

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

Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas  
Solo-Cinza-Cal

Amanda Dalla Rosa

Porto Alegre  
2009

Amanda Dalla Rosa

**ESTUDO DOS PARÂMETROS-CHAVE NO CONTROLE DA  
RESISTÊNCIA DE MISTURAS SOLO-CINZA-CAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Orientação: Prof. Ph.D. Nilo Cesar Consoli.

Porto Alegre  
2009

D144e

Dalla Rosa, Amanda

Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal / Amanda Dalla Rosa. – 2009.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2009.

Orientação: Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli

1. Estabilização do solo – Cinza-cal. 2. Geotécnica – Ensaios. 3. Análise de variância. I. Consoli, Nilo Cesar, orient. II. Título.

CDU-624.232.3(043)

**AMANDA DALLA ROSA**

**ESTUDO DOS PARÂMETROS-CHAVE NO CONTROLE DA  
RESISTÊNCIA DE MISTURAS SOLO-CINZA-CAL**

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

Porto Alegre, 6 de Abril de 2009.

**Prof. Nilo Cesar Consoli**

Ph. D. Concordia University, Canadá  
Orientador

**Prof. Fernando Schnaid**

Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Catherine O'Sullivan**

Ph. D. University of California at Berkeley, USA.

**Prof. Antônio Thomé**

Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

**Prof. João Ricardo Masuero**

Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

**Prof. Fernando Schnaid**

Ph. D. Oxford University, Reino Unido

**Prof. Samir Maghous**

Ph. D. Université de Marne la Vallée, França

Dedico este trabalho aos meus pais, Celenir e Amando e  
as minhas irmãs Salete e Sandra, por todo o apoio,  
cumplicidade, amor e carinho.

## **AGRADECIMENTOS**

Na conclusão de mais esta etapa agradeço a todos, pessoas e instituições, que de uma forma ou de outra contribuíram para a conclusão deste trabalho, que é muito importante para mim.

A Deus, que me concedeu a capacidade de realizar esta pesquisa, me guiando com serenidade, me dando forças e me proporcionando muitas coisas boas durante todo esse percurso.

Agradeço a valiosa contribuição do meu orientador e professor Nilo Cesar Consoli, que me orientou com empenho e dedicação. Muito obrigada pelo interesse, disponibilidade, incentivo, exemplo, amizade e principalmente pela confiança depositada em mim no decorrer do desenvolvimento desta pesquisa. Meus sinceros agradecimentos e admiração.

Ao professor João Ricardo Masuero pelo interesse, dedicação, incentivo, disponibilidade e amizade sempre demonstrados no desenvolvimento deste trabalho e principalmente pelas valiosas discussões e sugestões que engrandeceram esta pesquisa.

A todos os professores do PPGEC da UFRGS, que com conhecimento e dedicação me proporcionaram momentos preciosos de aprendizado. Muito obrigada!

Ao professor Márcio Antônio Vendruscolo pela confiança, exemplo, incentivo e amizade.

Aos meus pais Amando e Celenir por sempre se fazerem presentes em todos os momentos, me incentivando e me apoiando com muito amor e carinho. Obrigada pelas conversas, confiança, amizade, companheirismo e por serem meu “Porto Seguro”. Muito obrigada por seus exemplos profissional e pessoal e pelo incondicional estímulo ao estudo.

À minha irmã Salete, minha colega neste curso de Mestrado, pela companhia, pelo incentivo, pelas horas de estudo compartilhadas nas madrugadas de “Forno Alegre”, pelo carinho e amizade. À minha irmã Sandra, nossa futura Arquiteta, pelo incentivo, companhia, amizade, carinho e alegria. À Bebel, nossa cachorrinha, pela alegria contagiante. Valeu “maninhas”!

A todos os meus familiares e amigos pelo apoio, amizade e momentos de descontração.

A todos os meus queridos colegas do LEGG/ENVIRONGEO. Muito obrigada pela disponibilidade, pela troca de idéias, pela boa conduta na divisão da balança, pela amizade, pela parceria nos almoços e na “hora feliz” e pelas brincadeiras que além de me deixarem

“vermelha”, deixavam nosso ambiente de trabalho muito mais alegre, suavizando os momentos difíceis. Valeu “gente”!

Em especial, agradeço ao bolsista Rodrigo Beck Saldanha “Alemão” pelo excelente trabalho realizado, com muita dedicação e esforço, muito obrigada pela troca de idéias, companheirismo, amizade e apoio durante a nossa longa e trabalhosa caminhada “Feito!”. Ao colega Luizmar Lopes Junior pelos conhecimentos transmitidos, disponibilidade, amizade e discussões que muito contribuíram para esta pesquisa. Aos colegas Lucas Festugato e Francisco Dalla Rosa que estiveram presentes durante todo esse percurso, sempre com uma solução simples para um problema aparentemente difícil, muito obrigada pelo conhecimento transmitido, exemplo, incentivo, apoio e principalmente pela grande amizade adquirida. Aos colegas Anderson Fonini, Rodrigo Caberlon Cruz, Márcio Floss, José Rojas, Carlos Emmanuel Lautenschläger e Guilherme Righetto “Paulista” pela troca de idéias, pela disponibilidade, apoio e amizade. Às colegas Bianca Lobo, Jucélia Bedin e Emanuele Gauer pelo conhecimento transmitido, pelo apoio, pela amizade e pelos prazerosos e divertidos momentos de descontração “Uhu”.

A todos os meus colegas do PPGEC da UFRGS, em especial Samuel, Fábio, Francis, Marcelo, Paulo, Juliana, Klaus, Ariela e Andreos pelo conhecimento transmitido, horas de estudo compartilhadas, apoio, amizade e pelos momentos de descontração.

Aos funcionários da Escola de Engenharia da UFRGS pelo apoio nas atividades realizadas, em especial a João Diniz pela colaboração nas coletas de amostras e ensaios de laboratório, aos funcionários do NORIE e do LEME e às funcionárias da secretaria do PPGEC.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS pela oportunidade de realizar este curso de Mestrado.

À Companhia Tractebel Energia SUEZ pela disponibilização da cinza volante da Usina Termelétrica de Charqueadas.

À CAPES e ao CNPq pelo auxílio proporcionado com a bolsa de estudos que possibilitou minha total dedicação aos estudos e ao desenvolvimento desta pesquisa.

Muito obrigada!

Sem esforço de nossa parte jamais atingiremos o alto da montanha. Não desanime no meio da estrada: siga à frente, porque os horizontes se tornarão amplos e maravilhosos à medida que for subindo. Mas não se iluda, pois só atingirá o cimo da montanha se estiver decidido a enfrentar o esforço da caminhada.

*C. Torres Pastorino*



## RESUMO

DALLA ROSA, A. Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Na engenharia geotécnica o principal material utilizado, o solo, é complexo e muito variável, sendo que nem sempre satisfaz as necessidades da obra a ser realizada. Com a constante busca de soluções que proporcionem melhoria no solo, redução de custos e preservação dos recursos naturais, o aproveitamento de resíduos vem se destacando, como é o caso da utilização da cinza volante na estabilização de solos com cal. Contudo, ainda não existem metodologias de dosagem dessas misturas baseadas em critérios mais racionais, como a relação água/cimento para o concreto. Assim, esta pesquisa tem como objetivo quantificar a influência das variáveis de interesse quantidade de cal, quantidade de cinza volante, porosidade e do tempo de cura sobre a resistência de um solo estabilizado com cal e cinza volante, verificando a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa da resistência à compressão simples destas misturas. Para isso foram realizados ensaios de compressão simples e medidas de sucção matricial. Os resultados demonstram que o aumento da quantidade de cal e cinza volante, do peso específico aparente seco e do tempo de cura provoca o aumento da sua resistência à compressão simples. Sendo que, a resistência à compressão simples cresce linearmente com o aumento da quantidade de cal e exponencialmente com a redução da sua porosidade. Assim, verifica-se que, a relação vazios/cal, definida pela razão entre a porosidade da mistura compactada e o teor volumétrico de cal, ajustado por um expoente, demonstra ser um parâmetro adequado na estimativa da resistência à compressão simples das misturas estudadas. Além disso, a existência de relações únicas e distintas no controle da resistência à compressão simples do solo estudado em função da porosidade, do teor volumétrico de cal e da quantidade de cinza volante para 28, 60 e 90 dias de cura mostrou-se muito eficiente para relações de dosagem. Contudo, a análise estatística dos dados obtidos em um experimento é de extrema importância. Uma metodologia utilizada para analisar estes dados é a metodologia de Projeto de Experimentos, que é apoiada fortemente em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, a execução e análise de um experimento. Assim, a análise a ser realizada neste experimento baseia-se em um projeto fatorial completo que investiga todas as combinações de níveis dos fatores controláveis quantidade de cal, quantidade de cinza volante, porosidade e tempo de cura. Os resultados demonstram, a partir da análise da variância, que todos os fatores controláveis escolhidos no experimento são significativos, bem como todas as interações entre eles. A metodologia de Projeto de Experimentos mostrou-se eficiente na determinação de quais fatores intervenientes são importantes para o fenômeno em estudo.

**Palavras-chave:** solo-cinza-cal; relação vazios/cal; análise da variância.

## ABSTRACT

DALLA ROSA, A. Key Parameters in the Control of the Resistance of Soil-Ash-Lime Mixtures. 2009. M.Sc. Dissertation – Department of Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The main material used in the geotechnical engineering, the soil, is complex and highly variable, and does not always meet the needs of the work to be performed. With the constant search for solutions that provide soil improvement, costs reduction and natural resources preservation, the waste recovery has been increasing, such as the use of fly ash in the soils stabilization with lime. However, there are still no dosage methods of these mixtures based on more rational criteria such as the water/cement ratio for the concrete. Thus, this research aims to quantify the influence of variables of interest lime amount, the fly ash quantity, porosity and curing time on the strength of soil stabilized with lime and fly ash, verifying the adaptation of the use of the voids/lime ratio in the estimation of unconfined compression strength of these mixtures. Unconfined compression strength tests and measurement of matric suction were carried out in present work. The results show that increasing lime and/or fly ash amount, dry unit weight and curing time has as consequence the increase of unconfined compression strength. Unconfined compression strength increases linearly with the increase of lime amount and exponentially with the reduction of its porosity. The voids/lime ratio, defined as the ratio of the compacted mixture porosity and the lime volumetric content, adjusted by an exponent, proves to be an appropriate parameter to estimate the unconfined compression strength of the soil-ash-lime studied. Furthermore, the existence of unique and distinct relationships in the control of unconfined compression strength of the soil studied as a function of porosity, lime volumetric content and fly ash quantity for 28, 60 and 90 days of curing was very efficient for dosage relationships. However, the statistical analysis of data from an experiment is utmost importance. A methodology to analyze these data is the methodology of Design of Experiments, which is strongly supported by statistical concepts, designed to optimize the planning, the implementation and analysis of an experiment. The analysis to be performed in this experiment is based on a complete factorial design to investigate all combinations of levels of controllable factors lime amount, fly ash quantity, porosity, and time curing. The results show, from the analysis of variance, that all controllable factors chosen in the experiment and all interactions between them are significant. The methodology of Design of Experiments was efficient in determining which involved factors are important for the phenomenon under study.

**Key-words:** soil-ash-lime; voids/lime ratio; analysis of variance.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	23
1.2 OBJETIVOS .....	24
1.2.1 Objetivo Geral.....	24
1.2.2 Objetivos Específicos .....	24
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 APROVEITAMENTO E UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NA ENGENHARIA GEOTÉCNICA.....	26
2.2 VISÃO GERAL SOBRE A TÉCNICA DO SOLO-CAL .....	29
2.3 MATERIAIS UTILIZADOS EM MISTURAS SOLO-CINZA-CAL.....	32
2.3.1 Solo.....	32
2.3.2 Cinza Volante .....	33
2.3.3 Cal.....	34
2.3.3.1 Propriedades da Cal .....	34
2.3.3.2 Dosagem da Cal .....	34
2.3.4 Água.....	36
2.4 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE MISTURAS SOLO-CINZA-CAL .....	36
2.4.1 Alterações das propriedades dos solos com a adição de cal e cinza volante .....	36
2.4.1.1 Os mecanismos da estabilização.....	36
2.4.1.2 Alterações das propriedades básicas.....	40
2.4.2 Variáveis determinantes do comportamento de misturas solo-cinza-cal.....	41
2.4.2.1 Efeito da Cal .....	41
2.4.2.2 Efeito da Cinza.....	42
2.4.2.3 Efeito da densidade e compactação .....	42
2.4.2.4 Efeito do tempo de cura .....	43

2.4.2.5 Efeito da relação vazios/cal .....	44
2.4.3 Comportamento mecânico de solos estabilizados com cal e cinza volante .....	51
2.4.3.1 Resistência Mecânica.....	53
2.4.3.2 Resistência à Tração .....	54
2.4.3.3 Resistência ao Cisalhamento .....	55
2.4.3.4 Resposta Tensão-Deformação .....	55
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>57</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	57
3.2 MÉTODOS .....	60
3.2.1 Coleta de amostras .....	60
3.2.2 Preparação das amostras .....	60
3.2.3 Ensaio de caracterização .....	61
3.2.4 Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova.....	61
3.2.5 Ensaio de Compressão Simples.....	64
3.2.6 Medidas de Sucção .....	65
3.3 MATERIAS .....	67
3.3.1 Solo .....	67
3.3.2 Cinza Volante .....	71
3.3.3 Cal.....	73
3.3.4 Água.....	74
3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES .....	74
3.4.1 Dosagem das misturas .....	74
3.4.1.1 Definição dos teores de cal .....	74
3.4.1.2 Definição da quantidade de cinza volante .....	75
3.4.2 Programa de Ensaio.....	76
3.4.3 Definição do Tempo de Cura.....	78
3.4.4 Método de Avaliação da Influência dos Fatores Controláveis .....	78
<b>4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>79</b>

4.1	ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES.....	79
4.1.1	Amostras com 0% de Cinza Volante .....	79
4.1.2	Amostras com 12,5% de Cinza Volante .....	82
4.1.3	Amostras com 25% de Cinza Volante .....	87
4.1.4	Modo de ruptura dos corpos-de-prova.....	93
4.2	MEDIDAS DE SUCCÃO MATRICIAL .....	93
4.2.1	Amostras com 0% de Cinza Volante .....	94
4.2.2	Amostras com 12,5% de Cinza Volante .....	97
4.2.3	Amostras com 25% de Cinza Volante .....	101
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	105
5.1	EFEITO DO TEOR DE CAL .....	105
5.2	EFEITO DA POROSIDADE.....	108
5.2.1	Amostras com 0% de Cinza Volante .....	109
5.2.2	Amostras com 12,5% de Cinza Volante .....	111
5.2.3	Amostras com 25% de Cinza Volante .....	114
5.3	RELAÇÃO VAZIOS/CAL.....	118
5.3.1	Amostras com 0% de Cinza Volante .....	118
5.3.2	Amostras com 12,5% de Cinza Volante .....	123
5.3.3	Amostras com 25% de Cinza Volante .....	133
5.4	EFEITO DO TEOR DE CINZA VOLANTE.....	144
5.5	EFEITO DO TEMPO DE CURA.....	147
5.6	RELAÇÕES ÚNICAS NO CONTROLE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO ESTUDADO .....	150
5.7	COMPARAÇÃO DA RELAÇÃO VAZIOS/CAL COM TRABALHOS ENCONTRADOS NA LITERATURA.....	152
5.8	ANÁLISE DA VARIÂNCIA.....	155
5.8.1	Análise para o Experimento Sem 0% de Cinza Volante .....	155
5.8.1.1	Tabela ANOVA .....	155
5.8.1.2	Comparação de Médias.....	156

5.8.1.3 Gráficos dos fatores significativos e das suas interações .....	164
5.8.2 Análise para o Experimento Com 90 dias de Cura.....	166
5.8.2.1 Tabela ANOVA .....	166
5.8.2.2 Comparação de Médias.....	167
5.8.1.3 Gráficos dos fatores significativos e das suas interações .....	172
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	174
6.1 CONCLUSÕES .....	174
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	177
REFERÊNCIAS .....	178

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal (adaptado de Inglês & Metcalf, 1972).....	43
Figura 2.2 – Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Larnach, 1960).....	45
Figura 2.3 – Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Foppa, 2005).....	46
Figura 2.4 – Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Cruz, 2006).....	46
Figura 2.5 – Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Bittencourt <i>et al</i> , 2006).....	47
Figura 2.6 – Previsão da tensão desvio através da relação vazios/cimento (Consoli <i>et al</i> , 2007).....	48
Figura 2.7 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 28 dias de cura (Lopes Junior, 2007).....	49
Figura 2.8 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 90 dias de cura (Lopes Junior, 2007).....	50
Figura 2.9 – Fator vazios/cimento expresso em termos da porosidade e do teor de cimento volumétrico para amostras com 7 dias de cura (Lopes Junior, 2007).....	50
Figura 2.10 – Fator vazios/agente cimentante expresso em termos da porosidade e teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 90, 60 e 28 dias de cura (Righetto, 2008).....	51
Figura 2.11 – Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (adaptado de Ingles & Metcalf, 1972).....	53
Figura 3.1 – Corpo-de-prova de solo-cinza-cal.....	63
Figura 3.2a – Ensaio de Compressão Simples.....	65
Figura 3.2b – Corpo-de-prova de solo-cinza-cal no ensaio de Compressão Simples.....	65
Figura 3.3a – Corpo-de-Prova para o ensaio de sucção matricial.....	67
Figura 3.3b – Corpo-de-Prova para o ensaio de sucção matricial.....	67
Figura 3.4 – Formações geológicas ao norte do estado do RS (adaptado de IBGE, 1986).....	68
Figura 3.5 – Talude onde foi retirada a amostra de solo.....	69
Figura 3.6 – Curva granulométrica da amostra de solo (Foppa, 2005).....	70
Figura 3.7 – Curvas de compactação do solo residual de arenito Botucatu (Foppa, 2005).....	71
Figura 3.8a – Usina Termelétrica de Charqueadas-RS.....	72
Figura 3.8b – Cinza volante da Usina Termelétrica de Charqueadas-RS.....	72
Figura 3.9 – Curva granulométrica da amostra de cinza volante.....	73
Figura 3.10a – Dosagem da cal pelo método do ICL para a mistura com 0% de cinza volante.....	75
Figura 3.10b – Dosagem da cal pelo método do ICL para a mistura com 25% de cinza volante.....	75
Figura 3.11 – Comparação entre as curvas granulométricas do solo natural e da cinza volante (com defloculante).....	76
Figura 3.12 – Programa de ensaios de compressão simples.....	77
Figura 4.1 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura.....	80
Figura 4.2 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura.....	81

Figura 4.3 – Relação entre vazios/cal e resistência à compressão simples ajustados das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	82
Figura 4.4 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	83
Figura 4.5 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	83
Figura 4.6 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	84
Figura 4.7 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	85
Figura 4.8 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	86
Figura 4.9 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	86
Figura 4.10 – Relação entre vazios/cal e resistência à compressão simples ajustados das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura.....	87
Figura 4.11 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	88
Figura 4.12 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	88
Figura 4.13 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	89
Figura 4.14 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	90
Figura 4.15 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	90
Figura 4.16 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	91
Figura 4.17 – Relação entre vazios/cal e resistência à compressão simples ajustados das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura.....	92
Figura 4.18a – Corpos-de-prova submetidos à compressão simples.....	93
Figura 4.18b – Plano de ruptura típico .....	93
Figura 4.19 – Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nas amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura.....	95
Figura 4.20 – Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	96
Figura 4.21 – Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nas amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura.....	100
Figura 4.22 – Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura.....	100
Figura 4.23 – Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nas amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura.....	103
Figura 4.24 – Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura.....	104
Figura 5.1 – Mecanismo de troca de cátions (Prusinski & Bhattacharja, 1999) .....	106
Figura 5.2 – Mecanismo de estabilização solo-cal (Ingles & Metcalf, 1972) .....	107
Figura 5.3 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	110
Figura 5.4 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	111



Figura 5.5 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias .....	112
Figura 5.6 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	112
Figura 5.7 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	115
Figura 5.8 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	115
Figura 5.9 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	116
Figura 5.10 – Relação vazios/cal para as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	119
Figura 5.11 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	119
Figura 5.12 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	120
Figura 5.13 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	121
Figura 5.14 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	122
Figura 5.15 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	122
Figura 5.16 – Relação vazios/cal para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	123
Figura 5.17 – Relação vazios/cal para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	124
Figura 5.18 – Relação vazios/cal para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	124
Figura 5.19 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	126
Figura 5.20 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	126
Figura 5.21 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	127
Figura 5.22 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	127
Figura 5.23 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	128
Figura 5.24 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	128
Figura 5.25 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	129
Figura 5.26 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	129
Figura 5.27 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	130

Figura 5.28 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura.....	130
Figura 5.29 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura.....	131
Figura 5.30 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura.....	131
Figura 5.31 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura.....	132
Figura 5.32 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura.....	132
Figura 5.33 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura.....	133
Figura 5.34 – Relação vazios/cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura.....	135
Figura 5.35 – Relação vazios/cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura.....	135
Figura 5.36 – Relação vazios/cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura.....	136
Figura 5.37 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura.....	136
Figura 5.38 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura.....	137
Figura 5.39 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura.....	137
Figura 5.40 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura.....	138
Figura 5.41 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura.....	138
Figura 5.42 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura.....	139
Figura 5.43 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura.....	139
Figura 5.44 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura.....	140
Figura 5.45 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura.....	140
Figura 5.46 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura.....	141
Figura 5.47 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura.....	141
Figura 5.48 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura.....	142
Figura 5.49 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura.....	142
Figura 5.50 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura.....	143

Figura 5.51 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	143
Figura 5.52 – Efeito da quantidade de cinza volante nas amostras com 12,5% e 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	144
Figura 5.53 – Efeito da quantidade de cinza volante nas amostras com 12,5% e 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	145
Figura 5.54 – Efeito da quantidade de cinza volante nas amostras com 0%, 12,5% e 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura.....	146
Figura 5.55 – Efeito do tempo de cura nas amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura .....	148
Figura 5.56 – Efeito do tempo de cura nas amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura .....	149
Figura 5.57 – Variação da resistência à compressão simples com a porosidade ( $\eta$ ), com o teor volumétrico de cal ( $C_{av}$ ) e com a quantidade de cinza volante (CV) para 28, 60 e 90 dias de cura .....	151
Figura 5.58 – Curvas granulométricas dos materiais em estudo e dos materiais para comparação.....	152
Figura 5.59 – Comparação dos resultados das relações $\eta/C_{av}$ (ajustados) para as amostras com 28 dias de cura .....	153
Figura 5.60 – Comparação dos resultados das relações $\eta/C_{av}$ (ajustados) para as amostras com 90 dias de cura .....	154
Figura 5.61 – Gráfico de interação AB x C (a), AC x B (b) e BC x A (c) para D=28, AB x C (d), AC x B (e) e BC x A (f) para D=60 e AB x C (g), AC x B (h) e BC x A (i) para D=90 para o experimento sem 0% de cinza volante.....	165
Figura 5.62 – Influência dos fatores significativos A (a), B (b), C (c) e D (d) .....	166
Figura 5.63 – Influência dos fatores significativos A (a), B (b) e C (c).....	172
Figura 5.64 – Gráfico de interação AB x C (a), AC x B (b) e BC x A (c) para o experimento com 90 dias de cura .....	172

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Faixa de validade para aplicação da metodologia proposta por Thomé <i>et al</i> (2005) .....	32
Tabela 2.2 – Composição média das cales brasileiras (Guimarães, 2002).....	34
Tabela 2.3 – Previsão da quantidade de cal em função do tipo de solo (adaptada de Ingles & Metcalf, 1972) .....	36
Tabela 3.1 – Etapas e Ensaio do Programa Experimental .....	59
Tabela 3.2 – Propriedades físico-químicas do solo residual de arenito Botucatu (Núñez, 1991) .....	69
Tabela 3.3 – Propriedades físicas da amostra de arenito Botucatu (Foppa, 2005).....	70
Tabela 3.4 – Propriedades físicas da amostra de cinza volante.....	73
Tabela 3.5 – Caracterização da cal utilizada .....	74
Tabela 3.6 – Pontos de moldagem.....	78
Tabela 4.1 – Dados gerais das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	95
Tabela 4.2 – Dados gerais das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	98
Tabela 4.3 – Dados gerais das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	99
Tabela 4.4 – Dados gerais das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	99
Tabela 4.5 – Dados gerais das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	101
Tabela 4.6 – Dados gerais das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	102
Tabela 4.7 – Dados gerais das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	102
Tabela 5.1 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	110
Tabela 5.2 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	113
Tabela 5.3 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	113
Tabela 5.4 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	114
Tabela 5.5 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura .....	117
Tabela 5.6 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura .....	117
Tabela 5.7 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura .....	118
Tabela 5.8 – Tabela ANOVA para o experimento sem 0% de cinza volante .....	156
Tabela 5.9 – Tabela de médias do experimento sem 0% de cinza volante.....	157
Tabela 5.10 – Comparação de médias do fator A para o experimento sem 0% de cinza volante .....	159
Tabela 5.11 –Comparação de médias do fator B para o experimento sem 0% de cinza volante .....	160

Tabela 5.11 (continuação) – Comparação de médias do fator B para o experimento sem 0% de cinza volante .....	161
Tabela 5.12 – Comparação de médias do fator C para o experimento sem 0% de cinza volante .....	162
Tabela 5.12 (continuação) – Comparação de médias do fator C para o experimento sem 0% de cinza volante .....	163
Tabela 5.13 – Comparação de médias do fator D para o experimento sem 0% de cinza volante .....	163
Tabela 5.13 (continuação) – Comparação de médias do fator D para o experimento sem 0% de cinza volante .....	164
Tabela 5.14 – Tabela ANOVA para o experimento com 90 dias de cura .....	167
Tabela 5.15 – Tabela de médias do experimento com 90 dias de cura .....	168
Tabela 5.16 – Comparação de médias do fator A para o experimento com 90 dias de cura..	169
Tabela 5.17 – Comparação de médias do fator B para o experimento com 90 dias de cura..	170
Tabela 5.18 – Comparação de médias do fator C para o experimento com 90 dias de cura..	171

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a: massa de água

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANOVA: Analysis of Variance

ASTM: American Society for Testing and Materials

$c_a$ : massa de cal

Ca: teor de cal calculado em relação à massa de solo e cinza volante secos e expresso em porcentagem

$C_{av}$ : teor de volumétrico de cal, expresso em porcentagem do volume total

$C_u$ : coeficiente de uniformidade

$c_v$ : massa de cinza volante

Cv: teor de cinza volante em relação à massa de solo e cinza volante secos e expresso em porcentagem

CV: Cinza Volante

$D_{10}$ : diâmetro efetivo

$e$ : base do logaritmo neperiano (2,7183)

$e$ : índice de vazios

ENVIRONGEO: Laboratório de Resíduos, Novos Materiais e Geotecnia Ambiental

GLD: Graus de Liberdade

LC: limite de contração

LEGG: Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

LL: limite de liquidez

LMS: Laboratório de Mecânica dos Solos

LP: limite de plasticidade

MQ: Média Quadrada

NBR: Norma Brasileira

PCA: Portland Cement Association

$q_u$ : resistência à compressão simples

S : grau de saturação de moldagem.

Sig: Significância

$S_f$  : grau de saturação após a imersão do corpo-de-prova por 24 horas.

SQ: Soma Quadrada

TRB: Transportation Research Board

TC : Tempo de cura

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USACE: United States Army Corps of Engineers

USBR: United States Bureau of Reclamation

$V_{ca}$ : volume de cal

$V_v$ : volume de vazios (igual ao volume de água mais o volume de ar)

w: teor de umidade do papel filtro

$\gamma_d$ : massa específica aparente seca

$\eta$ : porosidade

$\omega$ : teor de umidade

$\omega_f$  : teor de umidade após a imersão do corpo-de-prova por 24 horas.





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Na engenharia geotécnica o principal material utilizado, o solo, é um material complexo e muito variável, sendo que nem sempre satisfaz as necessidades da obra a ser realizada.

Na pavimentação, por exemplo, alguns solos necessitam de bases granulares para o pavimento ser realizado, o que gera um alto custo quando a jazida está localizada longe da obra, além de causar degradação ambiental pela exploração da jazida e pelo próprio transporte do material. Outro exemplo são os solos que necessitam fundações profundas, cujo custo se torna inviável dependendo do porte da obra.

Nestes casos, onde é preciso se adequar às condições locais da obra a ser realizada, uma alternativa é o melhoramento destes solos através de técnicas de estabilização com a utilização de cal ou cimento.

Com a constante busca de soluções que proporcionem custo reduzido e preservação dos recursos naturais, o aproveitamento de resíduos vem se destacando, resultando em uma redução importante no impacto ambiental que seria gerado pela sua disposição inadequada.

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com objetivo de aproveitar resíduos na estabilização de solos, através da substituição de parte dos materiais de alto custo neste processo, por estes resíduos que apresentam um custo reduzido, como é o caso da utilização do resíduo cinza volante em misturas solo-cinza-cal.

A cal é o estabilizante mais econômico e mais utilizado na estabilização de solos, com aplicação em pavimentações e aterros, sendo utilizado desde a antiguidade. O estudo da aplicação da cal no melhoramento de solos, para pavimentação e fundações superficiais, têm sido realizado em diversas pesquisas, demonstrando sua eficiência no aumento da capacidade de suporte e na redução de recalques.

A cinza volante é um resíduo industrial que provém da queima do carvão mineral em termelétricas, possuindo grande interesse no seu aproveitamento, por ser produzido em grande quantidade, possuir propriedades pozolânicas e em alguns casos sua destinação final ser um problema ambiental.

Assim, o desenvolvimento de alternativas de utilização de resíduos industriais é de grande vantagem técnica, econômica e ambiental, sendo que estudos da combinação da cinza volante com a cal também têm sido realizados, comprovando a eficiência destas misturas solo-cinza-cal para a estabilização de solos.

Contudo, com todos os estudos realizados comprovando a eficiência de misturas solo-cinza-cal na estabilização de solos, ainda não existem metodologias de dosagem deste tipo de mistura em critérios mais racionais como existe para o concreto convencional, como a relação água/cimento que desempenha papel importante na obtenção da resistência desejada.

Assim, esta pesquisa busca fornecer subsídios para que, através de relações de dosagem, desenvolvidas a partir da identificação e quantificação das variáveis mais importantes no controle da resistência de solos estabilizados com cal e cinza volante, se possa atingir de forma objetiva e com maior confiabilidade as propriedades requeridas nas misturas solo-cinza-cal.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é quantificar a influência da quantidade de cal, da quantidade de cinza volante, da porosidade e do tempo de cura sobre a resistência de um solo estabilizado com cal e cinza volante, verificando a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa da resistência à compressão simples deste solo.

Para atingir o objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Quantificar a influência isolada de cada uma das variáveis de interesse: quantidade de cal, quantidade de cinza volante, porosidade da mistura

compactada e tempo de cura sobre a resistência à compressão simples do solo estudado.

- Verificar o desempenho das misturas com adição de cinza volante em relação às misturas sem adição de cinza volante.
- Verificar se as variáveis de interesse (quantidade de cal, quantidade de cinza volante, porosidade da mistura compactada e tempo de cura) e suas interações são estaticamente significativas.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em seis capítulos. O capítulo 1 constitui-se de uma introdução, onde são apresentados o problema e a relevância da pesquisa e são definidos os objetivos gerais e específicos a serem atingidos.

No capítulo 2 é feita uma revisão da literatura acerca de aspectos relevantes do tema abordado, proporcionando ao leitor uma visão geral sobre a técnica de solos artificialmente cimentados. Assim, os principais aspectos abordados são a aplicação de solos tratados com cal, bem como os materiais utilizados e as características comportamentais típicas de misturas solo-cinza-cal. São abordados também, os fatores que exercem influência sobre as características de solos artificialmente cimentados que estão fortemente embasados nas pesquisas realizadas por Foppa (2005) e Lopes Junior (2007), em termos de variáveis determinantes e comportamento mecânico.

O capítulo 3 apresenta a descrição do programa experimental utilizado no desenvolvimento da pesquisa, especificando as variáveis de interesse, os métodos e materiais utilizados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos na etapa experimental e uma breve análise acerca dos mesmos.

O capítulo 5 apresenta uma discussão detalhada dos resultados, levando em conta outros resultados encontrados na literatura.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 APROVEITAMENTO E UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NA ENGENHARIA GEOTÉCNICA**

O aproveitamento de materiais residuais constitui-se, ultimamente, numa área de estudo em expansão, em diversos lugares do mundo, principalmente devido às perspectivas de racionalização e conformidade ambiental que o tema envolve.

A técnica de estabilização de solos proporciona o melhoramento de um material já existente, e assim, em geotecnia, é muito difícil falar do aproveitamento de determinado produto, residual ou não, sem falar em estabilização de solos.

Materiais com acentuadas características pozolânicas estão, seguramente, entre aqueles mais utilizados para promover mecanismos de melhora e otimização de desempenho de solos, qualquer que seja sua aplicação (construção de barragens, obras rodoviárias, elementos de fundações, etc.).

Um exemplo da amplidão e histórico do uso de cinzas é apresentado por Ceratti (1979) onde pode-se destacar o emprego de solo vulcânico para tornar mais resistentes à água as argamassas de cal destinadas ao revestimento de cisternas, na ilha de Santorin, já no século VII a.C. Ainda segundo este autor, pode-se observar que 1936 é a data considerada como marco para a utilização de cinzas volantes provenientes de termoelétricas como agente cimentante no concreto, nos EUA.

Segundo Mallmann (1996), passou a haver uma maior preocupação com o estudo dos efeitos das cinzas sobre o meio ambiente, devido ao seu elevado grau de toxicidade, a partir da crescente produção destes resíduos nos países que utilizam a queima de carvão como energia.

Estudos que buscam compreender a influência da cinza volante como agente estabilizante de solos são apresentados em trabalhos como os de Nardi, 1975; Ceratti, 1979; Da Silva, 1982;

Zwonok & Chies, 1989; Mallmann, 1996; Fogaça & Cerratti, 1995 e Carraro, 1997, destacando, principalmente, o emprego dos materiais estabilizados em aplicações como bases para pavimentos ou na produção de blocos destinados à utilização em construção civil.

A influência da adição de cinzas de cascas de arroz na resistência à compressão simples de um solo argiloso muito mole, tratado com cal hidratada, idêntico ao estudado por Thomé (1994), foi analisada por Bottin Filho *et al* (1995). Estes autores observaram que a quantidade de cal necessária para o desenvolvimento de reações pozolânicas é reduzida em função da porcentagem de cinza de casca de arroz adicionada à mistura.

Cinzas oriundas da queima de resíduos de estações de tratamento de água também constituem-se numa importante fonte de materiais potencialmente utilizáveis em processos de estabilização físico-química. Curtil *et al* (1996) estudaram a viabilidade de uso deste material na indústria da construção e em obras públicas, especialmente na construção de aterros e rodovias. A cinza estudada apresentava características físicas comparáveis às das areias finas, mas o elevado teor de umidade do material *in natura*, entretanto, exigiria uma drenagem inicial em depósitos temporários, antes de sua aplicação.

Cinzas provenientes da incineração de resíduos sólidos municipais também têm sido estudadas para usos como agentes estabilizantes de solos e em camadas de cobertura de rejeitos (Lee *et al*, 1996). Misturas contendo esse material têm-se constituído em alternativas tecnicamente viáveis para essas aplicações uma vez que suas características físicas e químicas são bastante semelhantes as das cinzas volantes.

No Havaí, EUA, por exemplo, a incineração de resíduos sólidos tem sido realizada com propósitos de geração de energia, inclusive. De maneira geral, entretanto, esse procedimento visa, principalmente, reduzir o volume total dos resíduos sólidos municipais, antes de sua disposição nos aterros de rejeitos, aumentando dessa forma a capacidade de utilização destes últimos.

