)

3.3 CAL

A cal utilizada nesta pesquisa foi a cal hidratada dolomítica. A escolha dessa cal, ao invés da cal hidratada cálcica, deve-se ao fato da primeira ser proveniente das jazidas existentes no Estado. O quadro 3 apresenta os resultados de ensaios de caracterização da cal utilizada, obtidos pelo fabricante, comparados com as exigências da Norma Brasileira – NBR 7175 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993 apud LOPES JUNIOR, 2007).

PROPRIEDADES	LIMITES DA NBR 7175	ANÁLISE
Densidade	$\leq 600\text{g/l}$	510 g/l
Perda ao Fogo	-	23,3 %
Resíduo Insolúvel	-	4,7 %
CO ₂ (anidrido carbônico)	$\leq 5\%$	2,2 %
Óxidos Totais	$\geq 88\%$	94,8 %
Óxidos não hidratados	$\leq 15\%$	11,0 %
CaO	-	44,8 %
MgO	-	27,9 %
Umidade	$\leq 1,5\%$	0,6 %
Resíduo na peneira 0,600mm	$\leq 0,5\%$	0,0 %
Resíduo na peneira 0,075mm	$\leq 15\%$	8,0 %

Quadro 3: caracterização da cal dolomítica (LOPES JUNIOR, 2007)

Lopes Junior (2007) determinou a massa específica da cal, segundo as recomendações da Norma Brasileira – NBR NM 23, a partir da média de três ensaios, cujo valor foi de 2,49 g/cm³.

3.4 CIMENTO

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), o cimento pode ser definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob hidratação. O cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP V-ARI, apresenta valores

aproximados de resistência à compressão de 26 MPa no primeiro dia de cura e 53 MPa aos 28 dias de cura. Este cimento foi escolhido devido ao seu acelerado ganho de resistência, atingindo aproximadamente 80% da resistência obtida aos 7 dias de cura, conforme mostra a figura 14.

Para Ingles e Metcalf (1972), o cimento é o material com custo mais elevado quando se trata de estabilização de solos. Daí vem à necessidade da realização de um número grande de ensaios para que se possa determinar o teor mínimo de cimento a ser adicionado para que sejam satisfeitas as especificações do projeto.

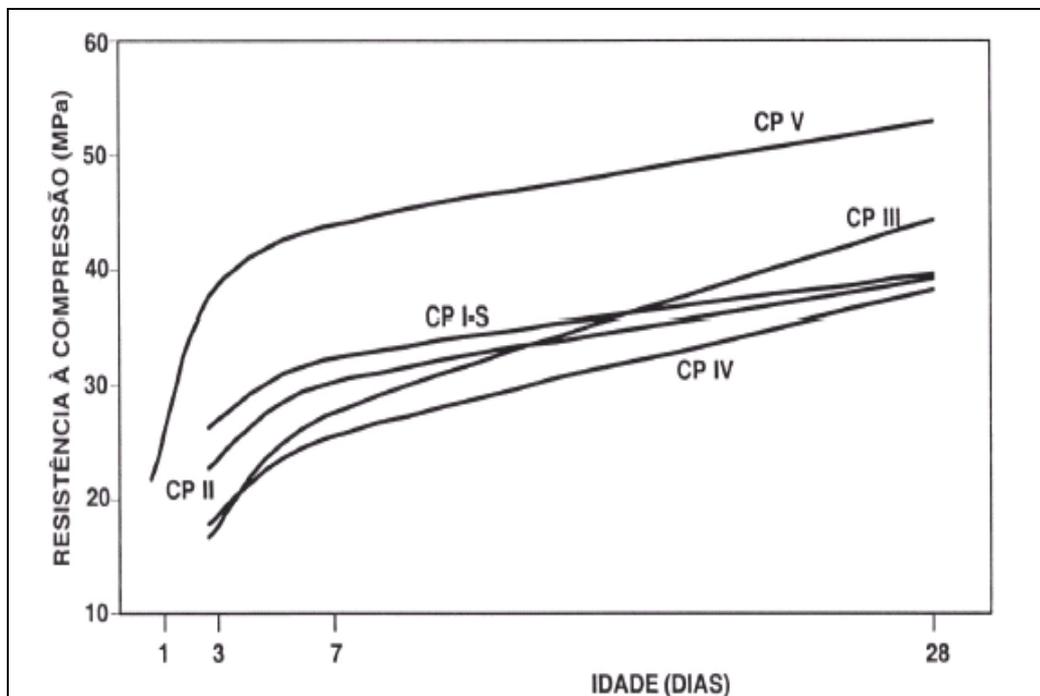


Figura 14: gráfico da resistência à compressão simples versus idade da amostra para diferentes tipos de cimento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002)

Lopes Junior (2007) determinou a massa específica do cimento, segundo as recomendações da NBR NM 23, a partir da média de três ensaios, cujo valor foi de 3,15 g/cm³.

3.5 ÁGUA

A água utilizada é proveniente da destilação da água da rede de abastecimento público.

4 MÉTODO DE PESQUISA

Foram explicitadas as considerações referentes ao estado da arte da técnica do solo-cimento e do solo-cal, em que foram abordados seus aspectos de maior relevância, bem como suas características, tanto do solo e resíduo quanto dos agentes cimentantes, cal e cimento. Nos itens a seguir estão apresentadas as metodologias para a realização das atividades.

4.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: é possível estimar a resistência à compressão simples de um solo artificialmente tratado com cal, cimento e resíduo de britagem de rocha através do uso do fator vazios/agente cimentante?

4.2 OBJETIVOS

Essa pesquisa tem como objetivo primário a verificação da validade do uso do fator vazios/agente cimentante na estimativa da resistência à compressão simples de um solo arenoso artificialmente tratado, simultaneamente, com cal, cimento e resíduo.

Para que se possa atingir o objetivo primário, foram estabelecidos os seguintes objetivos secundários:

- a) quantificação da influência de cada parâmetro de controle isoladamente, para as diferentes proporções de materiais utilizados, em função da resistência à compressão simples,
 - quantidade de agente cimentante;
 - porosidade das misturas compactadas;
 - teor de umidade de moldagem;
 - tempo de cura;
- b) confecção das relações entre as variáveis de interesse em função da resistência à compressão simples do material.

4.3 HIPÓTESES

A hipótese do trabalho é que é possível estimar a resistência à compressão simples de um solo artificialmente tratado com cal, cimento e resíduo de britagem de rocha.

4.4 PREMISSAS

É premissa do trabalho que o fator vazios/cimento, proposto por Foppa (2005), é uma variável de análise válida na previsão de carga de ruptura de um solo artificialmente cimentado e que pode ser estendida para outros materiais compósitos, através de curva apropriada, desde que sejam comparados compósitos com o mesmo tempo de cura e teor de umidade.

4.5 PRESSUPOSTO

É pressuposto do trabalho que a sucção seja satisfatoriamente eliminada pelo processo de imersão dos corpos-de-prova, de acordo com o trabalho realizado por Lopes Junior (2007).

4.6 DELIMITAÇÕES

As delimitações desta pesquisa são: o tipo de solo utilizado, solo residual de arenito da formação Botucatu e o agente cimentante, composto de cal hidratada e cimento (CP V-ARI).

4.7 LIMITAÇÕES

As limitações estão relacionadas às dosagens consideradas, isto é, as variáveis em estudo mantêm uma relação de dependência e a quantificação de suas influências será válida somente para o espectro de dosagens adotado.

4.8 DELINEAMENTO

Na figura 15 estão apresentadas, esquematicamente, as etapas que definem o delineamento da pesquisa.

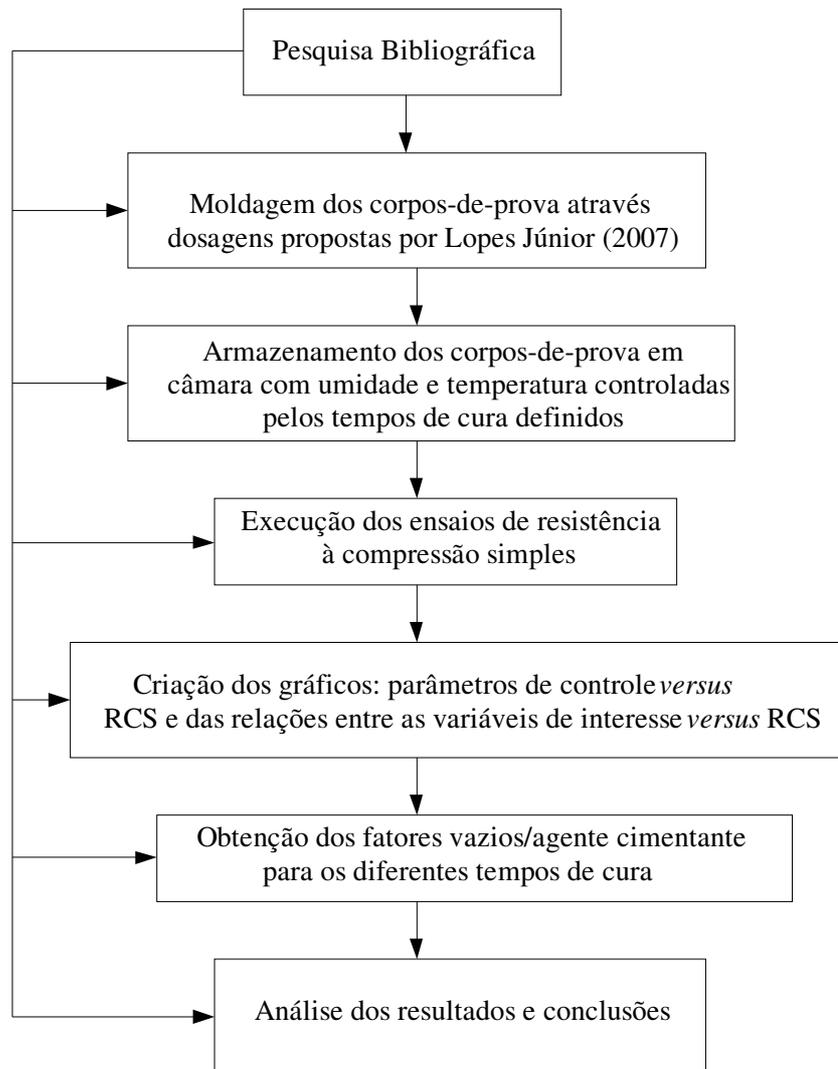


Figura 15: delineamento da pesquisa

A seguir, está detalhado o delineamento da pesquisa:

- a) pesquisa bibliográfica: etapa que se estendeu ao longo de toda a pesquisa. A proposta de revisão bibliográfica está voltada para a coleta de informações sobre a técnica de estabilização com cimento e com cal e sobre as variáveis de interesse. Posteriormente, ao longo do programa experimental, a revisão serviu de subsídio para interpretação e análise dos resultados obtidos. Nas conclusões, a revisão poderá ser

uma importante ferramenta para complementação de aspectos relevantes;

- b) definição das dosagens: as dosagens foram definidas a partir daquelas obtidas por Lopes Junior (2007), através das curvas de compactação adequadas para os materiais, devido à utilização dos mesmos materiais (solo residual de arenito da formação Botucatu, cal hidratada dolomítica, cimento CP V-ARI e resíduo de britagem de rocha basáltica);
- c) armazenamento e cura: para os três tempos de cura considerados nessa pesquisa (28, 60 e 90 dias), os corpos-de-prova permanecerão em uma câmara com temperatura e umidade controladas, para que esses fatores não influenciem na resistência mecânica do material compósito;
- d) execução dos ensaios: após permanecerem pelo tempo estabelecido na câmara úmida, os corpos-de-prova serão submetidos ao ensaio de compressão simples, para que se possam medir suas cargas de ruptura referentes às diversas dosagens empregadas;
- e) criação dos gráficos: considerando os parâmetros de controle dos corpos-de-prova e as resistências adquiridas através dos ensaios de compressão simples, serão confeccionados os gráficos dos parâmetros de controle versus resistência à compressão simples e as relações entre as variáveis de interesse versus resistência à compressão simples;
- f) fator vazios/agente cimentante: a partir dos gráficos que correlacionam os parâmetros de controle e a resistência à compressão simples, será determinada a relação vazios/agente cimentante em função da sua resistência mecânica, para os três tempos de cura considerados;
- g) análise dos resultados e conclusões: após a determinação do comportamento mecânico em função do fator vazios/agente cimentante e das demais variáveis de interesse, poderão ser efetuadas as conclusões referentes a esse novo material compósito.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentadas as dosagens dos materiais utilizados na moldagem dos corpos-de-prova e o programa de ensaios de compressão simples.

5.1 TEORES DE CAL E CIMENTO

As porcentagens (3% a 11% em relação à massa de sólidos da mistura) foram escolhidas a partir da experiência brasileira e internacional com o solo-cal e solo-cimento, tanto em nível experimental quanto em aplicações em campo como, por exemplo, rodovias. Devido à adição de cal e cimento simultaneamente, para cada porcentagem considerou-se metade composta por cal e a outra metade composta por cimento, ou seja, 3% agente cimentante implica em 1,5% de cal e 1,5% de cimento.

5.2 TEOR DE RESÍDUO DE BRITAGEM DE ROCHA

Segundo Transportation Research Board (1976), a proporção selecionada para os materiais numa mistura solo-cinza-cal deve garantir que esta mistura:

- a) apresente resistência e durabilidade adequadas ao seu propósito de utilização;
- b) seja de fácil manuseio e compactação;
- c) seja econômica.

No trabalho realizado por Carraro (1997) sobre solo-cinza-cal, o teor ótimo de cinza utilizado nas misturas foi de 25% em relação à massa de solo.

Considerando a granulometria do material e a sua trabalhabilidade, Lopes Junior (2007) adotou um teor de 25% para a definição da quantidade de resíduo nas misturas estudadas. A

figura 16 apresenta as curvas de distribuição granulométrica, obtidas com a utilização de defloculante, do solo natural, do resíduo de britagem de rocha e do solo com 25% de resíduo.

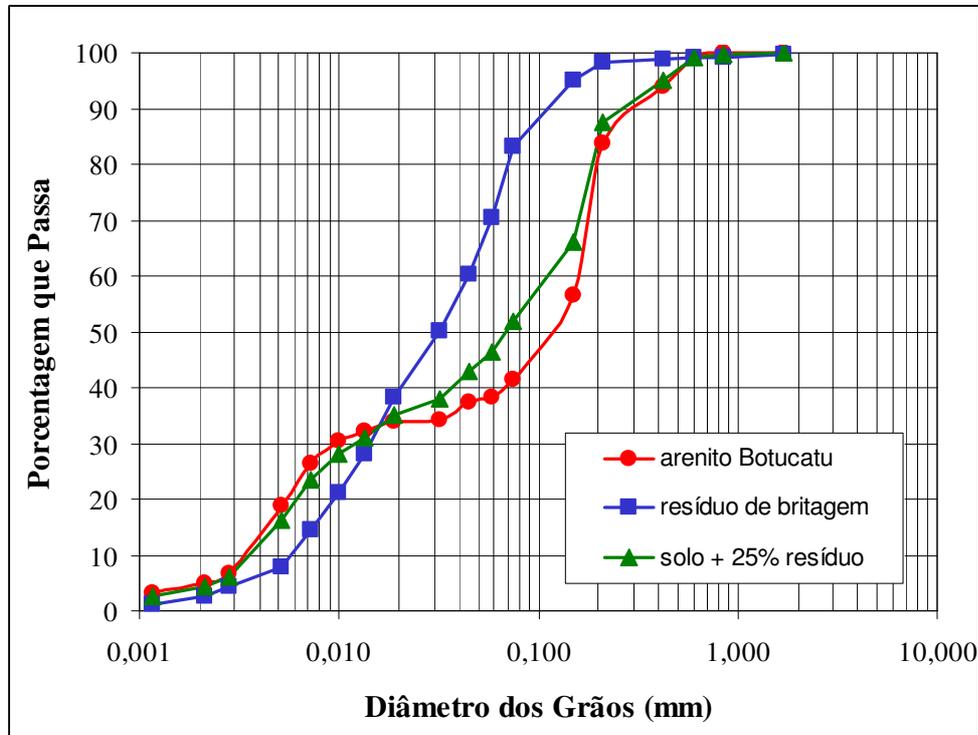


Figura 16: distribuição granulométrica dos materiais (LOPES JUNIOR, 2007)

5.3 PROGRAMA DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

O programa de ensaios de compressão simples foi a principal etapa desta pesquisa, cujo objetivo consistiu em avaliar a influência dos parâmetros de controle sobre a resistência mecânica de um solo artificialmente cimentado, sendo eles:

- a) quantidade de agente cimentante;
- b) porosidade das misturas;
- c) teor de umidade de moldagem;
- d) tempo de cura;
- e) fator vazios/agente cimentante.

Para que pudesse analisar as influências de cada variável isoladamente, foi necessário manter as outras variáveis constantes.

Para atingir os objetivos propostos foi adotado o programa de ensaios, definidos por Lopes Junior (2007), conforme apresenta a figura 17. Nela pode-se observar a curva de compactação do arenito Botucatu (sem adição de cal e resíduo), para a energia normal, as curvas de compactação solo + 25% de resíduo nas energias normal, intermediária e modificada, as curvas de compactação solo + 25% de resíduo + cal (3%, 5%, 7%, 9% e 11%) e a localização dos pontos de moldagem dos corpos-de-prova.