Pneus usados, que não servem mais à aplicações automobilísticas, têm sido empregados, concomitantemente com solos, em geotecnia, na execução de diques, estruturas de contenção, sub-leitos de rodovias, entre outras aplicações (Long, 1996). A flexibilidade das estruturas construídas segundo esta tecnologia pode ser destacada como uma de suas maiores vantagens, permitindo-lhes suportar grandes recalques diferenciais.

Resíduos semi-sólidos, oriundos de estações de tratamento de águas provenientes de processos industriais, também conhecidos como lodo ou lama, têm sido utilizados em camadas de cobertura de aterros de rejeitos, em substituição aos materiais argilosos tradicionalmente usados. Principalmente, em locais onde depósitos de argila não encontram-se facilmente disponíveis, o custo do aterro pode ser significativamente acrescido, justificando o aproveitamento deste material residual.

Resíduos oriundos de materiais plásticos formam outro importante grupo de produtos potencialmente utilizáveis em geotecnologia ambiental. Esses resíduos são frequentemente classificados como materiais inadequados à incineração porque têm alta capacidade calorífica, liberada intensamente durante sua queima, a qual origina, também de maneira indesejada, a formação de gases tóxicos (Omine *et al*, 1996).

Cal de origem residual também pode constituir-se num material adequado ao uso em estabilização de solos. Entretanto, embora muitas cales de natureza residual possam ser bastante similares à cal virgem, em termos de composição química, outras propriedades importantes podem ser consideravelmente diferentes. Cales hidratadas, por exemplo, devido ao seu processamento na fábrica, são mais finamente divididas e apresentam maior superfície específica que a cal de carbureto (*e.g.* TRB, 1976; Minnick 1967).

Andrieux & Colombel *apud* Curtil *et al* 1996, comentam que cinzas oriundas da queima de resíduos de estações de tratamento de água podem ser usadas como agente cimentante na execução de camadas de fundações, da mesma forma que a cinza volante já tem sido empregada nesse tipo de aplicação.

Segundo Núñez (2007), na década de 60 já se usavam cinzas volantes estabilizadas nos Estados Unidos, Inglaterra, França, Alemanha, na antiga URSS, na Polônia e nas antigas Tchecoslováquia e Iugoslávia. Na Europa as cinzas foram empregadas na constituição de blocos para a construção. Os blocos são obtidos por prensagem de cinza úmida seguida de queima a temperatura mais alta que aquela que originou a cinza, o que ocasiona a cristalização dos resíduos finais.

No Brasil, o primeiro registro da utilização da cinza volante remonta a 1964, quando ela foi incorporada ao concreto, na construção da hidrelétrica de Jupuí para diminuir o calor de hidratação do concreto (substituindo parcialmente o cimento). Desde então as cinzas volantes

têm sido empregadas pela indústria de cimento, em obras rodoviárias (trechos experimentais), na fabricação de pré-moldados, na constituição de argamassas pozolânicas, etc.

## 2.2 VISÃO GERAL SOBRE A TÉCNICA DO SOLO-CAL

O uso da cal como aditivo no tratamento de solos é o mais antigo método de estabilização química conhecida, utilizada nas mais variadas aplicações, como a Via Apia, construída pelos Romanos. 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 (USBR, 1998).

A adição de cal ao solo tem sido denominada de maneiras diferentes conforme o autor, sendo que termos como solo estabilizado, solo melhorado, solo modificado e solo tratado, são comumente utilizados. De maneira geral o critério para a adoção de uma ou outra denominação é o grau de alteração das propriedades do solo natural em função da quantidade de agente cimentante aplicado. Entretanto os processos são conceitualmente os mesmos, ou seja, a introdução e mistura de cal ao solo para obtenção de propriedades como resistência ou deformabilidade adequadas a um determinado uso de engenharia. Nesta revisão da literatura não será feita distinção entre os termos, sendo mantido o termo utilizado pelo autor citado.

Utiliza-se solo-cal quando não se dispõem de um material ou combinação de materiais com as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade adequadas ao projeto. A estabilização com cal é comumente empregada na construção de estradas, sendo geralmente utilizado como base ou sub-base de pavimentos (Inglês & Metcalf, 1972). Outra importante aplicação do solo-cal tem sido na proteção de taludes contra a erosão em obras hidráulicas.

A técnica de melhoramento do solo também pode ser utilizada nas fundações de edificações de pequeno porte, em solos com baixa capacidade de suporte ou que apresentam baixa estabilidade volumétrica. Tais condições são problemáticas na medida em que podem causar severas patologias na edificação (Inglês & Metcalf, 1972).

A solução tradicionalmente utilizada para suportar as cargas das construções nestes locais é o uso de fundações profundas. Estas atravessam o material menos resistente e são assentes em camadas mais profundas de maior capacidade de suporte. No entanto, este tipo de solução técnica pode inviabilizar, por exemplo, obras de conjuntos habitacionais de baixo custo, nos

quais o investimento em fundações pode vir a ser uma grande parcela do valor total do empreendimento (Thomé *et al*, 2005).

Estudos realizados nos últimos anos no sul do Brasil têm demonstrado que a utilização de fundações apoiadas em sistemas de dupla camada, sendo a superior constituída de solos cimentados compactados, é uma técnica alternativa que pode ser utilizada nos casos em que existam camadas de solos de baixa resistência e o nível de carga das edificações seja baixo (Thomé *et al*, 2005).

Thomé *et al* (2005), a partir de uma série de resultados de ensaios de placa sobre sistemas de dupla camada, sendo a superior cimentada, e simulações numéricas através do Método dos Elementos Finitos, apresentam um método semi-empírico de dimensionamento de fundações superficiais apoiadas sobre uma camada de solo resistente, a qual se encontra assente sobre uma camada de baixa resistência.

As principais conclusões apresentadas por Thomé *et al* (2005) são:

I - É possível utilizar um modelo simples para representar o comportamento de solos cimentados e não-cimentados, como o modelo elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Drucker-Prager em conjunto com o Método dos Elementos Finitos, para prever o comportamento de fundações superficiais apoiadas em um sistema de dupla camada;

II - Dos parâmetros dos materiais, o módulo de elasticidade e o ângulo de atrito da camada cimentada não influenciam significativamente o valor de capacidade de carga referente a 2% de recalque relativo (sendo o recalque relativo igual ao recalque observado dividido pelo diâmetro da placa);

III - Os parâmetros dos materiais que mais influenciam a capacidade de carga em um sistema de dupla camada, sendo a superior cimentada, em ordem e importância são: coesão da camada cimentada, coesão, módulo de elasticidade e ângulo de atrito interno da camada não-cimentada;

IV - A resposta tensão *versus* recalque relativo será única para uma mesma relação H/D, onde H é a espessura da camada cimentada e D é o diâmetro da fundação. Quanto maior esta relação, mais rígida e mais resistente será a resposta carga *versus* recalque. O recalque relativo em que ocorre a ruptura física de fundações sobre dupla camada, também é função da relação H/D;



V - É possível suprimir as influências das variáveis geométricas diâmetro da fundação (D) e espessura da camada cimentada (H), desde que se normalize os resultados de carga aplicada pela carga obtida ao nível de recalque de 2% do tamanho da fundação (D/50).

Portanto a partir de um ensaio de placa de pequeno diâmetro sobre um sistema de dupla camada, além do valor da capacidade de carga a 2% de recalque relativo, é possível reproduzir a curva carga *versus* recalque de fundações de maiores dimensões. De acordo com os autores, os valores da capacidade de carga a 2% de recalque relativo de fundações superficiais apoiadas em sistema de dupla camada, sendo a superior cimentada, podem ser obtidos através das equações (2.1), (2.2) e (2.3) abaixo:

$$\text{Para } H/D = 1,00: \frac{q_{u2\%}}{Pa} = 2,10 \cdot e^{0,3235F} \quad (2.1)$$

$$\text{Para } H/D = 0,50: \frac{q_{u2\%}}{Pa} = 1,31 \cdot e^{0,3365F} \quad (2.2)$$

$$\text{Para } H/D = 0,25: \frac{q_{u2\%}}{Pa} = 0,84 \cdot e^{0,3328F} \quad (2.3)$$

Onde:  $q_{u2\%}$ : tensão de ruptura a 2% de recalque relativo.

$$F: \text{fator de parâmetros } F = \ln\left(\frac{c_1}{Pa}\right) + \ln\left(\frac{c_2}{Pa}\right) + \frac{1}{\cos^4 \phi'_2} + \ln\left(\frac{E_2}{Pa}\right)$$

$Pa$ : pressão atmosférica.

$c_1$ : coesão da camada cimentada.

$c_2$ : coesão da camada não-cimentada.

$\phi'_2$ : ângulo de atrito interno da camada não-cimentada.

$E_2$ : módulo de elasticidade da camada não-cimentada.

Como esta formulação foi obtida a partir de dados experimentais, é necessário explicitar a sua faixa de validade. Na Tabela 2.1 é apresentada a faixa de variação dos parâmetros para os quais a metodologia é aplicável.

Tabela 2.1 – Faixa de validade para aplicação da metodologia proposta por Thomé *et al* (2005)

Material Cimentado	Material Não-Cimentado
$0,19 \leq c'_1/\text{Pa} \leq 4,44$	$0,01 \leq c'_2/\text{Pa} \leq 0,50$
$0,70 \leq \text{tg}\phi'_1 \leq 1,19$	$0,26 \leq \text{tg}\phi'_2 \leq 0,70$
$2.961,0 \leq E_1/\text{Pa} \leq 14.810,0$	$98,0 \leq E_2/\text{Pa} \leq 988,0$
$2.961,0 \leq E_1/\text{Pa} \leq 14.810,0$	$98,0 \leq E_2/\text{Pa} \leq 988,0$

Além das aplicações destacadas anteriormente, outras utilizações para solo-cal também são relatadas na literatura como, por exemplo, para execução de fundações profundas, na construção de caminhos de serviço, para reforço em aterros, para contenção em escavações (injeção de lama de cal sob pressão ou *grouting*), na confecção de blocos para alvenaria ou ainda no fechamento de trincheiras abertas para passagem de canalizações (Ingles & Metcalf, 1972; Guimarães, 2002).

## 2.3 MATERIAIS UTILIZADOS EM MISTURAS SOLO-CINZA-CAL

### 2.3.1 Solo

A cal tem pouco efeito em solos altamente orgânicos e também em solos com pouca ou nenhuma quantidade de argila. Sendo mais eficiente em solos argilosos, podendo ser mais efetivo que o cimento em pedregulhos argilosos (Ingles & Metcalf, 1972).

Para verificar qual aditivo mais indicado a ser utilizado na estabilização de solos deve-se levar em consideração a granulometria do solo e a plasticidade. Solos com média a alta plasticidade são mais reativos a cal, a qual aumenta a trabalhabilidade, diminui a expansão volumétrica e aumenta a resistência (USACE, 1994).

Thompson (1966) denominou de reativos aqueles solos que ao reagirem com a cal sofrem substancial ganho de resistência, qual seja,  $345 \text{ kN/m}^2$ , após 28 dias de cura à temperatura de

22,8 °C. Solos que apresentam limitada reatividade pozolânica (ganhos de resistência inferiores a 345 kN/m<sup>2</sup>) são denominados de não-reativos.

Argilas expansivas apresentam uma resposta mais rápida à adição de cal. Bell (1996) constatou um rápido aumento inicial na resistência à compressão simples de um solo contendo montmorilonita, com pequenos teores de cal (2% a 3%). Além disso, para este solo, 4% de cal foi suficiente para atingir a resistência máxima, enquanto que para um solo rico em caulinita, a resistência máxima foi atingida com teores entre 4 e 6%. Entretanto, o nível de resistência alcançado pela mistura solo caulinítico mais cal foi sensivelmente superior ao da outra.

Ormsby e Kinter (1973) constataram para um solo contendo como principal argilo-mineral a caulinita, que a mistura com cal cálcica apresentou maior resistência à compressão simples que a mistura com cal dolomítica. Quando o principal argilo-mineral presente era a montmorilonita, a cal dolomítica apresentou desempenho um pouco superior. Segundo Bhattacharja *et al* (2003), independentemente da fonte de cálcio utilizada, é necessário que uma quantidade equivalente de cálcio seja disponibilizada para as reações pozolânicas. Na cal dolomítica a presença de magnésio reduz a disponibilidade de cálcio por peso unitário, o que poderia ser compensado pela dosagem de um maior teor de cal.

### 2.3.2 Cinza Volante

Segundo Núñez (2007), a cinza volante (*fly ash*) é uma pozolana artificial, produzida geralmente em termelétricas que queimam carvão mineral ou matéria orgânica. Pozolana é definida pela ASTM (American Society for Testing and Materials) como um material silicoso ou sílico-aluminoso, que por si só possui pouca ou nenhuma capacidade de cimentação, porém em forma finamente dividida e na presença de umidade reage quimicamente com hidróxidos alcalinos e alcalinos terrosos à temperatura ambiente para formar ou ajudar a formação de compostos possuindo propriedades cimentantes. A compreensão das reações é difícil, mas se sabe que a cinza volante desenvolve reações pozolânicas e que sua mistura com cal tem as mesmas características de solo-cal.

Em princípio solos arenosos, com escassez de argila coloidal, não reagem satisfatoriamente à cal. Para a estabilização desses solos, quando o consumo de cimento é muito elevado (economicamente inviável) ou quando a correção da granulometria não é possível (por falta de outros materiais), a adição de cinza volante pode torná-los reativos à cal. A função da cinza

volante é, então, substituir a fração fina (argila) do solo, uma vez que pode reagir com a cal, embora o tamanho da cinza seja diferente do da argila.

### 2.3.3 Cal

#### 2.3.3.1 Propriedades da Cal

Conforme Guimarães (2002), a cal utilizada na estabilização ou melhoria dos solos é produto resultante da calcinação, em temperaturas próximas de 1000°C, de rochas carbonatadas cálcicas e magnesianas existentes na superfície terrestre. Na forma hidratada deve obedecer às determinações da Norma Brasileira NBR 7175.

Na Tabela 2.2 são apresentadas as propriedades com valores médios das cales comercializadas no mercado brasileiro segundo Guimarães (2002).

Tabela 2.2 – Composição média das cales brasileiras (Guimarães, 2002)

Tipo de Cal	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Perda ao Fogo (%)	CO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO + MgO Base de Não-Volátil (%)	MgO Não Hidratado (%)
Cal Virgem Cálcica	90–98	0,1–0,8	0,5–3,5	0,2–1,0	0,5–5,0	0,2–3,8	0,1–0,6	96,0–98,5	–
Cal Hidratada Cálcica	70–74	0,1–1,4	0,5–2,5	0,2–0,8	23–27	1,5–3,5	0,1–0,0		0,5–1,8
Cal Hidratada Dolomítica ou Magnésiana	39–61	15–30	0,5–18,2	0,2–1,5	19–27	3,0–6,0	0,02–0,2	76–99	5 – 25
Cal Virgem Dolomítica Ou Magnésiana	51–61	30–37	0,5–4,5	0,2–1,0	0,5–4,8	0,5–4,5	0,05–0,1		–

#### 2.3.3.2 Dosagem da Cal

A dosagem visa selecionar a quantidade de cal a ser adicionada ao solo que fornecerá a resistência e a durabilidade adequadas ao uso que o material se destina. O procedimento de dosagem é feito através de baterias de testes de laboratório (Ingles & Metcalf, 1972).

Entre os métodos de dosagem de misturas solo-cal mais utilizados destacam-se:

I – Método do pH (Eades & Grim, 1966) – consiste na determinação do teor mínimo de cal que produza um aumento no valor de pH para 12,4.

II – Método do ICL (Initial Consumption of Lime) – proposto por Rogers *et al* (1997), é uma variação do método do pH, onde o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor constante (máximo);

III – Método do Lime Fixation Point (Hilt & Davidson, 1960) – baseado no limite de plasticidade, que determina o teor de cal máximo que proporciona melhoria na trabalhabilidade, sem ganhos significativos de resistência;

IV – Método de Thompson (1966) – que define como reativo um solo que apresente um aumento de resistência à compressão simples de pelo menos 345 kPa quando estabilizado com cal.

O método do pH apresenta algumas limitações para utilização em solos tropicais e subtropicais. Segundo relato do TRB (1987), estudos de Harty (1970) demonstraram que a porcentagem de cal obtida pelo método do pH, não produz a máxima resistência à compressão nos solos tropicais e subtropicais. Conforme o autor, o método não assegura se a reação do solo com a cal produzirá um substancial aumento de resistência, devendo ser utilizado apenas como referência.

Núñez (1991) ao estudar um solo saprolítico de arenito, observou a impropriedade do método do pH para o solo em questão. Thomé (1994), ao tratar com cal um solo caracterizado como Gley Húmico verificou que o método Eades & Grim (1966) não se apresentou adequado a determinação do teor ótimo de cal, o valor adotado pelo método (9%) simplesmente melhorou as características do material, não cimentando as partículas como esperado.

Segundo Bhattacharja *et al* (2003), os métodos de dosagem existentes geralmente consideram a resistência como um critério secundário e não levam em consideração a durabilidade.

A título de ilustração, a Tabela 2.3 adaptada de Inglês & Metcalf (1972), apresenta um indicativo da quantidade de cal a ser adicionada para a estabilização de acordo com o tipo de solo.

Tabela 2.3 – Previsão da quantidade de cal em função do tipo de solo (adaptada de Ingles & Metcalf, 1972)

Tipo de Solo	Teor de Cal para Modificação	Teor de Cal para Estabilização
Pedra finamente britada	2 a 4	Não recomendado
Pedregulho argiloso bem graduado	1 a 3	≥ 3
Areias	Não recomendado	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado	≥ 5
Argila siltosa	1 a 3	2 a 4
Argilas	1 a 3	3 a 8
Solos orgânicos	Não recomendado	Não recomendado

### 2.3.4 Água

A água potável é considerada satisfatória para utilização em misturas de solo-cal. Em geral, a quantidade de água a ser adicionada é determinada pela quantidade requerida para a compactação, tomando-se cuidado em misturas com cal virgem, as quais podem requerer maiores teores de água devido ao rápido processo de hidratação (Ingles & Metcalf, 1972).

## 2.4 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE MISTURAS SOLO-CINZA-CAL

### 2.4.1 Alterações das propriedades dos solos com a adição de cal e cinza volante

As reações que ocorrem em sistemas constituídos de materiais como solo, cinza volante, cal e água são relativamente complexas. Segundo Mateos (1961) uma idéia geral do fenômeno físico-químico envolvido é que quando cal e cinza volante são misturadas ao solo, parte desta cal combina-se com as partículas do solo e uma segunda parte, com o dióxido de carbono presente nas fases ar e água do solo, e a parcela remanescente, combina-se com a cinza volante, em uma reação de natureza pozolânica. Cada um destes mecanismos é, a seguir, suscintamente caracterizado.

#### 2.4.1.1 Os mecanismos da estabilização

Na presença de água, a cal hidratada constitui-se numa fonte de íons livres  $\text{Ca}^{+2}$  e/ou  $\text{Mg}^{+2}$ , dependendo da natureza das matérias-primas empregadas no seu processo de produção,

devido ao fenômeno conhecido como hidrólise. Dessa forma, a molécula de hidróxido de cálcio, por exemplo, no caso de cales destituídas de magnésio (cal hidratada comercial calcítica e cal de carbureto) decompõe-se segundo a seguinte reação:



O processo de adsorção dos cátions mais comuns associados com solos tende a seguir uma ordem preferencial. Assim, cátions monovalentes são usualmente substituídos pelos multivalentes. A adição de quantidades suficientes de cal cria uma concentração de  $Ca^{+2}$  livre capaz de trocar ou substituir permanentemente outros íons metálicos ( $Na^+$ ,  $K^+$ , por exemplo), adsorvidos sobre a superfície coloidal, por esse elemento (TRB, 1987). Esse fenômeno é conhecido como troca catiônica.

Herrin & Mitchell (1961), acrescentam que, como a ligação das partículas de argila depende da carga e tamanho dos íons na sua superfície, a predominância dos íons cálcio bivalentes, substituindo íons monovalentes, atrai as partículas, entre si, mais intimamente. A floculação e aglomeração das partículas de argila ocorre, portanto, em consequência deste comportamento, formando agregados de maiores dimensões.

A cal, na presença de água, também pode reagir com a sílica e alumina presentes no solo formando vários compostos cimentantes. Em solos típicos, possíveis fontes de sílica e alumina podem incluir os argilo-minerais, quartzo, feldspatos, micas e minerais silicosos ou alumino-silicosos apresentando estrutura amorfa ou cristalina (TRB, 1987). Essas reações podem ser, de maneira bastante simplificada, apresentadas conforme as expressões descritas a seguir:



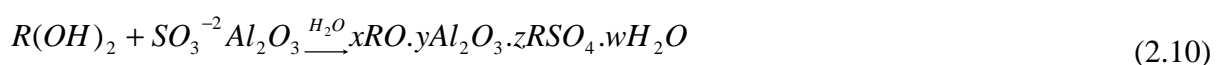
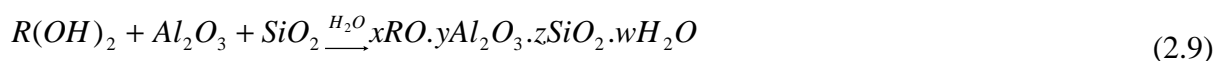
onde  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$  representam, respectivamente, as componentes de sílica e alumina presentes no solo e CSH e CAH, os produtos cimentantes formados, geralmente denominados de Silicato Hidratado de Cálcio e Aluminato Hidratado de Cálcio, respectivamente. As letras empregadas nas siglas CSH e CAH são abreviações dos elementos químicos encontrados nos produtos formados conforme a convenção: C = CaO; S =  $SiO_2$ ; A =  $Al_2O_3$ ; e H =  $H_2O$ .

Diversas propriedades dos solos naturais afetam as reações pozolânicas (solo-cal). Em alguns solos, estas reações são inibidas e não se observa grande produção de agentes cimentantes. Algumas das propriedades e características mais importantes de um solo que influenciam sua capacidade de reagir com a cal, formando materiais cimentantes, são: pH; teor carbono orgânico; presença de excessivas quantidades de sódio trocável ( $\text{Na}^+$ ); drenagem natural; mineralogia da argila; grau de intemperização; presença de carbonatos, sulfatos, ou ambos; quantidade de ferro extraível; relação sílica-sesquióxido e relação sílica-alumina (TRB, 1987).

De maneira similar, a cal pode reagir com o material pozolânico abundantemente encontrado nas cinzas volantes, uma vez que, de fato, estes materiais são fundamentalmente constituídos por partículas de sílica e alumina.

A idéia da adição de cinza volante à solos que não seriam originalmente adequados à estabilização com cal foi primeiramente abordada por Herrin & Mitchell (1961). Segundo estes autores, quando a quantidade desejada de pozolana não estiver presente no solo, a adição de materiais pozolânicos, tais como a cinza volante, auxiliarão muitas vezes a produzir os níveis de reação desejados com a cal. Diversos autores brasileiros têm desenvolvido trabalhos relacionados à adição de cinza volante à solos que se enquadram nesta característica de inadequabilidade à estabilização com cal (*e.g.* Nardi, 1975; Ceratti, 1979; Fogaça & Ceratti, 1995; Carraro, 1997).

Alguns dos possíveis compostos oriundos das reações entre a cal e os componentes de natureza pozolânica das cinzas volantes são apresentados por Minnick (1967), conforme as expressões abaixo:



onde R representa, alternativamente, os íons  $\text{Ca}^{+2}$  ou  $\text{Mg}^{+2}$ , ou, ainda, uma possível combinação entre eles.



Baseado em seus próprios estudos, bem como em outros trabalhos documentados na literatura, Minnick (1967) sugere que os principais compostos cimentantes formados em misturas contendo cal e cinza volante são, provavelmente, um membro da família da tobermorita (silicato de cálcio hidratado) e, possivelmente, etringita (sulfato de cálcio e alumínio hidratado).

Em adição às reações acima apresentadas, é sugerido também que compostos de cálcio e magnésio podem reagir particularmente com o óxido de ferro, se este composto estiver presente na fase vítrea da cinza volante. Além destes produtos, sulfo-aluminatos com baixos teores de sulfato podem também ser formados, entre outros compostos.

Roy & Johnson *apud* Mallmann (1996), enumeram os principais grupos de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados possivelmente formados na reação química entre a cinza volante e a cal hidratada. Entre estes compostos, pode-se destacar a presença de produtos como a tobermorita, gyrolita, xonotlita, wallastonita e hidrogarnete.

Blanks & Kennedy e Davis *apud* Mateos (1961), acrescentam que, uma vez que a maioria das pozolanas contém certas quantidades de outros materiais, além de sílica, outros compostos envolvendo ferro, alumina e alguns álcalis provavelmente também são possíveis de serem formados.

Alguns autores concordam que os materiais vítreos amorfos encontrados na cinza volante são os constituintes que efetivamente reagem para formar complexas formas de silicatos e aluminatos hidratados de cálcio (*e.g.* Minnick, 1967; ABCP, 1992; Mateos, 1961).

Outros compostos, como a mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) por exemplo, são também responsabilizados pelas desejáveis características pozolânicas apresentadas pelas cinzas volantes (*e.g.* TRB, 1987; Nontananandh & Kamon, 1996).

Finalmente, a cal também pode reagir com o dióxido de carbono existente nas fases ar e água destas misturas. Esta reação é conhecida como carbonatação e produz um carbonato relativamente insolúvel (TRB, 1987). Em outras palavras, pode-se dizer que esse mecanismo é inverso àquele verificado nos processos de produção das cales hidratadas comerciais.

Diversos são os fatores que influenciam o desenvolvimento das reações de natureza pozolânica entre as misturas contendo solo, cal e cinza volante. Esquemáticamente, estes fatores podem ser sub-divididos em dois grupos. O primeiro, relacionado aos materiais

empregados, compreende aspectos como: propriedades físicas, químicas e físico-químicas; quantidade de aditivos em relação ao total da mistura e relação cal/cinza volante. O segundo, diz respeito aos processos utilizados, dentre os quais pode-se destacar, em relação à mistura: o modo de execução, o tempo decorrido até a compactação e o teor de umidade adotado. Em relação à compactação, o método, a energia e os parâmetros empregados na execução. E, em relação às condições de cura, o tempo, a temperatura e umidade relativa (Cru *et al*, 1955).

Mallmann (1996) observou que o aumento da energia de moldagem resulta em um acréscimo de resistência de misturas solo-cinza-cal. Segundo este autor, grande parte deste aumento ocorreu devido, provavelmente, a um maior número de reações pozolânicas que se desenvolveram com a aproximação das partículas devido ao aumento da energia. Estudos realizados por análise de variância mostraram que o tempo de cura é o principal fator influenciando a resistência à compressão simples de corpos-de-prova curados à temperatura ambiente ( $\pm 21^{\circ}\text{C}$ ).

Essa diversidade de fatores, que contribuem efetivamente nos mecanismos de reação, é ainda mais acentuada no que diz respeito às variáveis relativas às propriedades dos aditivos utilizados. Alguns aspectos merecem atenção especial, especificamente, em relação a cada material, em particular. A cal hidratada pode ter seu desempenho relacionado a fatores como: tipo de cal, natureza do processo de produção, quantidade e finura de material reativo presente (*e.g.* Rocha Neto *et al*, 1991; Minnick, 1967). A cinza volante, à fatores como: tipo de cinza, superfície específica ou finura, quantidade de sílica, alumina, álcalis e carbono presentes, frequência, morfologia e mineralogia das partículas (*e.g.* ABCP, 1992; Vincent *et al*, Watt *et al* e Minnick *et al*, citados por TRB, 1976).

#### 2.4.1.2 Alterações das propriedades básicas

Conforme TRB (1976), em adição às reações básicas entre a cal e a cinza volante, a cal pode também reagir com os finos presentes no material que está sendo estabilizado. Reações solo-cal que podem ocorrer são troca de cátions, floculação/aglomeração e reações pozolânicas.

As reações de troca catiônica e floculação/aglomeração ocorrem rapidamente e causam redução da plasticidade da mistura solo-cinza volante-cal além de um certo aumento imediato de resistência. A redução da plasticidade melhora a trabalhabilidade e facilita a mistura com materiais que contém quantidades substanciais de partículas de granulometria fina (TRB, 1976).

Reduções substanciais na plasticidade, observadas pela redução do índice de plasticidade e aumento do limite de contração, são produzidas pela adição da cal, e em muitos casos a mistura resultante pode se tornar não plástica (TRB, 1987).

Os produtos resultantes das reações pozolânicas solo-cal contribuem também no desenvolvimento da matriz cimentante na mistura estabilizada.

Kaniraj & Havanagi (1996) argumentam que, à medida que o teor de cinza volante presente aumenta, em misturas contendo solo, cinza volante e cal hidratada, observa-se uma redução do máximo peso específico aparente seco e um aumento da umidade ótima, fixado um determinado esforço de compactação (*e.g.* Ceratti, 1979). Comportamento similar também é normalmente observado como consequência da adição de cal hidratada, em misturas solo-cal (*e.g.* TRB, 1987; Núñez, 1991).

Kaniraj & Havanagi (1996) acrescentam que o aumento da quantidade de cinza volante presente implica também na redução do peso específico real dos grãos das misturas. Além disso, amostras compactadas nas condições de umidade ótima e máximo peso específico aparente seco, para um específico esforço de compactação, apresentam aumento da porosidade e do índice de vazios, em teores crescentes de cinza volante. Segundo estes autores, tais características poderiam tornar particularmente interessante a utilização de processos de estabilização de solos com adição de cinza volante na construção de aterros, principalmente solos moles.

## 2.4.2 Variáveis determinantes do comportamento de misturas solo-cinza-cal

Quando se adiciona cal e cinza volante a um solo argiloso suas propriedades físicas são alteradas. Essas alterações dependem de diversos fatores, entre eles: tipo de solo, tipo e teor de cal, tipo e teor cinza, energia de compactação, período e condições de cura.

Nos itens subseqüentes serão detalhados os efeitos de alguns dos fatores considerados de grande importância na determinação da resistência de solos cimentados e que tem relação com as variáveis de estudo escolhidas nesta pesquisa.

### 2.4.2.1 Efeito da Cal

A adição de pequenas quantidades de cal modificará as propriedades do solo, enquanto que maiores quantidades irão alterar suas propriedades. A primeira resposta da mistura solo-cal

será a redução do índice de plasticidade e melhoria na trabalhabilidade e a segunda será o ganho de resistência através da cimentação das partículas (Ingles & Metcalf, 1972; Attoh-Okine, 1995; TRB, 1987).

Guimarães (1971) afirma que, de modo geral, a cal sempre afeta favoravelmente certas propriedades dos solos, o que se reflete em variações das características físicas seguintes: granulometria, plasticidade, contração e retração, umidade de campo, densidade, trabalhabilidade, desintegração e compactação, resistência e permeabilidade.

Consoli *et al* (2001), 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 aumento da resistência de pico e diminuição da deformação na qual o pico é atingido.

#### 2.4.2.2 Efeito da Cinza

A adição de materiais pozolânicos, tais como a cinza volante, auxiliam na produção de níveis de reação desejados com a cal. Consoli *et al* (2001), ao estudar um solo arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, verificaram que os novos materiais constituídos pelas misturas entre o solo e os resíduos apresentaram desempenho bastante superior em termos de resistência ao cisalhamento e deformabilidade.

#### 2.4.2.3 Efeito da densidade e compactação

De similar importância à quantidade de cal é a densidade na qual a mistura é compactada. Com o aumento da densidade, a resistência aumenta, a permeabilidade diminui até um valor mínimo, próximo da umidade ótima, depois começa a aumentar novamente (Ingles & Metcalf, 1972).

Diversos autores observaram que misturas solo-cal apresentam menor peso específico aparente máximo ( $\gamma_a$ ) que o solo natural, para uma mesma energia de compactação. À medida que o teor de cal aumenta o  $\gamma_a$  continua diminuindo. Além disso, a umidade ótima aumenta com o aumento do teor de cal (TRB, 1987).

As partículas do solo, quando adicionada cal, se tornam mais floculadas, devido à substituição dos íons sódio monovalentes da argila por íons cálcio divalentes. Devido à floculação, a quantidade de vazios e o tamanho dos vazios no solo aumentam. Esta estrutura floculada é

forte o suficiente para resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios mais alto, reduzindo assim o  $\gamma_d$  do solo. Quanto mais vazios houver, mais água será necessária para preenchê-los, o que resultará em uma umidade ótima maior, e uma curva de compactação mais achatada (Sivapullaiah *et al*, 1998). Com a adição de cinza volante, um comportamento similar também é normalmente observado em misturas solo-cinza-cal.

#### 2.4.2.4 Efeito do tempo de cura

Inglês e Metcalf (1972) apresentam um estudo sobre a influência do tempo de cura em diferentes tipos de solos, observaram taxas de ganhos de resistência maiores em pedregulhos arenosos, conforme a Figura 2.1.

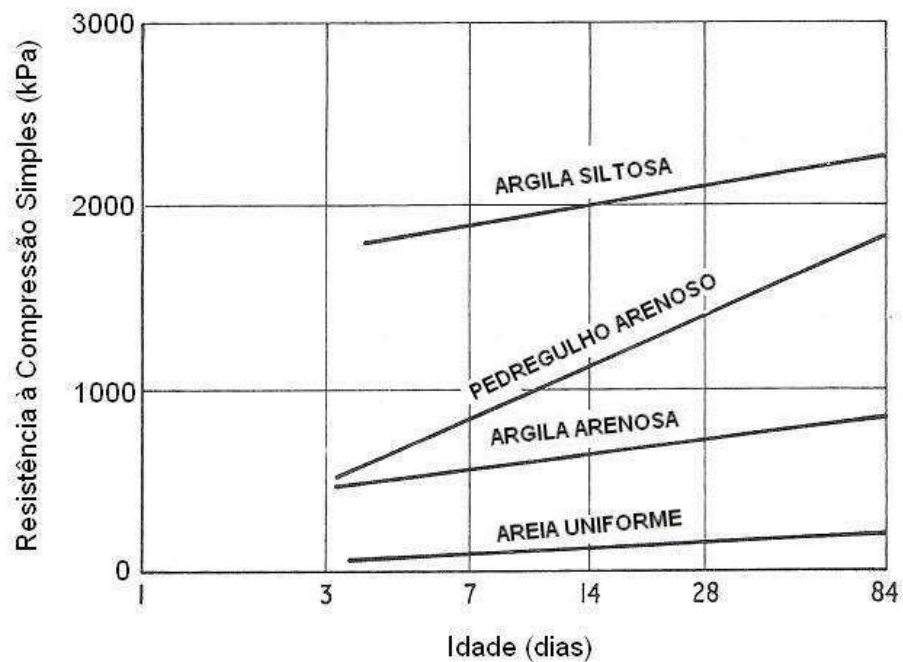


Figura 2.1 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal (adaptado de Inglês & Metcalf, 1972)

Thomé (1994) estudou misturas de uma argila mole (pedologicamente conhecida como Gley Húmico) com 5, 7 e 9% de cal dolomítica. Observou que a resistência não apresentou variação significativa para tempos de cura superiores a 7 dias. Segundo o autor, as reações pozolânicas foram impedidas ou sua quantidade insuficiente para cimentar as partículas. As reações pozolânicas poderiam ser impedidas pelos seguintes fatores simultâneos ou

independentes: falta de água, temperatura de cura muito baixa, teor de cal insuficiente ou presença de matéria orgânica.

Carraro (1997) ao estudar um solo silte arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, observou que o teor de cal presente nas misturas não exerceu influência significativa sobre os valores médios de resistência à compressão simples até a idade de 90 dias de cura, para a maior idade de cura adotada (180 dias), a resistência à compressão simples é fundamentalmente dependente do teor de cal de carbureto, apresentando uma relação aproximadamente linear.

#### 2.4.2.5 Efeito da relação vazios/cal

Nessa parte da revisão foram abordados os trabalhos que correlacionam a quantidade de vazios com a quantidade cal para estimativa da resistência. Foram abordados também, os trabalhos que relacionam a quantidade de vazios com a quantidade de cimento para a estimativa da resistência, pela falta de trabalhos em relação à cal.