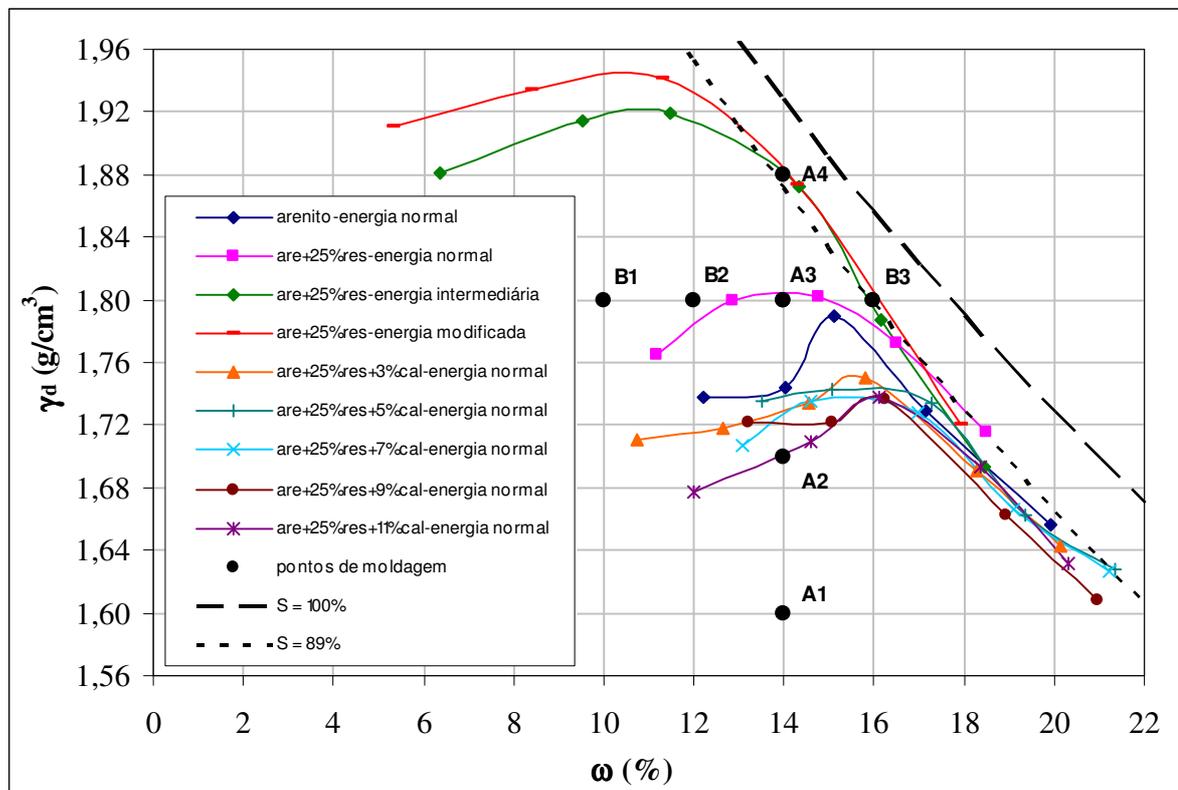


Figura 17: programa de ensaios de compressão simples (LOPES JUNIOR, 2007)

Os pontos de moldagem foram posicionados em duas linhas. Uma linha vertical (pontos: A₁, A₂, A₃ e A₄), denominada linha A, com um mesmo teor de umidade e diferentes massas específicas aparentes secas e, em uma linha horizontal, denominada linha B (pontos: B₁, B₂ e B₃), com mesma massa específica aparente seca e diferentes teores de umidade. O quadro 4 apresenta os pares massa específica aparente seca e teor de umidade para todos os pontos do programa de ensaios.

PONTOS DE MOLDAGEM		
PONTO	γ_a (g/cm ³)	ω (%)
A ₁	1,60	14,0
A ₂	1,70	14,0
A ₃	1,80	14,0
A ₄	1,88	14,0
B ₁	1,80	10,0
B ₂	1,80	12,0
B ₃	1,80	16,0

Quadro 4: pontos de moldagem

A posição dos pontos de moldagem foi estabelecida de modo que ficassem compreendidos dentro de uma faixa de massas específicas aparente secas e teores de umidade exequíveis numa situação de campo. Cada ponto da linha A e da linha B foi moldado com 5 diferentes porcentagens agente cimentante (A_c), ou seja, 3%, 5%, 7%, 9% e 11%, compostos por uma adição conjunta de cal (C_a) e de cimento (C_i). Os pontos da linha A foram moldados para três tempos de cura (28, 60 e 90 dias) e os pontos da linha B foram moldados para um tempo de cura de 28 dias.

Devido à dispersão característica dos ensaios de compressão simples, foram moldados corpos-de-prova em triplicata para cada ponto e porcentagem, para que se obtenha uma melhor confiabilidade dos resultados.

Nos itens a seguir será explicitada detalhadamente a maneira como foram feitas as análises com base no programa de ensaios.

5.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA POROSIDADE E DA QUANTIDADE DE AGENTE CIMENTANTE

A avaliação da influência da porosidade e da quantidade de agente cimentante adicionado sobre a resistência à compressão simples foi realizada através dos pontos da linha A, sendo que cada ponto dessa linha foi moldado com 5 teores de agente cimentante (3%, 5%, 7%, 9% e 11%), os quais são compostos por metade de cal e metade de cimento. A partir disso, foi possível avaliar a influência da quantidade de agente cimentante adicionado, já que para um mesmo ponto foi mantida constante a massa específica aparente seca e o teor de umidade.

A avaliação da influência da porosidade sobre a resistência à compressão simples foi realizada mantendo fixa a quantidade de agente cimentante e teor de umidade e variando-se a massa específica aparente seca do material compósito.

5.5 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE

A avaliação da influência do teor de umidade foi feita através dos pontos da linha B, os quais possuem massa específica aparente seca ($1,8 \text{ g/cm}^3$) e teores de agente cimentante constantes e teores de umidade crescentes (10%, 12%, e 16%).

5.6 AVALIAÇÃO DO FATOR VAZIOS/AGENTE CIMENTANTE

A avaliação do fator vazios/agente cimentante foi realizada através dos pontos da linha A para os diferentes tempos de cura estabelecidos, ou seja, obteve-se uma curva de fator vazios/agente cimentante para cada tempo de cura (28, 60 e 90 dias) sobre a resistência à compressão simples verificando a validade de suas relações.

6 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

6.1 MATERIAIS

De maneira a se produzir amostras representativas para o comportamento que se quer determinar a partir de dosagens pré-definidas por Lopes Junior (2007), e para posteriores comparações, optou-se pela utilização dos mesmos materiais, os quais estão descritos no capítulo 3.

6.2 MÉTODOS DE ENSAIO

Os métodos podem ser divididos em duas etapas. A primeira etapa consiste na caracterização física do solo, resíduo, cal e cimento com o objetivo de determinar as propriedades necessárias para o desenvolvimento da pesquisa. Como foram adotados os mesmos materiais usados por Lopes Junior (2007), suprimiu-se esta etapa adotando-se os valores obtidos naquela pesquisa.

A segunda etapa consiste na realização dos ensaios de resistência à compressão simples para os pontos de moldagem pré-estabelecidos. Esta etapa objetiva avaliar a influência de cada variável isoladamente sobre a resistência à compressão simples do material compósito.

6.2.1 Coleta de Amostras

A amostra do solo foi coletada, no estado deformado, mediante escavação com ferramentas manuais, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios. A amostra obtida era armazenada e transportada em tonéis plásticos adequadamente vedados, de forma que fosse evitada uma possível contaminação da amostra.

O resíduo foi coletado diretamente dos reservatórios dos equipamentos da usina de britagem, em quantidade suficiente para realização de todos os ensaios. As amostras coletadas foram armazenadas em sacos plásticos adequadamente vedados.

O cimento foi adquirido comercialmente em sacos 40 kg e a cal, adquirida em sacos de 20 kg, foram armazenados em recipientes de vidro devidamente vedados para evitar sua hidratação prematura.

6.2.2 Preparação das Amostras

A preparação das amostras de solo e resíduo para a moldagem dos corpos-de-prova, que envolve os procedimentos de secagem ao ar, destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica seguiram os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986).

Depois de preparadas, as amostras eram armazenadas em sacos plásticos devidamente vedados e identificados.

6.2.3 Ensaios de Caracterização

A caracterização física dos materiais, realizadas através de ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade e compactação, foi adotado a partir dos resultados obtidos por Lopes Junior (2007).

A análise granulométrica do solo e do resíduo foi realizada (com uso de defloculante) de acordo com os procedimentos descritos pela NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984 apud LOPES JUNIOR, 2007).

A determinação da massa específica real dos grãos de solo e do resíduo seguiu o método descrito pela NBR 6508 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984 apud LOPES JUNIOR, 2007).

A obtenção dos limites de liquidez e de plasticidade do solo e do resíduo seguiu, respectivamente, os métodos descritos pelas normas NBR 6459 e NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984 apud LOPES JUNIOR, 2007).

Para os ensaios de compactação foram utilizados os procedimentos descritos pela NBR 7182 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986 apud LOPES JUNIOR, 2007).

6.2.4 Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova

Foram utilizados, para os ensaios de compressão simples, corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A confecção dos corpos-de-prova foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura.

Após a pesagem dos materiais (solo, resíduo, agente cimentante e água) com resolução de 0,01 gf, o solo, o resíduo e o agente cimentante eram misturados com o auxílio de uma espátula metálica, até que a mistura adquirisse coloração uniforme. Em seguida, adicionava-se água, continuando o processo de mistura até que a mistura se tornasse homogênea.

A quantidade de resíduo necessário para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo seco utilizado, a quantidade de agente cimentante em relação à massa de solo seco + massa de resíduo adicionado, e a quantidade de água (teor de umidade) em relação à soma das massas de solo seco, resíduo e de agente cimentante. A massa total da mistura permitia a moldagem de um corpo-de-prova e a determinação do teor de umidade.

Ao final do processo de mistura, duas pequenas porções eram retiradas e colocadas em cápsulas para determinação do teor de umidade, adotando-se a média dos dois teores como sendo o teor de umidade de corpo-de-prova. A mistura era compactada estaticamente em três camadas (escarificada nas interfaces para aumentar sua integração) no interior de um molde de ferro fundido tripartido, devidamente lubrificado, de maneira que cada camada atingisse as especificações de teor de umidade e peso específico aparente seco.

Concluído o processo de moldagem, o corpo-de-prova era imediatamente extraído do molde, seu peso e medidas (diâmetro e altura) aferidos com resolução de 0,01gf e 0,1 mm respectivamente, e acondicionado em um saco plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas do teor de umidade.

Os corpos de prova obtidos eram armazenados e curados por um período de 28, 60 e 90 dias em um ambiente com temperatura e umidade controladas (temperatura de $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar maior que 95%). Para este procedimento foi utilizada a câmara úmida do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (NORIE/UFRGS).

Foram considerados aptos para os ensaios os corpos-de-prova que atendiam as seguintes tolerâncias:

- a) massa específica aparente seca (γ_d): grau de compactação de 98% a 102%, sendo o grau de compactação definido como o valor de γ_d efetivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de γ_d definido como meta;
- b) teor de umidade (ω): valor especificado $\pm 0,5$ pontos percentuais;
- c) dimensões: diâmetro $50 \pm 0,5$ mm e altura 100 ± 1 mm.

6.2.5 Ensaios de Compressão Simples

Ensaio de compressão simples têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade da estabilização de solos ou determinar aspectos relativos à importância de fatores influentes sobre a resistência de solos tratados. Uma das razões é a experiência acumulada com este tipo de ensaio na área de concretos, além de ser um ensaio de simples e de rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido.

Entretanto sabe-se que, quando se utiliza solo cimentado como uma camada compactada sobre um solo de baixa capacidade de suporte, a ruptura do sistema geralmente ocorre por tração na base da camada estabilizada. Portanto, o mais razoável seria utilizar o ensaio de resistência à tração como uma medida direta da resistência do solo estabilizado. Contudo, resultados apresentados por Núñez (1991) demonstraram que a resistência à tração para o solo

utilizado nesta pesquisa tratado com 9% de cal variou entre 9% e 20% da resistência à compressão simples e tratado com 11% de cimento variou entre 11% e 15%. Esse fato, aliado aos aspectos mencionados acima, fez com que o ensaio de compressão simples fosse adotado para a medição da influência das variáveis investigadas.

Para estes ensaios foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 50 kN, anéis dinamométricos calibrados com capacidade de 10 kN e 50 kN, com resolução de 0,005 kN (0,5 kgf) e 0,023 kN (2,3 kgf) respectivamente (figura 18). A velocidade de deformação destes ensaios foi de 1,14 mm por minuto. O procedimento dos ensaios de compressão simples seguiu a norma americana ASTM D 5102 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1996).



Figura 18: corpo-de-prova submetido ao ensaio de resistência à compressão simples

Os corpos-de-prova, após permanecerem na câmara úmida pelo tempo de cura estabelecido, eram submersos em um recipiente com água por um período de 24 horas, visando aproximar a condição de saturação, ou seja, buscou-se diminuir a influência da sucção matricial, que é

proveniente das forças capilares existentes no interior das amostras, as quais têm influência na resistência. A temperatura da água era controlada e mantida em 23 ± 3 °C.

Como critério de aceitação para o ensaio de resistência à compressão simples, estipulou-se que as resistências individuais, carga máxima atingida no ensaio, dos três corpos-de-prova não deveriam se afastar mais de 10% da resistência média desse conjunto.

7 RESULTADOS

Esse capítulo objetiva a apresentação dos resultados de resistência à compressão simples obtidos para o programa experimental delineado no item anterior. Os itens abaixo estão divididos pelos diferentes tempos de cura analisados.

7.1 TEMPO DE CURA DE 90 DIAS

Avaliaram-se, para o tempo de cura de 90 dias, a influência da quantidade de teor de agente cimentante adicionado, a porosidade das misturas compactadas e o fator vazios/agente cimentante. Esses corpos-de-prova se referem aos pontos da linha A do quadro de dosagens.

A figura 19 apresenta as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função do teor de agente cimentante adicionado. Cada curva possui a mesma massa específica aparente seca e o mesmo teor de umidade (14%).

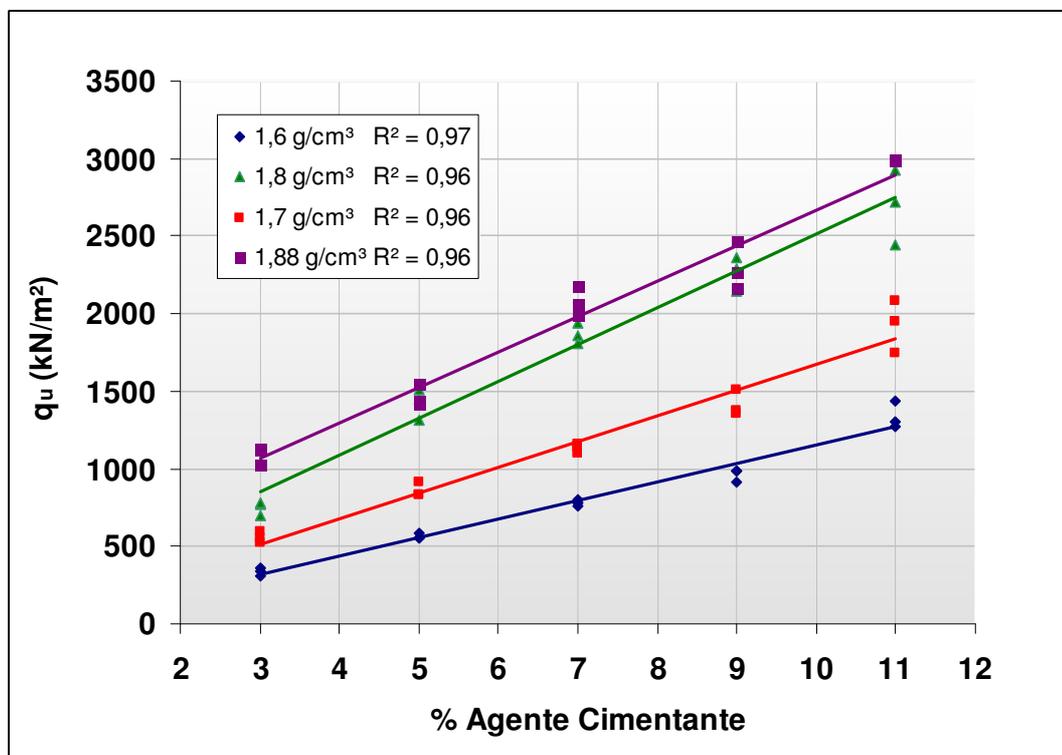


Figura 19: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de agente cimentante adicionado para amostras com 90 dias de cura

Pode-se observar que a quantidade de agente cimentante adicionado tem uma grande influência sobre a resistência à compressão simples das amostras. Pequenas adições expressam ganhos de resistência.

No espectro de dosagens adotado, verifica-se que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento do teor de agente cimentante adicionado. As taxas de ganho de resistência, representada pela inclinação das retas ajustadas, aumentam com o aumento da massa específica aparente seca.

A figura 20 apresenta as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras compactadas. Cada curva possui o mesmo teor de agente cimentante e o mesmo teor de umidade (14%).

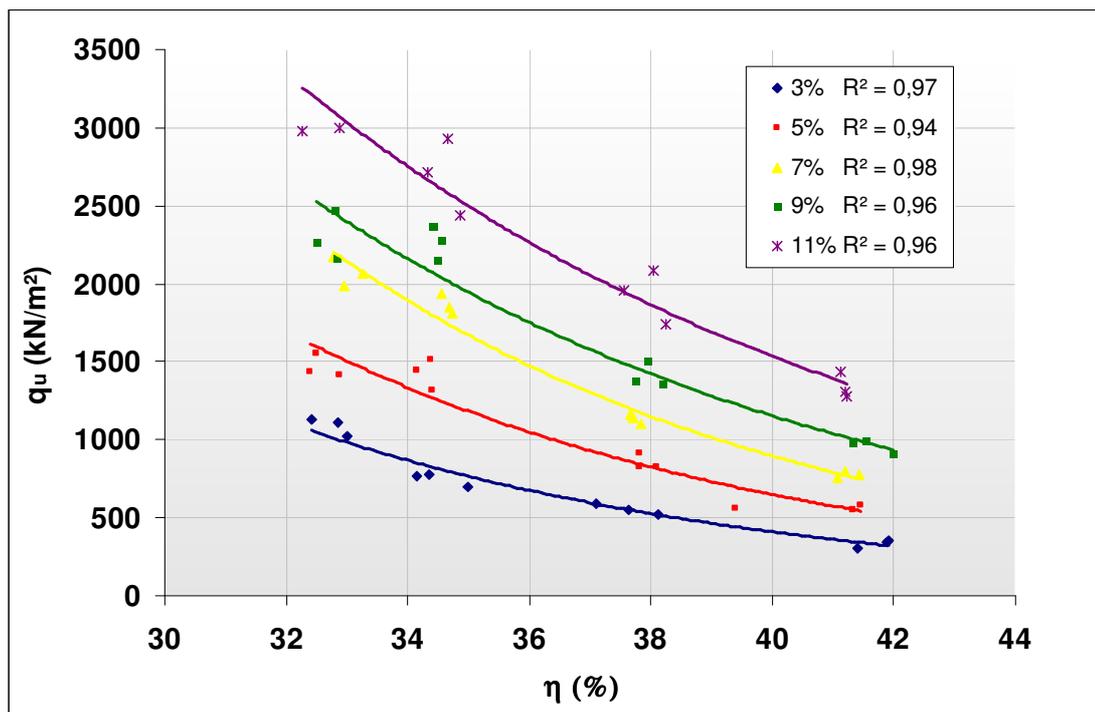


Figura 20: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 90 dias de cura

Assim como o teor de agente cimentante, a porosidade das amostras tem grande influência sobre a resistência à compressão simples. Percebe-se, através da figura 20, que independentemente da quantidade de agente cimentante utilizado, a redução da porosidade

implica em ganhos exponenciais de resistência, ou seja, as maiores resistências foram obtidas para as amostras com as menores porosidades e maiores teores de agente cimentante.