Segundo Larnach (1960), como a compactação em solos ou no solo-cimento nunca consegue expulsar completamente o ar do sistema solo-água-ar ou solo-cimento-água-ar, a resistência não pode ser correlacionada com o fator água/cimento, pois este só se aplica a materiais onde o ar foi totalmente expulso e os vazios existentes estão preenchidos por água, como no caso de argamassas e concretos tradicionais.

Em seu estudo, Larnach (1960) utilizou uma areia fina misturada com uma argila pulverizada na proporção de nove partes da areia para uma de argila. As porcentagens de cimento utilizadas, em relação ao peso do solo seco, foram de 5,3%, 11,1% e 17,7%. Para cada porcentagem de cimento foi feita uma série de ensaios de compressão simples e de flexão em vigotas, moldadas a diferentes teores de umidade e massas específicas aparente secas, ambos determinados a partir das curvas de compactação das misturas de solo e cimento.

A relação vazios/cimento utilizada por Larnach (1960) é definida pela seguinte expressão:

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar + água)}}{\text{Volume absoluto de cimento}}$$

A Figura 2.2 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples das amostras de solo-cimento curadas previamente por 7 dias. Observa-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/cimento.

Para Larnach (1960), o uso deste tipo de relação, similarmente ao que ocorre em concreto, pode ser de extrema utilidade para dosagem e controle de execução de misturas de solo-cimento em campo.

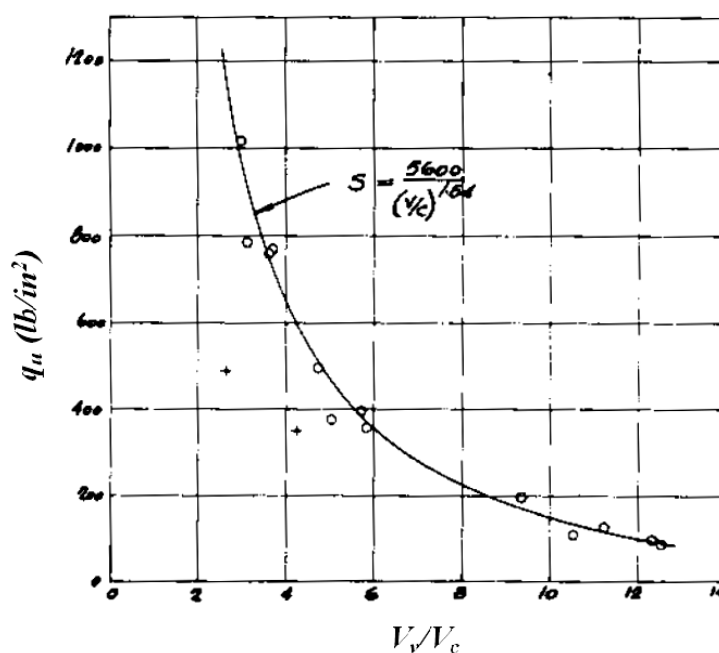


Figura 2.2 – Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Larnach, 1960)

Posteriormente Foppa (2005) verificou a mesma tendência obtida por Larnach (1960), tratando um solo arenoso com 2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12% de cimento em relação ao peso de solo seco. Para cada porcentagem de cimento foi feita uma série de ensaios de compressão simples, moldadas a diferentes teores de umidade e massas específicas aparente secas, ambos determinados a partir das curvas de compactação das misturas de solo e cimento. A Figura 2.3 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples das amostras de solo-cimento curadas previamente por 7 dias. Verifica-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/cimento.

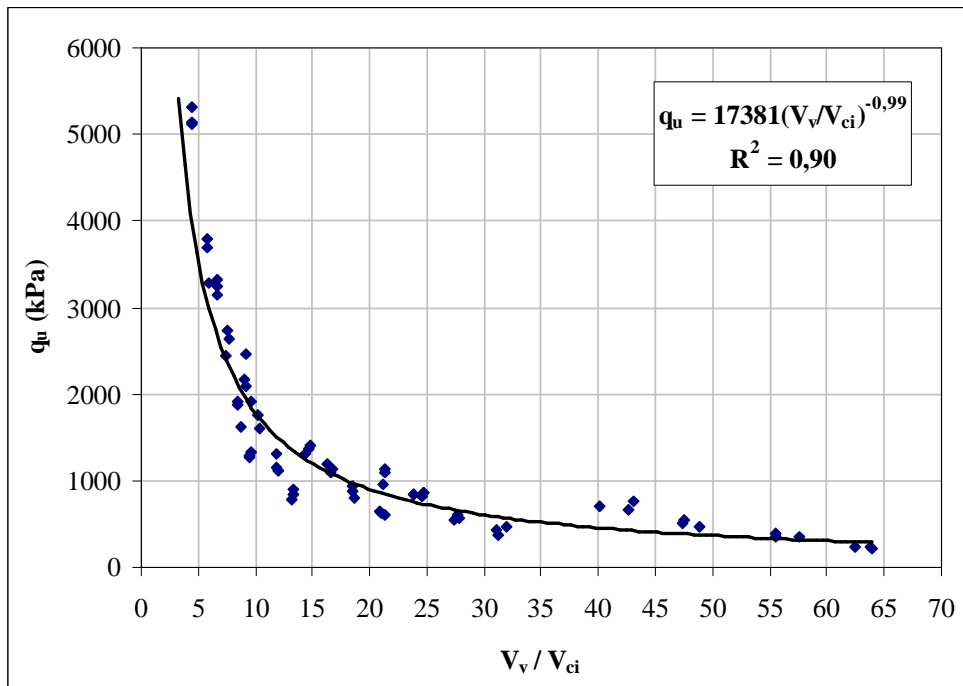


Figura 2.3 – Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Foppa, 2005)

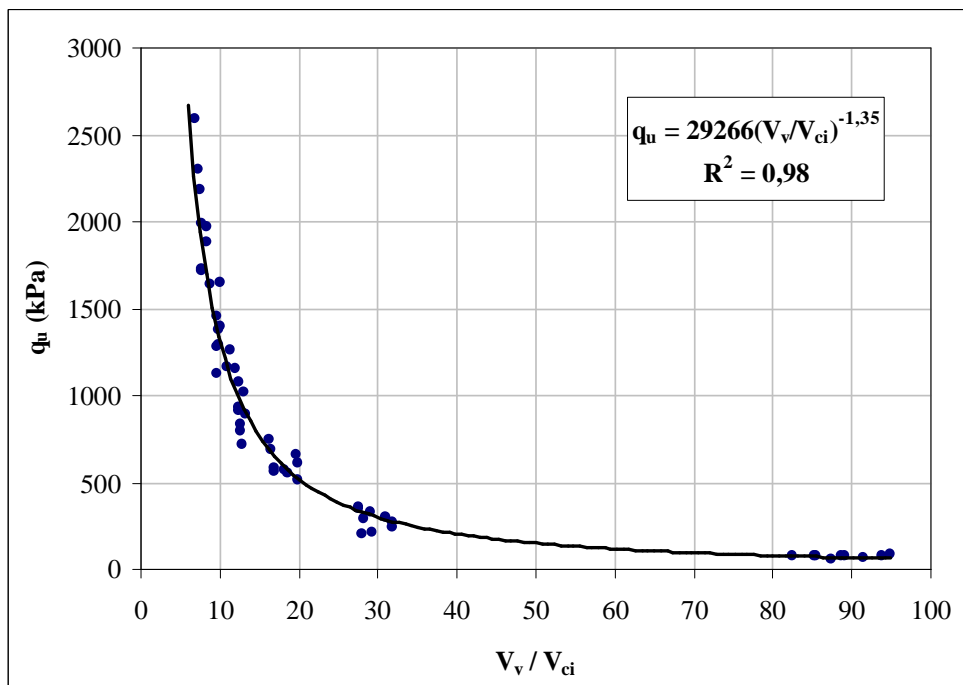


Figura 2.4 – Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Cruz, 2006)



Cruz (2006) utilizando o mesmo conceito vazios/cimento tratou uma areia fina com 2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12% de cimento. Para cada porcentagem de cimento foi feita uma série de ensaios de compressão simples, moldadas com 10% de umidade e diferentes índices de vazios (0,68; 0,73 e 0,80). A Figura 2.4 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples das amostras de solo-cimento curadas previamente por 7 dias. Nota-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/cimento.

Bittencourt *et al* (2006) ao estudarem a influência de variáveis no controle da resistência de concreto compactado com rolo (CCR), concluíram que a relação vazios/cimento pode ser mais um parâmetro a ser considerado em estudos de dosagens de CCR. O material utilizado foi uma composição de 52% de areia industrial, 24% de brita 25mm e 24% de brita 50mm. As porcentagens de cimento utilizadas, em relação ao peso de material seco, foram de 2,5%, 3,5% e 4,3%. Para cada porcentagem de cimento foi feita uma série de ensaios de compressão simples, moldadas a diferentes teores de umidade e massas específicas aparente secas. A Figura 2.5 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples das amostras de concreto compactado com rolo curadas previamente por 28 dias. Observa-se a mesma tendência que os trabalhos anteriores e um bom ajuste dos dados à relação vazios/cimento.

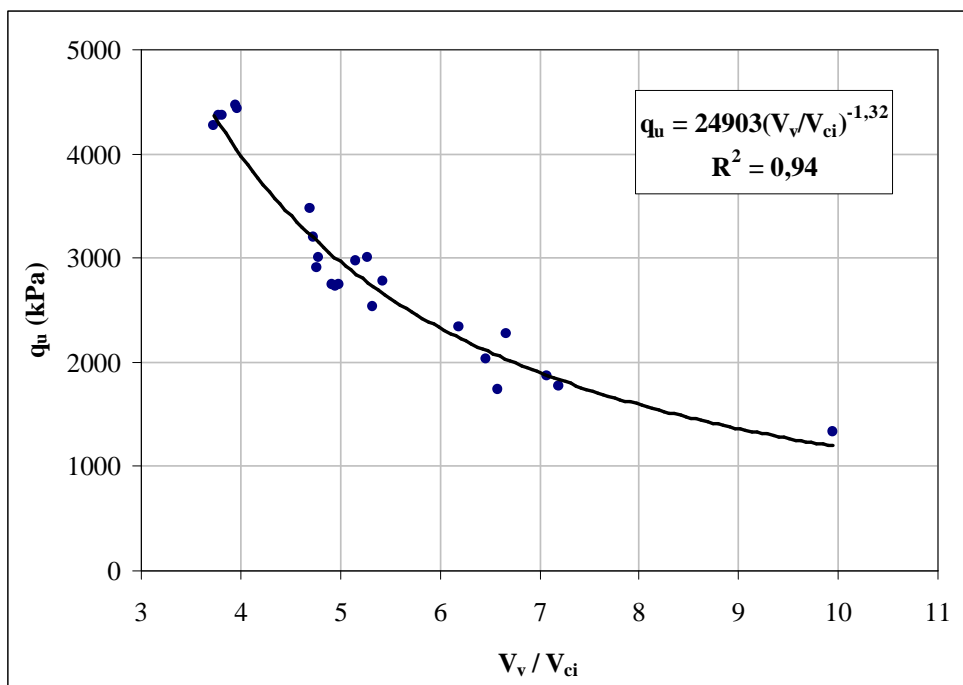


Figura 2.5 – Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Bittencourt *et al*, 2006)

Consoli *et al* (2007) com o objetivo de verificar o comportamento tensão-deformação de corpos-de-prova com mesma relação vazios/cimento, realizaram seis ensaios triaxiais não-drenados com tensões de confinamento de 20kPa e compararam com a curva de ajuste dos resultados de resistência à compressão simples obtidos por Foppa (2005). Foram adotados três valores de  $\eta/(C_{iv})^{0,28}$  (relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustados por um fator 0,28) para avaliação (20, 25 e 35), como é apresentado na Figura 2.6.

Os autores concluíram que a relação vazios/cimento também fornece bons resultados para a previsão da tensão desvio dos ensaios triaxiais não-drenados. Perceberam também, que a curva de ajuste dos ensaios triaxiais ficou próxima, porém, um pouco acima da curva de ajuste dos ensaios de compressão simples, devido ao efeito do confinamento (Figura 2.6).

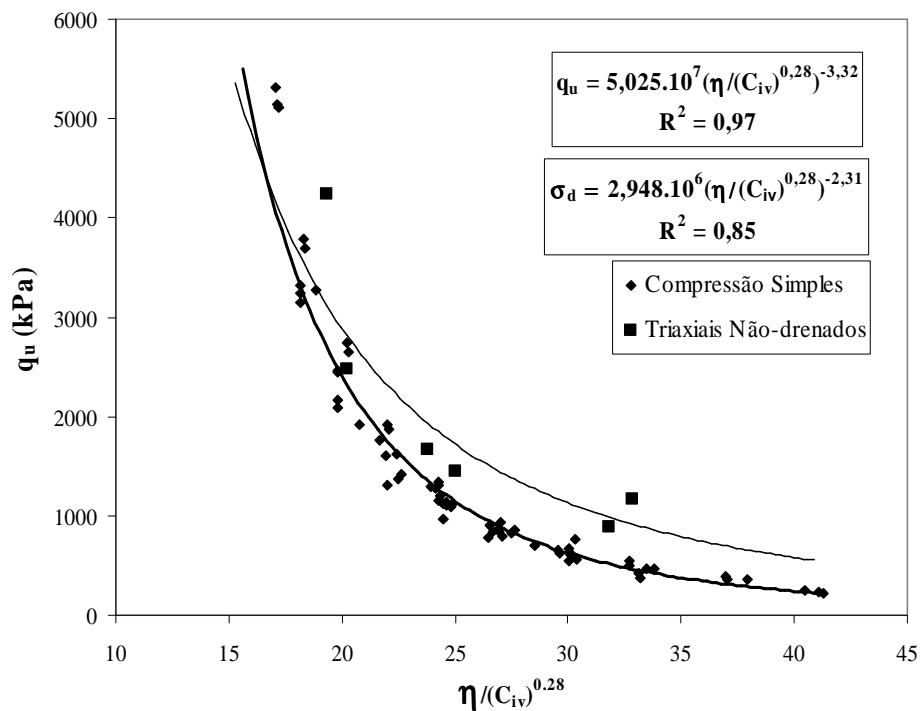


Figura 2.6 – Previsão da tensão desvio através da relação vazios/cimento (Consoli *et al*, 2007)

Lopes Junior (2007), estudou a relação vazios/cal tratando um solo arenoso com resíduo de britagem e as proporções de 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cimento ou de cal em relação ao peso de solo seco. Para cada porcentagem de cimento ou de cal foi feita uma série de ensaios de compressão simples, moldadas a diferentes teores de umidade e massas específicas aparente secas, ambos determinados a partir das curvas de compactação das misturas de solo, resíduo e

cimento. As Figuras 2.7 e 2.8 apresentam os resultados dos ensaios de compressão simples das amostras tratadas com cal e com 28 e 90 dias de cura respectivamente e a Figura 2.9 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples das amostras tratadas com cimento curadas previamente por 7 dias. Verifica-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/cal (ajustados por um fator 0,06) e vazios/cimento (ajustados por um fator 0,35).

Righetto (2008), estudou a relação vazios/agente cimentante tratando também, um solo arenoso com resíduo de britagem, porém com as proporções de 3%, 5%, 7%, 9% e 11% compostos por uma adição conjunta de cal e cimento. Para cada porcentagem de agente cimentante (cal+cimento) foi feita uma série de ensaios de compressão simples, moldadas a diferentes teores de umidade e massas específicas aparente secas, ambos determinados a partir das curvas de compactação das misturas de solo, resíduo e cimento. A Figura 2.10 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples das amostras tratadas com as porcentagens de agente cimentante com 28, 60 e 90 dias de cura. Verifica-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/agente cimentante (ajustados por um fator 0,25).

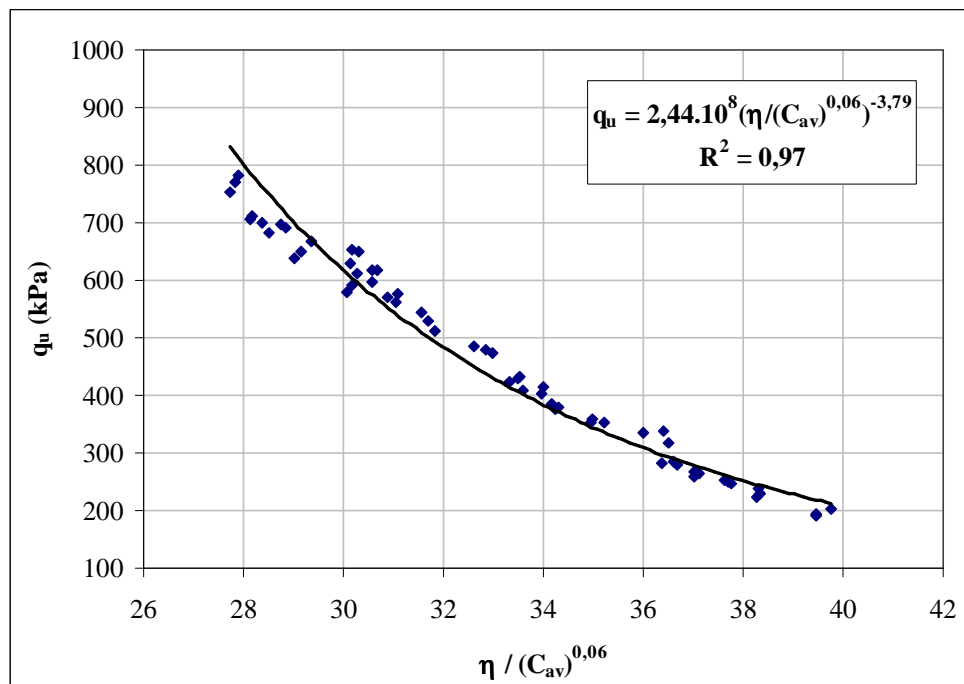


Figura 2.7 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 28 dias de cura (Lopes Junior, 2007)

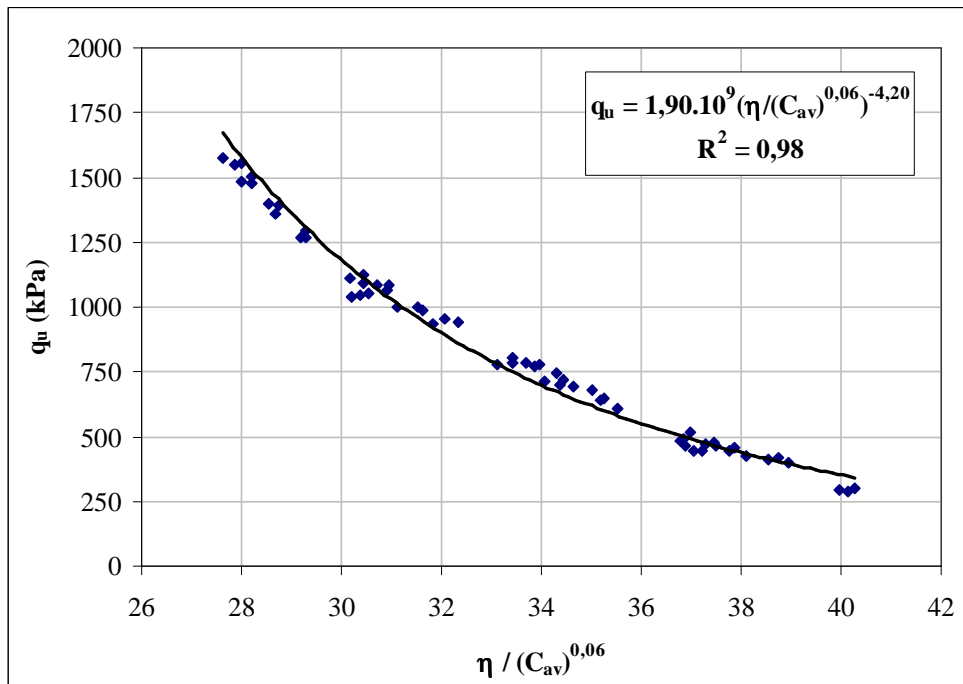


Figura 2.8 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 90 dias de cura (Lopes Junior, 2007)

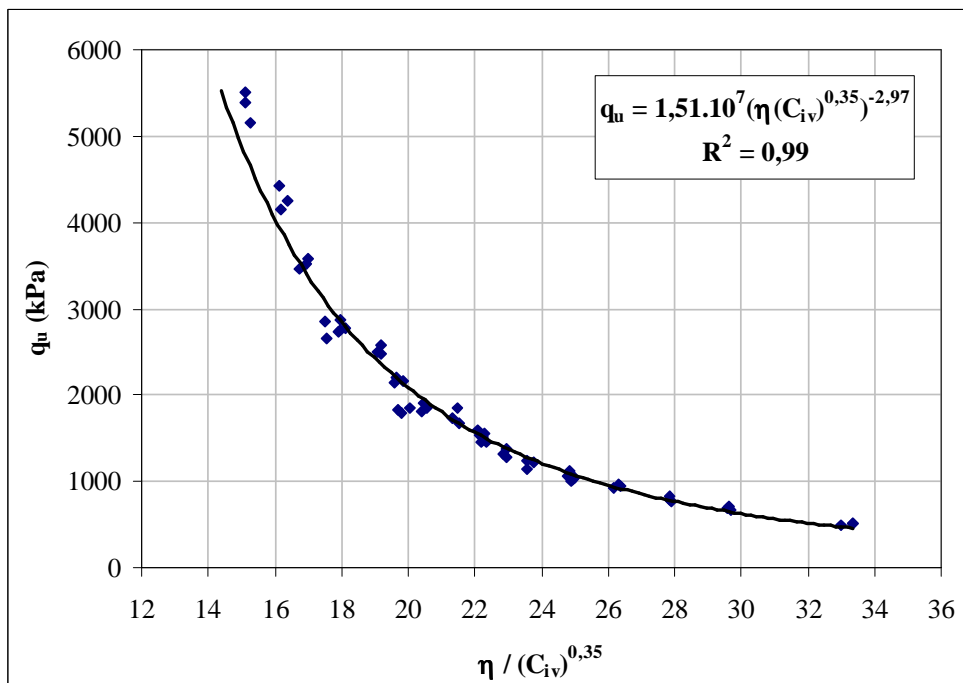


Figura 2.9 – Fator vazios/cimento expresso em termos da porosidade e do teor de cimento volumétrico para amostras com 7 dias de cura (Lopes Junior, 2007)

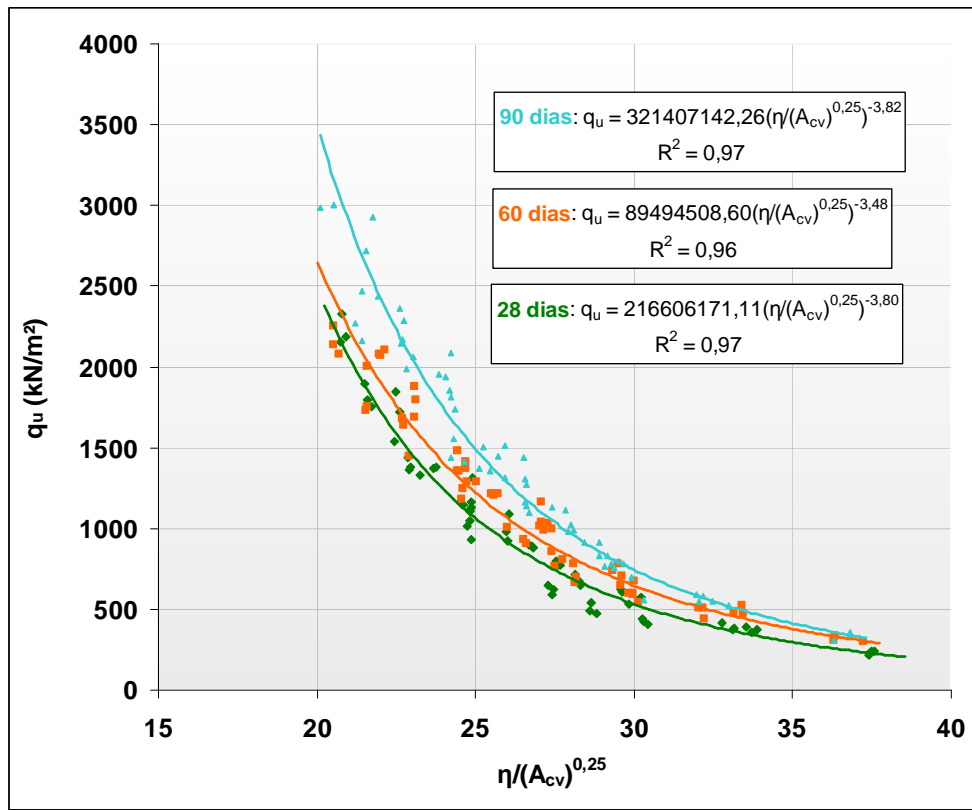


Figura 2.10 – Fator vazios/agente cimentante expresso em termos da porosidade e teor volumétrico de agente cimentante para amostras com 90, 60 e 28 dias de cura (Righetto, 2008)

### 2.4.3 Comportamento mecânico de solos estabilizados com cal e cinza volante

Solos estabilizados pozolanicamente, mediante a adição de cinza volante e cal hidratada, constituem-se, em última análise, num novo material geotécnico artificialmente cimentado. O comportamento mecânico deste novo material, entre outras características, pode diferir, significativamente, daquele que caracteriza o solo natural, não cimentado, uma vez que tenha havido êxito na execução do processo de estabilização.

Dessa forma, torna-se necessária uma reavaliação da abordagem teórica adotada para a previsão e compreensão do comportamento de engenharia que o novo material passa a apresentar, comparando-se àquela esperada para o solo natural.

Solos submetidos a um efetivo processo de estabilização, de qualquer natureza, podem apresentar um comportamento mecânico similar àqueles que caracterizam as rochas brandas

ou os solos cimentados. Segundo Gens & Nova (1993), estes últimos materiais situam-se numa área do conhecimento compreendida entre a mecânica das rochas e a mecânica dos solos. Como consequência, a compreensão do seu comportamento tem sido desenvolvida numa taxa menor em relação àquelas observadas para as rochas e os solos tradicionais. Esta afirmação torna-se especialmente evidente considerando-se a relativa carência de teorias e modelos matemáticos aptos a condensar o comportamento daqueles materiais de uma maneira unificada e consistente.

Entre outros trabalhos, é de enorme valia a extensa e criteriosa revisão da literatura sobre o comportamento mecânico de materiais geotécnicos cimentados, acrescentado-se resultados de alguns trabalhos encontrados na literatura nos quais foram utilizados mecanismos de estabilização de natureza pozolânica, no caso de materiais artificialmente cimentados.

Clough *et al* (1981) sugerem que o comportamento mecânico de uma areia cimentada é fortemente influenciado por fatores como: grau de cimentação, densidade, tensão de confinamento, distribuição granulométrica, forma e arranjo dos grãos e natureza do agente cimentante. A influência dos dois primeiros fatores é igualmente enfatizada por Huang & Airey (1993) como determinante do comportamento de uma areia artificialmente cimentada.

Conforme Gens & Nova (1993), solos cimentados, rochas brandas e materiais similares exibem um comportamento mecânico complexo, afetado principalmente pela sua história geológica e pela história de tensões e deformações. Outros fatores, além desses anteriormente citados, são apresentados pelos autores como determinantes do comportamento desses materiais.

Agentes cimentantes de natureza pozolânica, artificialmente introduzidos em mecanismos de estabilização de solos têm no tempo de cura uma das variáveis mais significativas para a caracterização do comportamento mecânico, uma vez que esse fator afeta diretamente a efetividade do grau de cimentação da mistura (*e.g.* Mallmann, 1996; Ceratti, 1979; Mateos, 1961).

Segundo Prietto (1996), todos os aspectos analisados do comportamento mecânico residual de arenito (idêntico ao estudado no presente trabalho), artificialmente cimentado com cimento pozolânico, foram, em maior ou menor grau, influenciados pela variação do grau de cimentação e da tensão efetiva média inicial.

### 2.4.3.1 Resistência Mecânica

A resistência de misturas solo-cal normalmente é avaliada através dos ensaios de compressão simples, compressão triaxial e índice de Suporte Califórnia (ISC), e depende de diversas variáveis como: tipos de solo e cal, teor de cal, tempo e temperatura de cura (TRB, 1987).

Segundo Inglês & Metcalf (1972), geralmente, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até certo nível, usualmente 8% para solos argilosos. A partir deste ponto a taxa de acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal, devido às misturas solo-cal apresentarem uma cimentação lenta que dependerá do tipo de solo (Figura 2.11).

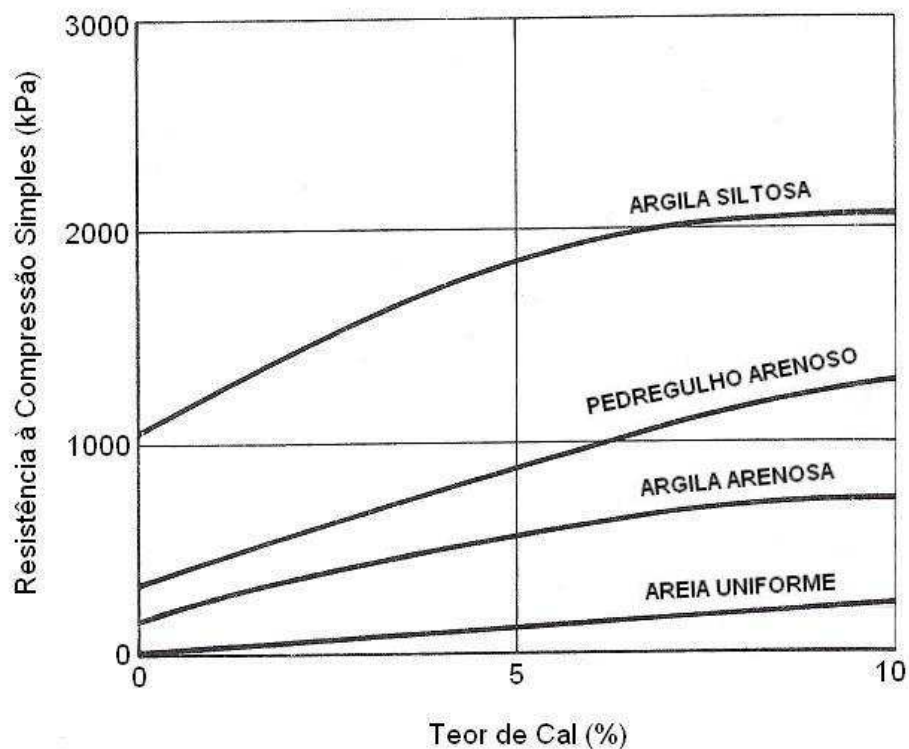


Figura 2.11 – Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (adaptado de Inglês & Metcalf, 1972)

Herrin e Mitchell (1961) afirmaram que não há, aparentemente, um teor ótimo de cal, que produza a máxima resistência em um solo estabilizado. Apontaram o teor e tipo de cal, o tipo de solo, o peso específico, o tempo e tipo de cura, como sendo os principais fatores que influenciam a resistência de misturas de solo e cal.

Ormsby e Kinter (1973), por sua vez, constataram que em solos ricos em caolinita a adição de cal cálcica dá maiores resistências do que a dolomítica, sendo a resistência à compressão simples função linear do teor de cal adicionado. Já para solos contendo montmorilonita a relação é uma equação do segundo grau, e os melhores efeitos são obtidos com a adição de cal dolomítica.

O aumento da resistência à compressão simples de misturas solo-cal, com o aumento da energia de compactação, foi observado por Mateos (1964), que afirmou que a resistência das misturas é fortemente influenciada pela temperatura de cura, recomendando a construção de camadas de pavimento estabilizadas com cal no início do verão. Carraro (1997) verificou que a energia de compactação influencia e é de fundamental importância na determinação da resistência mecânica de solos tratados com cal de carbureto e cinza volante.

#### 2.4.3.2 Resistência à Tração

A resistência à tração do solo-cimento é de grande interesse em projetos de pavimentos e tem sido investigada por vários pesquisadores. (TRB, 1987).

Conforme citado por Núñez (1991), Thompson (1975) afirmou que a resistência à tração na compressão diametral conduz a menores valores que a resistência à tração na flexão. Constatou também que o quociente entre a resistência a tração pela resistência à compressão simples das misturas solo-cal estudadas varia de 0,10 a 0,15, independente do tipo e/ou teor de cal. Além disso, Ceratti (1979) ao estudar os efeitos da adição de cal e cinza volante a um solo residual compactado também constatou uma relação entre 0,10 e 0,13.

Carraro (1997) ao estudar uma mistura de solo arenoso compactado com cinza volante e cal de carbureto, observou que valores médios de resistência à tração na compressão diametral aumentam com o tempo de cura e que a taxa de crescimento dos diferentes mecanismos de resistência (tração e compressão) é variável com o tempo de cura.

Segundo TRB (1987), estudos de Thompson (1969) demonstraram que o quociente entre a resistência à tração na flexão e a resistência à tração na compressão diametral é em torno de 2. Assim pode-se estimar que a resistência à tração na flexão é 25% da resistência à compressão simples.



### 2.4.3.3 Resistência ao Cisalhamento

Existe um entendimento geral que, para uma dada variação de tensões, a resistência ao cisalhamento de solos naturalmente e artificialmente cimentados pode ser representada por uma envoltória reta de Mohr-Coulomb, definida por um intercepto coesivo, que é apenas função da cimentação, e por um ângulo de atrito que parece não ser afetado pela cimentação (Schnaid *et al*, 2001).

O principal efeito na resistência ao cisalhamento de um solo fino reativo é o de produzir um substancial aumento da coesão, sendo o aumento do ângulo de atrito bem menos expressivo. Considerando as baixas tensões confinantes atuantes no interior de pavimentos flexíveis ou fundações superficiais, o aumento da coesão é da maior importância. Para os solos de Illinois, Thompson (1966) observou que o ângulo de atrito interno de misturas solo-cal variava de 25° a 35° e obteve a seguinte relação entre a coesão ( $c$ ) e a resistência à compressão simples (RCS):

$$c = 9,3 + 0,292 \text{ RCS}$$

Onde:  $c$  e RCS são medidas em psi ( $1 \text{ psi} \cong 0,7 \text{ kgf/cm}^2$ ).

Thomé (1994) ao estabilizar um solo classificado como Gley Húmico com 5%, 7% e 9% de cal (teores insuficientes para o desenvolvimento de reações pozolânicas, conforme esse autor), obteve valores de coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ), compreendidos entre 13,7kPa e 21,6kPa e 19,7° e 23,1°. O solo natural tinha  $c = 6,1\text{kPa}$  e  $\phi = 18,3^\circ$ .

Consoli *et al* (2001) ao verificarem o comportamento de um solo silte-arenoso tratado com 4% de cal de carbureto, observaram um acréscimo na coesão de  $10\text{kN/m}^2$  para  $42\text{kN/m}^2$  e um acréscimo no ângulo de atrito de 35° para 38°, em relação ao solo natural.

### 2.4.3.4 Resposta Tensão-Deformação

As características tensão-deformação são essenciais para a análise do comportamento de uma estrutura de pavimento ou fundações superficiais assentes sobre uma camada em solo-cal.

Em geral, o comportamento tensão-deformação de solos cimentados pode ser descrito como inicialmente rígido, aparentemente linear até um ponto de plastificação bem definido, além do qual o solo sofre aumento nas deformações plásticas até a ruptura. Outra característica apresentada é a marcante fragilidade na ruptura com a formação de planos de ruptura. Tal

fragilidade aumenta com o aumento da quantidade de agente estabilizante e diminui com o aumento da tensão efetiva média (Schnaid *et al*, 2001).

O efeito da cal nas características de deformabilidade de um solo fino reativo são marcantes. A tensão de ruptura aumenta significativamente, enquanto que a deformação para ruptura diminui. Akoto & Singh (1986) observaram que quando as tensões de tração são elevadas, as amostras de laterita tratadas com cal se deformam notavelmente antes de romperem. Thompson (1965), entretanto, afirmou que a análise da curva tensão- deformação revela o comportamento frágil das misturas solo-cal.

Para o solo classificado como Gley Húmico, Thomé (1994), observou que o módulo secante, entre a origem e 75% da tensão de ruptura, aumenta com o teor de cal. Após 7 dias de cura, a mistura solo tratado com 9% de cal apresentou módulo secante 2,63 vezes maior do que o solo natural.

No solo silte-arenoso tratado com cal de carbureto e cinza volante, Consoli *et al* (2001) observaram um comportamento frágil na ruptura e que a deformação axial na ruptura diminui com a cimentação, verificaram que não só a cimentação influencia nesse processo, mas também as condições de compactação. Os autores observaram também que o módulo de deformação secante decresce de forma acentuada com o aumento das deformações axiais.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este programa experimental tem dois objetivos fundamentais. O primeiro consiste em quantificar a influência da quantidade de cal e de cinza volante, da porosidade da mistura compactada e do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples do material estudado. O segundo é verificar a validade do uso da relação vazios/cal na estimativa da resistência à compressão simples do solo tratado com cal e cinza volante.

O programa experimental desta pesquisa foi desenvolvido a partir da metodologia de Projeto de Experimentos. Segundo Ribeiro & Ten Caten (2003) trata-se de uma metodologia apoiada fortemente em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, a execução e a análise de um experimento. O uso de Projeto de Experimentos permite que se estruture a seqüência de ensaios de forma a traduzir os objetivos pré-estabelecidos pelo pesquisador, sendo aplicado desde o planejamento do experimento até a sua análise de dados.

Assim, as variáveis da presente pesquisa podem ser classificadas em dois grupos: variáveis independentes e variáveis dependentes.

As variáveis independentes são todos os fatores do experimento que podem causar algum efeito sobre as variáveis dependentes, e são divididas em fatores controláveis, fatores constantes e fatores de ruído:

- Fatores controláveis:
  - *Densidade do solo-cal*: expressa através da porosidade ( $\eta$ ) ou da massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ) da mistura compactada;
  - *Quantidade de cinza volante (Cv)*: massa de cinza volante ( $c_v$ ) dividida pela massa de solo e cinza volante secos, expressa em porcentagem;

- *Quantidade de cal (Ca)*: massa de cal ( $c_a$ ) dividida pela massa de solo seco ou pela massa de solo e cinza volante secos, expressa em porcentagem;
- *Tempo de cura úmida*: tempo de permanência do corpo-de-prova na câmara úmida após a moldagem até o seu rompimento, expresso em dias;
- Fatores constantes:
  - *Tipo de solo*: solo residual de arenito Botucatu;
  - *Tipo de cinza*: cinza volante;
  - *Tipo de agente cimentante*: cal hidratada Primor Extra;
  - *Teor de umidade ( $\omega$ )*: massa de água ( $a$ ) dividida pela massa de material seco (solo + cal ou solo + cinza volante + cal), expresso em porcentagem;
  - *Temperatura durante a moldagem*:  $23^\circ \pm 2^\circ\text{C}$ ;
  - *Taxa de deformação nos ensaios de compressão simples*: 1,14% por minuto;
- *Fatores de ruído*
  - *Velocidade de moldagem dos corpos-de-prova*: a moldagem é realizada em uma prensa que não é automatizada;

As variáveis dependentes são as variáveis de resposta do experimento:

- *Resistência à compressão simples ( $q_u$ )*;
- *Sucção Matricial*.

A relação vazios/cal ( $V_v/V_{ca}$ ) definida como sendo o volume absoluto de vazios ( $V_v$ ) dividido pelo volume absoluto de cal ( $V_{ca}$ ) presentes nas amostras compactadas, é uma variável derivada dos fatores controláveis e será utilizada na análise dos dados.

Basicamente, o programa experimental foi dividido e executado em duas etapas. Na primeira etapa foram realizados os ensaios de caracterização física do solo, da cinza volante e da cal e os ensaios de dosagem da cal, com o objetivo de classificar os materiais e acessar as propriedades necessárias ao desenvolvimento das etapas seguintes.

A segunda etapa consiste na realização de uma bateria de ensaios de compressão simples sobre os pontos de moldagem pré-estabelecidos de acordo com o programa de ensaios detalhado no item 3.4. Esta etapa teve por objetivo avaliar a influência isolada de cada uma das variáveis investigadas sobre a resistência à compressão simples do solo-cinza-cal em estudo. Ainda nesta etapa, foram realizadas medidas de sucção matricial em amostras de interesse.

A Tabela 3.1 apresenta as etapas do programa experimental, bem como o tipo e número de ensaios que foram realizados em cada etapa.

Tabela 3.1 – Etapas e Ensaios do Programa Experimental

Etapa	Material	Tipo de Ensaio	Número de ensaios
Ensaio de Caracterização	Solo	Massa Específica Real dos Grãos	3*
		Análise Granulométrica	1*
		Limite de Plasticidade	1*
		Limite de Liquidez	1*
		Compactação	1*
	Cinza Volante	Massa Específica Real dos Grãos	1
		Análise Granulométrica	1
		Limite de Plasticidade	1
		Limite de Liquidez	1
	Cal	Massa Específica	3
Solo-Cinza Volante	Compactação	1	
Dosagem Cal	Solo-Cal e Solo-Cinza-Cal	Método Rogers <i>et al</i> (Método do ICL - 1997)	2
Resistência Mecânica	Solo-Cal e Solo-Cinza-Cal	Compressão Simples	432
	Solo-Cal e Solo-Cinza-Cal	Medidas de Sucção Matricial	144

\*Dados obtidos em Foppa (2005).

No item 3.4 encontra-se detalhada a etapa principal deste trabalho que foi a realização dos ensaios de compressão simples. Como o programa de ensaios de compressão simples foi baseado em resultados obtidos na etapa de caracterização, ele será apresentado após os itens referentes aos métodos e materiais.

Portanto nos itens 3.2 e 3.3, são apresentados os métodos e materiais utilizados durante o programa experimental, a justificativa para a escolha dos mesmos, sua descrição, bem como referências às normas técnicas obedecidas.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Coleta de amostras

A amostra de solo foi coletada no estado deformado, mediante escavação com ferramenta manual, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos.

A amostra assim obtida foi armazenada e transportada em tonéis plásticos adequadamente vedados. Durante a coleta, todos os cuidados foram tomados no sentido de se evitar a contaminação da amostra.

A cinza volante foi coletada diretamente dos reservatórios dos equipamentos da usina termelétrica, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. A amostra assim obtida foi armazenada e transportada em tonéis plásticos adequadamente vedados.

A cal, adquirida em embalagem de 20 kg foi armazenada em recipientes de vidro, com volume de aproximadamente 4 litros cada, e adequadamente vedados para evitar sua hidratação prematura em função da umidade do ar.

### 3.2.2 Preparação das amostras

A preparação das amostras de solo e da cinza volante para os ensaios de caracterização e para a moldagem dos corpos-de-prova, que envolve os procedimentos de secagem ao ar, destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica seguiu os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457/86.

As amostras assim preparadas são armazenadas até a data da sua utilização em sacos plásticos, devidamente identificados e vedados.

### 3.2.3 Ensaio de caracterização

Para a caracterização do solo foram utilizados os ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade, compactação e determinação do teor de umidade. Para a caracterização da cinza volante foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade e determinação do teor de umidade. Para o solo-cinza volante foi realizado o ensaio de compactação e para a cal utilizou-se o ensaio de massa específica real dos grãos.

As determinações do teor de umidade do solo e da cinza volante seguem os procedimentos descritos pelo anexo da norma NBR 6457/86.

A análise granulométrica do solo e da cinza volante foi realizada de acordo com os procedimentos descritos pela NBR 7181/84. Nestes ensaios foi utilizado defloculante.

A determinação da massa específica real dos grãos do solo e da cinza volante seguiu o método descrito pela NBR 6508/84.

A obtenção dos limites de liquidez e de plasticidade do solo e da cinza volante seguiu os métodos descritos nas normas NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente.

Para o ensaio de compactação foram utilizados os procedimentos descritos pela NBR 7182/86.

### 3.2.4 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, cal, cinza volante e água) com resolução de 0,01 g, o solo, a cinza volante e a cal foram misturados com o auxílio de uma espátula metálica, até que a mistura adquirisse coloração uniforme. Em seguida, a água era adicionada continuando o processo de mistura até que a homogeneidade fosse obtida.

A quantidade de solo, cinza volante e cal constituem a massa seca total. Assim, a quantidade de cal necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo e cinza volante

utilizada, sendo que a quantidade de água (teor de umidade) foi calculada em relação à soma das massas de solo, cinza volante e de agente cimentante. A quantidade total de mistura permite a moldagem de um corpo-de-prova e uma sobra para determinação do teor de umidade.

Após a mistura dos materiais, a quantidade de solo-cinza-cal necessária para confecção de um corpo-de-prova era dividida em três partes iguais, armazenadas em recipientes com tampa para evitar a perda da umidade, para posterior compactação.

Ao final deste processo, duas pequenas porções da mistura eram retiradas e colocadas em cápsulas para determinação do teor de umidade. A média dos dois teores de umidade medidos foi adotada como sendo o teor de umidade do corpo-de-prova.

A amostra era, então, compactada estaticamente em três camadas no interior de um molde de ferro fundido tripartido, devidamente lubrificado, de maneira que cada camada atingisse o peso específico aparente seco definido, tomando-se o cuidado de escarificar levemente os topos acabados da primeira e da segunda camada para aumentar a integração entre as camadas superpostas.

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

Os corpos-de-prova assim obtidos eram, então, armazenados e curados por um período de 28 dias, 60 dias 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).

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

- Massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ): grau de compactação de 99% a 101%, sendo o grau de compactação definido como o valor de  $\gamma_d$  efetivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de  $\gamma_d$  definido como meta. (Exemplo: para  $\gamma_d$



= 1,60 g/cm<sup>3</sup> consideram-se aceitáveis corpos-de-prova que apresentarem valores de  $\gamma_d$  compreendidos entre 1,58 e 1,62 g/cm<sup>3</sup>).

- Teor de umidade ( $\omega$ ): valor especificado  $\pm 0,5$  pontos percentuais (Exemplo: para um objetivo de  $\omega = 14\%$  são aceitos valores compreendidos entre 13,5% e 14,5%).
- Dimensões: diâmetro  $50 \pm 0,5$  mm e altura  $100 \pm 1$  mm.

A Figura 3.1 apresenta o aspecto final de um corpo-de-prova moldado de acordo com os procedimentos descritos anteriormente.



Figura 3.1 – Corpo-de-prova de solo-cinza-cal

Devido à dispersão característica dos ensaios de compressão simples, foram moldados corpos-de-prova em triplicata para cada ponto de moldagem (definidos no item 3.4.2) obtendo-se assim, uma maior confiabilidade dos resultados. A moldagem dos corpos-prova do experimento foi realizada de forma aleatória, tendo o cuidado para que os três corpos-de-prova de um mesmo ponto não fossem moldados no mesmo dia, seguindo os conceitos da metodologia de Projeto de Experimentos. Segundo Ribeiro & Ten Caten (2003), a aleatorização espalha sobre os resultados o efeito dos fatores de ruído, como a temperatura do dia, o desgaste das ferramentas e a habilidade e cansaço do operador.

Por problemas de temperatura na câmara úmida, os corpos-de-prova foram remoldados. Na fase de remoldagem, apenas os conjuntos de três corpos-de-prova por ponto foram moldados aleatoriamente, sendo que os três corpos-de-prova de um mesmo ponto foram moldados no mesmo dia. Este procedimento foi adotado para evitar a dispersão dos dados adquiridos, fazendo com que todos os corpos-de-prova de um mesmo conjunto passassem pelo mesmo período de cura.

### 3.2.5 Ensaio 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 com cal ou acessar aspectos relativos à importância de fatores influentes sobre a resistência de solos tratados. Uma das razões para tal é a experiência acumulada com este tipo de ensaio na área de concretos, além de ser um ensaio de simples e rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido no meio técnico.

Para estes ensaios foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 100 kN, além de anéis dinamométricos calibrados com capacidade de 10 kN e 50 kN e resolução de 0,005 kN (0,5 kgf) e 0,023 kN (2,3 kgf) respectivamente (Figura 3.2a). A velocidade de deformação destes ensaios eram de 1,14 mm por minuto. O procedimento dos ensaios de compressão simples seguiram a norma americana ASTM D 5102/96.

Os corpos-de-prova, após serem curados na câmara úmida, eram submersos em um recipiente com água por um período de 24 horas, visando aproximar a condição de saturação.

A temperatura da água do tanque era controlada e mantida em  $23 \pm 3$  °C. Imediatamente antes do ensaio de compressão simples, os corpos-de-prova foram retirados do tanque e superficialmente secos com auxílio de um tecido absorvente. Procedia-se então a execução do ensaio e anotava-se a carga máxima atingida pelo corpo-de-prova (Figura 3.2b).

Como critério de aceitação para o ensaio de resistência à compressão simples, estipulou-se que as resistências individuais de três corpos-de-prova não deveriam se afastar mais de 10% da resistência média desse conjunto. Este critério é utilizado em todas as pesquisas realizadas a partir de ensaios de compressão simples no LEGG/ENVIRONGEO. Assim, esta pesquisa também adotou este critério, para poder comparar os resultados obtidos com os resultados de trabalhos realizados anteriormente.



Figura 3.2a – Ensaio de Compressão Simples



Figura 3.2b – Corpo-de-prova de solo-cinza-cal no ensaio de Compressão Simples

### 3.2.6 Medidas de Sucção

Como todos os corpos-de-prova do programa de ensaios, no teor de umidade de moldagem, encontram-se na condição não-saturada, um determinado nível de sucção está presente. As medidas de sucção neste trabalho têm o objetivo de verificar qual sua magnitude e se esta apresenta variação significativa entre os corpos-de-prova.

A sucção medida foi a matricial, ou seja, a proveniente das forças capilares existentes no interior da amostra. Utilizou-se para a medição da sucção matricial a técnica do papel filtro. O método baseia-se no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso, com deficiência de umidade, é posto em contato com um papel filtro, com umidade menor. O papel passa a absorver uma certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de sucção. Tendo-se a relação entre sucção e umidade do papel filtro (curva de calibração) pode-se obter a sucção do solo a partir da curva de calibração (Marinho, 1995).

Esta técnica foi escolhida por ser uma técnica simples e de baixo custo. Ela fornece resultados plenamente satisfatórios desde que se tenha extremo cuidado nos procedimentos utilizados. Foi utilizado o papel filtro da marca Whatman N° 42 e equações de calibração apresentadas por Chandler *et al* (1992) e recomendadas por Marinho (1995):

- Para umidades do papel filtro ( $w$ ) > 47%, Sucção (kPa) =  $10^{(6,05 - 2,48 \log w)}$
- Para umidades do papel filtro ( $w$ ) ≤ 47%, Sucção (kPa) =  $10^{(4,84 - 0,0622 w)}$

Os procedimentos adotados para a medição da sucção matricial são os mesmos que os utilizados por Feuerharmel (2003), por Foppa (2005) e por Lopes Junior (2007) e são descritos a seguir.

Após a realização do ensaio de compressão simples, com o auxílio de uma espátula, uma pequena amostra cilíndrica, de aproximadamente 5 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura, foi obtida do corpo-de-prova rompido. Além da amostra para sucção, através de raspagem do corpo-de-prova ensaiado, retirava-se uma amostra para determinação do teor de umidade.

Dois pedaços de papel filtro, com área de aproximadamente 2 cm<sup>2</sup>, eram colocados na parte superior da amostra sem sobreposição dos mesmos (Figura 3.3a). O papel filtro era utilizado diretamente da caixa, na condição seco ao ar. O manuseio do papel filtro durante todo o ensaio foi realizado com o auxílio de uma pinça metálica para evitar qualquer alteração nas características originais do papel. Após, cada conjunto (papel filtro + amostra) era protegido por filme plástico de PVC (Figura 3.3b) e embalado em um saco plástico selado para garantir que o fluxo ocorra somente entre o solo e o papel, sem interferência do ambiente externo.

As amostras já embrulhadas e identificadas eram, então, colocadas em uma caixa de isopor com tampa por um período de 7 dias, necessário para que o equilíbrio de sucção entre o solo e o papel filtro fosse alcançado.

Após alcançado o equilíbrio, os papéis filtro eram removidos rapidamente da amostra e colocados em recipientes plásticos numerados e com tampa. Essa operação era realizada dentro de 3 a 5 segundos. O peso dos dois conjuntos (papel filtro úmido + recipiente) era determinado usando uma balança com resolução de 0,0001 g.

Depois de obtido o peso úmido de cada conjunto, os papéis eram retirados dos recipientes, colocados em tampas de cápsula (previamente identificada com a mesma numeração do recipiente) e levados a uma estufa de 60°C durante 48 horas. Após secagem, cada papel filtro era retirado da estufa e rapidamente recolocado no mesmo recipiente utilizado para obtenção do peso úmido. Determinava-se, então o peso seco de cada conjunto.



Figura 3.3a – Corpo-de-Prova para o ensaio de sucção matricial



Figura 3.3b – Corpo-de-Prova para o ensaio de sucção matricial

Após a obtenção do peso seco, os papéis filtro eram descartados e os recipientes pesados. Através desses dados, o teor de umidade de cada papel filtro era calculado. Com o teor de umidade e a correspondente equação de calibração, obteve-se a sucção do papel filtro, e a média dos dois valores considerada igual à sucção existente na amostra.

### 3.3 MATERIAS

#### 3.3.1 Solo

O solo utilizado no presente trabalho é um solo residual de arenito pertencente à denominada formação Botucatu que abrange área superior a 1.300.000 km<sup>2</sup> no estado do Rio Grande do Sul. Essa formação se desenvolve partir da fronteira com o Uruguai, na região de Santana do Livramento, constituindo uma faixa de afloramento que se prolonga para o norte até a região de São Francisco de Assis, onde apresenta inflexão para leste, ocorrendo ao longo da escarpa basáltica, conformando uma estreita e alongada faixa (Figura 3.4).

Esse solo tem sido utilizado em pesquisas realizadas nos laboratórios de Mecânica dos Solos (LMS), Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG) e Laboratório de Resíduos, Novos Materiais e Geotecnia Ambiental (ENVIRONGEO) da UFRGS, o que contribuiu para o conhecimento de suas propriedades físicas, químicas e do seu comportamento mecânico, vindo ao encontro a presente pesquisa (Núñez, 1991; Prietto, 1996; Heineck, 1998; Rotta, 2000; Foppa 2005; Lopes Junior, 2007).

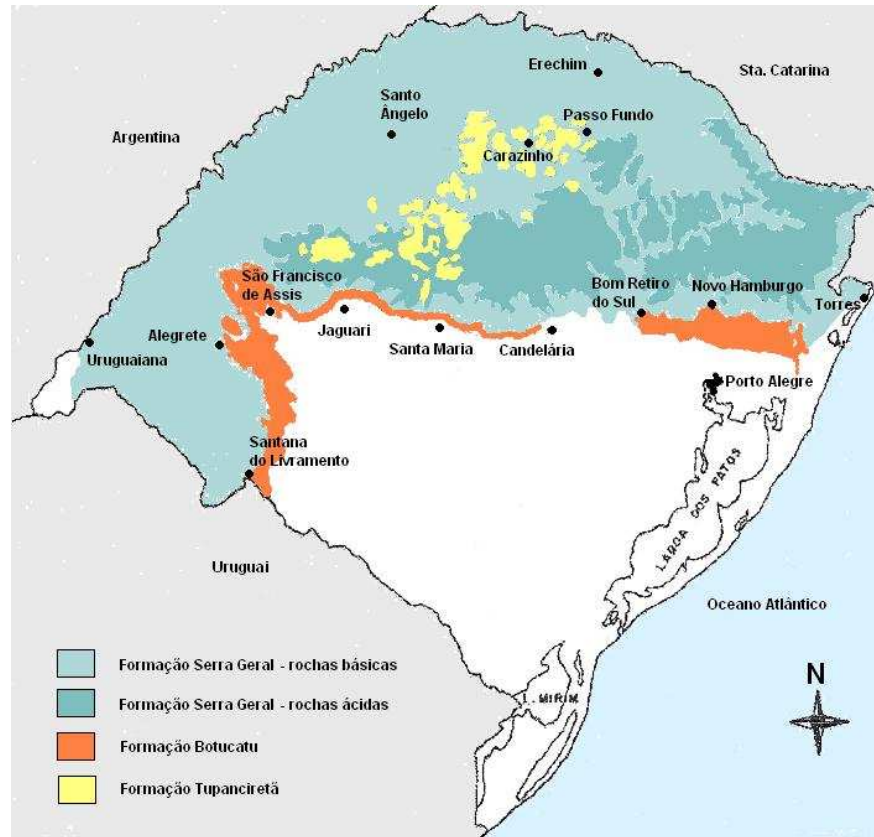


Figura 3.4 – Formações geológicas ao norte do estado do RS (adaptado de IBGE, 1986)

Além da existência de trabalhos prévios, a escolha deste solo se deu por três fatores básicos: é um solo que cobre uma extensa área do território do Rio Grande do Sul sob regiões de relevante importância econômica; possui algumas características como erodibilidade e baixa capacidade de suporte, fazendo deste um material que necessita de algum tipo de adequação ou melhoria para emprego sob condições mais severas do ponto de vista de engenharia; por sua uniformidade de características físicas e boa trabalhabilidade em laboratório.

A jazida, de onde foi coletada a amostra, situa-se às margens da rodovia estadual RS- 240, na localidade de Vila Scharlau, município de São Leopoldo no Rio Grande do Sul (Figura 3.5).

Núñez (1991) realizou uma ampla caracterização físico-química e mineralógica do arenito Botucatu. Na Tabela 3.2 são apresentadas as características mineralógicas e físico-químicas do solo residual de arenito Botucatu.





Figura 3.5 – Talude onde foi retirada a amostra de solo

Tabela 3.2 – Propriedades físico-químicas do solo residual de arenito Botucatu (Núñez, 1991)

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 <sub>2</sub>	9,70%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,69%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,21%
Análise Físico-Química do Solo	pH	4,70%
	Matéria Orgânica	0,00%

Na Figura 3.6 é apresentada a curva granulométrica obtida em Foppa (2005) das amostras utilizadas para os ensaios.

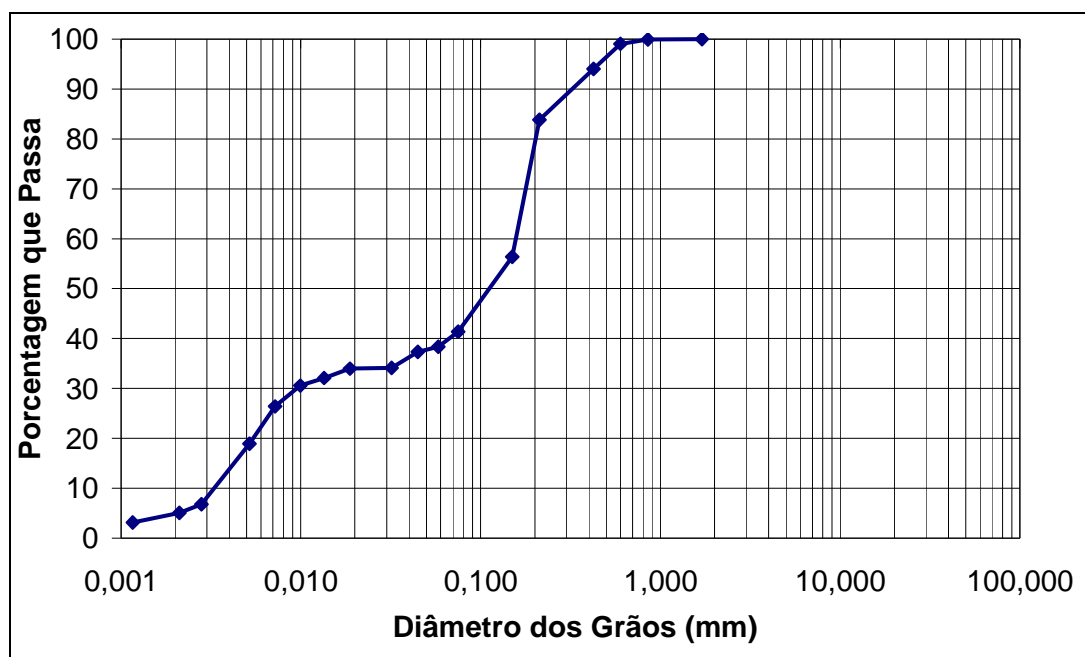


Figura 3.6 – Curva granulométrica da amostra de solo (Foppa, 2005)

As frações granulométricas, bem como, os demais resultados obtidos dos ensaios de caracterização realizados por Foppa (2005) estão na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Propriedades físicas da amostra de arenito Botucatu (Foppa, 2005)

Propriedades	Valores	Norma seguida para classificação e/ou ensaio	Observações
Limite de Liquidez (LL)	23%	NBR 6459/84	-
Limite de Plasticidade (LP)	13%	NBR 7180/84	-
Índice de Plasticidade (IP)	10%	-	-
Densidade Real dos Grãos (G)	2,64	NBR 6508/84	Média de 3 determinações
% de Areia Média ( $0,2 < \phi < 0,6$ mm)	16,2	NBR 6502/95	Com uso de defloculante
% de Areia Fina ( $0,06 < \phi < 0,2$ mm)	45,4		
% de Silte ( $0,002 < \phi < 0,06$ mm)	33,4		
% de Argila ( $\phi < 0,002$ mm)	5,0		
Diâmetro Efetivo ( $D_{10}$ )	0,0032 mm	NBR 6502/95	-
Coefficiente de Uniformidade ( $C_u$ )	50	NBR 6502/95	-

Os resultados dos ensaios de compactação da amostra de solo utilizada estão plotados na Figura 3.7. Pode-se observar as curvas de compactação obtidas por Foppa (2005) para as energias normal, intermediária e modificada do ensaio de Proctor, bem como as curvas de 100% e 89% de saturação.



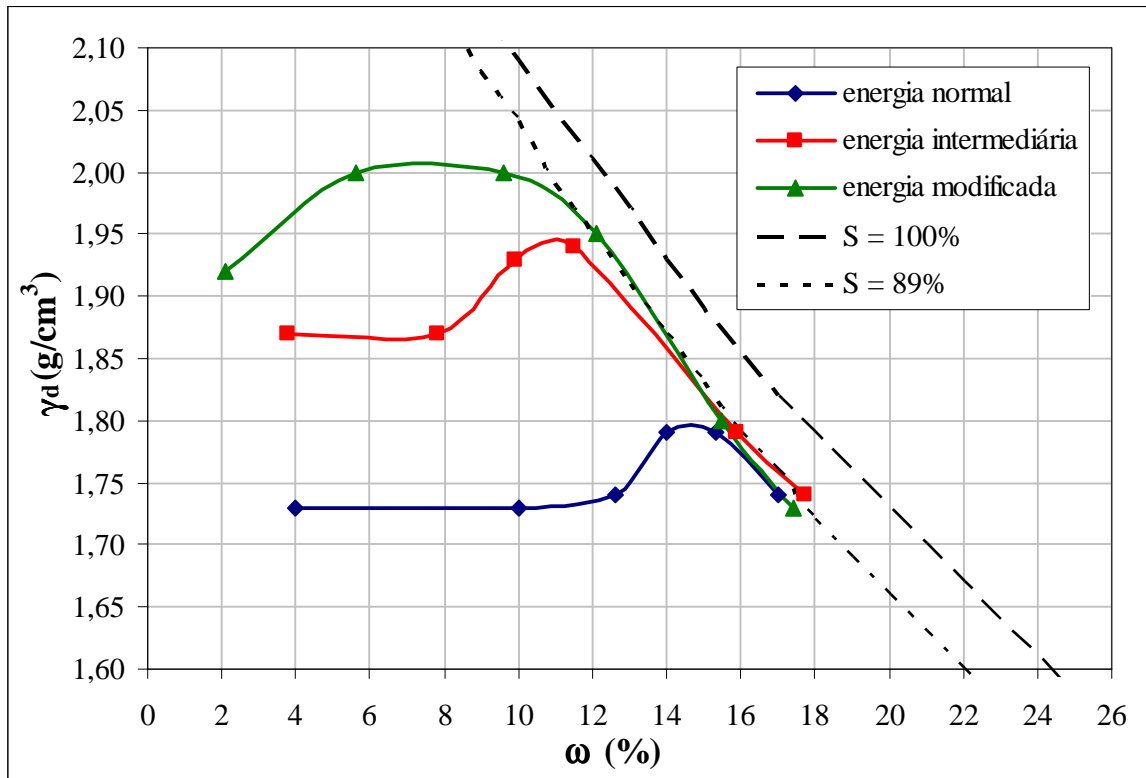


Figura 3.7 – Curvas de compactação do solo residual de arenito Botucatu (Foppa, 2005)

### 3.3.2 Cinza Volante

O resíduo utilizado nesta pesquisa é a cinza volante proveniente do processo da queima do carvão mineral em usinas termelétricas. Os principais estados produtores de cinza volante no Brasil são o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, sendo que no Rio Grande do Sul, as principais fontes produtoras de cinza volante são as termelétricas de Candiota e Charqueadas. Do ponto de vista ambiental, o emprego da cinza volante é extremamente conveniente, sendo que a preocupação com o destino dos resíduos provenientes de qualquer tipo de indústria é alvo de inúmeros trabalhos e pesquisas na atualidade.

Carraro (1997) estudou o reaproveitamento de cinza volante e cal de carbureto na estabilização de um solo arenoso, observando que os novos materiais constituídos pelas misturas entre o solo e os resíduos apresentaram desempenho bastante superior em termos de resistência ao cisalhamento e deformabilidade.

Cinzas provenientes da incineração de resíduos sólidos municipais também têm sido estudadas para usos como agentes estabilizantes de solos e em camadas de cobertura de

rejeitos (Lee *et al*, 1996), sendo que misturas contendo esse material têm-se constituído em alternativas tecnicamente viáveis para essas aplicações uma vez que suas características físicas e químicas são bastante semelhantes àquelas das cinzas volantes.

A cinza volante utilizada nesta pesquisa é oriunda da Usina Termelétrica Charqueadas (Figura 3.8a), a qual pertence à Companhia Tractebel Energia SUEZ, localizada no município de Charqueadas no Estado do Rio Grande do Sul. O combustível utilizado na sua operação é o carvão mineral, sendo que a cinza volante oriunda desse processo possui coloração cinza e textura fina (Figura 3.8b), possuindo propriedades pozolânicas e sendo praticamente sílica amorfa. Segundo a companhia, a produção média anual de cinza volante é de 100.000 a 150.000 toneladas, sendo totalmente vendida para as cimenteiras Votoran e Cimpor.



Figura 3.8a – Usina Termelétrica de Charqueadas-RS



Figura 3.8b – Cinza volante da Usina Termelétrica de Charqueadas-RS

A seguir são apresentadas algumas propriedades físicas da cinza volante. Na Figura 3.9 é apresentada a curva granulométrica da cinza volante obtida com uso de defloculante.

Na Tabela 3.4 são apresentadas as frações granulométricas, bem como, os demais resultados obtidos dos ensaios de caracterização da cinza volante.

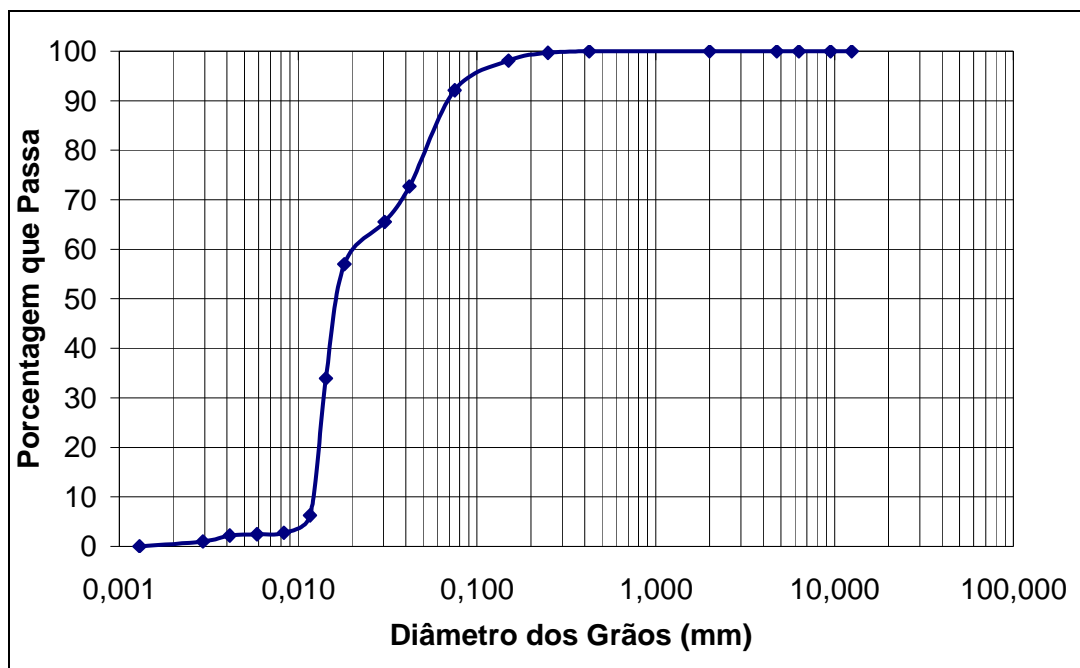


Figura 3.9 – Curva granulométrica da amostra de cinza volante

Tabela 3.4 – Propriedades físicas da amostra de cinza volante

Propriedades	Valores	Norma seguida para classificação e/ou ensaio	Observações
Limite de Liquidez (LL)	-	NBR 6459/84	-
Limite de Plasticidade (LP)	-	NBR 7180/84	-
Índice de Plasticidade (IP)	Não-plástico	-	-
Densidade Real dos Grãos (G)	2,28	NBR 6508/84	-
% de Areia Média ( $0,2 < \varnothing < 0,6$ mm)	1,0	NBR 6502/95	Com uso de defloculante
% de Areia Fina ( $0,06 < \varnothing < 0,2$ mm)	7,0		
% de Silte ( $0,002 < \varnothing < 0,06$ mm)	90,0		
% de Argila ( $\varnothing < 0,002$ mm)	2,0		
Diâmetro Efetivo ( $D_{10}$ )	0,012 mm	NBR 6502/95	-
Coefficiente de Uniformidade ( $C_u$ )	2	NBR 6502/95	-

### 3.3.3 Cal

A cal utilizada no trabalho é uma cal hidratada dolomítica, comercialmente chamada de “Primor Extra”, produzida na cidade de Caçapava do Sul - RS. A Tabela 3.5 apresenta os resultados de ensaios de caracterização da cal utilizada, fornecida pelo fabricante, comparando com as exigências da NBR 7175.

Tabela 3.5 – Caracterização da cal utilizada

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

\*Dados do fabricante

Os ensaios de massa específica da cal seguiram as recomendações da NBR NM 23/2001. Obteve-se, a partir de três determinações o valor médio de 2,49 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.3.4 Água

A água utilizada para a moldagem dos corpos-de-prova é a água potável proveniente da rede de abastecimento pública. Já para os ensaios de caracterização utilizou-se água destilada quando especificada pela respectiva norma.

## 3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

### 3.4.1 Dosagem das misturas

#### 3.4.1.1 Definição dos teores de cal

As porcentagens (3% a 9%) foram definidas a partir do método do ICL (Rogers *et al*, 1997) de dosagem para solo-cal, sendo que as porcentagens definidas estão de acordo com a experiência brasileira e internacional com o solo-cal, tanto em nível experimental quanto em aplicações diversas como, por exemplo, em rodovias.

Os resultados de dosagem da cal pelo método do ICL para as misturas contendo 0% de cinza volante e 25% de cinza volante são observados nas Figuras 3.10a e 3.10b, demonstrando que as misturas adquirem pH constante com a adição de 3% de cal.