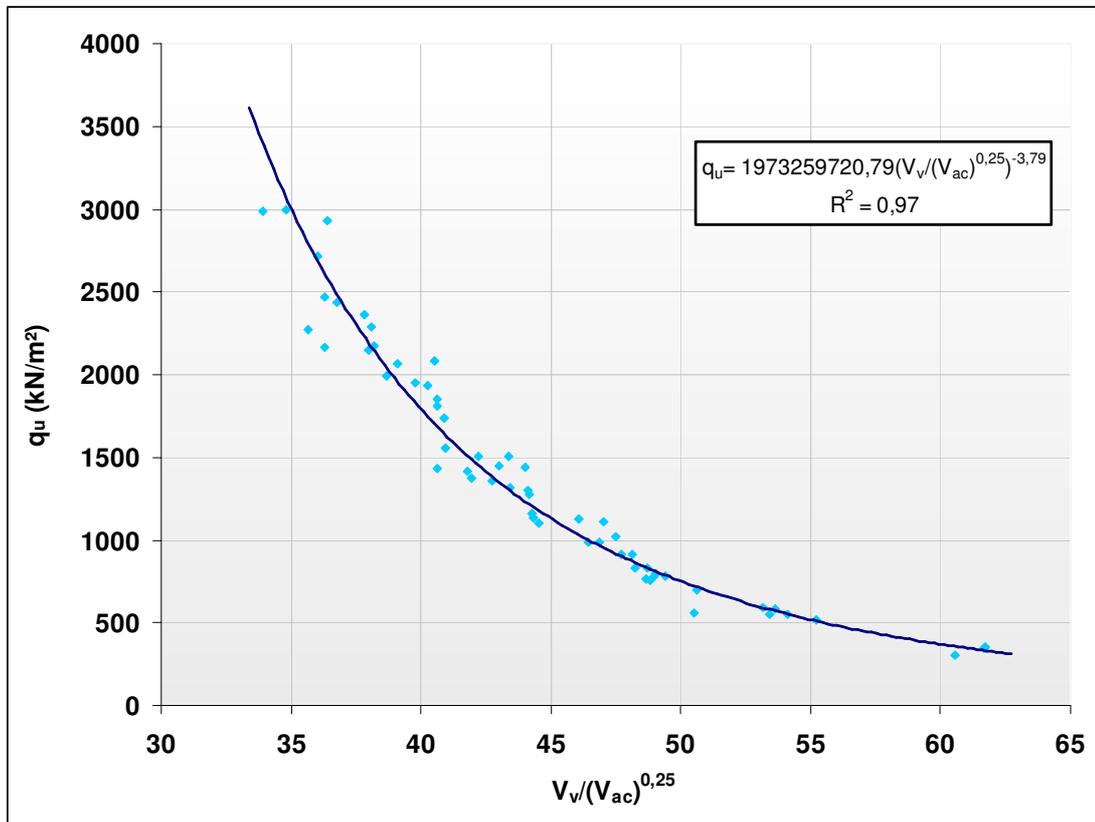


Figura 21: resistência à compressão simples em relação ao fator volume de vazios/volume de agente cimentante para amostras com 90 dias de cura

As figura 21 mostra a variação da resistência à compressão simples em função do fator vazios/agente cimentante, baseado na definição proposta por Larnach (1960):

$$\frac{V_v}{V_{ac}} = \frac{\text{Volume Absolutode Vazios}(ar + \acute{a}gua)}{\text{Volume Absolutode Cal} + \text{Cimento}}$$

Todos os corpos-de-prova apresentados na figura 21 possuem o mesmo teor de umidade (14%), porém diferentes quantidades de agente cimentante e porosidades.

Pode-se perceber uma boa correlação entre o volume de vazios e o volume de agente cimentante ajustado e a resistência à compressão simples das amostras. De maneira a delinear

esse comportamento ajustou-se uma curva potencial que apresentou o melhor coeficiente de determinação (R^2) em função do expoente sobre o volume de agente cimentante.

7.2 TEMPO DE CURA DE 60 DIAS

Para o tempo de cura de 60 dias, avaliaram-se a influência da quantidade de teor de agente cimentante adicionado, a porosidade das misturas compactadas e o fator vazios/agente cimentante. Esses corpos-de-prova se referem aos pontos da linha A do quadro de dosagens.

A figura 22 apresenta as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função do teor de agente cimentante adicionado. Cada curva possui a mesma massa específica aparente seca e o teor de umidade constante de 14%.

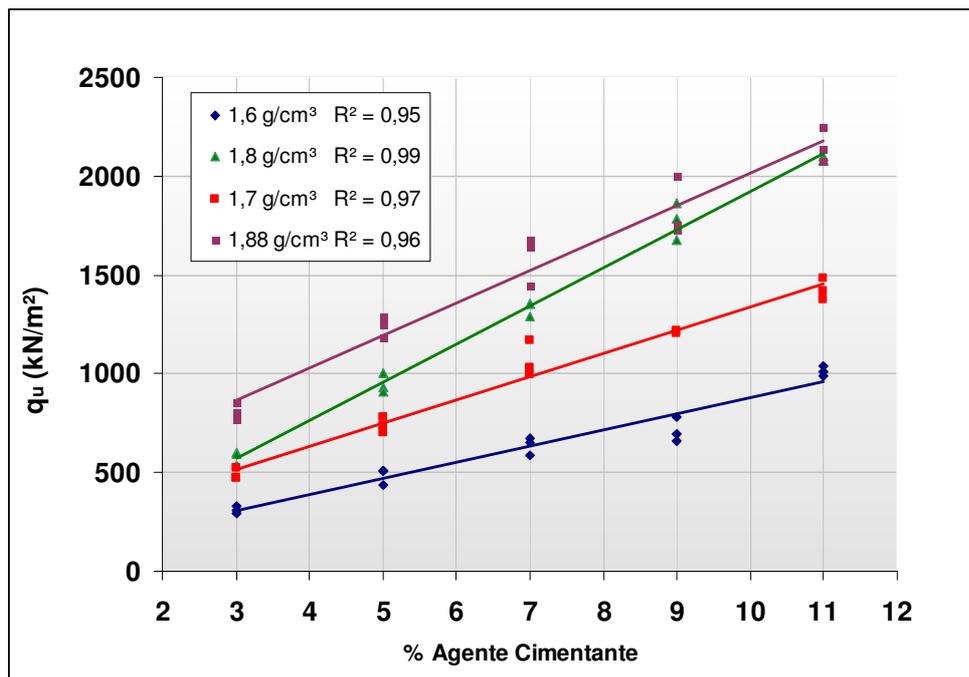


Figura 22: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de agente cimentante adicionado para amostras com 60 dias de cura

Pode-se observar que a quantidade de agente cimentante adicionado tem uma grande influência sobre a resistência à compressão simples das amostras, assim como para as amostras de 90 dias de cura.

Verifica-se que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento do teor de agente cimentante adicionado e as taxas de ganho de resistência, representada pela inclinação das retas ajustadas, aumentam com o aumento da massa específica aparente seca. Percebe-se, comparando as figuras 19 e 22, que os valores obtidos de resistência, para 60 dias de cura, atingiram valores menores do que para as amostras curadas por 90 dias.

A figura 23 apresenta as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade das amostras compactadas. Cada curva possui o mesmo teor de agente cimentante e o mesmo teor de umidade (14%).

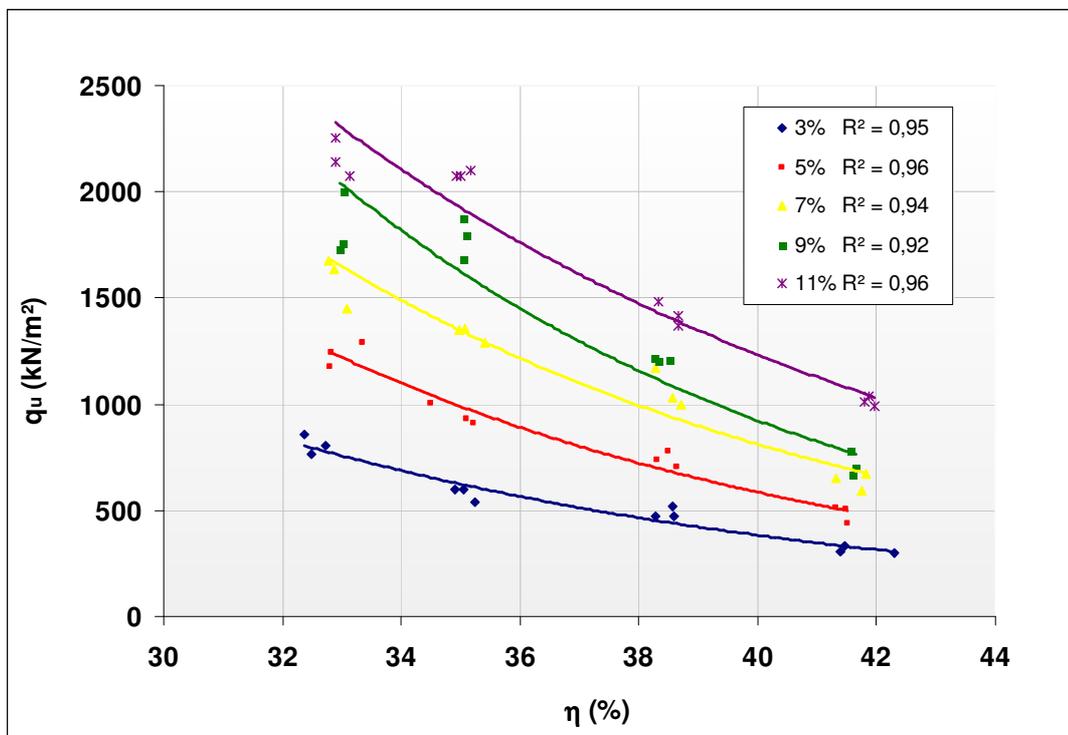


Figura 23: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 60 dias de cura

Percebe-se, através da figura 23, que independentemente da quantidade de agente cimentante utilizado, a redução da porosidade implica em ganhos exponenciais de resistência, ou seja, as maiores resistências foram obtidas para as amostras com as menores porosidades e maiores teores de agente cimentante.

As figura 24 mostra a variação da resistência à compressão simples em função do fator vazios/agente cimentante, baseado na definição proposta por Larnach (1960) anteriormente explicitada:

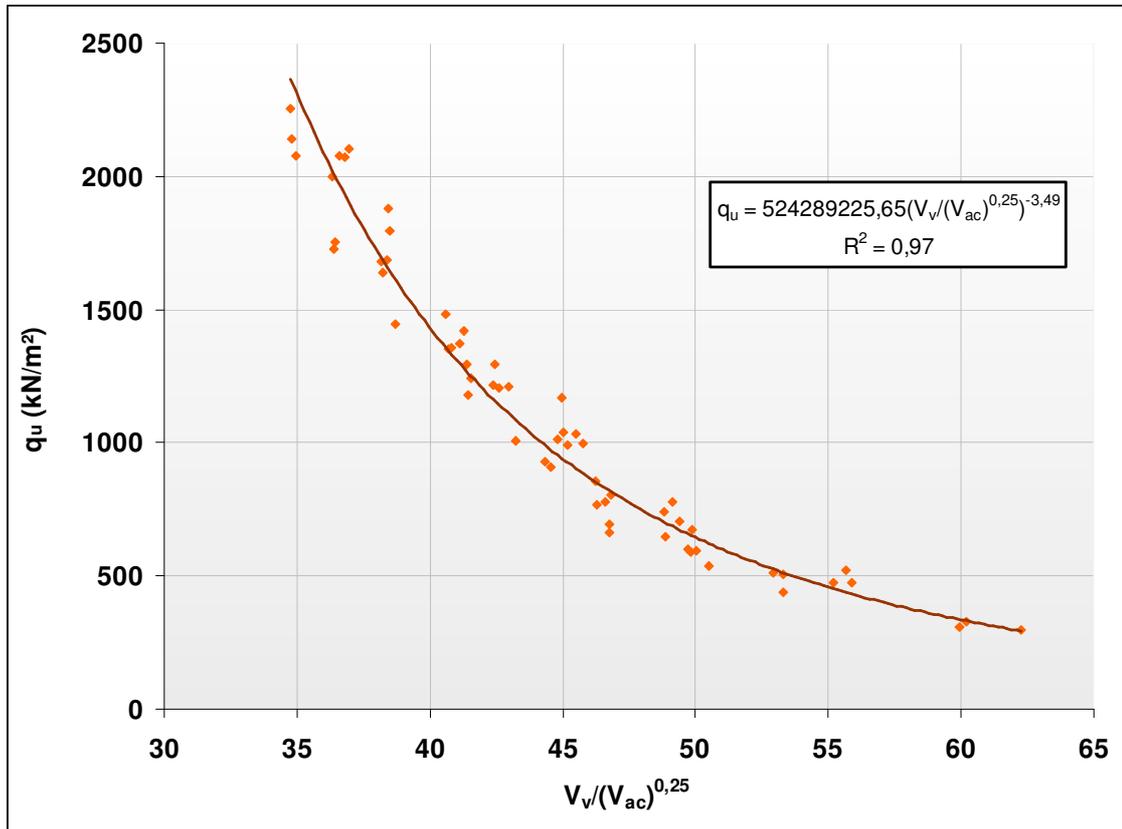


Figura 24: resistência à compressão simples em relação ao fator volume de vazios/volume de agente cimentante para amostras com 60 dias de cura

Os corpos-de-prova que definem essa curva possuem o mesmo teor de umidade (14%), porém diferentes quantidades de agente cimentante e porosidades.

Pode-se perceber uma boa correlação entre o volume de vazios e o volume de agente cimentante ajustado e a resistência à compressão simples das amostras. Assim como para as amostras de 90 dias de cura, ajustou-se uma curva potencial que apresentou o melhor coeficientes de determinação (R^2) em função do expoente sobre o volume de agente cimentante, para as amostras de 60 dias de cura.

7.3 TEMPO DE CURA DE 28 DIAS

Para o tempo de cura de 28 dias, foram avaliadas as mesmas variáveis analisadas para 90 e 60 dias de cura. Esses corpos-de-prova se referem aos pontos da linha A do quadro de dosagens.

A figura 25 apresenta as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função do teor de agente cimentante adicionado. Considerando que cada curva possui a mesma massa específica aparente seca e o teor de umidade constante de 14%.

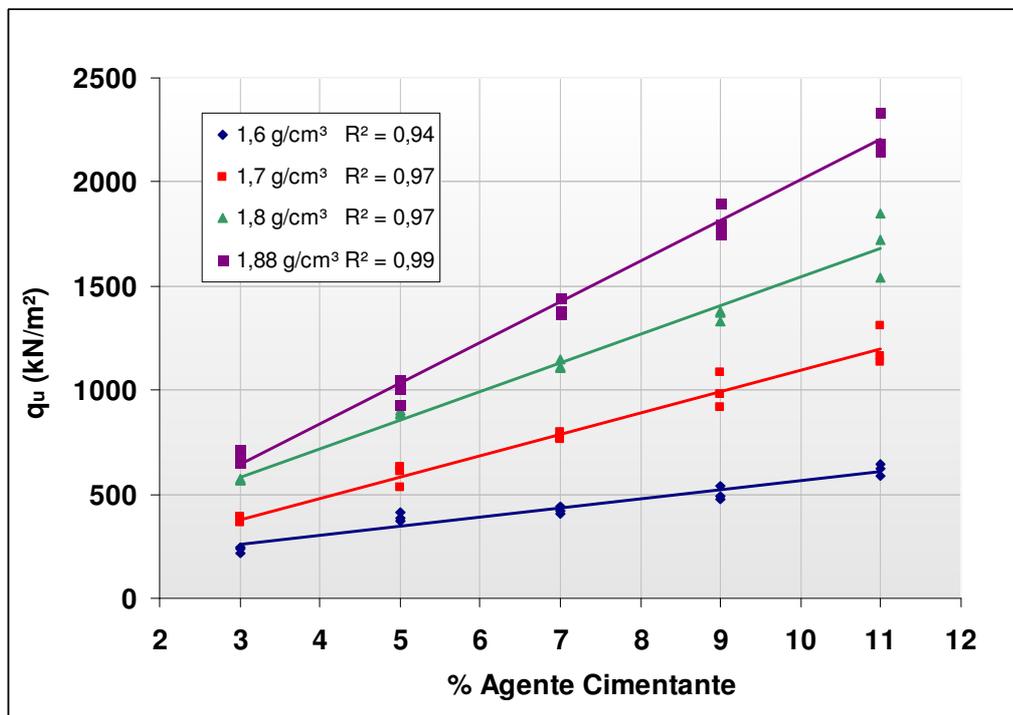


Figura 25: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de agente cimentante adicionado para amostras com 28 dias de cura

Observa-se que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento do teor de agente cimentante adicionado e as taxas de ganho de resistência, representada pela inclinação das retas ajustadas, aumentam com o aumento da massa específica aparente seca. Percebe-se, comparando as figuras 19, 22 e 25, que os valores obtidos de resistência, para 28 dias de cura, atingiram valores menores do que para as amostras curadas por 60 e 90 dias.

A figura 26 apresenta as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade das amostras, sendo que cada curva possui o mesmo teor de agente cimentante e o mesmo teor de umidade (14%).