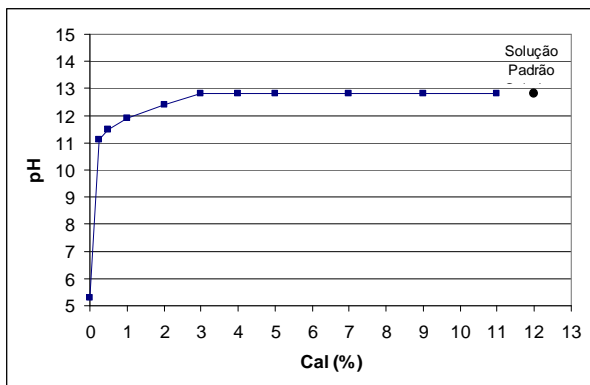


Figura 3.10a – Dosagem da cal pelo método do ICL para a mistura com 0% de cinza volante

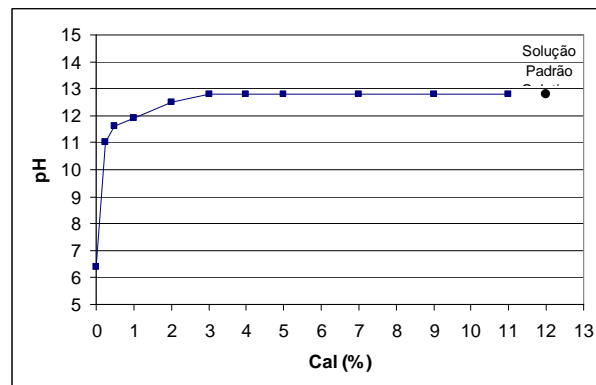


Figura 3.10b – Dosagem da cal pelo método do ICL para a mistura com 25% de cinza volante

#### 3.4.1.2 Definição da quantidade de cinza volante

Conforme o TRB (1976) a proporção selecionada para os materiais numa mistura solo-cinza-cal deve garantir que essa mistura: (1) apresente resistência e durabilidade adequadas ao seu propósito de utilização; (2) seja de fácil manuseio e compactação; e (3) seja econômica. A escolha do teor de cal + cinza volante a ser adotado numa mistura solo-cinza-cal depende de muitas variáveis, mas, geralmente, varia de 12% a 30%. Solos finos geralmente requerem maiores percentagens de cal + cinza volante, ao passo que os requerimentos para agregados bem graduados situam-se no limite inferior da faixa anteriormente citada. Além disso, materiais mal graduados que apresentam menor diâmetro máximo dos grãos necessitam de quantidades de cal + cinza volante substancialmente maiores do que aqueles melhor graduados com maior diâmetro máximo. No trabalho realizado por Carraro (1997) sobre solo-cinza-cal, o teor ótimo de cinza utilizado nas misturas foi de 25% da massa de solo.

Para estabelecer a quantidade de cinza volante a ser utilizado nas misturas inicialmente foram levadas em consideração, além dos resultados apresentados por Carraro (1997), as seguintes propriedades físicas:

- Granulometria dos materiais (estabilização granulométrica);
- Trabalhabilidade (fácil manuseio e compactação).

Em virtude dessas considerações, adotou-se os teores de 0%, 12,5% e 25% para a definição da quantidade de cinza volante nas misturas estudadas. A Figura 3.11 apresenta a comparação

entre as curvas granulométricas (obtidas com a utilização de defloculante) do solo natural e da cinza volante.

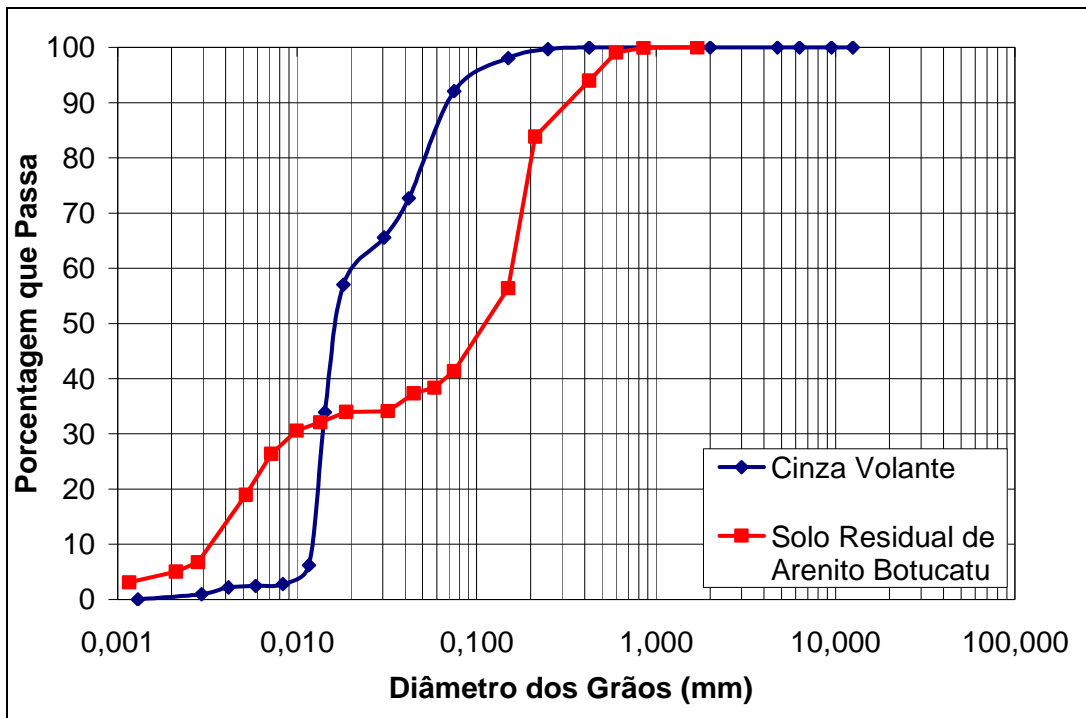


Figura 3.11 – Comparação entre as curvas granulométricas do solo natural e da cinza volante (com defloculante)

### 3.4.2 Programa de Ensaios

O programa de ensaios de compressão simples constituiu a principal etapa desta pesquisa e tem por objetivo avaliar a influência das variáveis: quantidade de cinza volante, quantidade de cal, porosidade, tempo de cura e relação vazios/cal sobre a resistência mecânica de um solo tratado com cal e cinza volante. Para que seja possível a mensuração da influência de uma variável isoladamente é necessário que as outras variáveis sejam mantidas constantes.

Para isto foi elaborado o programa de ensaios apresentado na Figura 3.12. Nela pode-se observar as curvas de compactação para o solo com 0% de cinza volante e para o solo com 50% de cinza volante para a energia modificada, os pontos de moldagem dos corpos-de-prova e as curvas de saturação de 100% e 89% do solo com 0% de cinza volante.

A porcentagem de 50% de cinza volante era a maior porcentagem inicial do programa experimental, sendo que posteriormente a maior porcentagem utilizada foi de 25% de cinza

volante, como foi visto anteriormente. O valor inicial foi alterado porque não foi possível moldar corpos-de-prova de 50% de cinza volante com massa específica aparente seca de 1,6 e 1,7 g/cm<sup>3</sup>, pelo fato desses valores ultrapassarem a sua curva de compactação, como pode ser observado na Figura 3.12.

Observa-se que os pontos de moldagem foram posicionados em uma linha vertical (pontos: A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> e A<sub>4</sub>), denominada linha “A”, com um mesmo teor de umidade e diferentes massas específicas aparentes secas. A Tabela 3.6 apresenta os pares massa específica aparente seca e teor de umidade para todos os pontos do programa de ensaios.

A posição dos pontos de moldagem foi estabelecida de modo que estes ficassem compreendidos dentro de uma faixa de massas específicas aparentes secas e teores de umidade exequíveis numa situação de campo. Cada ponto da linha “A”, foi moldado com 3 diferentes porcentagens de cinza volante (0%, 12,5%, 25%), com 4 diferentes porcentagens de cal (3%, 5%, 7% e 9%) e com 3 diferentes tempos de cura (28, 60 e 90 dias).

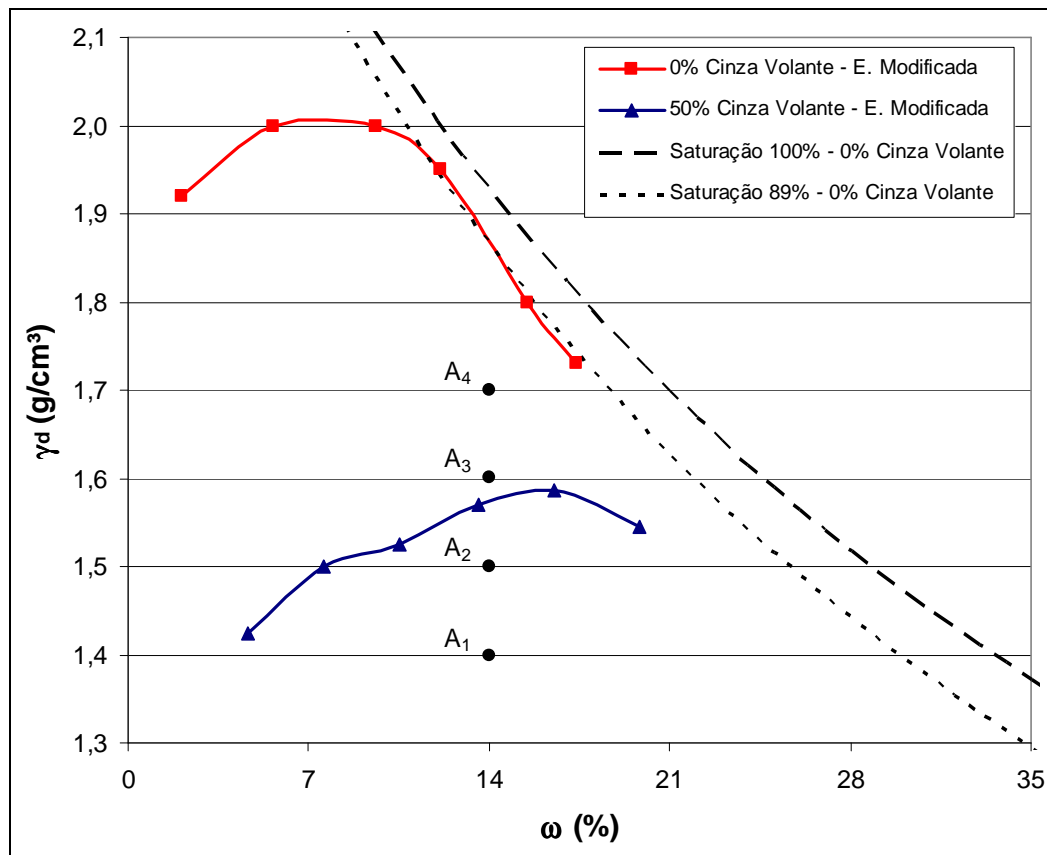


Figura 3.12 – Programa de ensaios de compressão simples

Tabela 3.6 – Pontos de moldagem

Ponto	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)
A <sub>1</sub>	1,40	14,0
A <sub>2</sub>	1,50	14,0
A <sub>3</sub>	1,60	14,0
A <sub>4</sub>	1,70	14,0

### 3.4.3 Definição do Tempo de Cura

O tempo de cura foi definido a partir do tempo hábil para analisar a resistência à compressão simples de misturas solo-cinza-cal e também do tempo necessário para que as reações químicas dessas misturas ocorrem. Assim, com os tempos de cura de 28, 60 e 90 dias, são obtidos resultados relevantes de resistência à compressão simples para o solo estabilizado com cal e cinza volante.

### 3.4.4 Método de Avaliação da Influência dos Fatores Controláveis

Para avaliar a influência dos fatores controláveis foi realizado um projeto fatorial completo onde todos os fatores controláveis foram variados e todas as combinações entre eles foram realizadas. Assim, cada ponto da linha “A” (Figura 3.12) foi moldado com diferentes níveis de cal (3%, 5%, 7% e 9%), com diferentes níveis de cinza volante (0%, 12,5% e 25%) e diferentes níveis de tempo de cura (28, 60 e 90 dias).

A partir da avaliação da influência dos fatores controláveis verificou-se a adequação da relação vazios/cal ( $V_v/V_{ca}$ ) na estimativa da resistência à compressão simples destas misturas. Neste trabalho foi adotado, em primeira instância, como definição da relação vazios/cal a expressão utilizada por Lopes Junior (2007):  $V_v/V_{ca}$ , onde  $V_v$  é o volume absoluto de vazios (água + ar) e  $V_{ca}$  é o volume absoluto de cal.



## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

As Tabelas A.1 a A7 do apêndice “A”, apresentam as características de todos os corpos-de-prova ensaiados à compressão simples, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. Os corpos-de-prova contendo 0% de cinza volante ensaiados com 28 e 60 dias de cura da linha vertical “A” não sobreviveram à imersão, e portanto não foi possível verificar a resistência à compressão simples dessas amostras, porém, os corpos-de-prova com 90 dias de cura são apresentados na Tabela A.1. Os corpos-de-prova contendo 12,5% de cinza volante ensaiados com 28 dias de cura da linha vertical “A”, do programa de ensaios, são apresentados na tabela A.2, os corpos-de-prova com 60 dias de cura são apresentados na Tabela A.3 e os corpos-de-prova com 90 dias de cura são apresentados na Tabela A.4. Os corpos-de-prova contendo 25% de cinza volante ensaiados com 28 dias de cura da linha vertical “A”, do programa de ensaios, são apresentados na tabela A.5, os corpos-de-prova com 60 dias de cura são apresentados na Tabela A.6 e os corpos-de-prova com 90 dias de cura são apresentados na Tabela A.7. Pode-se observar nestas tabelas que os dados foram agrupados a cada três linhas pois correspondem às três repetições para um mesmo ponto de moldagem (mesmo teor de umidade, porosidade, teor de cal e teor de cinza volante).

#### 4.1.1 Amostras com 0% de Cinza Volante

A partir dos dados constantes na Tabelas A.1, foram elaboradas as Figuras 4.1 a 4.3, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento do solo-cal em estudo são evidenciados.

Na Figura 4.1, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal para 90 dias de cura. Cada curva, isoladamente,

possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega=14\%$ ).

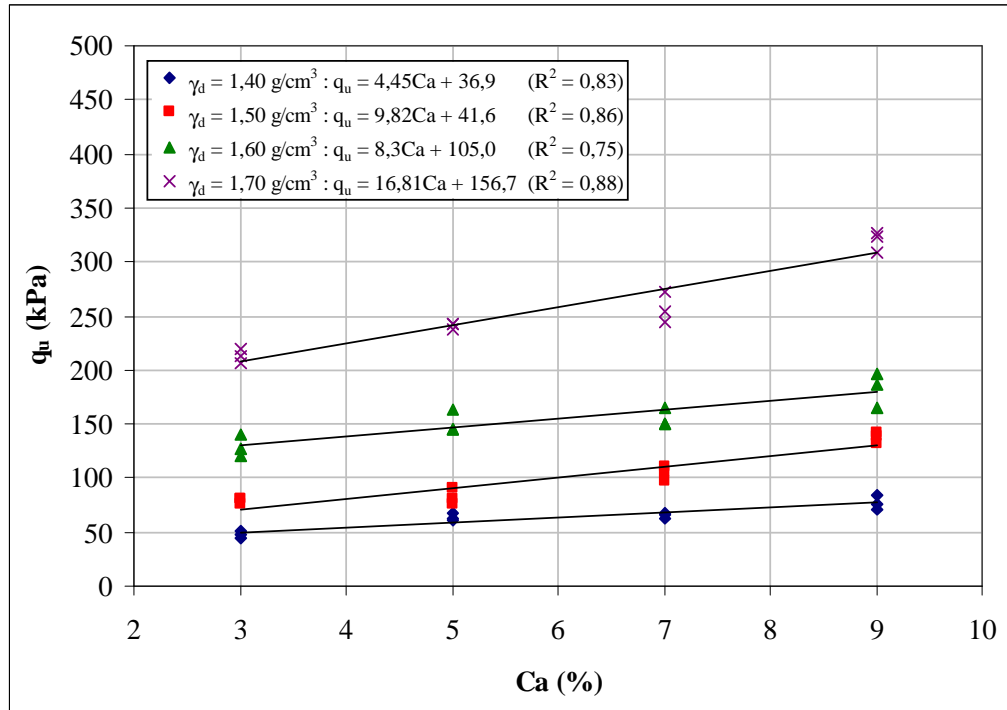


Figura 4.1 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Na Figura 4.1 verifica-se que, para as amostras ensaiadas com 90 dias de cura, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cal na faixa de teores estudados. Mesmo pequenas adições de cal são suficientes para gerar ganhos de resistência. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a resistência à compressão simples acresceu, em média, 55%.

Na Figura 4.2, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade do solo-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 90 dias de cura. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega=14\%$ ).

Na Figura 4.2 verifica-se, para as amostras ensaiadas com 90 dias de cura que, de maneira similar à quantidade de cal, a redução na porosidade da mistura compactada promove o aumento da resistência à compressão simples do solo-cal. Independentemente da quantidade

de cal utilizado, a redução na porosidade promove ganhos de resistência no material. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou em 4,1 vezes a resistência à compressão simples do solo-cal testado para 90 dias de cura, respectivamente.

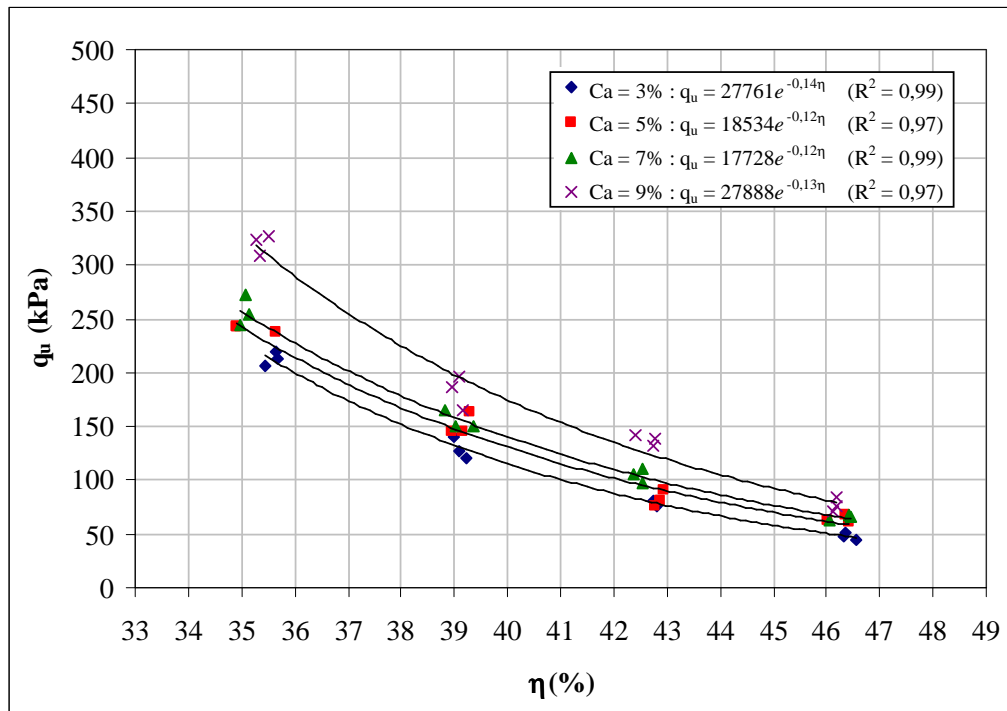


Figura 4.2 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Pode-se observar também, que a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

Na figura 4.3 é apresentada a variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cal dos corpos-de-prova com 0% de cinza volante com 90 dias de cura, ajustados pela potência 0,12 (que será explicada no capítulo 5), tendo como base a definição apresentada por Lopes Junior (2007):

$$\frac{V_v}{V_{ca}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (água + ar)}}{\text{Volume absoluto de cal}}$$

Todos os corpos de prova apresentados na figura 4.3 possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega=14\%$ ) e o mesmo teor de cinza volante (0%), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

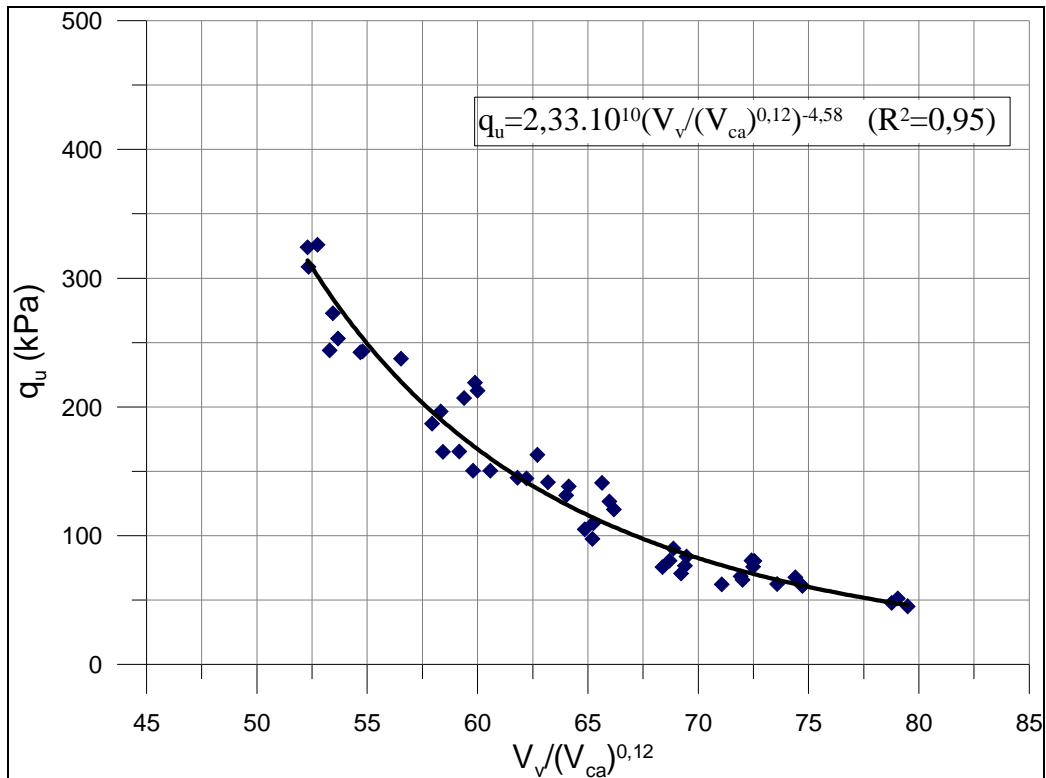


Figura 4.3 – Relação entre vazios/cal e resistência à compressão simples ajustados das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Pode-se observar uma razoável correlação entre o volume de vazios/volume de cal ajustados e a resistência à compressão simples do solo-cal compactado em estudo. Foi utilizado no ajuste curva tipo potência, a qual apresentou melhores coeficientes de correlação  $R^2$ .

A figura 4.3, será discutida e analisada com maior detalhe no capítulo 5.

#### 4.1.2 Amostras com 12,5% de Cinza Volante

A partir dos dados constantes nas Tabelas A.2 a A.4, foram elaboradas as figuras 4.4 a 4.10, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento do solo-cinza-cal em estudo são evidenciados.

Nas Figuras 4.4 a 4.6, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal para 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega=14\%$ ).

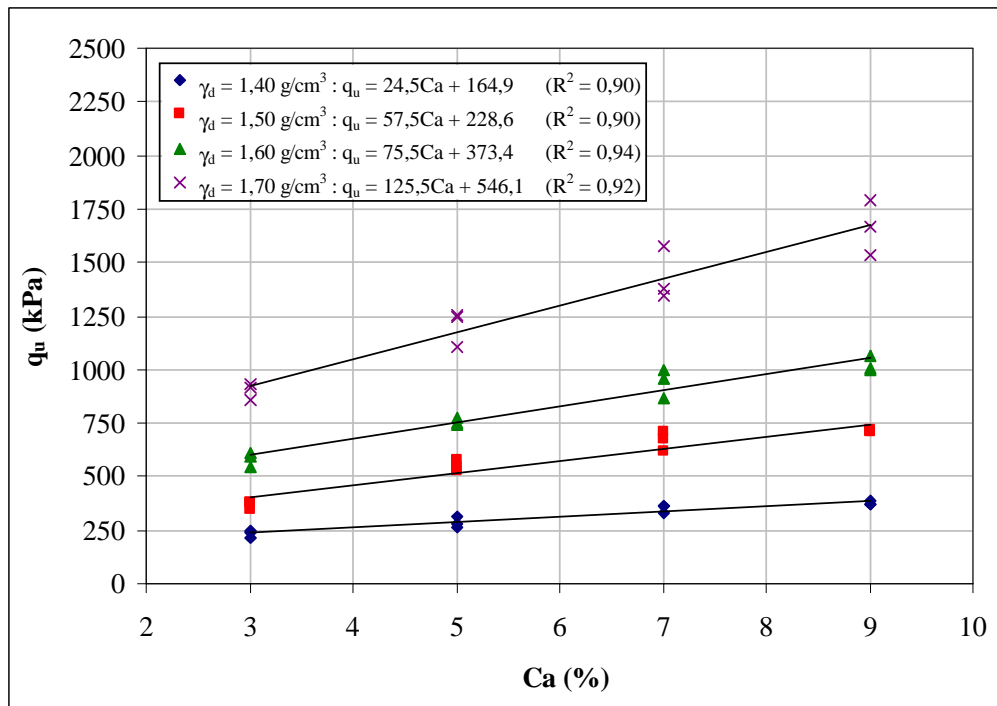


Figura 4.4 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

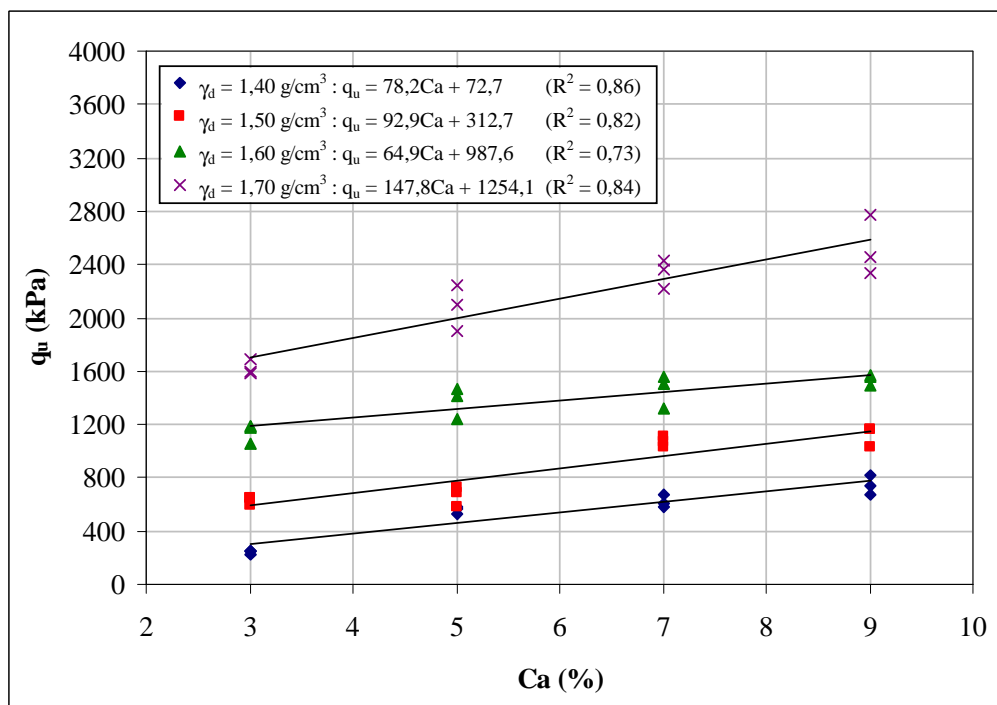


Figura 4.5 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

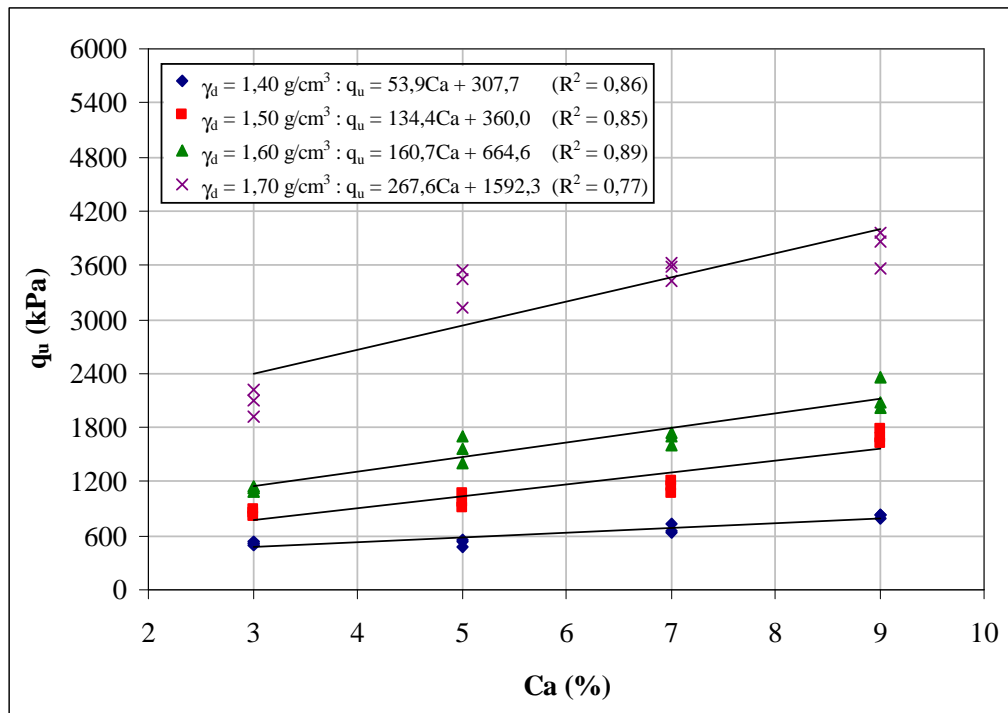


Figura 4.6 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a resistência à compressão simples do material, tanto para corpos-de-prova ensaiados a 28, 60 e 90 dias. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a resistência à compressão simples, em média, cresceu 80%, 95% e 85% para 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente. Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cal.

Nas Figuras 4.7 a 4.9, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade do solo-cinza-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega=14\%$ ).

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a resistência a compressão simples do solo-cinza-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de resistência. Em média a redução de 10 pontos percentuais

na porosidade do material aumentou em 4,1 vezes, 4,4 vezes e 5,1 vezes a resistência à compressão simples do solo-cal testado para 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente.

Pode-se observar também, que a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

Na figura 4.10 é apresentada a variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cal dos corpos-de-prova com 12,5% de cinza volante com 28, 60 e 90 dias de cura, ajustados pela potência 0,12 (que será explicada no capítulo 5), tendo como base a definição apresentada por Lopes Junior (2007):

$$\frac{V_v}{V_{ca}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (água + ar)}}{\text{Volume absoluto de cal}}$$

Todos os corpos de prova apresentados na figura 4.10 possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega=14\%$ ) e o mesmo teor de cinza volante (12,5%), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