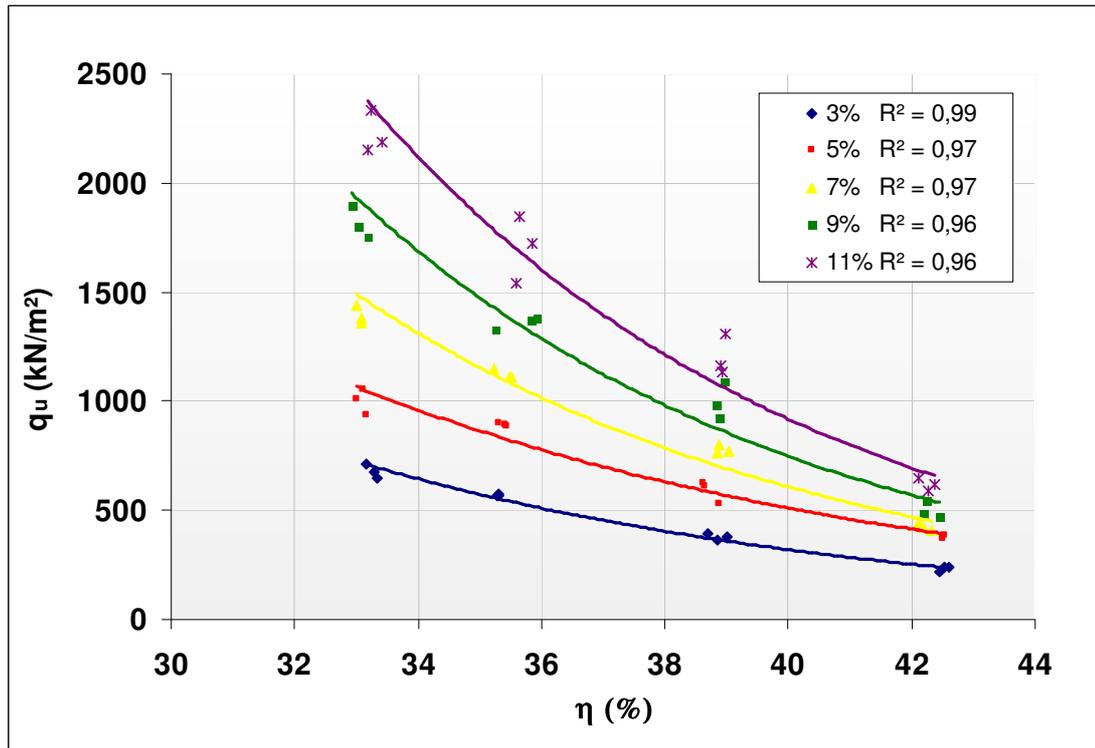


Figura 26: variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 28 dias de cura

Percebe-se, através da figura 26, que as maiores resistências foram obtidas para as amostras com as menores porosidades e maiores teores de agente cimentante.

As figura 27 mostra a variação da resistência à compressão simples em função do fator vazios/agente cimentante, baseado na definição proposta por Larnach (1960). Os corpos-de-prova que definem essa curva possuem o mesmo teor de umidade (14%), porém diferentes quantidades de agente cimentante e porosidades.

Observa-se um bom ajuste entre o volume de vazios, o volume de agente cimentante ajustado e a resistência à compressão simples das amostras. Assim como para as amostras de 90 e 60 dias de cura, ajustou-se uma curva potencial que apresentou o melhor coeficiente de determinação (R^2) em função do expoente sobre o volume de agente cimentante, para as amostras de 28 dias de cura.

Avaliou-se, também, a influência do teor de umidade de moldagem na resistência à compressão simples. Os corpos-de-prova apresentam a mesma massa específica aparente seca e diferentes teores de umidade, conforme o quadro 4.

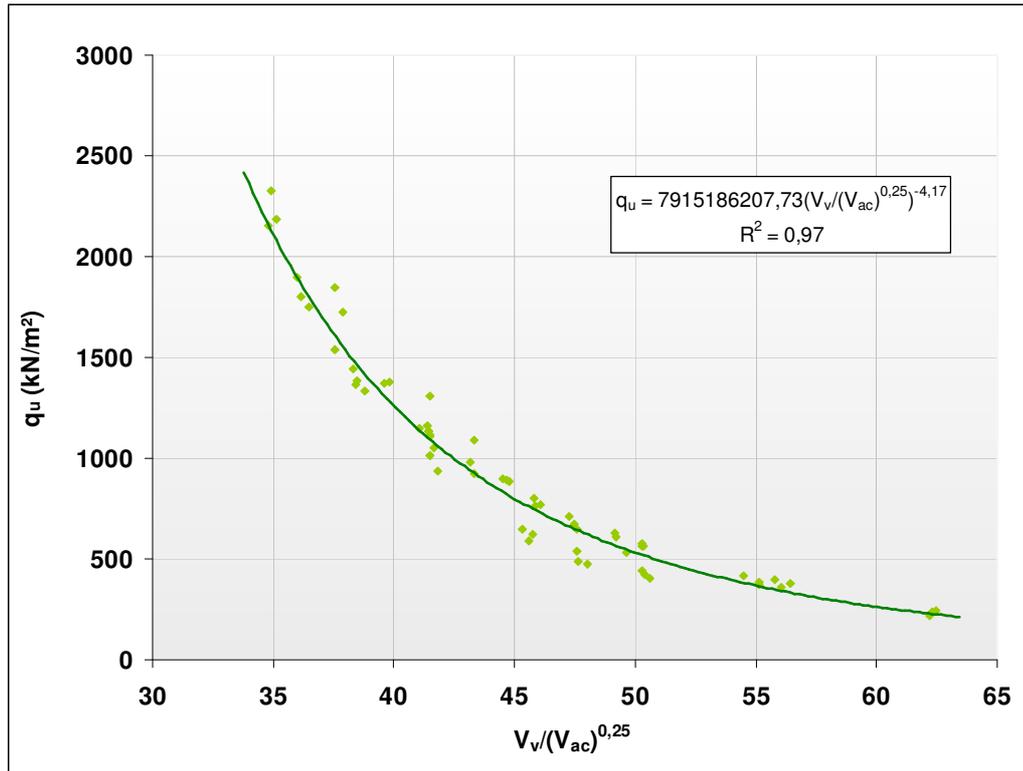


Figura 27: resistência à compressão simples em relação ao fator volume de vazios/volume de agente cimentante para amostras com 28 dias de cura

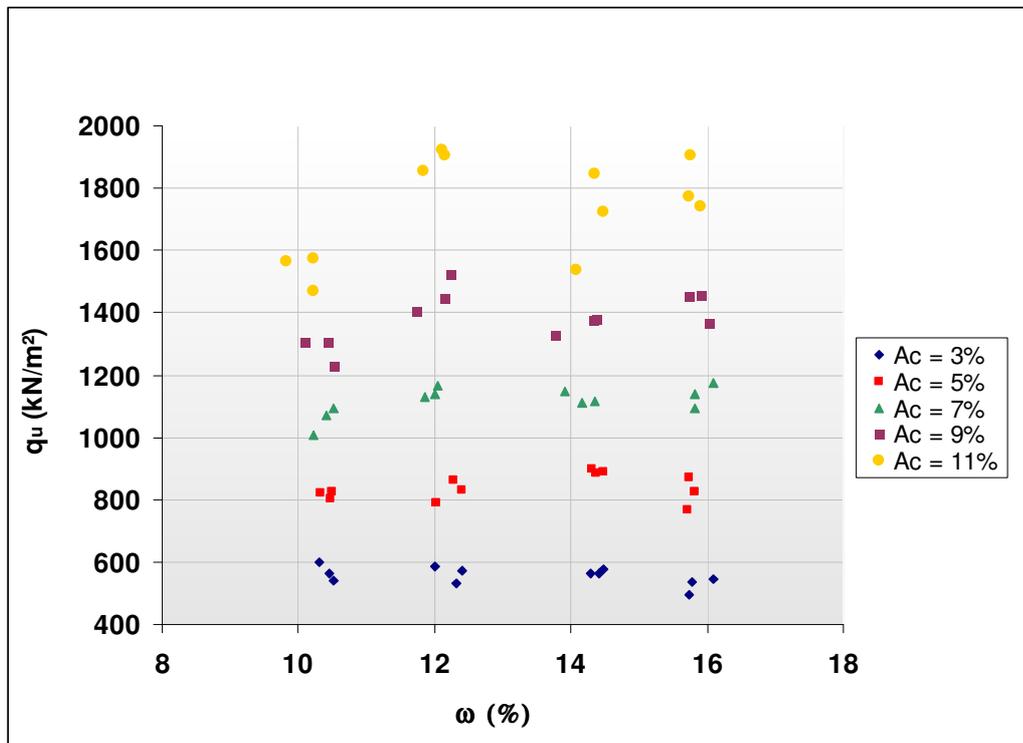


Figura 28: resistência à compressão simples em relação ao teor de umidade de moldagem para amostras com 28 dias de cura

Observa-se, através da figura 28, que o teor de umidade não tem influência significativa na resistência à compressão simples. Percebe-se, também, que para as amostras com teores de agente cimentante de 3, 5 e 7% a resistência permanece praticamente constante (para todos os teores de umidade); para as amostras mais cimentadas existe uma grande dispersão dos pontos, ou seja, percebe-se que, para os teores de 9 e 11% de agente cimentante, a resistência permanece praticamente constante para os teores de umidade de 12, 14 e 16%. Já para o teor de umidade de 10% constata-se que a resistência obtida é menor do que para os demais teores de umidade, acredita-se que isso está relacionado à quantidade de água adicionada, isto é, esse teor de umidade é insuficiente para que ocorram todas as reações químicas entre os materiais que formam o compósito.

A influência da quantidade de água adicionada associada com os teores de agente cimentantes utilizados podem ser observados na figura 29, que relaciona a variação da resistência à compressão simples em função do teor de agente cimentante utilizado.

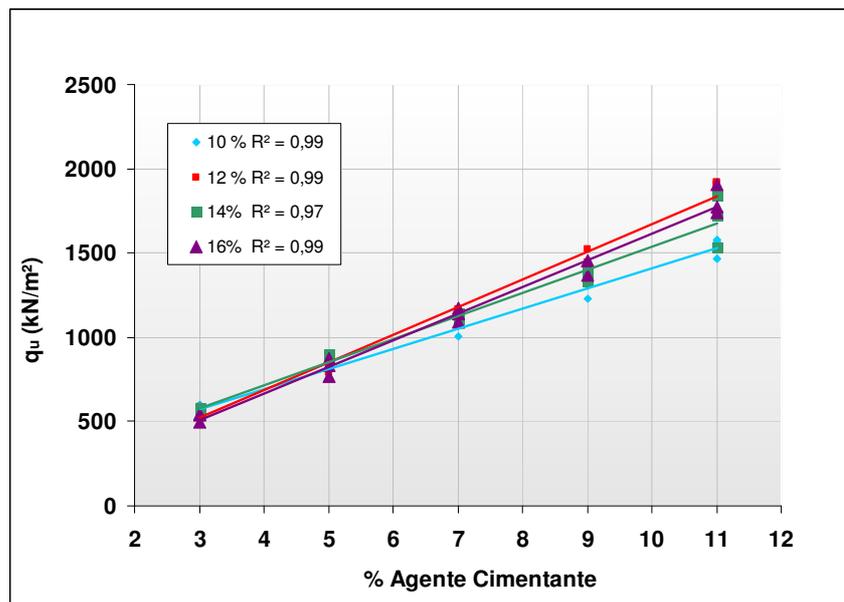


Figura 29: resistência à compressão simples em relação ao teor de agente cimentante para os diferentes teores de umidade de moldagem

Através da análise da figura 29, observa-se que as retas de ajuste praticamente se sobrepõem para os teores de 3, 5, 7% de agente cimentante, denotando que o teor de umidade de moldagem não é um parâmetro determinante para determinação da resistência de materiais compósitos artificialmente cimentados.

7.4 MODO DE RUPTURA

A figura abaixo mostra o aspecto posterior de alguns corpos-de-prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples. Em todos os ensaios realizados observou-se uma ruptura frágil das amostras, com a formação de um ou mais planos de ruptura. O ângulo formado entre o plano de ruptura e o plano onde atua a tensão principal maior foi de aproximadamente 60° . Esses resultados também foram observados por Foppa (2005) e Lopes Junior (2007).



Figura 30: plano de ruptura típico dos corpos-de-prova

8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo visa analisar os resultados de resistência à compressão simples obtidos de acordo com o programa experimental definido anteriormente.

8.1 EFEITO DO TEOR DE AGENTE CIMENTANTE

Através da análise das figuras 19, 22 e 25 verificou-se que a adição simultânea de cal e cimento, mesmo em pequenas quantidades, promoveu ganhos significativos de resistência do material compósito. Esse ganho de resistência foi maior para as amostras com tempos de cura elevados, isto é, as maiores resistências foram observadas para os corpos-de-prova curados por 90 dias.

Essa aquisição de resistência por longos períodos de tempo se deve principalmente pelas reações químicas promovidas pela adição da cal. Essas reações podem ser divididas em duas etapas:

A primeira, denominada de etapa inicial rápida, composta pela sucessão de alguns fenômenos:

- a) troca catiônica;
- b) floculação-aglomeração;
- c) compressão da dupla camada elétrica;
- d) adsorção de cal;
- e) reações químicas.

A segunda, denominada de etapa lenta é caracterizada pelas reações de carbonatação e pelas reações pozolânicas, sendo as primeiras prejudiciais e as segundas responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica, esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro, presentes no solo, reagem com a cal e água formando produtos cimentantes. Essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio. Esse processo

continuará ocorrendo enquanto houver Ca(OH)_2 reagindo e sílica disponível no solo (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 1987)

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que esses géis de silicato cobrem e ligam as partículas de argila bloqueando os vazios, sendo cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos.

Deve-se salientar que grande parcela da resistência mecânica adquirida pelas amostras se deve à adição de cimento. As reações de hidratação que regem o mecanismo de ganho de resistência de solos artificialmente cimentados geram compostos cimentantes como o C-S-H (silicato hidratado de cálcio) e o C-A-H (aluminato hidratado de cálcio). A figura 31 mostra a aquisição de resistência com o aumento do teor de agente cimentante adicionado para os diferentes tempos de cura considerados, considerando uma mesma massa específica aparente seca ($1,8 \text{ g/cm}^3$) e teor de umidade de 14%.

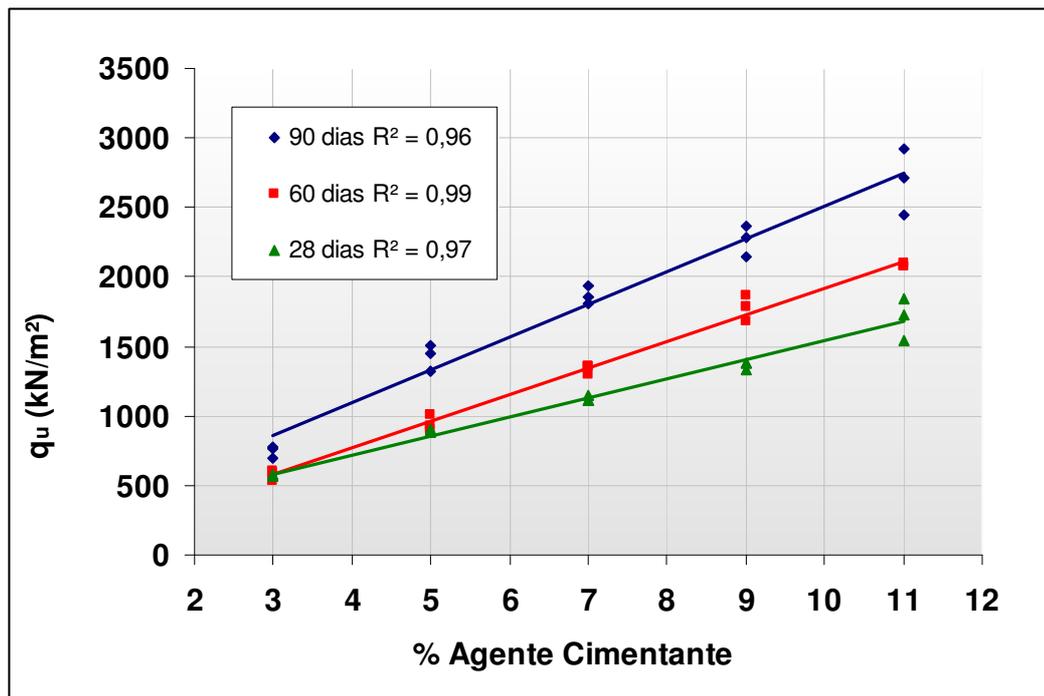


Figura 31: resistência à compressão simples em relação ao teor de agente cimentante para os diferentes tempos de cura ($\gamma_d = 1,8 \text{ g/cm}^3$)

No espectro de dosagens utilizado, observou-se que a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento do teor de agente cimentante, e que a taxa de crescimento da resistência é maior na amostras com tempo de cura de 90 dias. Isso se deve,

principalmente, as reações pozolânicas promovidas pela adição de cal. Esse comportamento foi observado por outros pesquisadores (CARRARO, 1997; LOPES JUNIOR, 2007 e NÚÑEZ, 1991).

Pode-se observar, também, que a taxa de aumento da resistência, representada pela inclinação da reta de ajuste, aumenta com o aumento da massa específica aparente seca, indicando que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactadas, isto é, existe um maior número de contatos entre as partículas. Esse comportamento foi observado em todos os tempos de cura analisados.

8.2 EFEITO DA POROSIDADE

Através da análise das figuras 20, 23 e 26 observou-se que a porosidade tem grande influência sobre a resistência das amostras, para todos os tempos de cura analisados. Independentemente da quantidade de agente cimentante adicionado e do tempo de cura estabelecido, a redução da porosidade promoveu ganhos exponenciais de resistência.

Esse ganho de resistência com o aumento da porosidade pode ser atribuído ao maior número de contatos entre as partículas, que implica numa maior capacidade de distribuição de tensões no interior das amostras.

Como todo o programa experimental baseou-se em curvas de compactação do solo, as dosagens foram feitas em termos de massa específica aparente seca alvo. Desta maneira, o aumento da massa específica aparente seca se deve ao aumento da massa da mistura e não somente pelo aumento da quantidade de solo. Portanto, deve-se salientar que existe um aumento do teor volumétrico de agente cimentante (razão entre o volume de agente cimentante e o volume do corpo-de-prova) para um mesmo teor de agente cimentante dosado em relação a massa de solo seco. Há um volume maior de agente cimentante, à medida que se aumenta a massa específica aparente seca das amostras. Essa tendência também foi observada por outros pesquisadores (FOPPA, 2005; LOPES JUNIOR, 2007).

O aumento no teor volumétrico de agente cimentante, foi de 14,6%, para as amostras com 90 dias de cura, 15% para 60 dias de cura e 15,9% para as amostras com 28 dias de cura,

considerando a faixa adotada de massa específica aparente seca ($1,60 \text{ g/cm}^3$ a $1,88 \text{ g/cm}^3$). Isso denota que uma pequena parcela do ganho de resistência com a redução da porosidade deva ser proveniente do maior número de partículas de cal e cimento presentes na mistura. As figuras abaixo mostram a variação da resistência à compressão simples em relação ao aumento do teor volumétrico de agente cimentante para os três tempos de cura considerados.

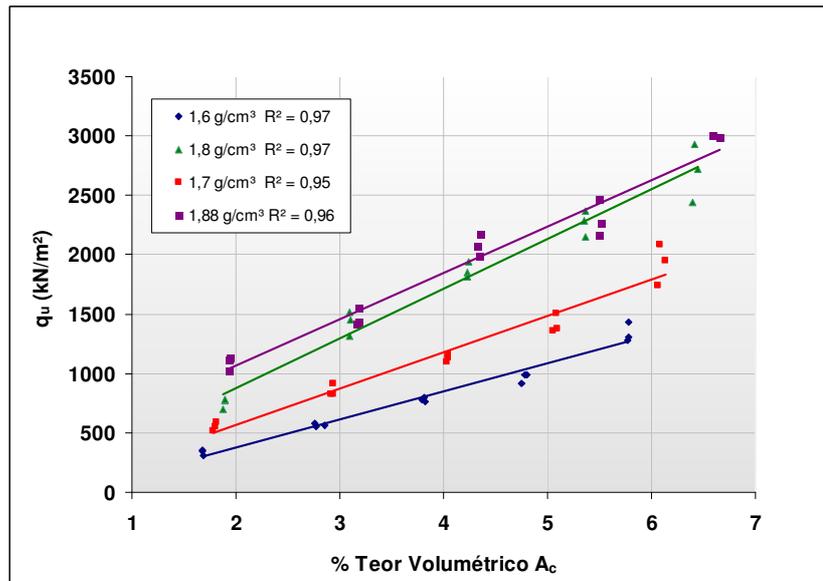


Figura 32: efeito do teor volumétrico de agente cimentante sobre a resistência à compressão simples para as amostras com 90 dias de cura

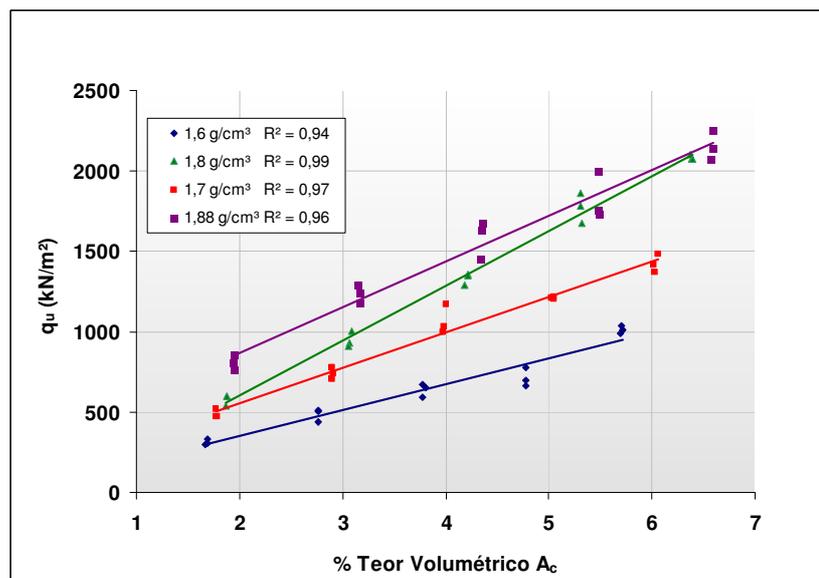


Figura 33: efeito do teor volumétrico de agente cimentante sobre a resistência à compressão simples para as amostras com 60 dias de cura

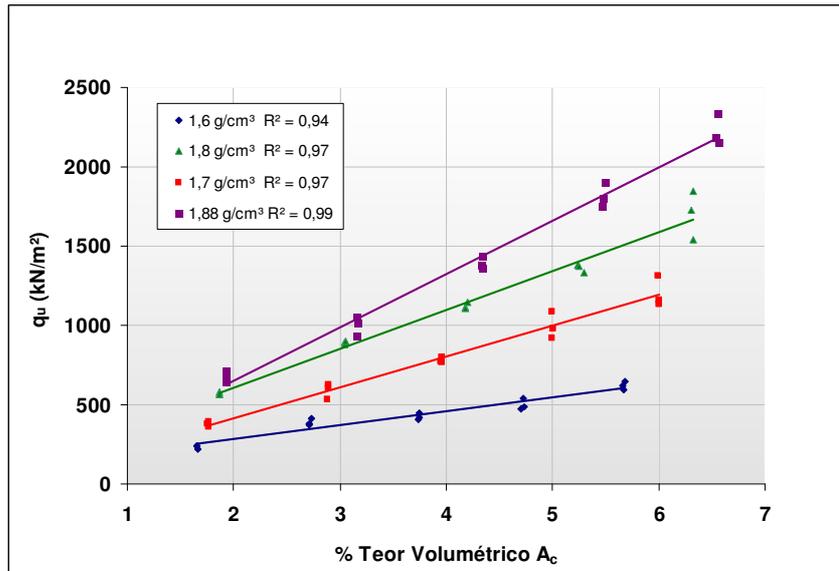


Figura 34: efeito do teor volumétrico de agente cimentante sobre a resistência à compressão simples para as amostras com 28 dias de cura

Comparando as figuras 19, 22 e 25 com as figuras 32, 33 e 34, verifica-se que as análises considerando o teor volumétrico de agente cimentante permanecem válidas, ou seja, a resistência mecânica do material cresce linearmente com o aumento do teor de agente cimentante e a taxa de crescimento da resistência é maior para as amostras com maior massa específica seca da mistura.

Em relação à porosidade há uma complexidade em avaliar a parcela de resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de agente cimentante, já que a ele está associado uma maior proximidade entre as partículas. Contudo, se considerarmos uma variação linear da resistência com o teor volumétrico de agente cimentante sob uma taxa média de 337,67 kPa/(%), 251,55 kPa/(%) e 216,36 kPa/(%) para 90, 60 e 28 dias respectivamente, calculada a partir da média dos coeficientes do teor volumétrico de agente cimentante (A_{cv}) apresentados nas figuras 32, 33 e 34, teremos que a resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de agente cimentante corresponderia a 15,1 %, 15,4% e 13,2% para 90, 60 e 28 dias respectivamente, do ganho de resistência obtida pela redução da porosidade da mistura, conforme os quadros 5, 6 e 7. Considera-se que esse pequeno percentual, atribuído ao aumento do teor volumétrico de agente cimentante, não invalida as análises realizadas.

Ac (%)	ΔA_{cv} (%)	Δq_u (kPa)	$q_{u \text{ min}}$ (kPa)	$q_{u \text{ máx}}$ (kPa)	$\Delta q_{u \text{ total}}$ (kPa)	$\frac{\Delta q_u}{\Delta q_{u \text{ total}}}$ (%)
3	0,26	87,40	335,14	1088,19	753,05	11,6
5	0,38	129,75	564,06	1467,32	903,27	14,4
7	0,53	180,35	777,82	2074,95	1297,13	13,9
9	0,73	246,18	961,69	2299,89	1338,20	18,4
11	0,85	285,35	1337,97	2991,40	1653,43	17,3
Média						15,1

Quadro 5: parcela de resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 90 dias de cura

Ac (%)	ΔA_{cv} (%)	Δq_u (kPa)	$q_{u \text{ min}}$ (kPa)	$q_{u \text{ máx}}$ (kPa)	$\Delta q_{u \text{ total}}$ (kPa)	$\frac{\Delta q_u}{\Delta q_{u \text{ total}}}$ (%)
3	0,26	66,57	310,78	808,28	497,51	13,4
5	0,40	100,27	485,35	1238,62	753,27	13,3
7	0,57	142,22	637,21	1587,94	950,73	15,0
9	0,70	177,05	712,08	1827,37	1115,28	15,9
11	0,88	220,12	1013,65	2155,38	1141,73	19,3
Média						15,4

Quadro 6: parcela de resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 60 dias de cura

Onde:

ΔA_{cv} : variação do teor volumétrico de agente cimentante para um mesmo teor de agente cimentante avaliado em relação à massa de solo seco;

Δq_u : ($\Delta A_{cv} \times 337,67$) para as amostras com 90 dias de cura;

Δq_u : ($\Delta A_{cv} \times 251,55$) para as amostras com 60 dias de cura;

$\Delta q_{u \text{ total}}$: ($q_{u \text{ máx}} - q_{u \text{ min}}$) variação na resistência à compressão simples com a redução na porosidade da mistura.

A_c (%)	ΔA_{cv} (%)	Δq_u (kPa)	$q_{u \text{ min}}$ (kPa)	$q_{u \text{ máx}}$ (kPa)	$\Delta q_{u \text{ total}}$ (kPa)	$\frac{\Delta q_u}{\Delta q_{u \text{ total}}}$ (%)
3	0,27	57,86	232,38	679,53	447,15	12,9
5	0,44	94,87	389,72	998,63	608,91	15,6
7	0,59	128,37	423,84	1394,93	971,09	13,2
9	0,76	163,72	501,21	1817,06	1315,85	12,4
11	0,88	190,71	619,18	2222,23	1603,05	11,9
<i>Média</i>						<i>13,2</i>

Quadro 7: parcela de resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 28 dias de cura

Onde:

ΔA_{cv} : variação do teor volumétrico de agente cimentante para um mesmo teor de agente cimentante avaliado em relação à massa de solo seco;

Δq_u : ($\Delta A_{cv} \times 216,36$) para as amostras com 28 dias de cura;

$\Delta q_{u \text{ total}}$: ($q_{u \text{ máx}} - q_{u \text{ min}}$) variação na resistência à compressão simples com a redução na porosidade da mistura.

8.3 EFEITO DO TEOR DE UMIDADE

O efeito do teor de umidade sobre a resistência à compressão simples, analisado através dos pontos da linha B de dosagem, pode ser observado nas figuras 28 e 29.

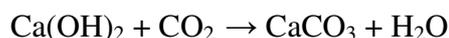
Pôde-se perceber que o teor de umidade não influenciou significativamente a resistência mecânica do material compósito. Através da análise da figura 28, observou-se que a resistência permaneceu praticamente constante para os teores de agente cimentante de 3, 5 e 7%, já para 9 e 11% a resistência permanece praticamente constante para os teores de umidade de 12, 14 e 16%. Para o teor de umidade de 10% constatou-se que a resistência obtida é menor do que para os demais teores de umidade, acredita-se que esse teor de umidade é

insuficiente para que ocorram todas as reações químicas entre os materiais que compõe o compósito.

8.4 EFEITO DO TEMPO DE CURA

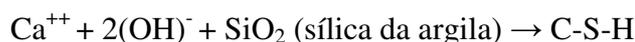
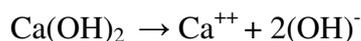
Quando se estabilizam solos com cal, percebe-se que uma variável determinante na obtenção de resistência mecânica é o tempo que as amostras permanecem em cura, devido às reações promovidas entre a cal, água e os compostos presentes no solo. Os ganhos de resistência são obtidos, principalmente, através das reações lentas:

a) reação de carbonatação:



Segundo Núñez (1991), a carbonatação é uma reação química prejudicial da cal com o dióxido de carbono da atmosfera, formando carbonato relativamente insolúvel. Uma visão simplificada e qualitativa de algumas reações típicas solo-cal são apresentadas abaixo (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 1976).

b) reações pozolânicas:



Sendo que o C-S-H (silicato hidratado de cálcio) e o C-A-H (aluminato hidratado de cálcio) são os compostos cimentantes responsáveis pela resistência. Portanto, o ganho de resistência do material compósito utilizado nessa pesquisa é fortemente influenciado pelo tempo de cura, sendo esse dependente da temperatura, tipo e quantidade de agente cimentante adicionado.

A adição de cimento implica, também, em ganhos expressivos de resistência em curto prazo, devido principalmente a ocorrência de reações de hidratação, explicitadas no item 2.2.1. Portanto, quanto se adiciona conjuntamente cal e cimento, percebe-se uma boa interação entre esse componentes, resultando em ganhos de resistência satisfatórios ao longo dos períodos de

cura. As figuras 35 a 38 demonstram os acréscimos de resistência, obtidos através dos diversos tempos de cura estabelecidos. O comportamento de todas as massas específicas aparentes secas seguem uma mesma tendência.

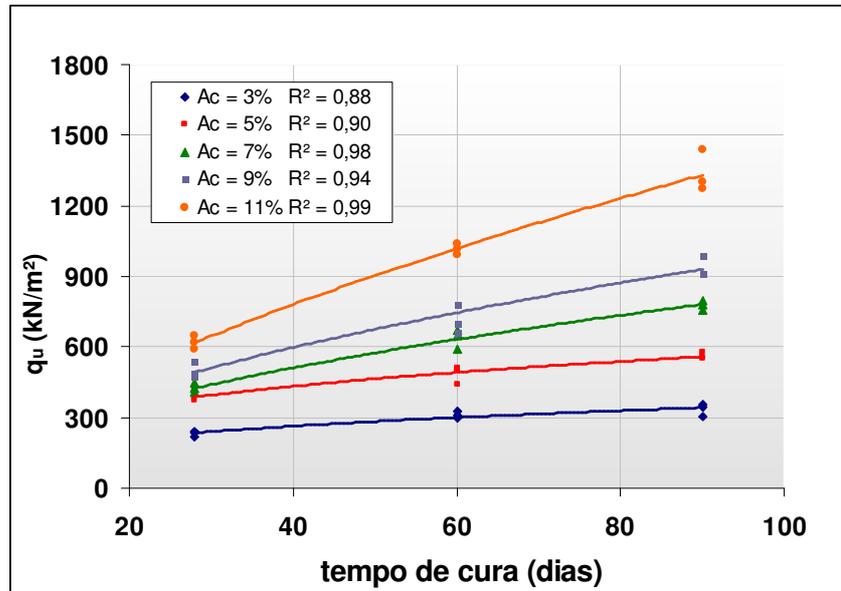


Figura 35: variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura ($\gamma_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$)

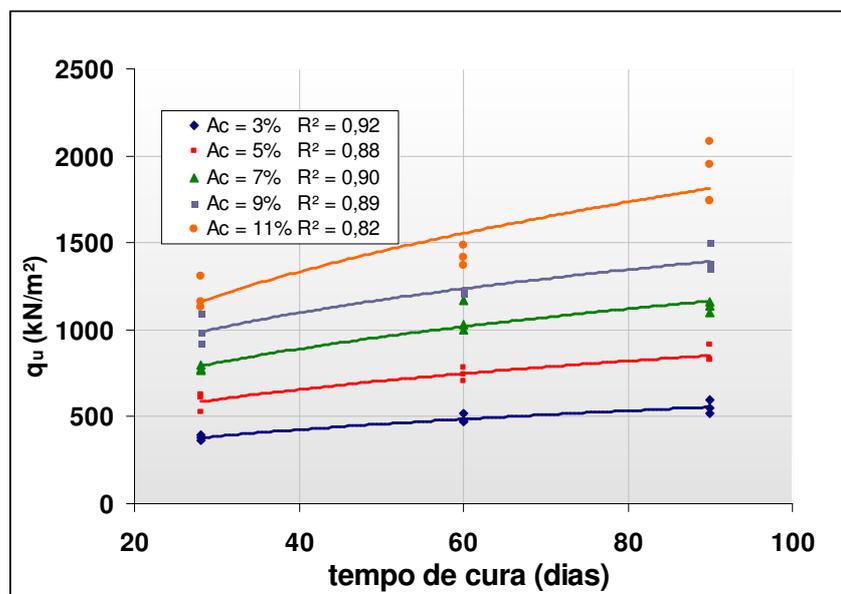


Figura 36: variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura ($\gamma_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$)

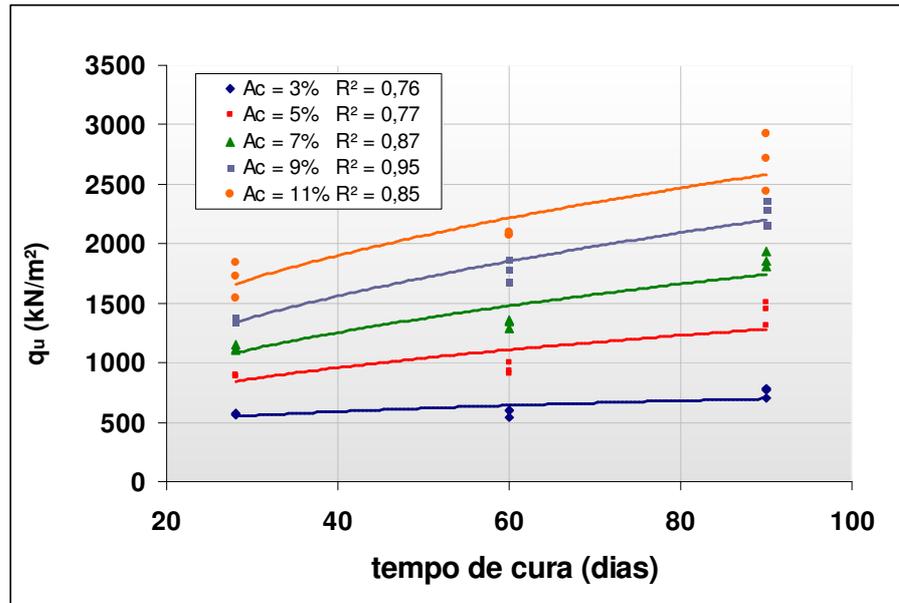


Figura 37: variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura ($\gamma_d = 1,8 \text{ g/cm}^3$)