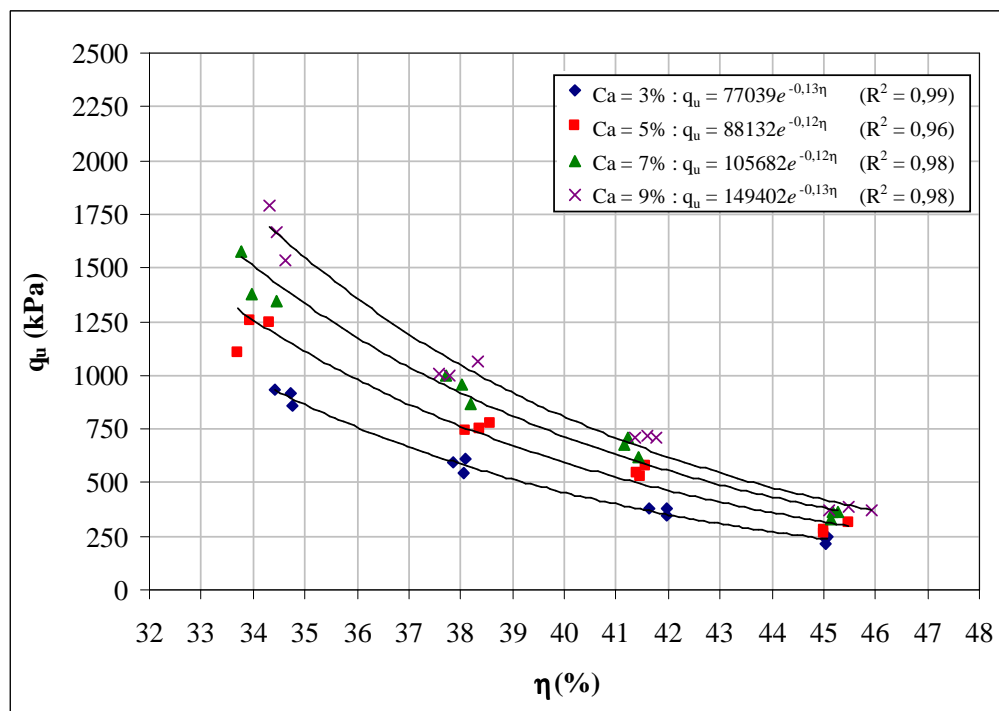


Figura 4.7 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

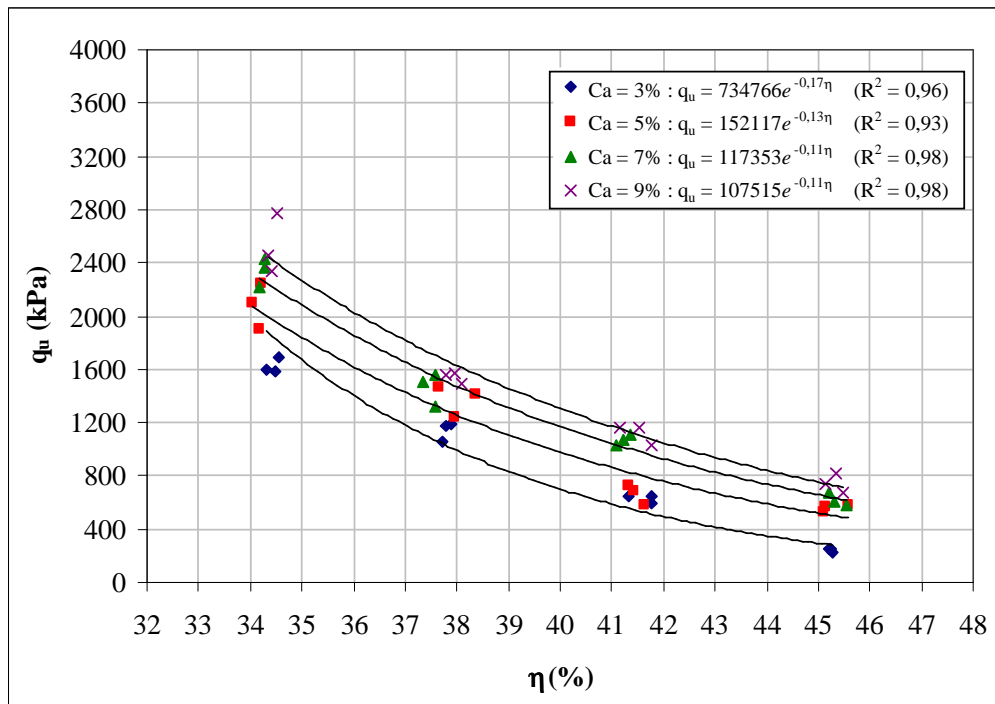


Figura 4.8 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

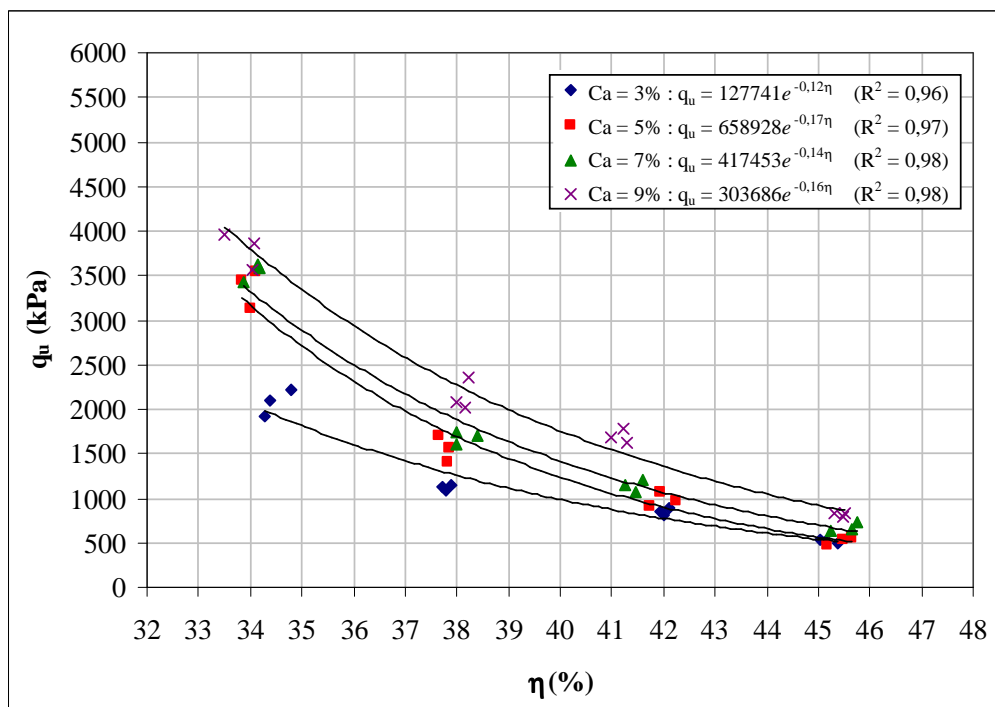


Figura 4.9 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura



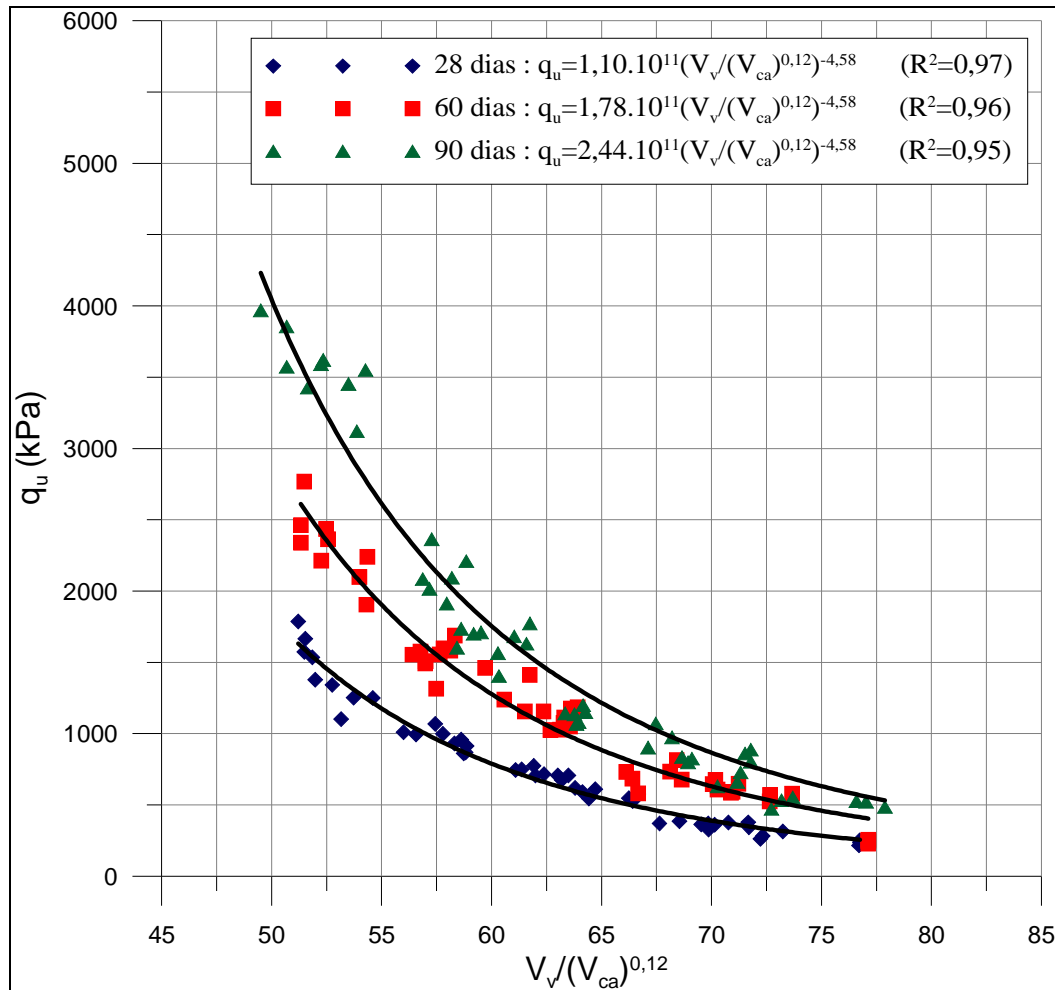


Figura 4.10 – Relação entre vazios/cal e resistência à compressão simples ajustados das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura

Pode-se observar uma razoável correlação entre o volume de vazios/volume de cal ajustados e a resistência à compressão simples do solo-cinza-cal compactado em estudo. Foi utilizado no ajuste curva tipo potência, a qual apresentou melhores coeficientes de correlação  $R^2$ .

A figura 4.10, será discutida e analisada com maior detalhe no capítulo 5.

#### 4.1.3 Amostras com 25% de Cinza Volante

A partir dos dados constantes nas Tabelas A.5 a A.7, foram elaboradas as figuras 4.11 a 4.17, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento do solo-cinza-cal em estudo são evidenciados.

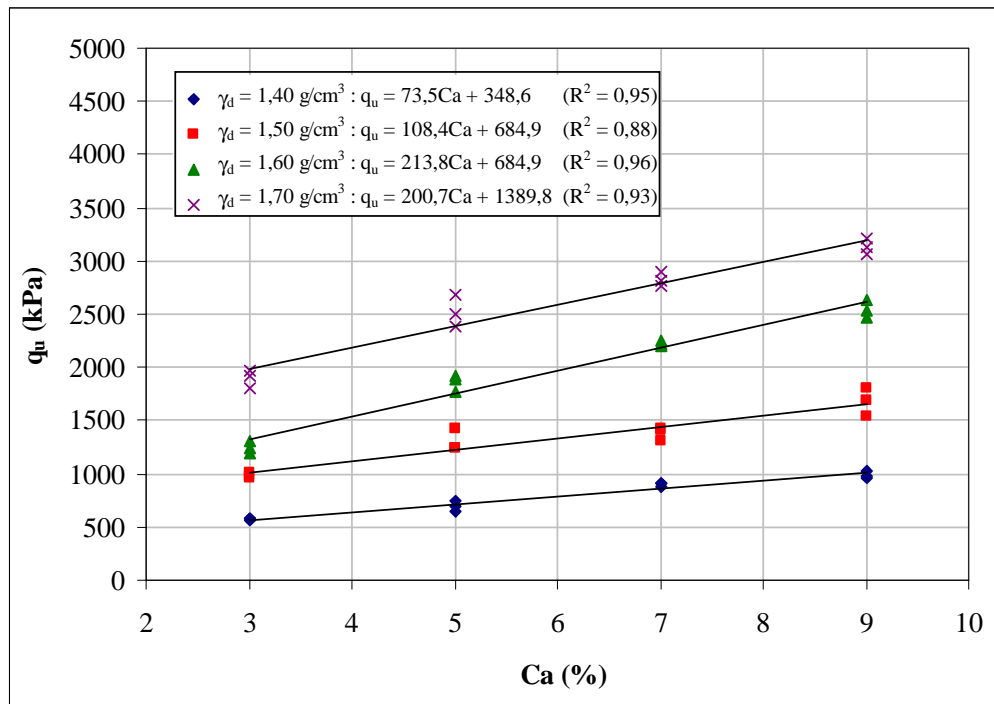


Figura 4.11 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

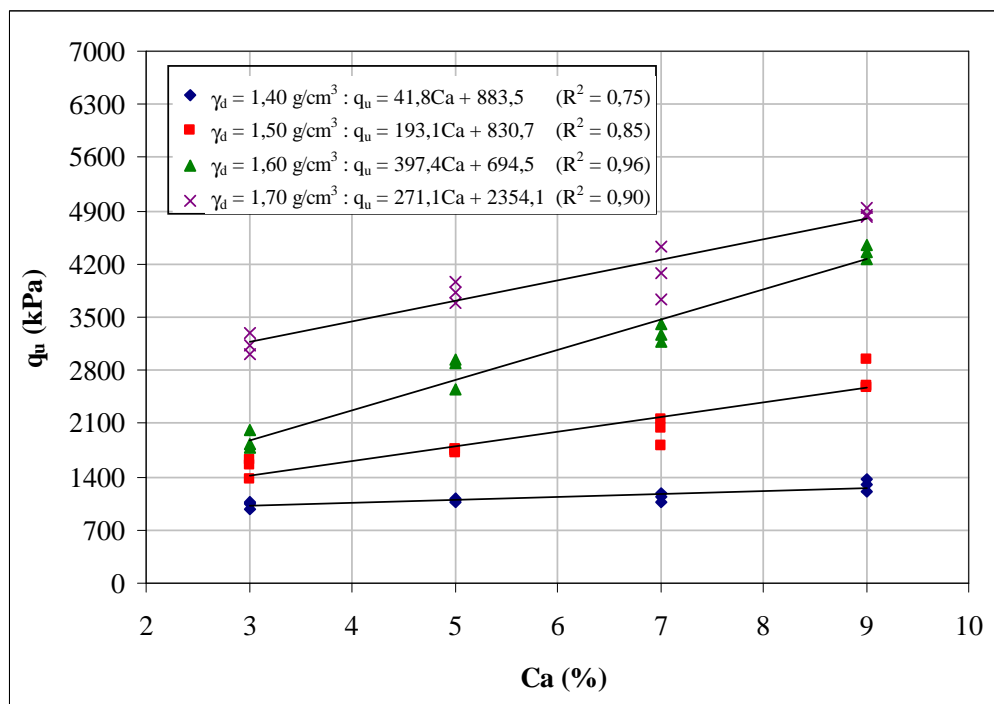


Figura 4.12 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

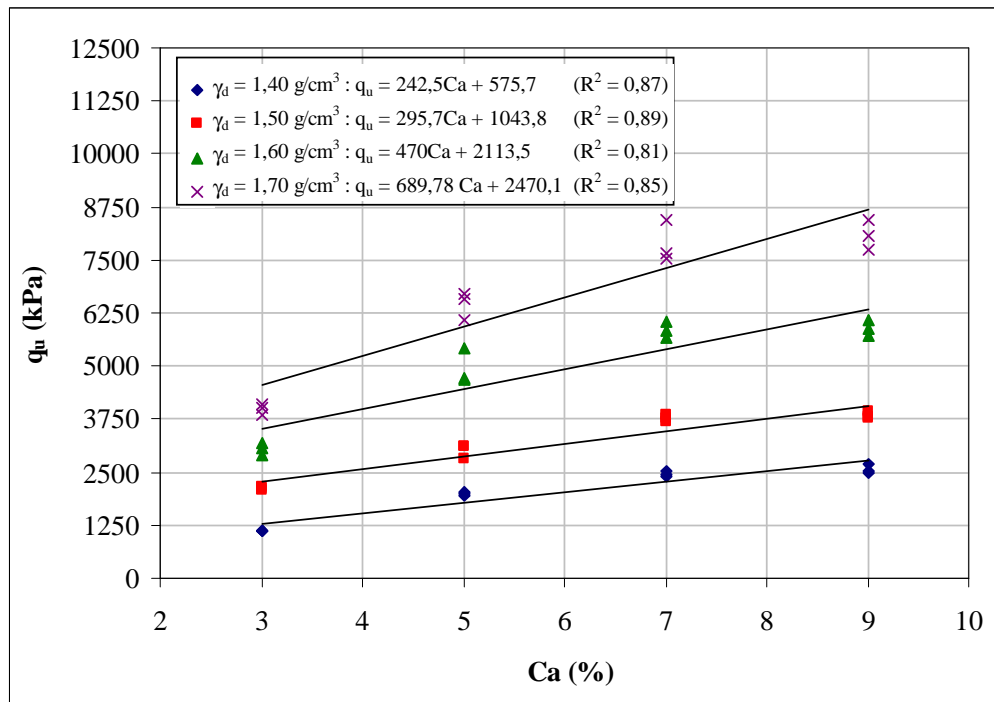


Figura 4.13 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Nas Figuras 4.11 a 4.13, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal para 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega=14\%$ ).

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a resistência à compressão simples do material, tanto para corpos-de-prova ensaiados a 28, 60 e 90 dias. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a resistência à compressão simples, em média, cresceu 80%, 75% e 102% para 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente.

Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cal. Além disso, a taxa de aumento de resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, em geral aumenta com o aumento da massa específica aparente seca.

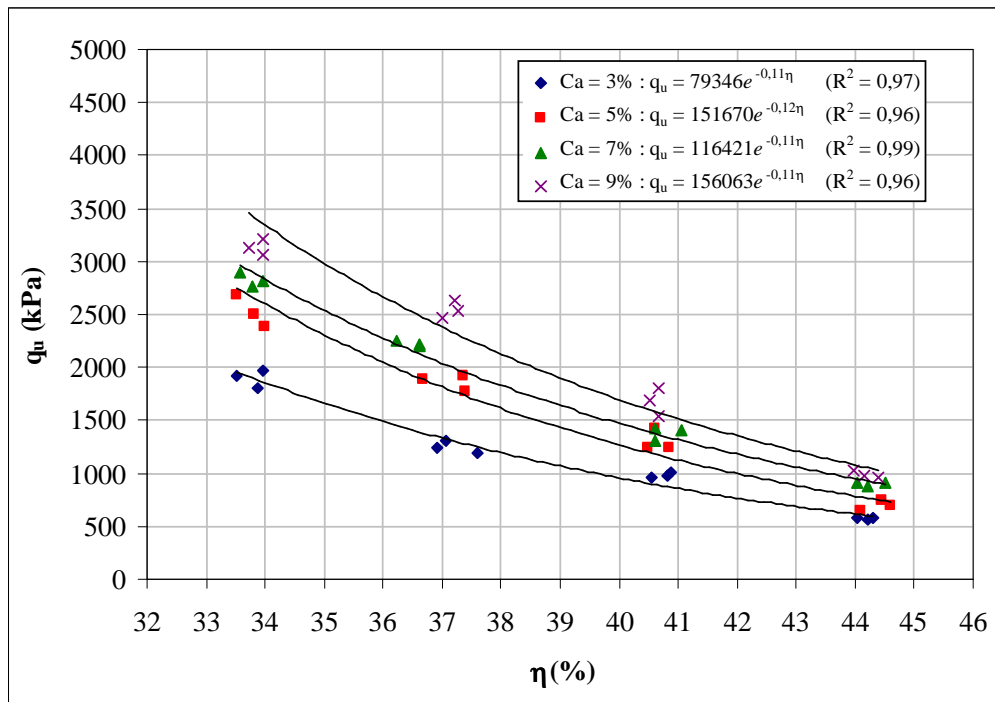


Figura 4.14 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

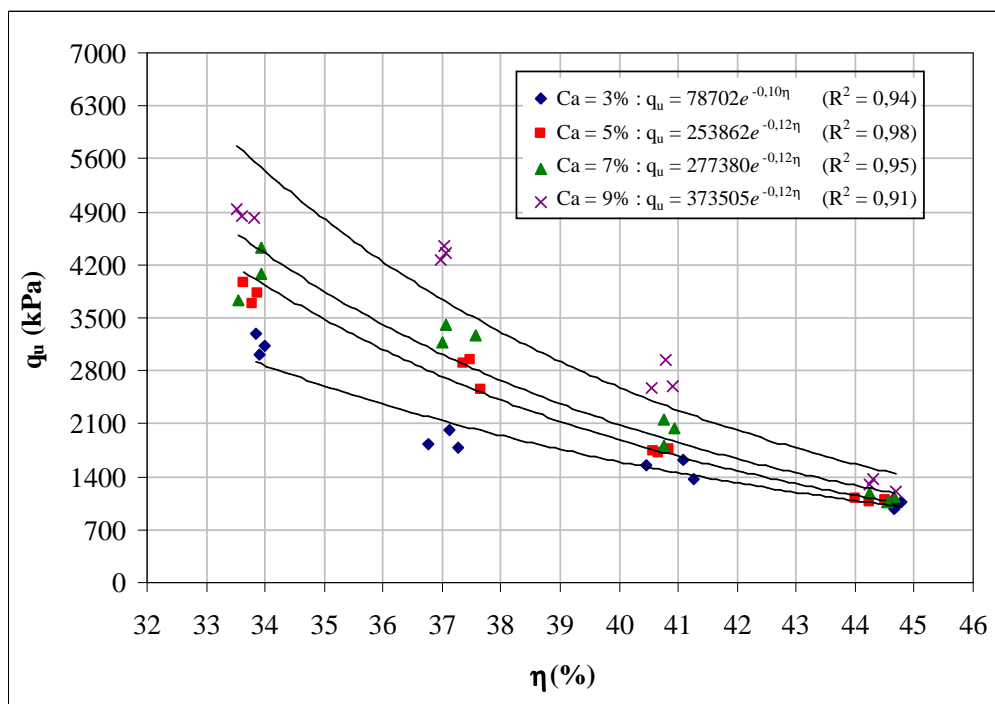


Figura 4.15 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

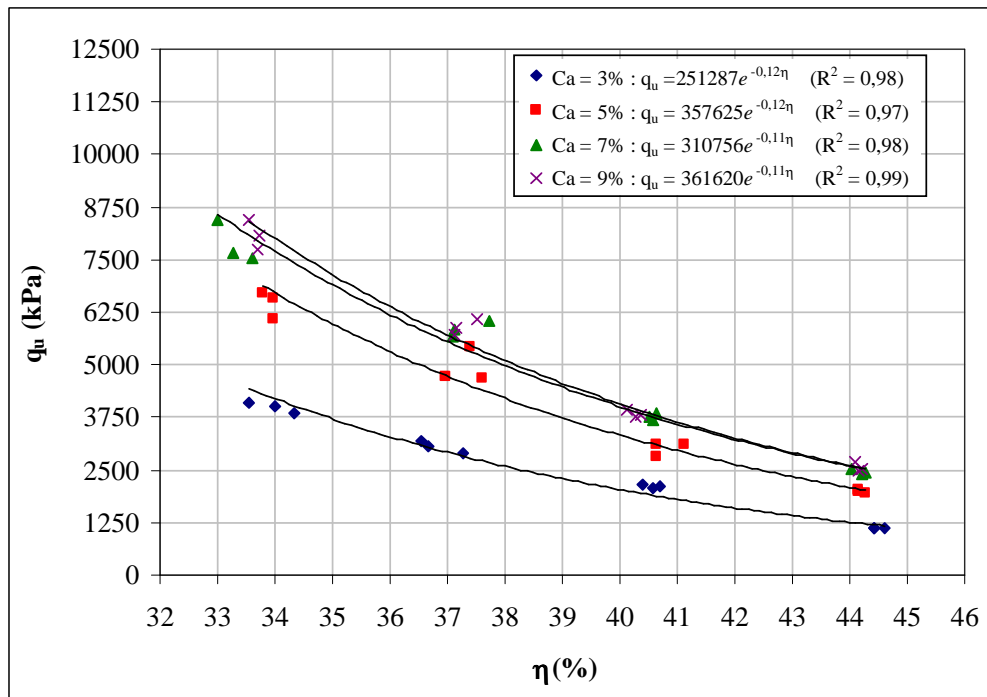


Figura 4.16 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Nas Figuras 4.14 a 4.16, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade do solo-cinza-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega=14\%$ ).

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a resistência a compressão simples do solo-cinza-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de resistência. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou em 3,3 vezes, 3,5 vezes e 3,3 vezes a resistência à compressão simples do solo-cinza-cal testado para 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente.

Pode-se observar também, que a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

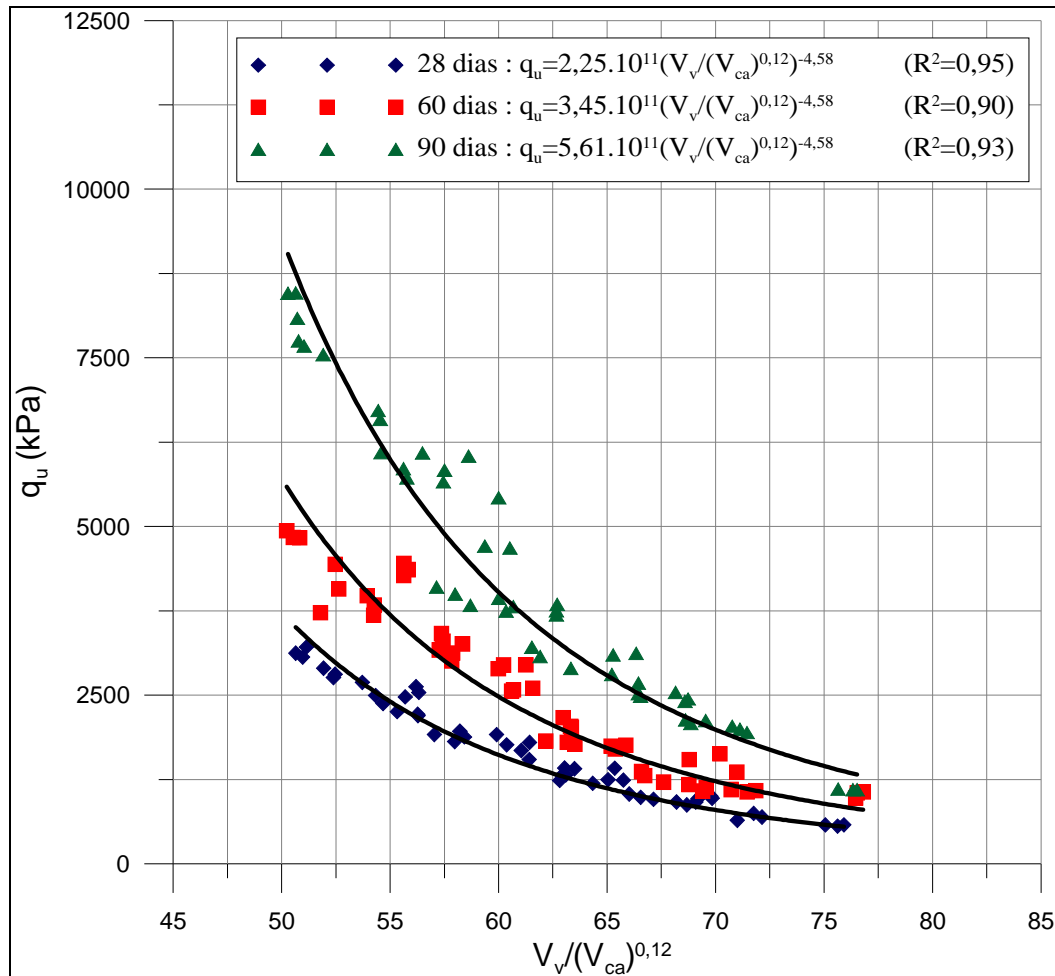


Figura 4.17 – Relação entre vazios/cal e resistência à compressão simples ajustados das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura

Na figura 4.17 é apresentada a variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cal dos corpos-de-prova com 25% de cinza volante com 28, 60 e 90 dias de cura, ajustados pela potência 0,12 (que será explicada no capítulo 5), tendo como base a definição apresentada por Lopes Junior (2007):

$$\frac{V_v}{V_{ca}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (água + ar)}}{\text{Volume absoluto de cal}}$$

Todos os corpos de prova apresentados na figura 4.21 possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega=14\%$ ) e o mesmo teor de cinza volante (25%), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

Pode-se observar uma razoável correlação entre o volume de vazios/volume de cal ajustados e a resistência à compressão simples do solo-cinza-cal compactado em estudo. Foi utilizado no ajuste curva tipo potência, a qual apresentou melhores coeficientes de correlação  $R^2$ .

A figura 4.17, será discutida e analisada com maior detalhe no capítulo 5.

#### 4.1.4 Modo de ruptura dos corpos-de-prova

A figura 4.18a mostra alguns corpos-de-prova de solo-cinza-cal submetidos à compressão simples.



Figura 4.18a – Corpos-de-prova submetidos à compressão simples



Figura 4.18b – Plano de ruptura típico

Na maioria dos ensaios de compressão simples realizados observou-se um modo de ruptura frágil com a formação de um ou mais planos de ruptura bem definidos, sendo que para os corpos-de-prova com maior porcentagem de cinza volante a ruptura foi mais frágil, ocorrendo às vezes o “estilhaçamento” do corpo-de-prova. Em geral, o ângulo formado entre o plano de ruptura e o plano onde atua a tensão principal maior foi de aproximadamente  $60^\circ$  (figura 4.18b). Não foram notadas diferenças significativas entre o tipo de ruptura apresentado por corpos-de-prova com mesma relação vazios/cal. Esse comportamento foi verificado também nos resultados obtidos por Lopes Junior (2007).

## 4.2 MEDIDAS DE SUCÇÃO MATRICIAL

Nas tabelas 4.1 a 4.7 são apresentados os resultados das medidas de sucção matricial feitas sobre os materiais estudados, onde:

$S$  = grau de saturação de moldagem;

$S_f$  = grau de saturação após a imersão do corpo-de-prova por 24 horas;

$\omega$  = teor de umidade de moldagem;

$\omega_f$  = teor de umidade após a imersão do corpo-de-prova por 24 horas;

#### 4.2.1 Amostras com 0% de Cinza Volante

Em relação à Tabela 4.1, referente aos corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura, verifica-se que o grau de saturação de moldagem variou de 39,4% até 67,8%. Após a imersão por 24 horas, os corpos-de-prova de menor índice de vazios absorveram menor quantidade de água, como era de se esperar. O grau de saturação obtido após a imersão apresentou pequena variação em relação ao índice de vazios, girando em torno de 68% para todos os corpos-de-prova. O valor médio obtido para a sucção matricial de todos os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 0% de cinza volante ficou em 14 kPa. Não foram realizados ensaios de sucção matricial para as amostras de 28 e 60 dias de cura pelo fato dessas amostras não terem sobrevivido à imersão.

A partir dos dados constantes na Tabela 4.1, foi elaborada a Figura 4.19, a qual apresenta a tendência e a relação existente entre a medida de sucção matricial e o índice de vazios. Apesar da dispersão dos pontos pode-se verificar que a sucção matricial tende a aumentar à medida que diminui o índice de vazios. A influência do índice de vazios na sucção foi verificada por Feuerharmel (2003).

Na Figura 4.20 é apresentada a variação da resistência à compressão simples pela relação entre a sucção e a resistência à compressão simples (em porcentagem). Nota-se que a influência da sucção varia de 4 a 16% da resistência à compressão simples nos corpos-de-prova já ensaiados.

Nota-se também, na figura 4.20 que a influência da sucção não passa de 10% da resistência à compressão simples em mais de 55% dos corpos-de-prova ensaiados. Entretanto, para os outros corpos-de-prova ensaiados a sucção não passa de 20% da sua resistência à compressão simples. Assim, observa-se que os corpos-de-prova não apresentaram grandes variações em relação a sucção.



Tabela 4.1 – Dados gerais das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	e	$\omega$ (%)	$\omega_f$ (%)	S (%)	$S_f$ (%)	$S_f$ médio (%)	Sucção (kPa)
A1-98 <sub>90</sub>	3,0	0,864	14,17	26,66	42,0	63,9	70,9	6
A2-111 <sub>90</sub>	3,0	0,747	14,49	24,12	49,6	69,0		6
A3-121 <sub>90</sub>	3,0	0,642	14,22	21,04	56,7	72,8		10
A4-135 <sub>90</sub>	3,0	0,554	14,45	18,56	66,8	77,9		25
A1-101 <sub>90</sub>	5,0	0,867	14,28	26,15	41,3	61,8	67,9	5
A2-113 <sub>90</sub>	5,0	0,747	14,43	24,07	48,4	67,5		12
A3-124 <sub>90</sub>	5,0	0,647	14,30	19,95	55,4	68,7		10
A4-137 <sub>90</sub>	5,0	0,536	14,49	17,56	67,8	73,6		26
A1-105 <sub>90</sub>	7,0	0,853	13,95	26,89	40,2	62,1	67,9	7
A2-116 <sub>90</sub>	7,0	0,740	14,49	23,39	48,1	65,7		6
A3-127 <sub>90</sub>	7,0	0,635	14,50	20,59	56,1	70,1		7
A4-141 <sub>90</sub>	7,0	0,538	13,60	17,82	62,1	73,6		29
A1-108 <sub>90</sub>	9,0	0,858	14,01	27,23	39,4	61,1	66,0	6
A2-120 <sub>90</sub>	9,0	0,746	14,46	22,95	46,7	63,2		11
A3-132 <sub>90</sub>	9,0	0,642	14,48	20,20	54,4	67,2		11
A4-144 <sub>90</sub>	9,0	0,545	14,20	17,96	62,8	72,6		40

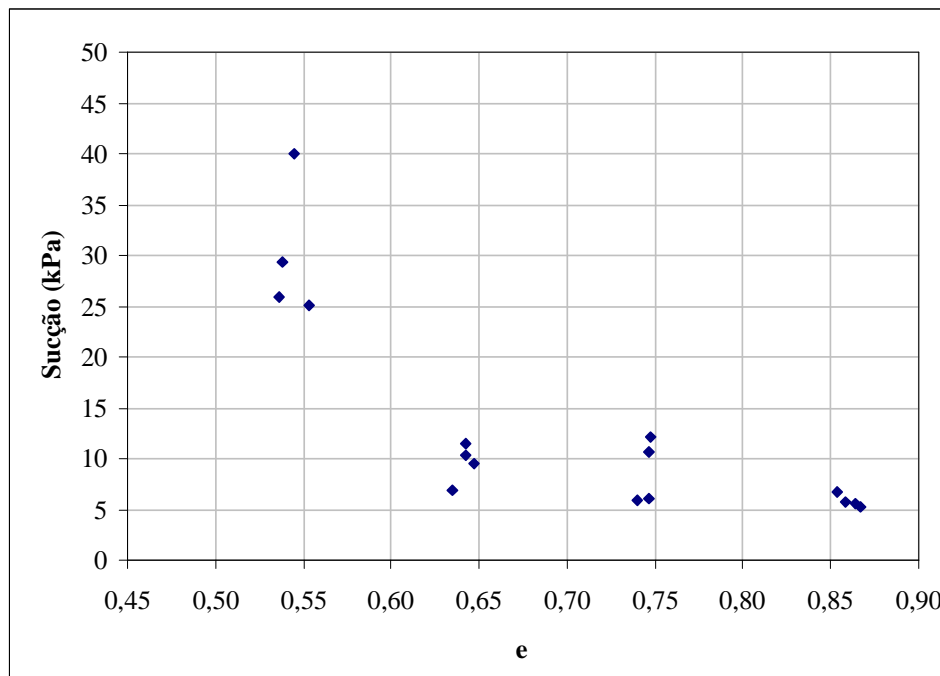


Figura 4.19 – Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nas amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

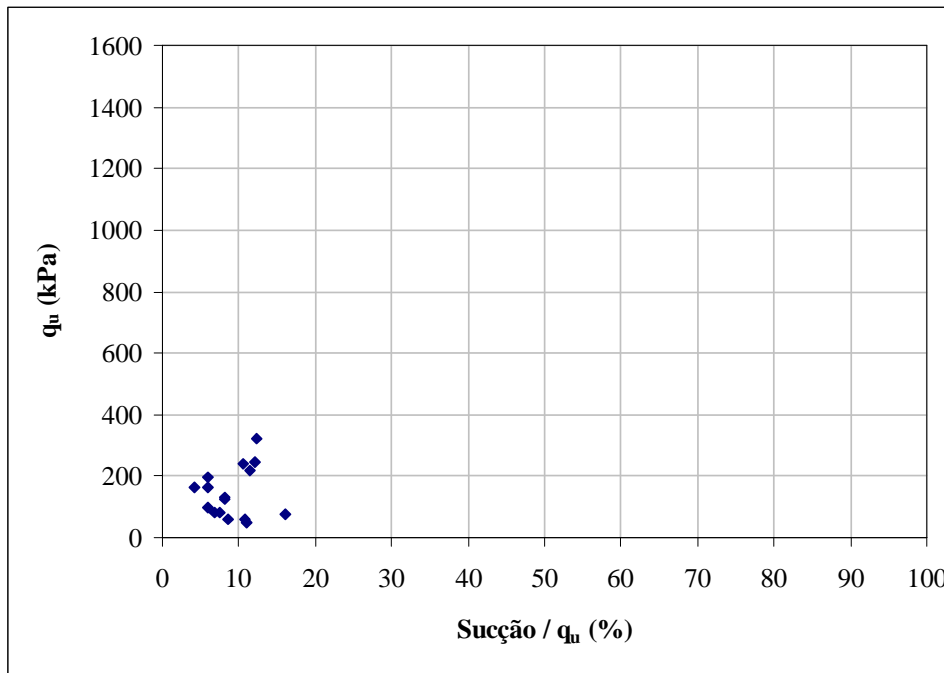


Figura 4.20 – Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

De acordo com Cruz (2001), em geral, os solos compactados próximos ao teor ótimo de umidade apresentam grau de saturação variando entre 70% e 90%, com valores de sucção compreendidos entre 0 kPa e 1000 kPa. O autor também apresenta medidas de sucção de treze solos residuais lateríticos compactados, para os quais encontrou valores de sucção variando de 30 kPa até 250 kPa. Da mesma forma, Marinho e Silva (2001) citam que a maioria dos solos compactados apresentam, no teor ótimo de umidade, sucções variando de 50 kPa a 300 kPa.

Em função do elevado grau de saturação, obtido após a imersão dos corpos-de-prova por 24 horas antes de serem submetidos à compressão simples (em média 68%), valores de sucção abaixo de 100 kPa eram esperados para todos os corpos-de-prova. Isso ocorreu para 100% das amostras. Como o processo de imersão dos corpos-de-prova por 24 horas se mostrou satisfatório no aumento e uniformização do grau de saturação das amostras, acredita-se também que os corpos-de-prova não apresentaram grandes variações na sucção, permitindo assim, desconsiderar a sucção como mais uma variável nas análises das variáveis investigadas.

#### 4.2.2 Amostras com 12,5% de Cinza Volante

As Tabelas 4.2 a 4.4, apresentam os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 12,5% de cinza volante com 28, 60 e 90 dias de cura. Verifica-se na Tabela 4.2, que o grau de saturação de moldagem das amostras com 28 dias de cura variou de 40,7% até 66,9%. Após a imersão por 24 horas, os corpos-de-prova de menor índice de vazios absorveram menor quantidade de água, como era de se esperar. Entretanto, o grau de saturação obtido após a imersão apresentou pequena variação em relação ao índice de vazios, girando em torno de 70% para todos os corpos-de-prova. O valor médio obtido para a sucção matricial de todos os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 12,5% de cinza volante e 28 dias de cura ficou em 45 kPa.

Na Tabela 4.3 são apresentadas as amostras com 60 dias de cura, onde o grau de saturação de moldagem variou de 39,5% até 67,7%. Após a imersão por 24 horas, os corpos-de-prova de menor índice de vazios absorveram menor quantidade de água, como era de se esperar. Entretanto, o grau de saturação obtido após a imersão apresentou pequena variação em relação ao índice de vazios, girando em torno de 72% para todos os corpos-de-prova. O valor médio obtido para a sucção matricial de todos os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 12,5% de cinza volante e 60 dias de cura ficou em 48 kPa.

Na Tabela 4.4 são apresentadas as amostras com 90 dias de cura, onde o grau de saturação de moldagem variou de 38,9% até 65,1%. Após a imersão por 24 horas, os corpos-de-prova de menor índice de vazios absorveram menor quantidade de água, como era de se esperar. Entretanto, o grau de saturação obtido após a imersão apresentou pequena variação em relação ao índice de vazios, girando em torno de 72% para todos os corpos-de-prova. O valor médio obtido para a sucção matricial de todos os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 12,5% de cinza volante e 90 dias de cura ficou em 52 kPa.

A partir dos dados constantes nas Tabelas 4.2 a 4.4, foi elaborada a Figura 4.21, a qual apresenta a tendência e a relação existente entre a medida de sucção matricial e o índice de vazios. Apesar da dispersão dos pontos pode-se verificar que a sucção matricial tende a aumentar à medida que diminui o índice de vazios.

Na Figura 4.22 é apresentada a variação da resistência à compressão simples pela relação entre a sucção e a resistência à compressão simples (em porcentagem). Nota-se que a

influência da sucção varia de 1 a 13% da resistência à compressão simples nos corpos-de-prova já ensaiados.

Tabela 4.2 – Dados gerais das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	e	$\omega$ (%)	$\omega_f$ (%)	S (%)	$S_f$ (%)	$S_f$ médio (%)	Sucção (kPa)
A1-145 <sub>28</sub>	3,0	0,820	13,55	26,49	41,5	64,7	73,2	18
A2-158 <sub>28</sub>	3,0	0,724	14,08	26,17	48,8	72,5		14
A3-170 <sub>28</sub>	3,0	0,616	13,77	21,71	56,2	74,8		52
A4-181 <sub>28</sub>	3,0	0,532	14,03	19,39	66,2	80,6		55
A1-149 <sub>28</sub>	5,0	0,819	13,52	27,61	40,7	65,1	69,3	8
A2-161 <sub>28</sub>	5,0	0,707	13,70	23,26	47,7	67,3		38
A3-172 <sub>28</sub>	5,0	0,622	14,50	23,24	57,3	76,6		28
A4-184 <sub>28</sub>	5,0	0,508	13,81	14,26	66,9	68,3		145
A1-153 <sub>28</sub>	7,0	0,824	14,49	26,47	42,5	63,0	68,9	14
A2-164 <sub>28</sub>	7,0	0,707	13,81	22,95	47,1	65,6		24
A3-175 <sub>28</sub>	7,0	0,614	13,72	21,86	53,9	72,4		47
A4-187 <sub>28</sub>	7,0	0,526	14,42	17,52	66,2	74,5		102
A1-155 <sub>28</sub>	9,0	0,834	14,47	27,05	41,1	61,8	68,7	13
A2-167 <sub>28</sub>	9,0	0,717	13,72	25,14	45,3	66,9		22
A3-178 <sub>28</sub>	9,0	0,608	13,52	21,24	52,7	70,1		46
A4-190 <sub>28</sub>	9,0	0,529	13,88	19,35	62,1	76,0		101

Nota-se também, na Figura 4.22 que a influência da sucção não passa de 10% da resistência à compressão simples em mais de 95% dos corpos-de-prova ensaiados. Entretanto, para os outros corpos-de-prova ensaiados a sucção não passa de 15% da sua resistência à compressão simples. Assim, observa-se que os corpos-de-prova não apresentaram grandes variações em relação a sucção.

Em função do elevado grau de saturação, obtido após a imersão dos corpos-de-prova por 24 horas antes de serem submetidos à compressão simples (em média 71%), valores de sucção abaixo de 100 kPa eram esperados para todos os corpos-de-prova. Isso ocorreu para 85% das amostras. Cogita-se que as medidas mais elevadas de sucção ocorreram, provavelmente, por problemas no procedimento experimental. Como o processo de imersão dos corpos-de-prova por 24 horas se mostrou satisfatório no aumento e uniformização do grau de saturação das amostras, acredita-se também que os corpos-de-prova não apresentaram grandes variações na sucção, permitindo assim, desconsiderar a sucção como mais uma variável nas análises das variáveis investigadas.

Tabela 4.3 – Dados gerais das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	e	$\omega$ (%)	$\omega_f$ (%)	S (%)	$S_f$ (%)	$S_f$ médio (%)	Sucção (kPa)
A1-195 <sub>60</sub>	3,0	0,826	13,88	27,13	42,2	65,6	74,2	16
A2-207 <sub>60</sub>	3,0	0,717	13,82	26,60	48,4	73,4		12
A3-217 <sub>60</sub>	3,0	0,610	14,22	22,16	58,5	77,0		30
A4-229 <sub>60</sub>	3,0	0,526	14,18	18,93	67,7	80,6		49
A1-198 <sub>60</sub>	5,0	0,823	13,52	28,37	40,4	65,8	72,6	14
A2-209 <sub>60</sub>	5,0	0,705	13,53	25,34	47,3	70,7		16
A3-221 <sub>60</sub>	5,0	0,612	14,00	21,77	56,3	74,2		28
A4-232 <sub>60</sub>	5,0	0,520	13,87	19,02	65,6	79,5		265
A1-201 <sub>60</sub>	7,0	0,826	13,52	27,47	39,5	63,1	72,1	13
A2-212 <sub>60</sub>	7,0	0,702	13,84	24,45	47,6	68,6		39
A3-224 <sub>60</sub>	7,0	0,602	13,52	22,16	54,2	80,9		43
A4-235 <sub>60</sub>	7,0	0,521	13,74	18,29	63,6	75,8		60
A1-203 <sub>60</sub>	9,0	0,829	14,04	29,46	40,1	64,8	70,1	8
A2-215 <sub>60</sub>	9,0	0,699	13,52	25,02	45,8	68,0		11
A3-226 <sub>60</sub>	9,0	0,615	14,19	22,52	54,6	72,7		29
A4-238 <sub>60</sub>	9,0	0,523	13,65	18,58	61,8	74,7		47

Tabela 4.4 – Dados gerais das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	e	$\omega$ (%)	$\omega_f$ (%)	S (%)	$S_f$ (%)	$S_f$ médio (%)	Sucção (kPa)
A1-242 <sub>90</sub>	3,0	0,822	13,53	27,54	41,3	66,0	74,2	7
A2-255 <sub>90</sub>	3,0	0,727	14,49	26,98	50,0	74,0		15
A3-267 <sub>90</sub>	3,0	0,606	13,54	21,63	56,1	75,4		27
A4-278 <sub>90</sub>	3,0	0,522	13,53	19,56	65,1	81,5		82
A1-245 <sub>90</sub>	5,0	0,834	14,39	28,18	42,4	65,7	72,2	9
A2-257 <sub>90</sub>	5,0	0,722	14,23	24,91	48,5	69,4		14
A3-268 <sub>90</sub>	5,0	0,604	14,49	21,67	59,1	75,7		29
A4-281 <sub>90</sub>	5,0	0,518	13,52	18,44	64,3	77,8		122
A1-249 <sub>90</sub>	7,0	0,827	13,68	30,35	39,9	66,9	71,8	9
A2-260 <sub>90</sub>	7,0	0,712	13,98	24,90	47,4	68,6		28
A3-271 <sub>90</sub>	7,0	0,612	13,95	22,06	54,9	73,2		110
A4-283 <sub>90</sub>	7,0	0,518	13,52	19,36	62,9	78,3		80
A1-252 <sub>90</sub>	9,0	0,834	13,71	31,55	38,9	66,6	69,9	12
A2-262 <sub>90</sub>	9,0	0,701	13,51	25,46	45,6	68,5		19
A3-275 <sub>90</sub>	9,0	0,617	14,16	21,17	54,3	70,0		67
A4-286 <sub>90</sub>	9,0	0,517	13,78	18,02	63,1	74,4		207

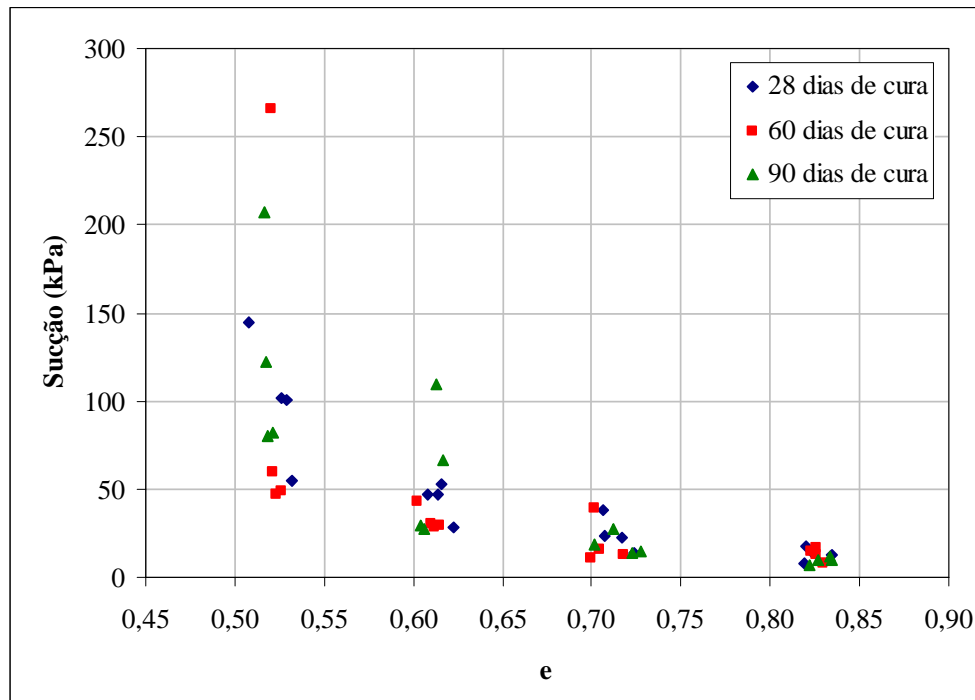


Figura 4.21 – Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nas amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura

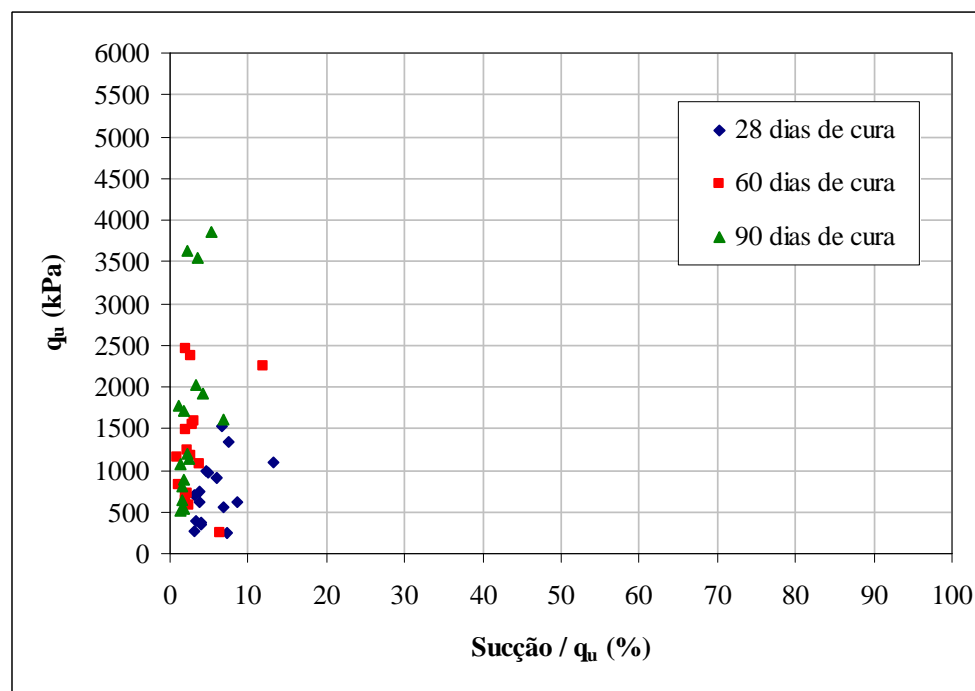


Figura 4.22 – Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura

### 4.2.3 Amostras com 25% de Cinza Volante

As Tabelas 4.5 a 4.7, apresentam os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 12,5% de cinza volante com 28, 60 e 90 dias de cura. Verifica-se na Tabela 4.5, que o grau de saturação de moldagem das amostras com 28 dias de cura variou de 40,2% até 66,3%. Após a imersão por 24 horas, os corpos-de-prova de menor índice de vazios absorveram menor quantidade de água, como era de se esperar. Entretanto, o grau de saturação obtido após a imersão apresentou pequena variação em relação ao índice de vazios, girando em torno de 73% para todos os corpos-de-prova. O valor médio obtido para a sucção matricial de todos os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 25% de cinza volante e 28 dias de cura ficou em 70 kPa.

Na Tabela 4.6 são apresentadas as amostras com 60 dias de cura, onde o grau de saturação de moldagem variou de 40,6% até 69,2%. Após a imersão por 24 horas, os corpos-de-prova de menor índice de vazios absorveram menor quantidade de água, como era de se esperar. Entretanto, o grau de saturação obtido após a imersão apresentou pequena variação em relação ao índice de vazios, girando em torno de 72% para todos os corpos-de-prova. O valor médio obtido para a sucção matricial de todos os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 25% de cinza volante e 60 dias de cura ficou em 70 kPa.

Tabela 4.5 – Dados gerais das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	e	$\omega$ (%)	$\omega_f$ (%)	S (%)	$S_f$ (%)	$S_f$ médio (%)	Sucção (kPa)
A1-291 <sub>28</sub>	3,0	0,792	13,53	28,77	42,1	68,6	74,7	26
A2-302 <sub>28</sub>	3,0	0,691	13,98	25,74	49,9	73,3		84
A3-313 <sub>28</sub>	3,0	0,589	14,00	21,50	58,6	76,4		54
A4-325 <sub>28</sub>	3,0	0,514	13,52	19,30	64,7	80,4		85
A1-294 <sub>28</sub>	5,0	0,800	13,81	28,40	41,7	66,6	73,8	22
A2-305 <sub>28</sub>	5,0	0,680	13,51	25,46	48,0	71,8		54
A3-316 <sub>28</sub>	5,0	0,596	14,41	22,00	58,4	75,7		54
A4-328 <sub>28</sub>	5,0	0,511	14,01	19,61	66,3	81,0		49
A1-296 <sub>28</sub>	7,0	0,786	13,38	27,25	40,3	64,3	71,5	18
A2-308 <sub>28</sub>	7,0	0,684	13,31	25,29	46,1	69,5		29
A3-319 <sub>28</sub>	7,0	0,578	13,54	21,59	55,6	74,2		52
A4-331 <sub>28</sub>	7,0	0,505	13,52	19,02	63,4	78,0		281
A1-299 <sub>28</sub>	9,0	0,785	13,56	27,94	40,2	64,3	70,3	45
A2-310 <sub>28</sub>	9,0	0,686	13,51	25,69	45,8	68,9		44
A3-322 <sub>28</sub>	9,0	0,588	13,52	22,19	53,5	72,8		61
A4-334 <sub>28</sub>	9,0	0,514	14,24	18,47	64,4	75,3		157

Tabela 4.6 – Dados gerais das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	e	$\omega$ (%)	$\omega_f$ (%)	S (%)	$S_f$ (%)	$S_f$ médio (%)	Sucção (kPa)
A1-339 <sub>60</sub>	3,0	0,807	14,50	29,87	44,3	70,1	75,3	43
A2-350 <sub>60</sub>	3,0	0,698	14,49	24,95	51,2	72,1		28
A3-361 <sub>60</sub>	3,0	0,595	14,09	21,46	58,4	75,8		72
A4-375 <sub>60</sub>	3,0	0,515	14,47	18,79	69,2	83,2		178
A1-342 <sub>60</sub>	5,0	0,794	13,51	29,01	41,1	67,5	72,7	11
A2-353 <sub>60</sub>	5,0	0,690	13,75	25,67	48,2	71,5		35
A3-364 <sub>60</sub>	5,0	0,604	14,48	18,59	57,9	67,9		227
A4-377 <sub>60</sub>	5,0	0,507	13,92	20,66	66,4	83,8		88
A1-345 <sub>60</sub>	7,0	0,803	13,76	28,87	40,6	65,7	70,7	26
A2-355 <sub>60</sub>	7,0	0,688	13,91	24,85	47,9	69,4		22
A3-367 <sub>60</sub>	7,0	0,602	14,14	21,74	55,7	72,8		43
A4-379 <sub>60</sub>	7,0	0,514	13,96	17,95	64,4	75,0		45
A1-347 <sub>60</sub>	9,0	0,808	14,49	29,66	41,7	65,8	75,3	20
A2-358 <sub>60</sub>	9,0	0,689	14,46	26,09	48,8	70,5		25
A3-370 <sub>60</sub>	9,0	0,587	13,52	29,81	53,6	85,1		106
A4-382 <sub>60</sub>	9,0	0,504	14,01	19,95	64,6	79,6		265

Tabela 4.7 – Dados gerais das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	e	$\omega$ (%)	$\omega_f$ (%)	S (%)	$S_f$ (%)	$S_f$ médio (%)	Sucção (kPa)
A1-385 <sub>90</sub>	3,0	0,799	14,49	28,80	44,7	69,3	75,9	22
A2-399 <sub>90</sub>	3,0	0,683	14,25	25,60	51,4	74,2		44
A3-409 <sub>90</sub>	3,0	0,576	14,02	21,84	60,0	78,7		67
A4-421 <sub>90</sub>	3,0	0,515	14,19	19,30	67,8	81,5		57
A1-390 <sub>90</sub>	5,0	0,791	14,22	28,39	43,5	67,7	75,5	24
A2-401 <sub>90</sub>	5,0	0,699	14,31	25,97	49,5	72,0		22
A3-412 <sub>90</sub>	5,0	0,587	13,52	23,86	55,7	78,9		73
A4-424 <sub>90</sub>	5,0	0,515	14,48	20,47	68,0	83,3		43
A1-391 <sub>90</sub>	7,0	0,794	13,64	29,68	40,7	67,2	73,9	37
A2-404 <sub>90</sub>	7,0	0,684	14,13	26,06	48,9	71,8		38
A3-415 <sub>90</sub>	7,0	0,590	13,53	21,76	54,3	73,1		560
A4-427 <sub>90</sub>	7,0	0,506	13,85	21,24	64,9	83,4		48
A1-395 <sub>90</sub>	9,0	0,793	14,29	29,20	41,9	66,2	70,6	46
A2-406 <sub>90</sub>	9,0	0,677	13,51	25,86	46,4	70,0		54
A3-420 <sub>90</sub>	9,0	0,591	14,47	21,18	56,9	72,0		174
A4-431 <sub>90</sub>	9,0	0,505	13,97	17,69	64,4	74,3		820



Na Tabela 4.7 são apresentadas as amostras com 90 dias de cura, onde o grau de saturação de moldagem variou de 40,7% até 68,0%. Após a imersão por 24 horas, os corpos-de-prova de menor índice de vazios absorveram menor quantidade de água, como era de se esperar. Entretanto, o grau de saturação obtido após a imersão apresentou pequena variação em relação ao índice de vazios, girando em torno de 74% para todos os corpos-de-prova. O valor médio obtido para a sucção matricial de todos os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 25% de cinza volante e 90 dias de cura ficou em 74 kPa.

A partir dos dados constantes nas Tabelas 4.5 a 4.7, foi elaborada a Figura 4.23, a qual apresenta a tendência e a relação existente entre a medida de sucção matricial e o índice de vazios. Apesar da dispersão dos pontos pode-se verificar que a sucção matricial tende a aumentar à medida que diminui o índice de vazios.

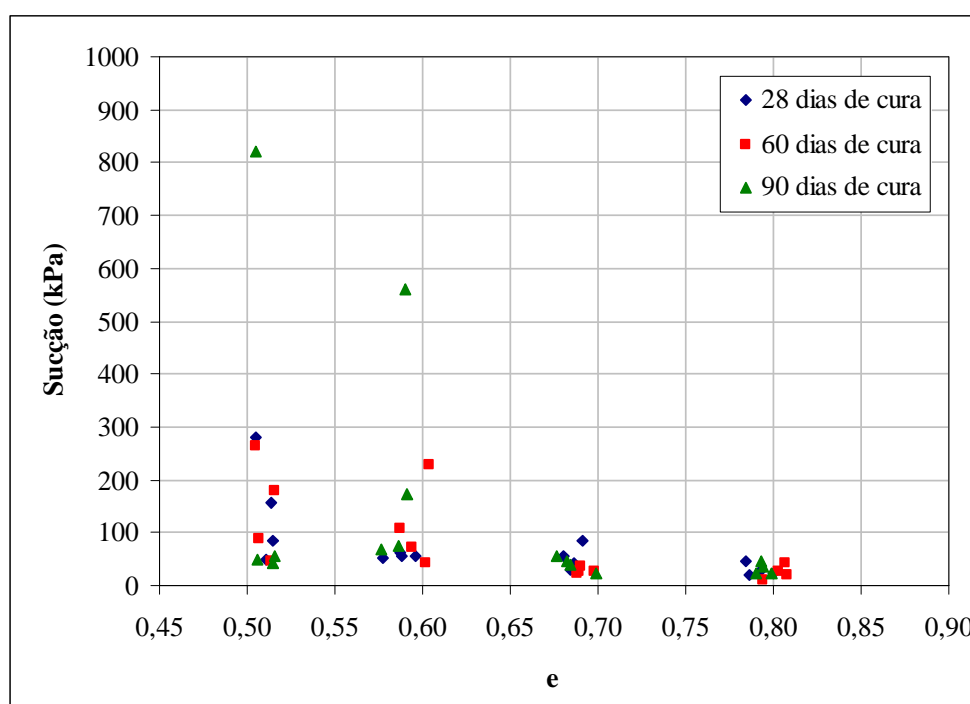


Figura 4.23 – Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nas amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura

Na Figura 4.24 é apresentada a variação da resistência à compressão simples pela relação entre a sucção e a resistência à compressão simples (em porcentagem). Nota-se que a influência da sucção varia de 1 a 10% da resistência à compressão simples nos corpos-de-

prova já ensaiados. Assim, observa-se que os corpos-de-prova não apresentaram grandes variações em relação a sucção.

Nota-se também, na figura 4.24 que a influência da sucção não passa de 10% da resistência à compressão simples em 100% dos corpos-de-prova ensaiados.

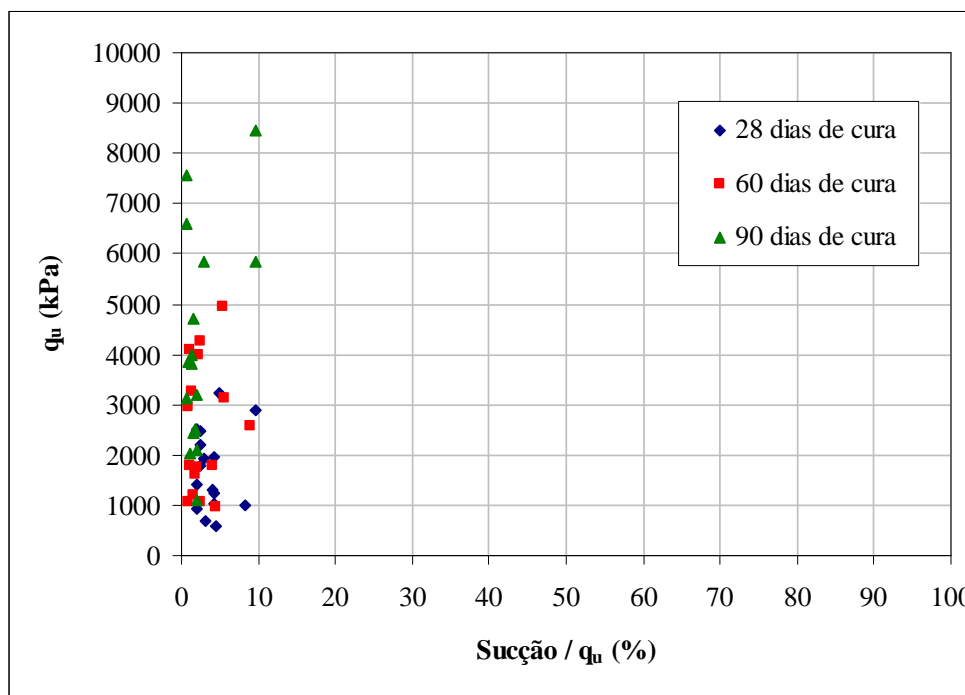


Figura 4.24 – Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura

Em função do elevado grau de saturação, obtido após a imersão dos corpos-de-prova por 24 horas antes de serem submetidos à compressão simples (em média 73%), valores de sucção abaixo de 100 kPa eram esperados para todos os corpos-de-prova. Isso ocorreu para 81% das amostras. Cogita-se que as medidas mais elevadas de sucção ocorreram, provavelmente, por problemas no procedimento experimental. Como o processo de imersão dos corpos-de-prova por 24 horas se mostrou satisfatório no aumento e uniformização do grau de saturação das amostras, acredita-se também que os corpos-de-prova não apresentaram grandes variações na sucção, permitindo assim, desconsiderar a sucção como mais uma variável nas análises das variáveis investigadas.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 EFEITO DO TEOR DE CAL

Pela análise das Figuras 4.1, 4.4, 4.5, 4.16, 4.11, 4.12 e 4.13 verificou-se que a adição de cal, promove ganhos de resistência no material estudado, tanto para amostras com 0% de cinza volante com 90 dias de cura como para as amostras com 12,5% e 25% de cinza volante com 28, 60 e 90 dias de cura. O aumento da resistência com a adição de cal é um aspecto reportado por grande parte dos trabalhos consultados.

Castro (1995) observa que quando se adiciona cal a um solo fino em presença de água, ocorrem simultaneamente algumas reações químicas. A estabilização química com cal é caracterizada por duas etapas distintas: uma etapa inicial rápida (que dura de horas a dias), e uma outra mais lenta, que pode levar meses a anos.

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

Prusinski e Bhattacharja (1999) afirmam que a troca catiônica inicia o processo de estabilização muito rapidamente e é seguida pela floculação e aglomeração. Segundo os autores, a superfície do argilo-mineral é deficiente em carga e, para neutralizar essa deficiência, 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. Grim *apud* Thomé (1994) afirmou que, assumindo igual concentração, a ordem de adsorção preferencial de cátions comuns, associados com os solos é dada pela série:  $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+} < \text{Al}^{3+}$ , da direita para a esquerda, ou seja, cátions de menor valência são substituídos por cátions de maior valência. Como a cal é uma fonte de cálcio livre, a sua

adição em quantidade suficiente cria uma concentração de  $\text{Ca}^{++}$ , que serão adsorvidos na superfície dos argilo-minerais.

A flocculação e aglomeração causam mudanças na textura da argila, pois sua estrutura é alterada de plana e paralela para uma orientação aleatória de partículas (Prusinski & Bhattacharja, 1999). Conforme relato do TRB (1987), Herzog & Mitchell (1963) afirmaram que o fenômeno da flocculação é causado pelo aumento da concentração eletrolítica da água intersticial, pelo alto pH e pela redução da espessura da dupla camada difusa, através de trocas catiônicas. O mecanismo de troca de cátions é mostrado na figura 5.1.

As reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica de misturas solo-cal. Esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes.

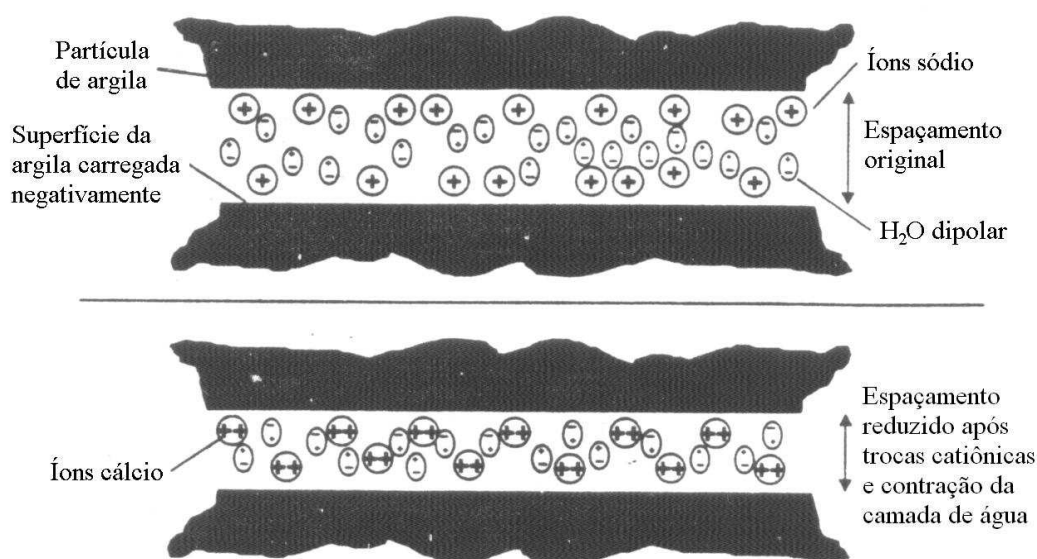


Figura 5.1 – Mecanismo de troca de cátions (Prusinski & Bhattacharja, 1999)

Segundo Rogers & Glendinning (2000), 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 do solo. Essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio (explicação muito direta). Segundo relato do TRB (1987) esta reação não cessará enquanto houver  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  reagindo e sílica disponível no solo. Conforme Ingles & Metcalf (1972), os géis de silicato resultantes da reação imediatamente cobrem e ligam as partículas de argila,

bloqueando os vazios. Os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos. Os autores salientam que esta reação só ocorre em presença de água, que tem a função de carregar os íons cálcio e hidroxila para a superfície da argila. Este mecanismo é mostrado na figura 5.2.

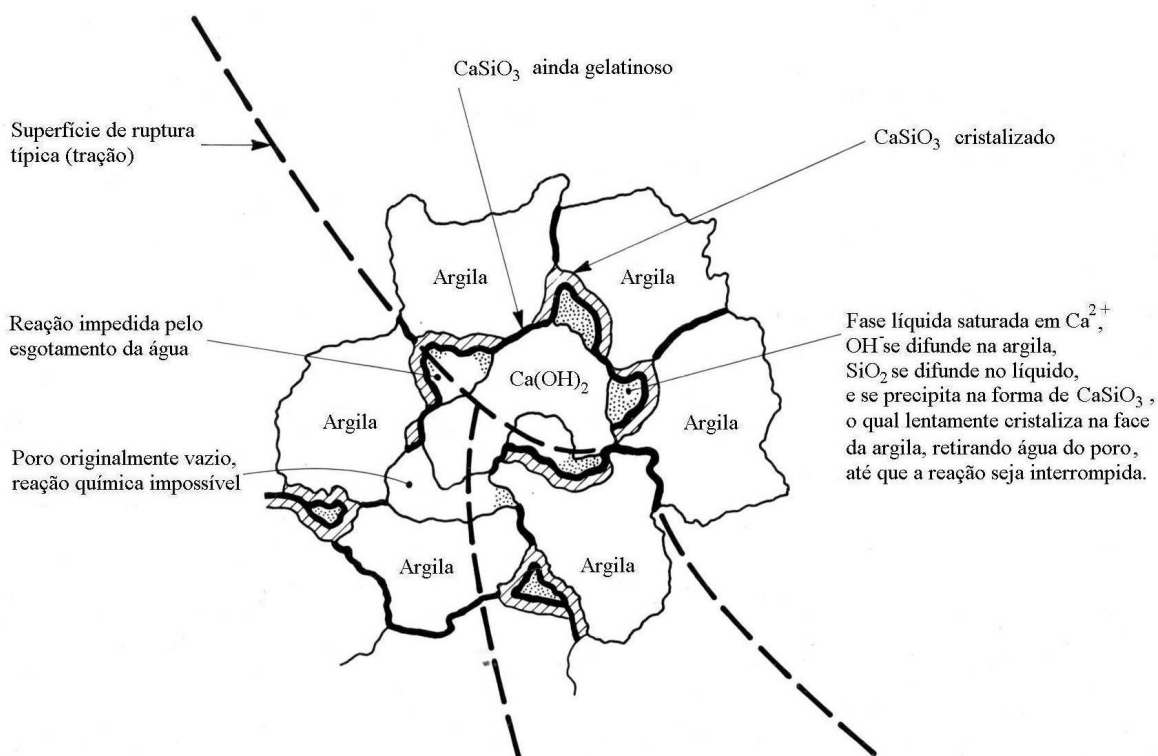


Figura 5.2 – Mecanismo de estabilização solo-cal (Ingles & Metcalf, 1972)

Verificou-se na presente pesquisa, na faixa de teores de cal e nos tempos de cura estudados, que a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal. Pode ser observado nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.11, 4.12 e 4.13 que a taxa de crescimento da resistência a compressão simples pelo teor de cal é maior nas amostras com 90 dias de cura, isso se deve as reações lentas solo-cal, as quais podem estender-se por anos. Este mesmo tipo de comportamento foi observado por Núñez (1991), Carraro (1997) e Lopes Junior (2007).

Outro aspecto observado nas Figuras 4.1, 4.4, 4.5, 4.6, 4.11, 4.12 e 4.13, é que a taxa de aumento da resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, em geral aumenta com o aumento da massa específica aparente seca do solo-cinza-cal compactado. Esse fato indica que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactas, tanto para

amostras com 28 e 60 dias como para 90 dias de cura, devido ao maior número de contatos entre as partículas.

Clough *et al* (1981), estudando areias naturalmente e artificialmente cimentadas, também relata que o aumento na massa específica aparente seca da areia aumentou a efetividade de uma dada quantidade de agente cimentante. Da mesma forma, Núñez (1991) e Lopes Junior (2007) também observaram este fenômeno tanto para misturas de solo-cal quanto para misturas de solo-cimento.

Na presente pesquisa nota-se também nas Figuras 4.1, 4.4, 4.5, 4.6, 4.11, 4.12 e 4.13, que a resistência aumenta com o aumento da porcentagem de cinza volante adicionada, demonstrando que os produtos das reações entre a cinza volante, a cal e a água são os responsáveis pelo aumento da resistência do material estudado.

## 5.2 EFEITO DA POROSIDADE

Através das Figuras 4.2, 4.7, 4.8, 4.9, 4.14, 4.15, 4.16, pôde-se observar como a porosidade afetou a resistência à compressão simples do solo com 0% de cinza volante e 90 dias de cura e para o solo com 12,5% de cinza volante e 25% de cinza volante, nos tempos de cura de 28, 60 e 90 dias. Independentemente da quantidade de cal e do tempo de cura, a redução na porosidade do material promoveu ganhos de resistência sobre o material. Verificou-se que a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada. O efeito benéfico em termos de aumento de resistência com a diminuição da porosidade foi observado em Núñez (1991) e Lopes Junior (2007).

Lopes Junior (2007), estudando amostras de solo-cal, atribui o efeito do ganho de resistência com a redução na porosidade, em termos de resistência à compressão simples, à existência de um maior número de contatos entre as partículas existentes, tornando a cimentação mais efetiva. Além desse aspecto, a maior capacidade de distribuição de tensões no interior da amostra, bem como a maior capacidade de mobilização de atrito nas porosidades mais baixas também contribuem para o ganho de resistência do material.

Um fator adicional nesta análise do efeito da porosidade que deve ser notado é o aumento do teor volumétrico da cal (volume de cal dividido pelo volume total do corpo-de-prova) para um mesmo teor de cal dosada em relação à massa de solo seco (Tabelas 5.1 a 5.7). Ou seja, há um

volume maior de cal por unidade de volume do corpo-de-prova, ou ainda, um número maior de partículas de cal, à medida que a massa específica aparente seca da mistura aumenta, tanto para misturas com 28 e 60 dias de cura como para as misturas com 90 dias de cura. Essa mesma tendência foi observada para misturas com cimento em Foppa (2005) e em Lopes Junior (2008), tanto para misturas com cal quanto para misturas com cimento.

Como as dosagens das misturas de solo-cinza-cal foram feitas em termos da massa específica aparente seca alvo, o aumento na massa específica aparente seca se deu por aumento da quantidade de mistura e não somente pelo aumento da quantidade de solo.