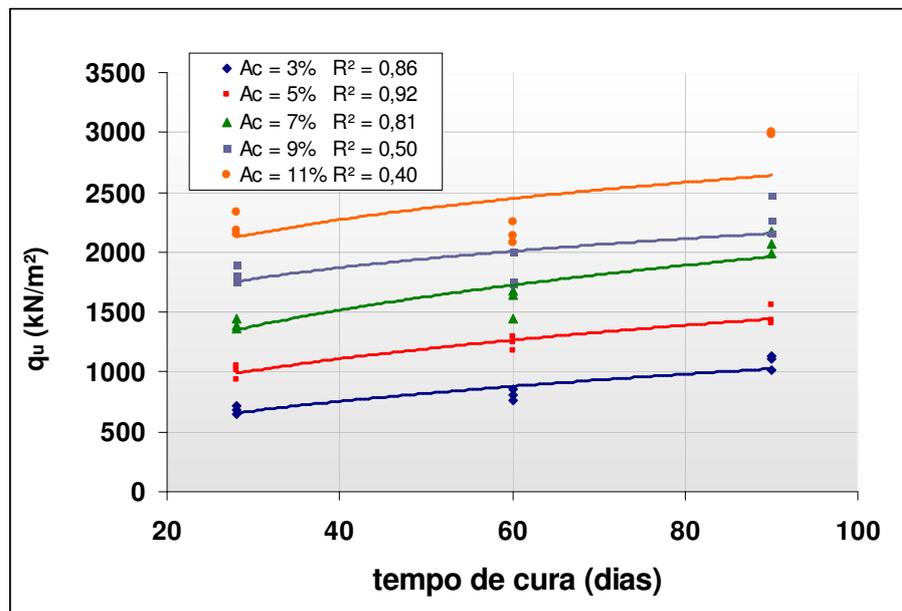


Figura 38: variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura ($\gamma_d = 1,88 \text{ g/cm}^3$)

Analisando o comportamento das curvas de ajuste das figuras 35 a 38, pode-se observar o aumento da resistência mecânica com o tempo de cura para todos os teores de agente cimentante utilizados e para todas as massas específicas aparentes secas consideradas (1,6; 1,7; 1,8 e 1,88 g/cm^3). Isso se deve, principalmente, as reações pozolânicas, que geram

produtos cimentícios enquanto houver Ca(OH)_2 e sílica disponíveis. Verifica-se, ainda, que a taxa de ganho de resistência continua crescente, isto é, as reações continuam ocorrendo, necessitando de um período maior de cura para que se possa avaliar o momento em que as reações cessarão definitivamente.

8.5 FATOR VAZIOS/AGENTE CIMENTANTE

Nas figuras 39, 40 e 41 são apresentadas às correlações entre a resistência à compressão simples e a razão entre o volume total de vazios e o volume total de agente cimentante, para as amostras de 90, 60 e 28 dias de cura.

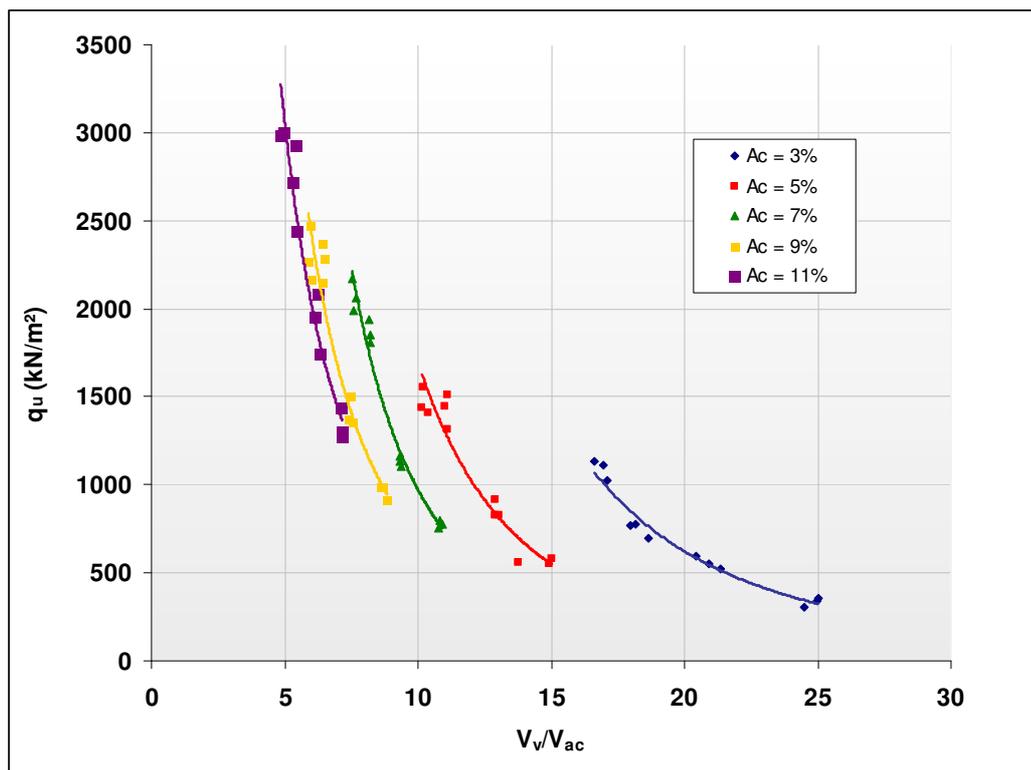


Figura 39: razão entre o volume de vazios e volume de agente cimentante para as amostras com 90 dias de cura

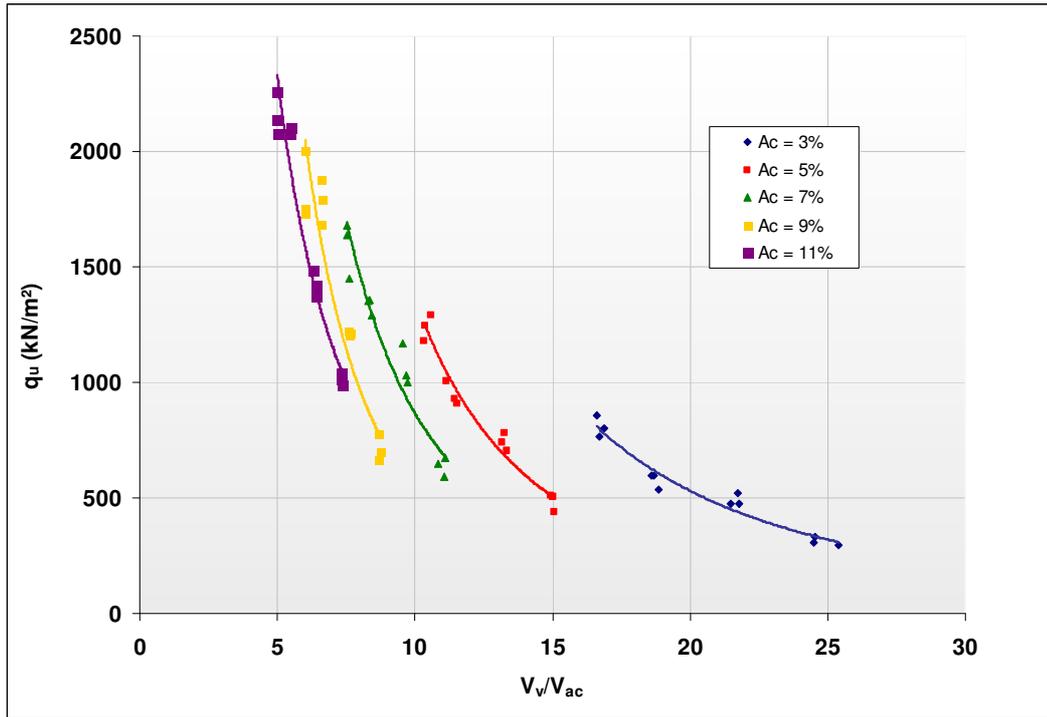


Figura 40: razão entre o volume de vazios e volume de agente cimentante para as amostras com 60 dias de cura

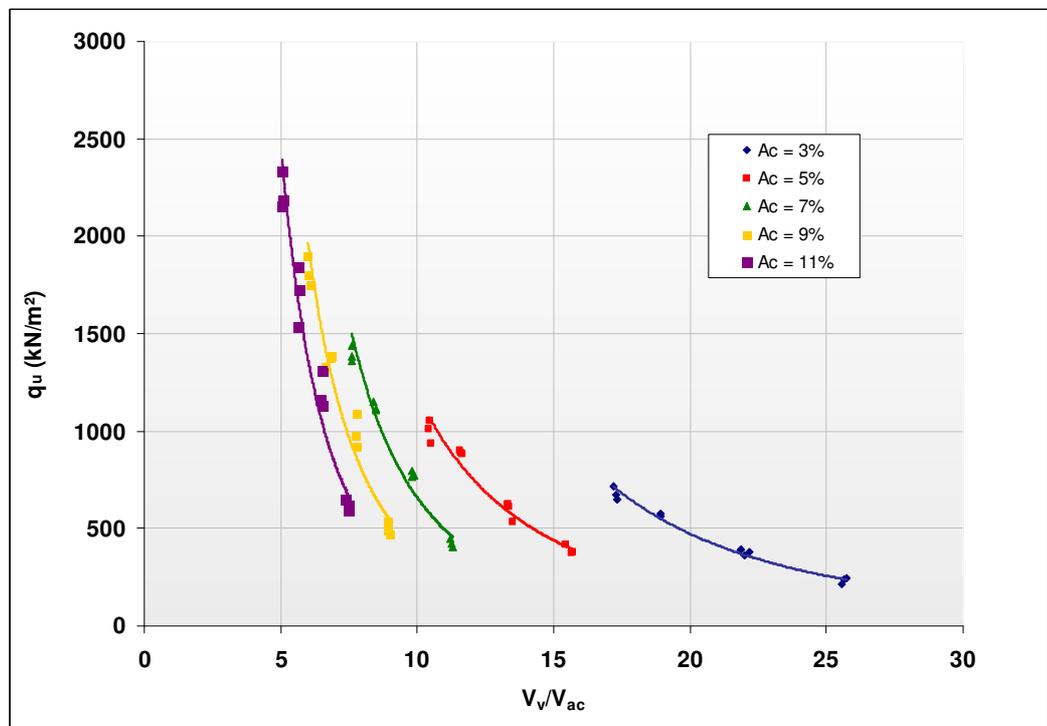


Figura 41: razão entre o volume de vazios e volume de agente cimentante para as amostras com 28 dias de cura

Através da análise das figuras 39, 40 e 41, pode-se observar que pontos com a mesma relação volume de vazios/volume de agente cimentante, obtidos de maneiras diferentes (por densificação ou por aumento do teor de agente cimentante), apresentam resistência distintas, ou seja, os pontos com menor porosidade e menor quantidade de agente cimentante atingem resistências maiores para todos os tempos de cura adotados.

Como observado por Foppa (2005), Larnach (1960) e Lopes Junior (2007), percebe-se, também nessa pesquisa, que para uma dada variação no volume de vazios, necessita-se de uma variação proporcional no volume de agente cimentante para contrabalançar a perda e ganho na resistência.

Para demonstrar as diferentes taxas de variação de cada variável, plotou-se, para os três tempos de cura considerados, as curvas potenciais ajustadas de resistência à compressão simples *versus* volume de vazios, e resistência à compressão simples *versus* o inverso do volume de agente cimentante.

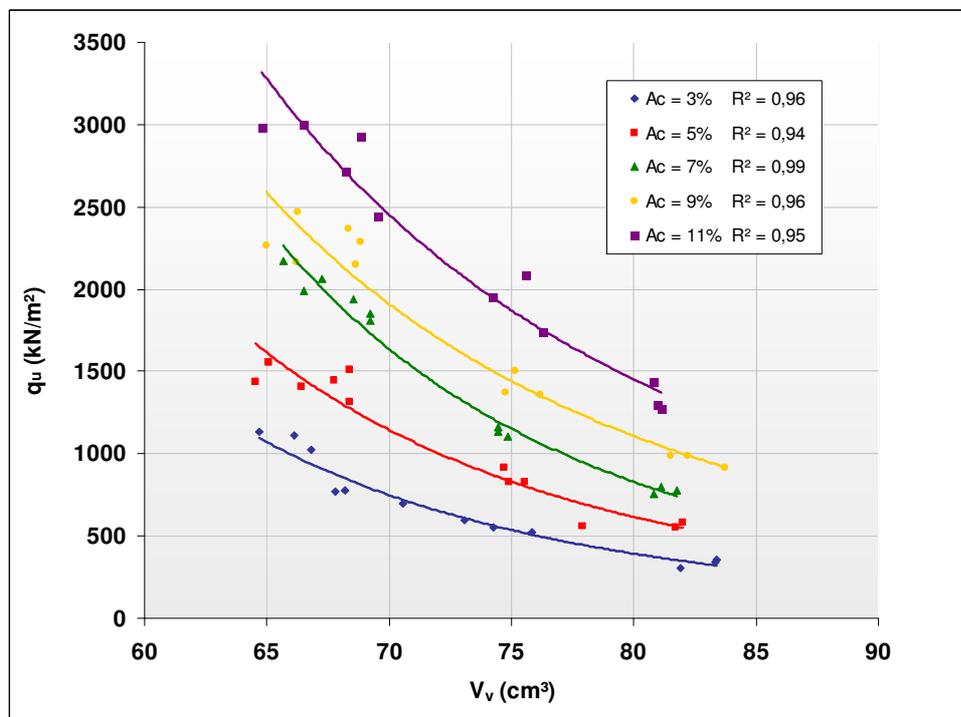


Figura 42: relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples de amostras com 90 dias de cura

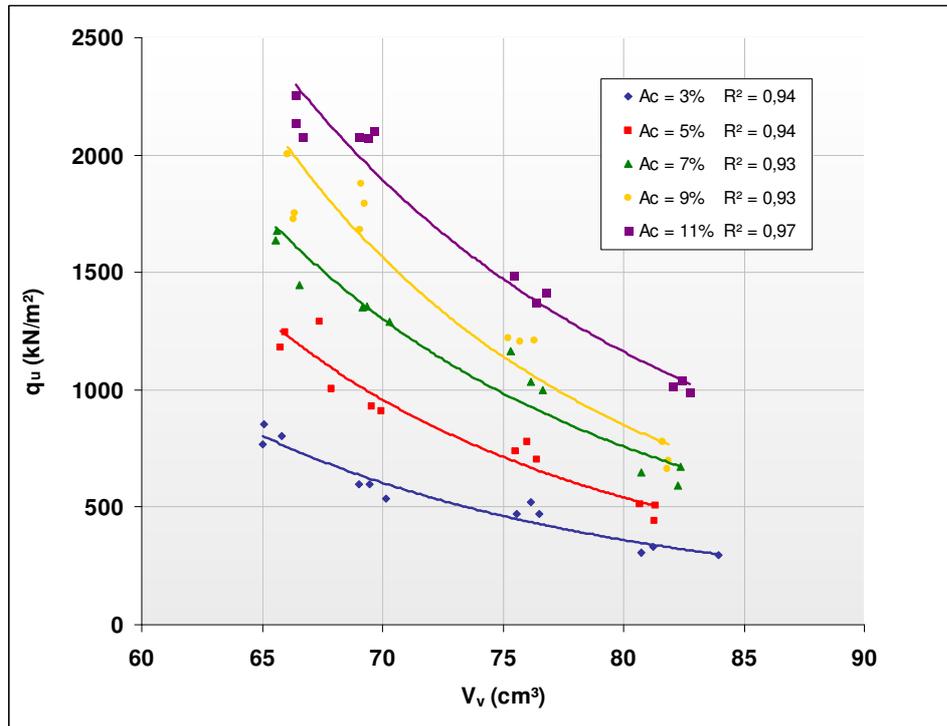


Figura 43: relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples de amostras com 60 dias de cura

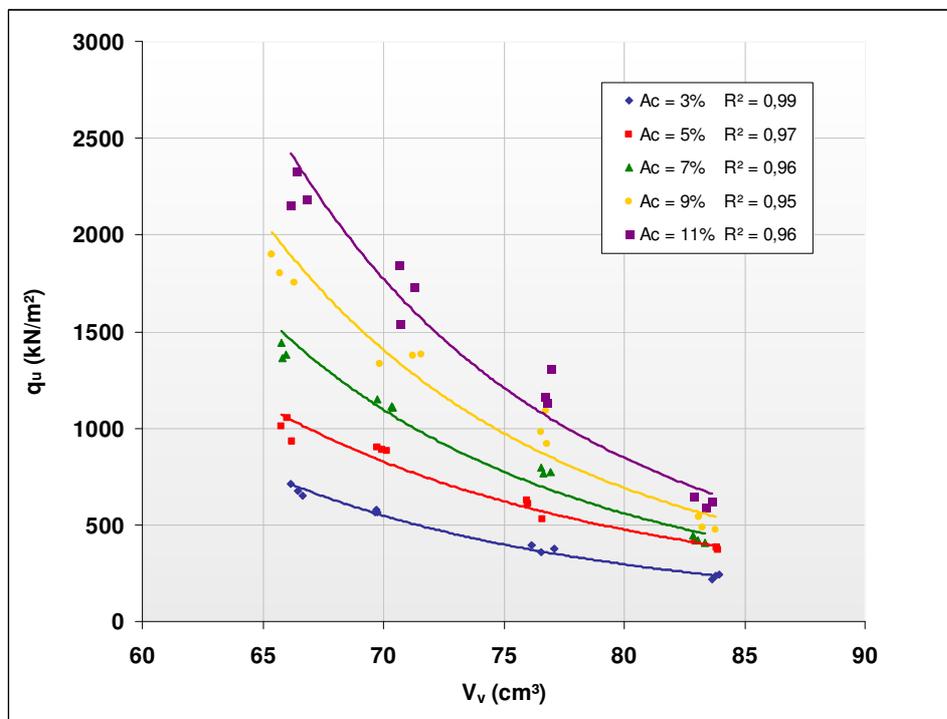


Figura 44: relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples de amostras com 28 dias de cura

Analisando as figuras 42, 43 e 44, que mostram a relação entre o volume de vazios e as figuras 45, 46 e 47, que relacionam o inverso do volume de agente cimentante com a resistência à compressão simples, para as amostras com 90, 60 e 28 dias respectivamente, pode-se perceber que as taxas de variação de resistência não são compatíveis, ou seja, necessita-se de uma compatibilização dessas taxas, para que o fator volume de vazios/volume de agente cimentante seja coerente.

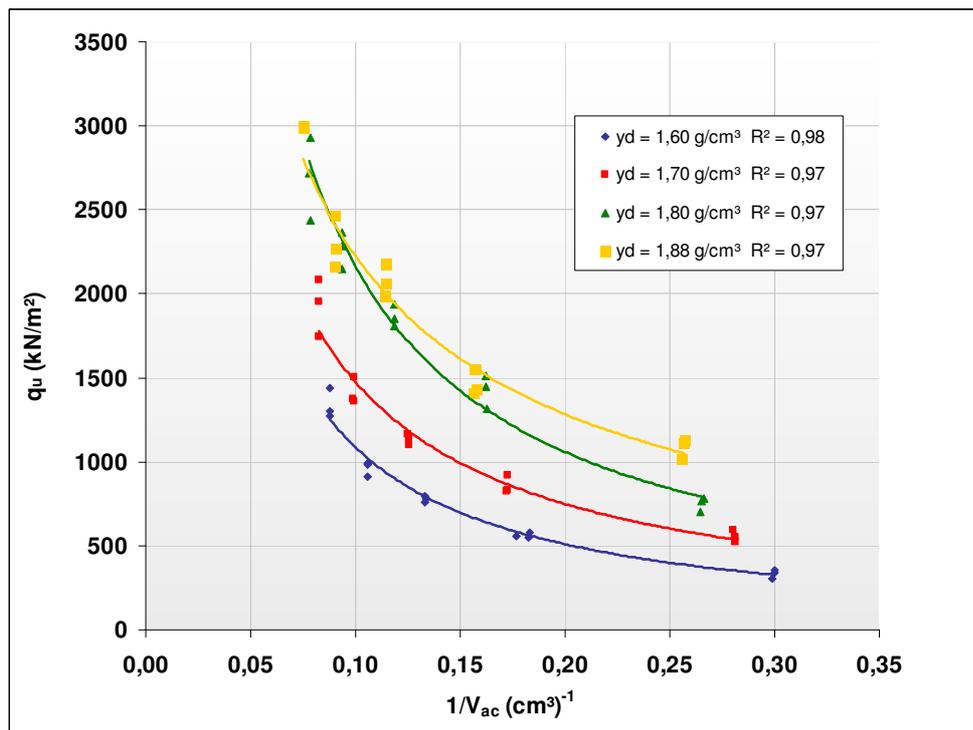


Figura 45: relação entre o inverso do volume de agente cimentante e a resistência à compressão simples de amostras com 90 dias de cura

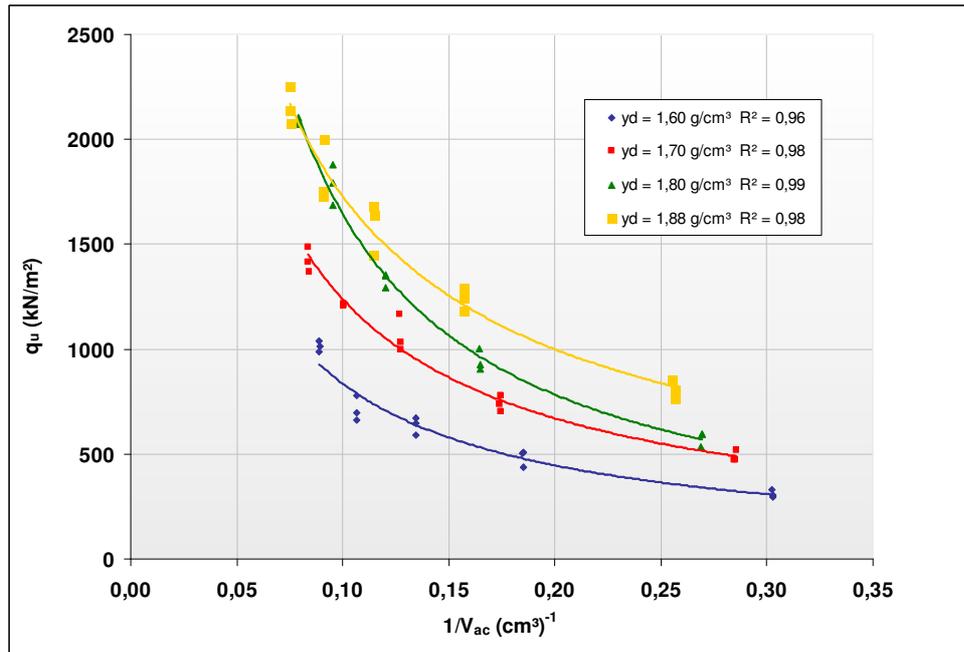


Figura 46: relação entre o inverso do volume de agente cimentante e a resistência à compressão simples de amostras com 60 dias de cura

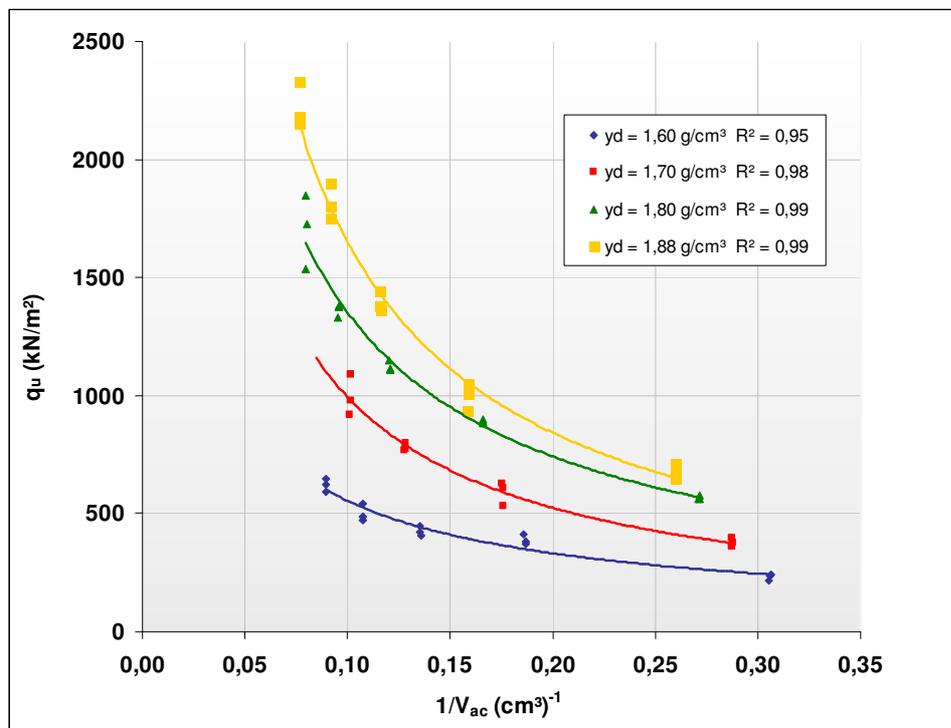


Figura 47: relação entre o inverso do volume de agente cimentante e a resistência à compressão simples de amostras com 28 dias de cura

Uma maneira de compatibilizarmos as taxas de variação das grandezas citadas anteriormente é a aplicação de uma potência sobre uma delas. Após diversas tentativas, buscando a melhor

correlação, obteve uma potência igual a 0,25 para as amostras com 90, 60 e 28 dias de cura, aplicada sobre o parâmetro volume de agente cimentante (V_{ac}); resultando em um bom ajuste para o fator volume de vazios/volume de agente cimentante. As curvas de resistência *versus* inverso do volume de agente cimentante ajustado são mostradas abaixo, para os seus respectivos tempos de cura.

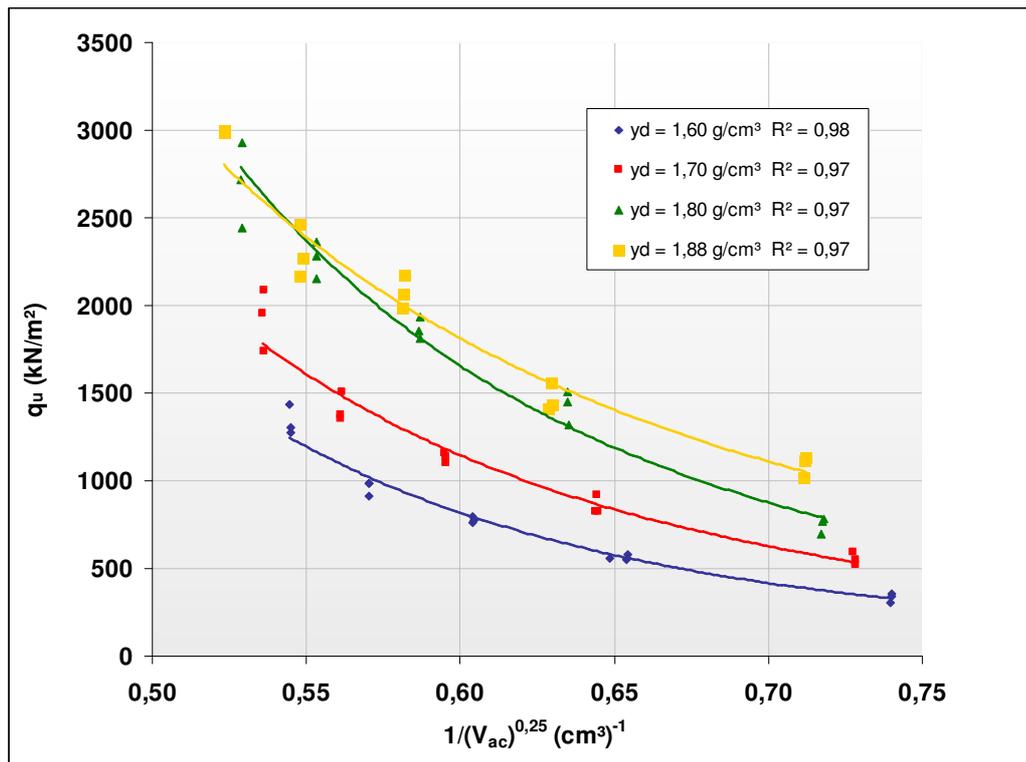


Figura 48: relação entre o inverso do volume de agente cimentante ajustado e a resistência à compressão simples de amostras com 90 dias de cura

Através da aplicação da potência, sobre o volume de agente cimentante, pode-se concluir que a relação entre a resistência à compressão simples e o inverso do volume de agente cimentante ajustado possui a mesma taxa de aquisição de resistência para as amostras com 90, 60 e 28 dias de cura.

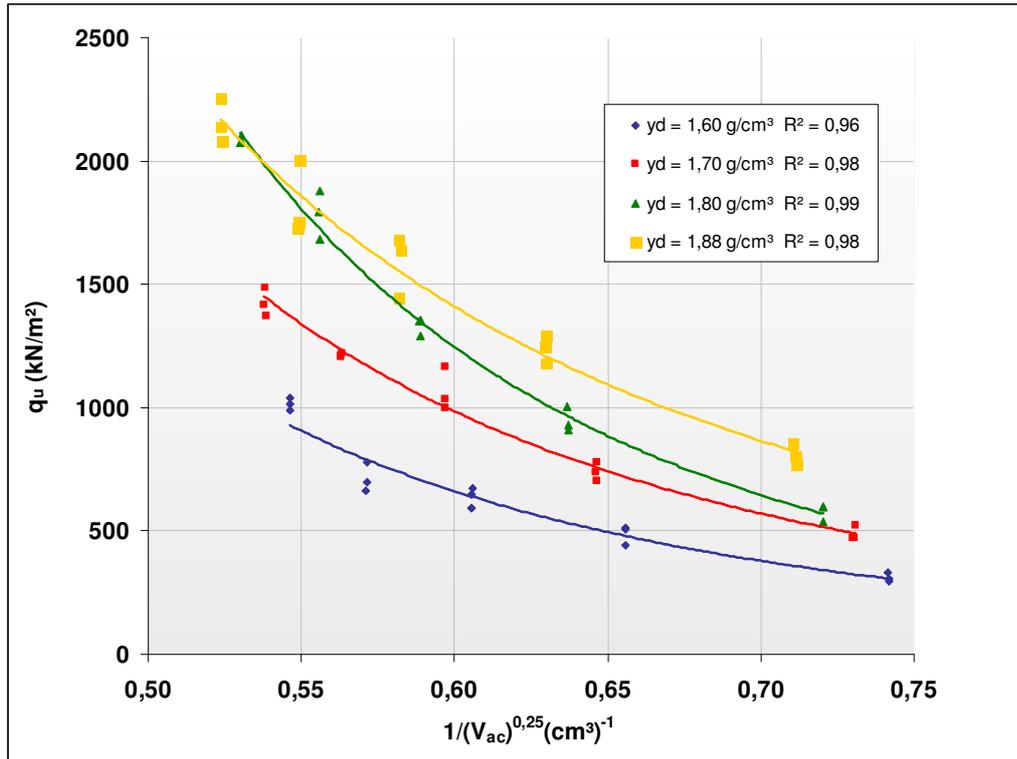


Figura 49: relação entre o inverso do volume de agente cimentante ajustado e a resistência à compressão simples de amostras com 60 dias de cura

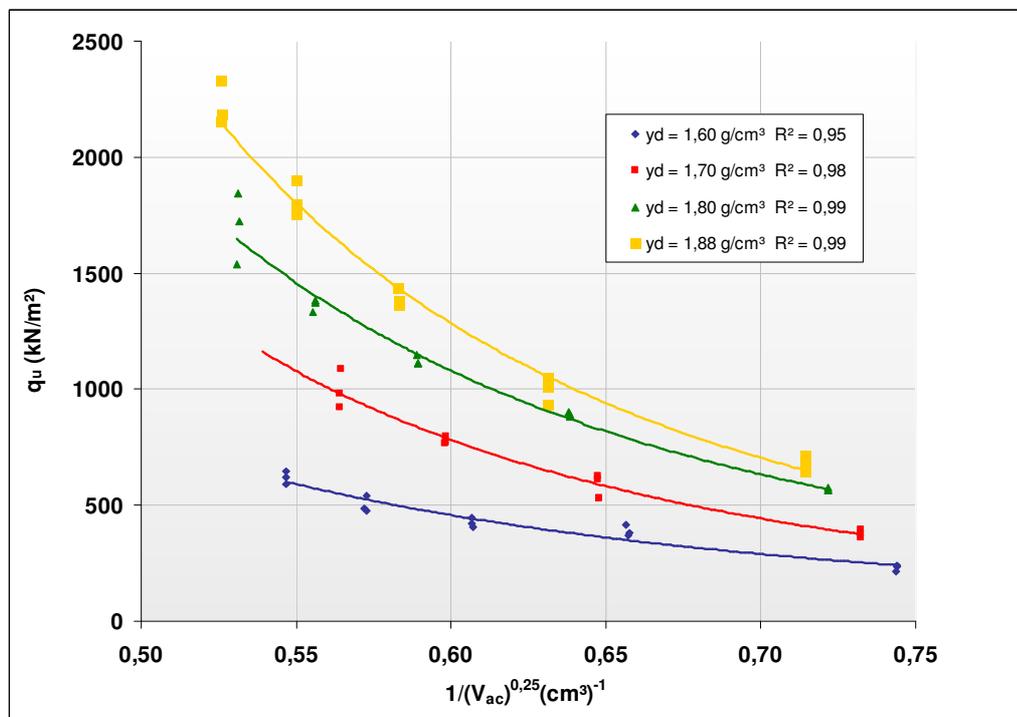


Figura 50: relação entre o inverso do volume de agente cimentante ajustado e a resistência à compressão simples de amostras com 28 dias de cura

A partir dessa compatibilização das curvas, pode-se determinar as curvas que relacionam a resistência à compressão simples com o fator volume de vazios/volume de agente cimentante ajustado, conforme as figuras 21, 24 e 27 explicitadas no capítulo anterior.

Pela análise das figuras 21, 24 e 27 conclui-se que a resistência do material compósito, estudado nessa pesquisa, pode ser avaliada através do fator volume de vazios/volume de agente cimentante, ajustado pelas suas respectivas potências. Entretanto, conforme Foppa (2005) e Lopes Junior (2007), pode-se explicitar esse fator em uma forma mais elegante utilizando ao invés de volume de vazios, a porosidade do material (η) expressa em porcentagem, e ao invés de volume de agente cimentante, o teor volumétrico de agente cimentante expresso em porcentagem do volume total (A_{cv}). As figuras 51, 52 e 53 apresentam o novo fator utilizando a relação $[\eta/(A_{cv})^b]$, para as amostras com 90, 60 e 28 dias de cura, respectivamente. Observa-se que a utilização do fator vazios/agente cimentante, $[\eta/(A_{cv})^b]$, não altera a qualidade dos resultados, uma vez que as novas variáveis são proporcionais às utilizadas anteriormente.

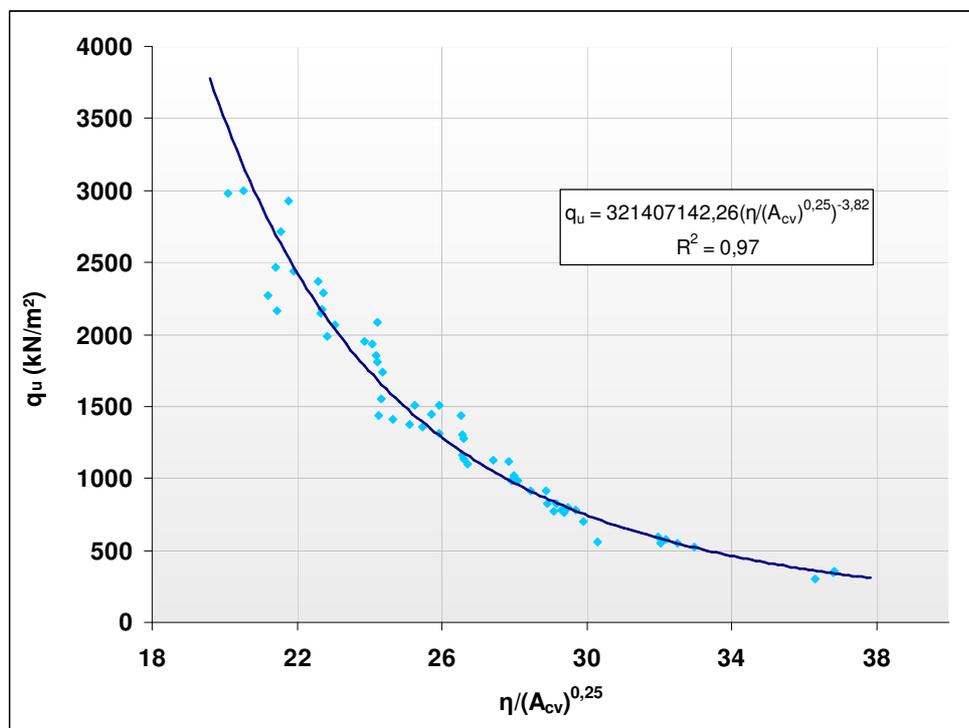


Figura 51: fator vazios/agente cimentante expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 90 dias de cura

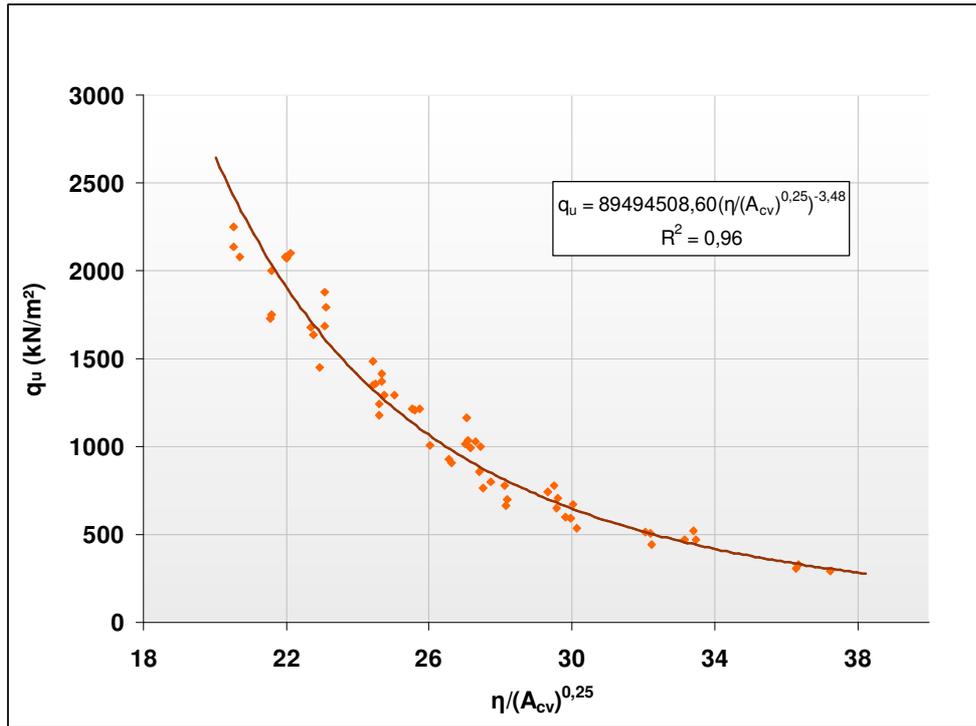


Figura 52: fator vazios/agente cimentante expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 60 dias de cura

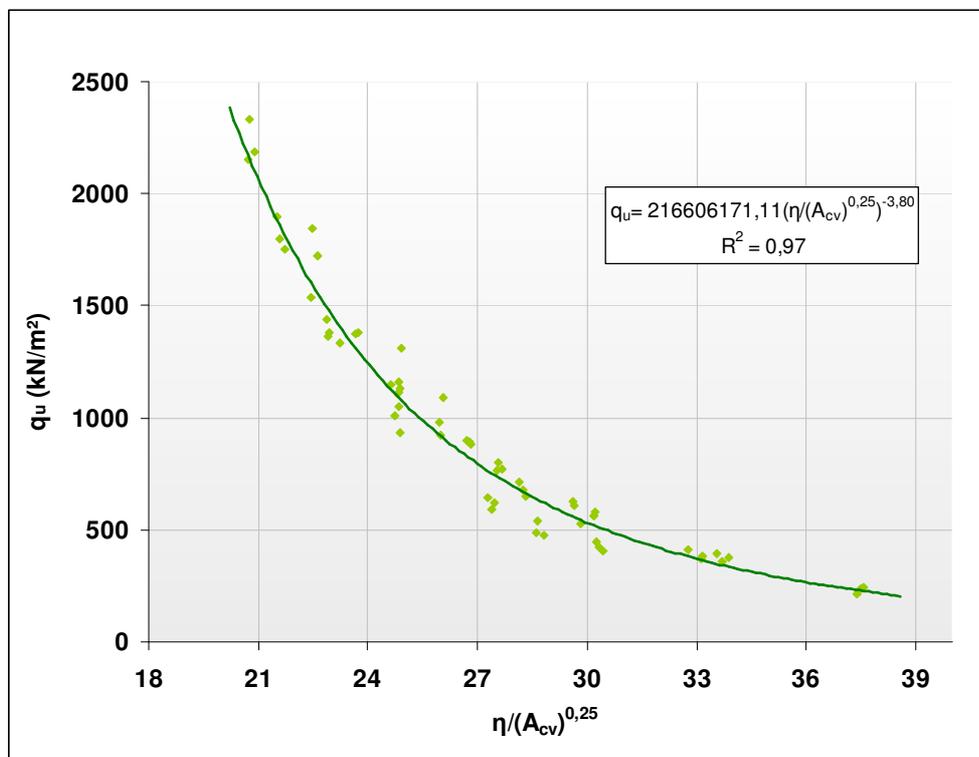


Figura 53: fator vazios/agente cimentante expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 28 dias de cura

Com o intuito de condensar os resultados obtidos para o material compósito estudado nesta pesquisa, em relação à validação do fator vazios/agente cimentante, para os tempos de cura definidos (28, 60 e 90 dias) e para o espectro de dosagens utilizado, confeccionou-se as três curvas em um único gráfico, conforme a figura abaixo.

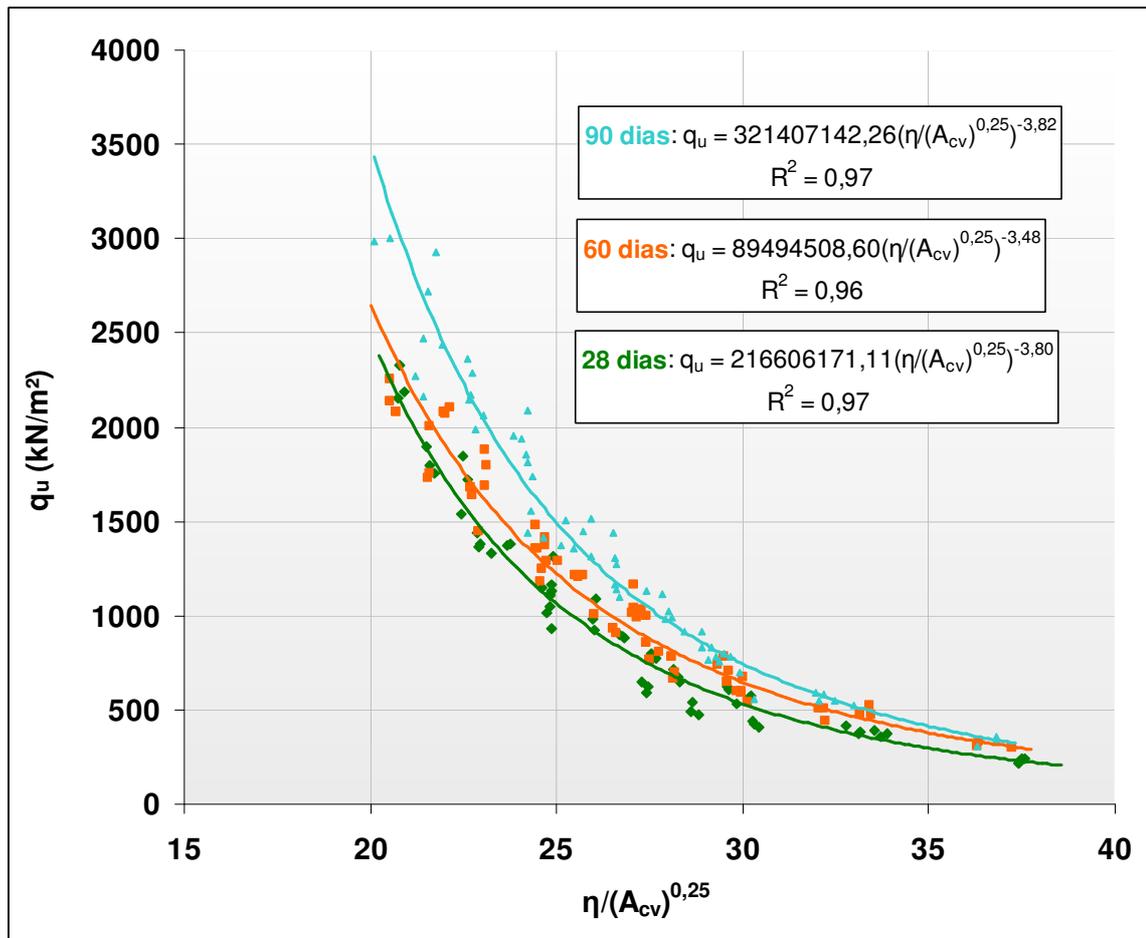


Figura 54: fator vazios/agente cimentante expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 90, 60 e 28 dias de cura

Conforme observado por Foppa (2005), uma vez estabelecido o fator vazios/agente cimentante, verifica-se no gráfico, figura 54, qual o fator que corresponde à resistência à compressão simples de projeto, de acordo com o tempo de cura definido. A partir disso, o projetista poderá escolher a densidade em que a mistura deve ser compactada e a quantidade de agente cimentante a ser adicionado, de maneira segura e econômica.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

9.1 CONCLUSÕES

A partir da análise detalhada dos resultados e a avaliação da influência dos parâmetros de controle (teor de agente cimentante, porosidade, tempo de cura, teor de umidade e fator vazios/agente cimentante) sobre a resistência à compressão simples do material compósito, foram estabelecidas, de acordo com o espectro de dosagens adotado, as seguintes conclusões:

9.1.1 Representatividade dos corpos-de-prova

Os critérios adotados e as rígidas tolerâncias estabelecidas para a aprovação dos corpos-de-prova acarretaram em amostras adequadas e representativas dos fenômenos estudados.

9.1.2 Influência da quantidade de agente cimentante

A adição de qualquer teor de agente cimentante, dentro dos teores adotados, promoveu ganhos significativos de resistência nas amostras. Na faixa de teores utilizada (3, 5, 7, 9 e 11%), a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento da quantidade de agente cimentante adicionado. As taxas de aquisição de resistência, representada pelas inclinações das retas de ajuste, aumentaram com o aumento das massas específicas aparentes secas do material compactado, indicando que a cimentação é mais efetiva nas amostras mais compactadas, isto é, o aumento da massa específica aparente seca implica em um maior número de contatos entre grãos, que são intertravados pelos produtos formados nas reações de hidratação e pozolânicas ocorridas nas amostras.

9.1.3 Influência da porosidade

A redução da porosidade das amostras promoveu ganhos significativos de resistência, independente do teor de agente cimentante utilizado. Verificou-se que a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade das misturas. Essa influência da porosidade na resistência mecânica está relacionada à existência de um maior número de contatos e um maior intertravamento entre as partículas de solo. Esse efeito é potencializado quando se adicionam agentes cimentantes, como cal e cimento, pois além de um maior número contatos entre as partículas de solo promover uma cimentação mais efetiva, os produtos formados por essa cimentação acarretam em um maior intertravamento das partículas, e com isso, há uma maior capacidade de distribuição de tensões e mobilização de atrito no interior das amostras, contribuindo para o aumento da resistência.

9.1.4 Influência do teor de umidade

A variação do teor de umidade, mantendo a massa específica aparente seca constante, não afetou significativamente a resistência à compressão simples das amostras para o tempo de cura estudado. Percebeu-se, entretanto, que para teores mais elevados de agente cimentante (9% e 11%) e teores de umidade próximos a 10% foram obtidas resistências menores do que para os demais teores (12, 14 e 16%), que permaneceram praticamente constantes. Isso se deve, possivelmente, a pouca água disponível para que ocorresse as reações de hidratação do cimento e as reações pozolânicas promovidas pelo hidróxido de cálcio presente na cal. Para visualizar as estruturas formadas no interior das amostras tem-se a necessidade de realização de microscopias, que fogem do objetivo desta pesquisa.

9.1.5 Influência do tempo de cura

Considerando os três tempos de cura definidos (28, 60 e 90 dias) verificou-se um aumento da resistência à compressão simples das amostras com o aumento do tempo de cura, para todos os teores de agente cimentante e para todas as massas específicas aparentes secas. Inicialmente tem-se um ganho de resistência devido às reações de hidratação do cimento

(primárias e secundárias), que formam produtos cimentantes como C-S-H (silicato hidratado de cálcio) e C-A-H (silicato hidratado de alumínio) com poucos dias de cura. As reações pozolânicas, que são as responsáveis pelos ganhos de resistência a longo prazo, ocorrem enquanto houver disponível no meio hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), proveniente da adição da cal e da hidratação do cimento, sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), provenientes do solo e do resíduo de britagem de rocha. Os produtos das reações pozolânicas são, principalmente, os compostos cimentícios C-S-H e C-A-H. Nota-se que para os tempos de cura estudados as reações ainda continuam ocorrendo, necessitando de um período maior de cura para determinação do período em que as reações se cessarão.

9.1.6 Fator vazios/agente cimentante

A utilização do fator volume de vazios/volume de agente cimentante não constitui na melhor maneira de representar o fenômeno, pois assume que uma determinada variação no volume de vazios, acarretando em ganho ou perda de resistência, poderia ser contrabalançada por uma variação proporcional no volume de agente cimentante. Verificou-se que essa proporcionalidade não é satisfeita, pois o volume de vazios e o inverso do volume de agente cimentante sobre a resistência à compressão simples não têm a mesma taxa de variação. A melhor forma de definí-lo foi através do fator vazios/agente cimentante expresso em termos de porosidade da mistura (η) e do teor volumétrico de agente cimentante (A_{cv}) ajustado por um expoente que compatibilizasse suas diferentes taxas de variação. Para os três tempos de cura obteve-se o seguinte fator $[\eta/(A_{cv})^{0,25}]$. Salienta-se que esse expoente é função da matriz de solo e do agente cimentante utilizado.

Portanto a utilização desse fator, para estabilização de solos, pode ser uma ferramenta importante para o projetista, no que se refere à escolha adequada de quantidade de agente cimentante a ser adicionado e densidade de compactação, proporcionando ao projeto economia e segurança.

9.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a evoluir e ampliar os conhecimentos, mostrados neste trabalho de diplomação, sobre o comportamento de solos artificialmente cimentados sugere-se os seguintes tópicos de pesquisas:

- validação do fator vazios/agente cimentante para diferentes solos, mais argilosos e mais arenosos;
- execução de ensaios triaxiais drenados, triaxiais não-drenados para análise do comportamento de corpos-de-prova com o mesmo fator vazios/agente cimentante;
- realização de ensaios de microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raio X para que se possa avaliar as interações existentes entre o solo-cal-cimento-resíduo e compreender o comportamento microestrutural das amostras;
- consideração de tempos de cura maiores, para verificação de quando as reações que conferem resistência cessam completamente;
- verificação do efeito da trajetória de tensões sobre o fator vazios/agente cimentante e sobre corpos-de-prova com mesmo fator vazios/agente cimentante;
- aplicação em campo do fator vazios/agente cimentante para verificação de sua validade em experimentos em verdadeira grandeza.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5102**: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures. Philadelphia, 1996.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Solo – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 1986.

_____. **NBR 12024**: Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1992a.

_____. **NBR 12253**: Solo-cimento – Dosagem para o emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 1992b.

CARRARO, J. A. H. **Utilização de Resíduos Industriais na Estabilização de um Solo Residual de Arenito**. 1997. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CHANG, T. S.; WOODS, R. D. Effect of Particle Contact Bond on Shear Modulus. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York: ASCE, v.118, n.8, p.1216-1233, 1992.

CRUZ, R. C. **Influência de Parâmetros Fundamentais na Rigidez, Resistência e Dilatância de uma Areia Artificialmente Cimentada**. 2008. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DALLA ROSA, F. **Comportamento Mecânico de um Solo Cimentado Curado sob Tensão em Ensaio Triaxial**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FERREIRA, P. M. V. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Residual de Arenito da Formação Botucatu**. 2002. 234 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FOPPA, D. **Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados**. 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal**: fundamentos e aplicações na engenharia civil. São Paulo: Pini, 1997.

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

KÉZDI, Á. **Stabilized Earth Roads**. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam, 1979.

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

LAUTENSCHLÄGER, C. E. R. **Influência da Relação Vazios/Cimento nos Parâmetros de Resistência de um Solo Artificialmente Cimentado**. 2007. 91 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. 2007. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NÓBREGA, M. T. **Características e Mecanismo de Estabilização de Solos Tropicais com Cal e Cimento em Pista Experimental**. 1995. 233 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica. Universidade de São Paulo, São Paulo.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização Físico-Química de um Solo de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação**. 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PRUSINSKI, J.R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., nº 1652, p.215-227, 1999.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Soil-Cement**. Disponível em: <www.cement.org/pavements>. Acesso em: 15 jun. 2008.

PRIETTO, P. D. M. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Artificialmente Cimentado**. 1996. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

THOMÉ, A.; DONATO, M; CONSOLI, N. C., GRAHAM, J. Circular Footings on a Cement Layer Above Weak Foundation Soil. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa: v. 42, n. 6, p. 1569-1584, 2005.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime-fly Ash-stabilized Bases and Subbases**. Washington, D.C., 1976.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization, Reactions, Properties, Design and Construction**. Washington: TRB, 1987.