### 5.2.1 Amostras com 0% de Cinza Volante

O aumento no teor de cal volumétrica, para as amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura, foi em média de 20% para a faixa de variação considerada na massa específica aparente seca da mistura (de  $1,40 \text{ g/cm}^3$  para  $1,70 \text{ g/cm}^3$ ). Isso faz com que uma pequena parcela do aumento da resistência com a redução da porosidade deva ser creditada ao maior número de partículas de cal presentes. A Figura 5.3 mostra a variação da resistência à compressão simples com o aumento do teor volumétrico da cal, para amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura.

Comparando-se as Figuras 5.3 e 4.1, verifica-se que as análises feitas considerando o teor de cal dosada em relação à massa de solo seco permanecem válidas quando consideramos o teor de cal volumétrico, ou seja,  $q_u$  cresce linearmente com o aumento do teor de cal e, a taxa de crescimento da resistência, em geral é maior quanto maior for a massa específica aparente seca da mistura.

Em relação à porosidade torna-se difícil avaliar a parcela de resistência gerada em função do aumento do teor volumétrico de cal, já que o aumento no teor de cal está associado com a maior proximidade entre as partículas. Entretanto, se considerarmos uma variação linear da resistência com o teor de cal volumétrico sob uma taxa média de  $17 \text{ kPa}/(\%)$  para 90 dias de cura, calculada a partir da média dos coeficientes de  $C_{av}$  apresentados na Figuras 5.3, teremos que a resistência gerada pelo aumento do teor de cal volumétrico corresponderia a aproximadamente 6% para 90 dias de cura, do ganho de resistência obtida pela redução na porosidade da mistura (Tabela 5.1). Considera-se que esse pequeno percentual, atribuído ao aumento no teor de cal, não invalida as análises realizadas até agora.

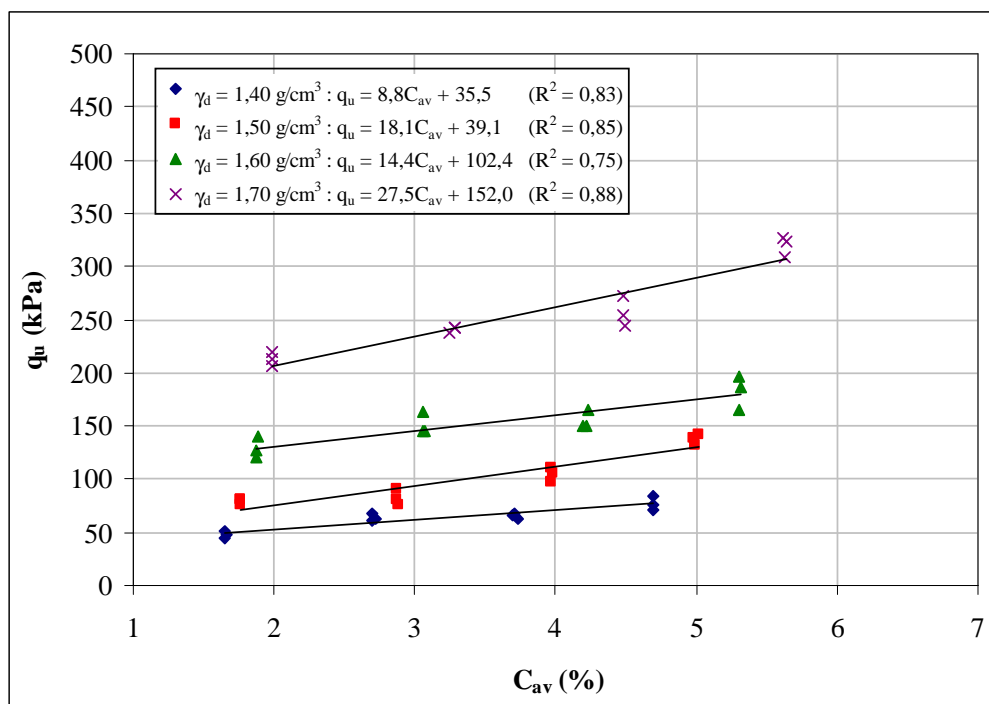


Figura 5.3 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Tabela 5.1 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

$C_a$ (%)	$\Delta C_{av}$ (%)	$\Delta q_u$ (kPa)	$q_{u \text{ mín}}$ (kPa)	$q_{u \text{ máx}}$ (kPa)	$\Delta q_{u \text{ total}}$ (kPa)	$\Delta q_u / \Delta q_{u \text{ total}}$ (%)
3	0,33	6	48	213	165	3
5	0,56	10	64	241	177	5
7	0,78	13	65	257	191	7
9	0,94	16	77	320	242	7
Média						6

Onde:

$\Delta C_{av}$ : variação do teor volumétrico de cal para um mesmo teor de cal na faixa de variação considerada para a massa específica aparente seca da mistura (de  $1,40 \text{ g/cm}^3$  para  $1,70 \text{ g/cm}^3$ ).

$\Delta q_u$ :  $\Delta C_{av} \times$  taxa de variação linear da resistência com o teor de cal volumétrico ( $\Delta C_{av} \times 17$ ).

$\Delta q_{u \text{ mín}}$ :  $q_u$  mínimo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_{u \text{ máx}}$ :  $q_u$  máximo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_{u \text{ total}}$ : ( $q_{u \text{ máx}} - q_{u \text{ mín}}$ ) variação na resistência à compressão simples com a redução na porosidade da mistura (ver Figura 4.2).



### 5.2.2 Amostras com 12,5% de Cinza Volante

O aumento no teor de cal volumétrica, para as amostras com 12,5% de cinza volante com 28, 60 e 90 dias de cura foi na média de 20% para a faixa de variação considerada na massa específica aparente seca da mistura (de 1,40 g/cm<sup>3</sup> para 1,70 g/cm<sup>3</sup>). Isso faz com que uma pequena parcela do aumento da resistência com a redução da porosidade deva ser creditada ao maior número de partículas de cal presentes. As Figuras 5.4 a 5.6 mostram a variação da resistência à compressão simples com o aumento do teor volumétrico da cal, para amostras com 12,5% de cinza volante com 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente.

Comparando-se as Figuras 5.4, 5.5, 5.6 com as Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, verifica-se que as análises feitas considerando o teor de cal dosada em relação à massa de solo seco permanecem válidas quando consideramos o teor de cal volumétrico, ou seja,  $q_u$  cresce linearmente com o aumento do teor de cal e, a taxa de crescimento da resistência, é maior quanto maior for a massa específica aparente seca da mistura.

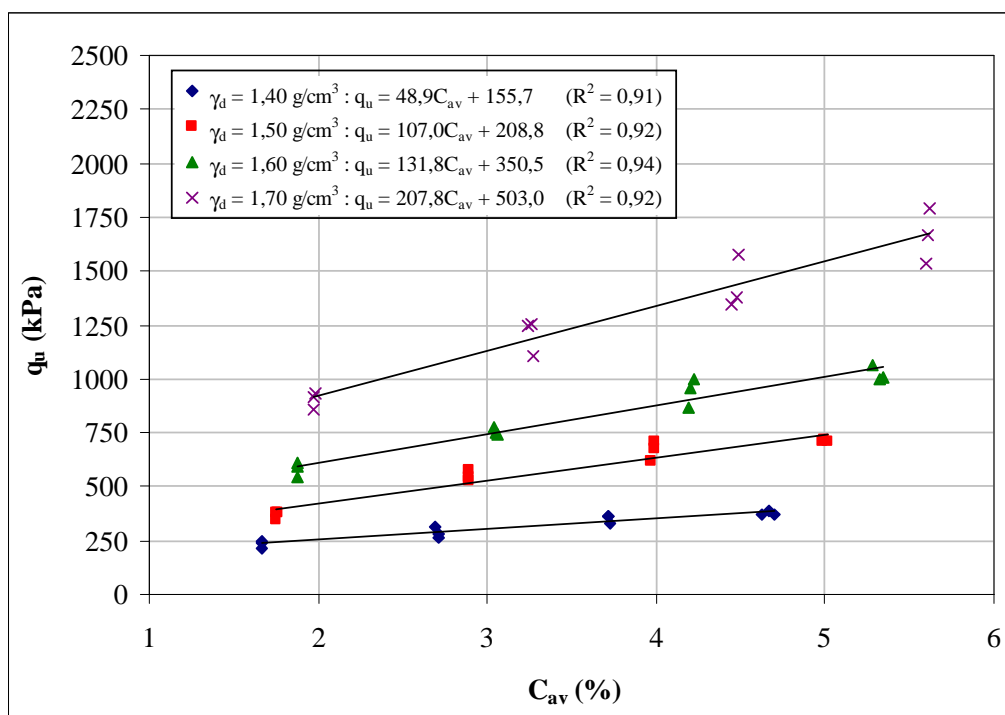


Figura 5.4 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

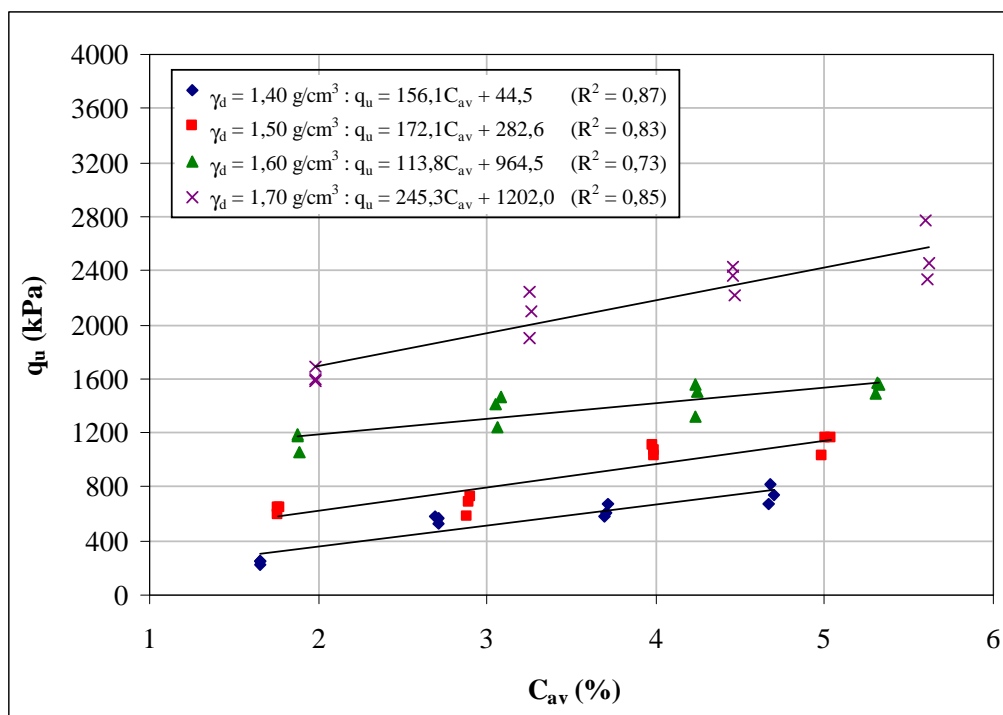


Figura 5.5 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias

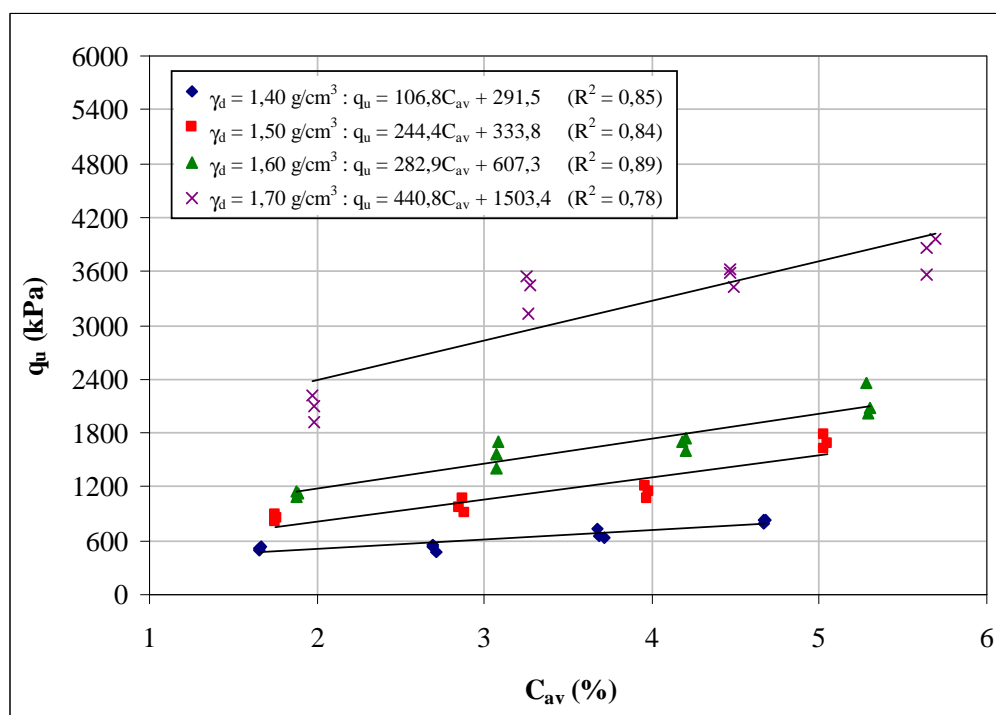


Figura 5.6 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Tabela 5.2 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

$C_a$ (%)	$\Delta C_{av}$ (%)	$\Delta q_u$ (kPa)	$q_{u \text{ min}}$ (kPa)	$q_{u \text{ máx}}$ (kPa)	$\Delta q_{u \text{ total}}$ (kPa)	$\Delta q_u / \Delta q_{u \text{ total}}$ (%)
3	0,32	39	234	902	668	6
5	0,55	69	286	1201	915	7
7	0,75	93	351	1430	1080	9
9	0,95	117	376	1662	1286	9
Média						8

Onde:

$\Delta C_{av}$ : variação do teor volumétrico de cal para um mesmo teor de cal na faixa de variação considerada para a massa específica aparente seca da mistura (de 1,40 g/cm<sup>3</sup> para 1,70 g/cm<sup>3</sup>).

$\Delta q_u$ :  $\Delta C_{av}$  × taxa de variação linear da resistência com o teor de cal volumétrico ( $\Delta C_{av}$  × 124).

$\Delta q_{u \text{ mín}}$ :  $q_u$  mínimo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_{u \text{ máx}}$ :  $q_u$  máximo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_{u \text{ total}}$ : ( $q_{u \text{ máx}}$  -  $q_{u \text{ mín}}$ ) variação na resistência à compressão simples com a redução na porosidade da mistura (ver Figura 4.7).

Tabela 5.3 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

$C_a$ (%)	$\Delta C_{av}$ (%)	$\Delta q_u$ (kPa)	$q_{u \text{ min}}$ (kPa)	$q_{u \text{ máx}}$ (kPa)	$\Delta q_{u \text{ total}}$ (kPa)	$\Delta q_u / \Delta q_{u \text{ total}}$ (%)
3	0,33	56	243	1622	1379	4
5	0,55	94	558	2081	1523	6
7	0,75	130	623	2337	1714	8
9	0,93	160	743	2523	1780	9
Média						7

Onde:

$\Delta C_{av}$ : variação do teor volumétrico de cal para um mesmo teor de cal na faixa de variação considerada para a massa específica aparente seca da mistura (de 1,40 g/cm<sup>3</sup> para 1,70 g/cm<sup>3</sup>).

$\Delta q_u$ :  $\Delta C_{av}$  × taxa de variação linear da resistência com o teor de cal volumétrico ( $\Delta C_{av}$  × 172).

$\Delta q_{u \text{ mín}}$ :  $q_u$  mínimo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_{u \text{ máx}}$ :  $q_u$  máximo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_{u \text{ total}}$ : ( $q_{u \text{ máx}}$  -  $q_{u \text{ mín}}$ ) variação na resistência à compressão simples com a redução na porosidade da mistura (ver Figura 4.8).

Tabela 5.4 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

$C_a$ (%)	$\Delta C_{av}$ (%)	$\Delta q_u$ (kPa)	$q_{u \text{ min}}$ (kPa)	$q_{u \text{ máx}}$ (kPa)	$\Delta q_{u \text{ total}}$ (kPa)	$\Delta q_u / \Delta q_{u \text{ total}}$ (%)
3	0,32	87	512	2072	1559	6
5	0,57	152	529	3375	2856	5
7	0,78	210	673	3546	2873	7
9	0,99	266	820	3799	29,78	9
Média						7

Onde:

$\Delta C_{av}$ : variação do teor volumétrico de cal para um mesmo teor de cal na faixa de variação considerada para a massa específica aparente seca da mistura (de 1,40 g/cm<sup>3</sup> para 1,70 g/cm<sup>3</sup>).

$\Delta q_u$ :  $\Delta C_{av} \times$  taxa de variação linear da resistência com o teor de cal volumétrico ( $\Delta C_{av} \times 269$ ).

$\Delta q_{u \text{ mín}}$ :  $q_u$  mínimo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_{u \text{ máx}}$ :  $q_u$  máximo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_{u \text{ total}}$ : ( $q_{u \text{ máx}} - q_{u \text{ mín}}$ ) variação na resistência à compressão simples com a redução na porosidade da mistura (ver Figura 4.9).

Em relação à porosidade torna-se difícil avaliar a parcela de resistência gerada em função do aumento do teor volumétrico de cal, já que estão associados o aumento no teor de cal com a maior proximidade entre as partículas. Entretanto, se considerarmos uma variação linear da resistência com o teor de cimento volumétrico sob uma taxa média de 124 kPa/(%), 172 kPa/(%) e 269 kPa/(%) para 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente, calculada a partir da média dos coeficientes de  $C_{av}$  apresentados nas Figuras 5.4 a 5.6, teremos que a resistência gerada pelo aumento do teor de cal volumétrico corresponderia a aproximadamente 8%, 7% e 7% para 28, 60 e 90 dias de cura respectivamente, do ganho de resistência obtida pela redução na porosidade da mistura (Tabelas 5.2 a 5.4). Considera-se que esse pequeno percentual, atribuído ao aumento no teor de cal, não invalida as análises realizadas até agora.

### 5.2.3 Amostras com 25% de Cinza Volante

O aumento no teor de cal volumétrica, para as amostras com 12,5% de cinza volante com 28, 60 e 90 dias de cura, foi respectivamente, na média de 19% para a faixa de variação considerada na massa específica aparente seca da mistura (de 1,40 g/cm<sup>3</sup> para 1,70 g/cm<sup>3</sup>). Isso faz com que uma pequena parcela do aumento da resistência com a redução da porosidade deva ser creditada ao maior número de partículas de cal presentes.

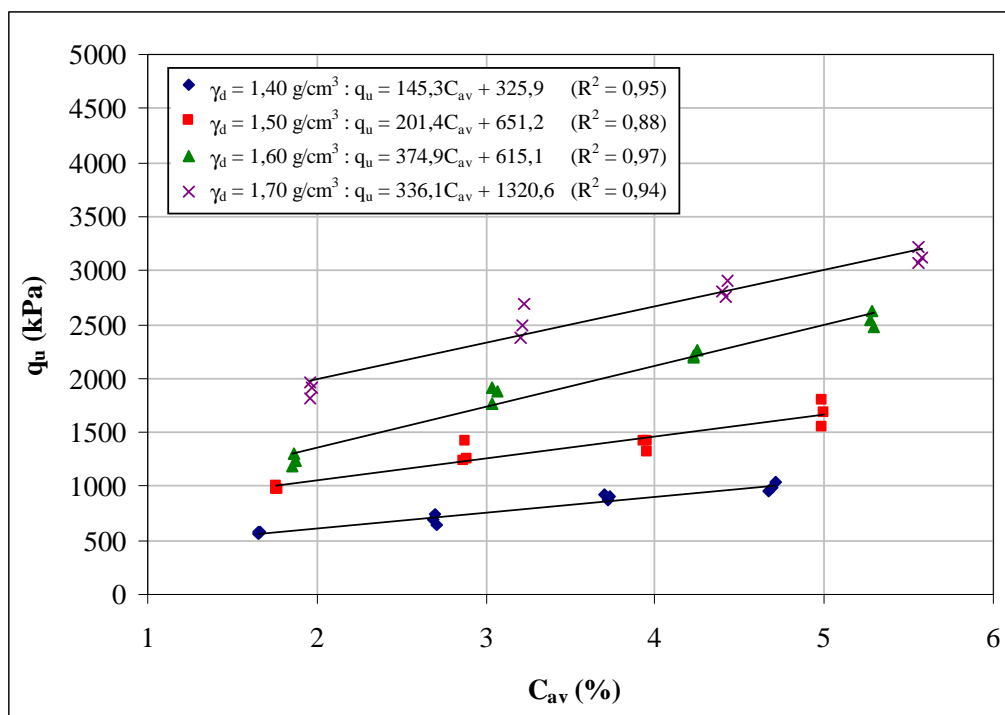


Figura 5.7 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

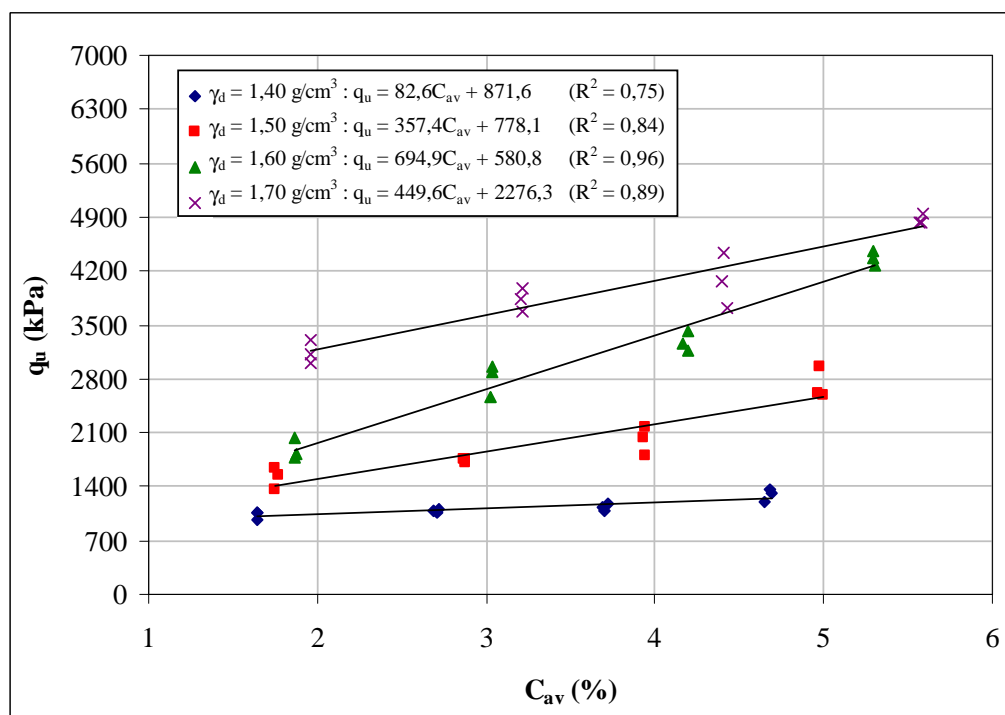


Figura 5.8 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

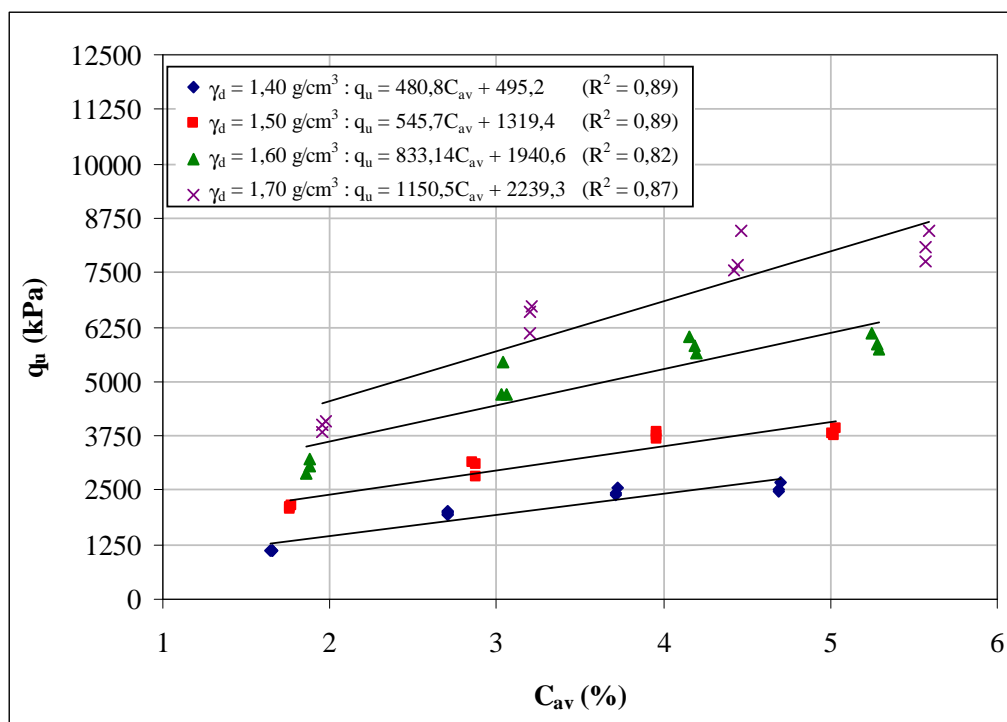


Figura 5.9 – Efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência à compressão simples das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

As Figuras 5.7 a 5.9 mostram a variação da resistência à compressão simples com o aumento do teor volumétrico da cal, para amostras com 25% de cinza volante com 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente. Comparando-se as Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 com as Figuras 4.11, 4.12 e 4.13, verifica-se que as análises feitas considerando o teor de cal dosada em relação à massa de solo seco permanecem válidas quando consideramos o teor de cal volumétrico, ou seja,  $q_u$  cresce linearmente com o aumento do teor de cal e, a taxa de crescimento da resistência, é maior quanto maior for a massa específica aparente seca da mistura.

Em relação à porosidade torna-se difícil avaliar a parcela de resistência gerada em função do aumento do teor volumétrico de cal, já que estão associados o aumento no teor de cal com a maior proximidade entre as partículas. Entretanto, se considerarmos uma variação linear da resistência com o teor de cal volumétrico sob uma taxa média de 264 kPa/(%), 396 kPa/(%) e 753 kPa/(%) para 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente, calculada a partir da média dos coeficientes de  $C_{av}$  apresentados nas Figuras 5.7 a 5.9, teremos que a resistência gerada pelo aumento do teor de cal volumétrico corresponderia a aproximadamente 8%, 8% e 10% para 28, 60 e 90 dias de cura respectivamente, do ganho de resistência obtida pela redução na

porosidade da mistura (Tabelas 5.5 a 5.7). Considera-se que esse pequeno percentual, atribuído ao aumento no teor de cal, não invalida as análises realizadas até agora.

Tabela 5.5 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

$C_a$ (%)	$\Delta C_{av}$ (%)	$\Delta q_u$ (kPa)	$q_{u \text{ min}}$ (kPa)	$q_{u \text{ máx}}$ (kPa)	$\Delta q_{u \text{ total}}$ (kPa)	$\Delta q_u / \Delta q_{u \text{ total}}$ (%)
3	0,31	81	570	1898	1228	6
5	0,51	136	696	2520	1824	7
7	0,70	184	902	2824	1922	10
9	0,87	229	992	3134	2142	11
Média						8

Onde:

$\Delta C_{av}$ : variação do teor volumétrico de cal para um mesmo teor de cal na faixa de variação considerada para a massa específica aparente seca da mistura (de 1,40 g/cm<sup>3</sup> para 1,70 g/cm<sup>3</sup>).

$\Delta q_u$ :  $\Delta C_{av} \times$  taxa de variação linear da resistência com o teor de cal volumétrico ( $\Delta C_{av} \times 264$ ).

$\Delta q_{u \text{ min}}$ :  $q_u$  mínimo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_{u \text{ máx}}$ :  $q_u$  máximo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_{u \text{ total}}$ : ( $q_{u \text{ máx}} - q_{u \text{ min}}$ ) variação na resistência à compressão simples com a redução na porosidade da mistura (ver Figura 4.14).

Tabela 5.6 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

$C_a$ (%)	$\Delta C_{av}$ (%)	$\Delta q_u$ (kPa)	$q_{u \text{ min}}$ (kPa)	$q_{u \text{ máx}}$ (kPa)	$\Delta q_{u \text{ total}}$ (kPa)	$\Delta q_u / \Delta q_{u \text{ total}}$ (%)
3	0,32	127	1030	3145	2114	6
5	0,51	202	1084	3831	2747	7
7	0,71	281	1127	4078	2951	10
9	0,90	358	1295	4870	3575	10
Média						8

Onde:

$\Delta C_{av}$ : variação do teor volumétrico de cal para um mesmo teor de cal na faixa de variação considerada para a massa específica aparente seca da mistura (de 1,40 g/cm<sup>3</sup> para 1,70 g/cm<sup>3</sup>).

$\Delta q_u$ :  $\Delta C_{av} \times$  taxa de variação linear da resistência com o teor de cal volumétrico ( $\Delta C_{av} \times 396$ ).

$\Delta q_{u \text{ min}}$ :  $q_u$  mínimo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_u \text{ máx}$ :  $q_u$  máximo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_u \text{ total}$ : ( $q_u \text{ máx}$  -  $q_u \text{ mín}$ ) variação na resistência à compressão simples com a redução na porosidade da mistura (ver Figura 4.15).

Tabela 5.7 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

$C_a$ (%)	$\Delta C_{av}$ (%)	$\Delta q_u$ (kPa)	$q_u \text{ mín}$ (kPa)	$q_u \text{ máx}$ (kPa)	$\Delta q_u \text{ total}$ (kPa)	$\Delta q_u / \Delta q_u \text{ total}$ (%)
3	0,31	235	1102	3975	2873	8
5	0,50	376	1994	6467	4474	8
7	0,73	546	2465	7895	5430	10
9	0,88	665	2562	8098	5536	12
Média						10

Onde:

$\Delta C_{av}$ : variação do teor volumétrico de cal para um mesmo teor de cal na faixa de variação considerada para a massa específica aparente seca da mistura (de  $1,40 \text{ g/cm}^3$  para  $1,70 \text{ g/cm}^3$ ).

$\Delta q_u$ :  $\Delta C_{av} \times$  taxa de variação linear da resistência com o teor de cal volumétrico ( $\Delta C_{av} \times 753$ ).

$\Delta q_u \text{ mín}$ :  $q_u$  mínimo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_u \text{ máx}$ :  $q_u$  máximo para a porcentagem de cal definida.

$\Delta q_u \text{ total}$ : ( $q_u \text{ máx}$  -  $q_u \text{ mín}$ ) variação na resistência à compressão simples com a redução na porosidade da mistura (ver Figura 4.16).

## 5.3 RELAÇÃO VAZIOS/CAL

### 5.3.1 Amostras com 0% de Cinza Volante

Na Figura 5.10 são apresentadas as correlações entre a resistência à compressão simples e a razão do volume total de vazios pelo volume total de cal para as amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura, plotados pelo seu teor de cal.

Pode-se observar na Figura 5.10 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

Verifica-se claramente que pontos com mesma relação vazios/cal obtidos de modos diferentes (um por densificação e outro por aumento do teor de cal), apresentam resistências distintas, sendo que os pontos com menor porosidade e menor quantidade de cal atingem, sistematicamente, resistências maiores.



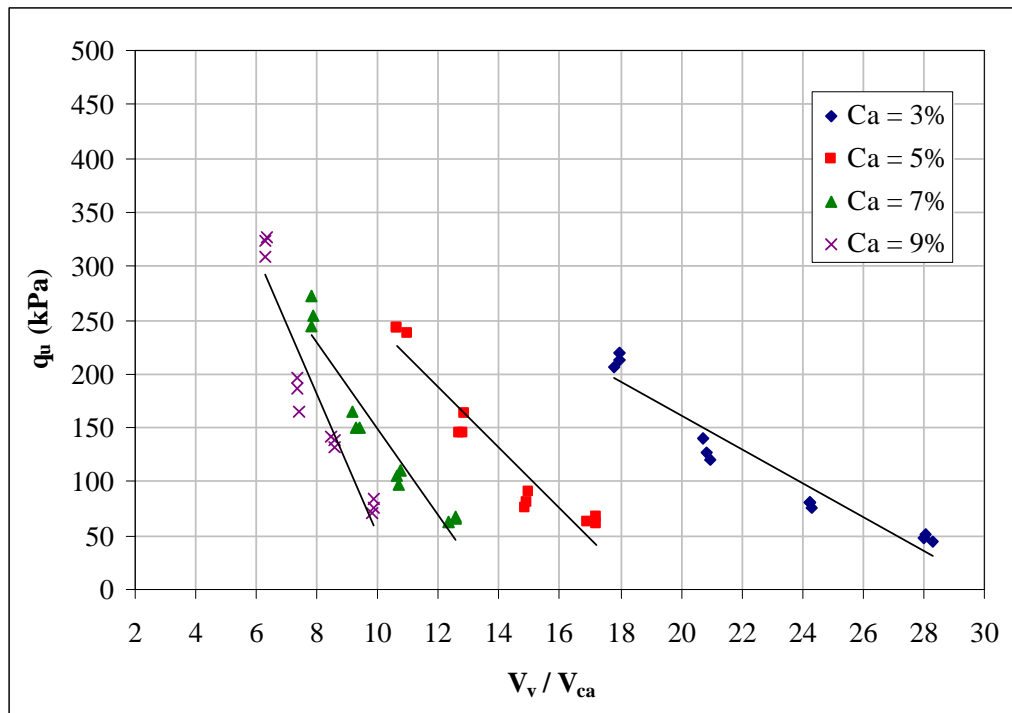


Figura 5.10 – Relação vazios/cal para as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

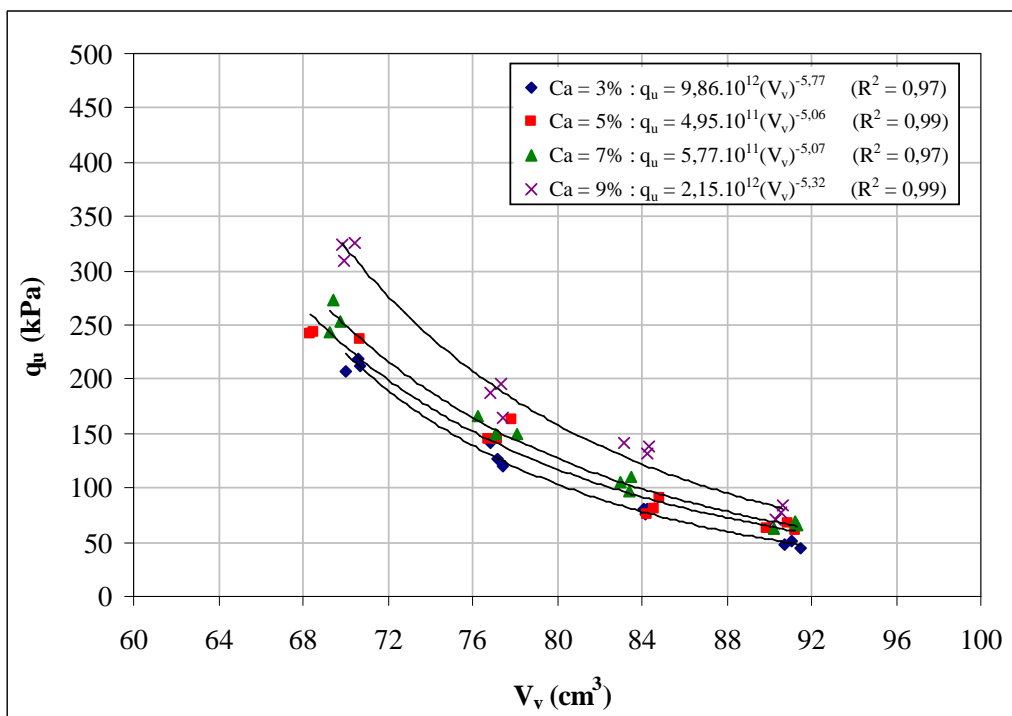


Figura 5.11 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

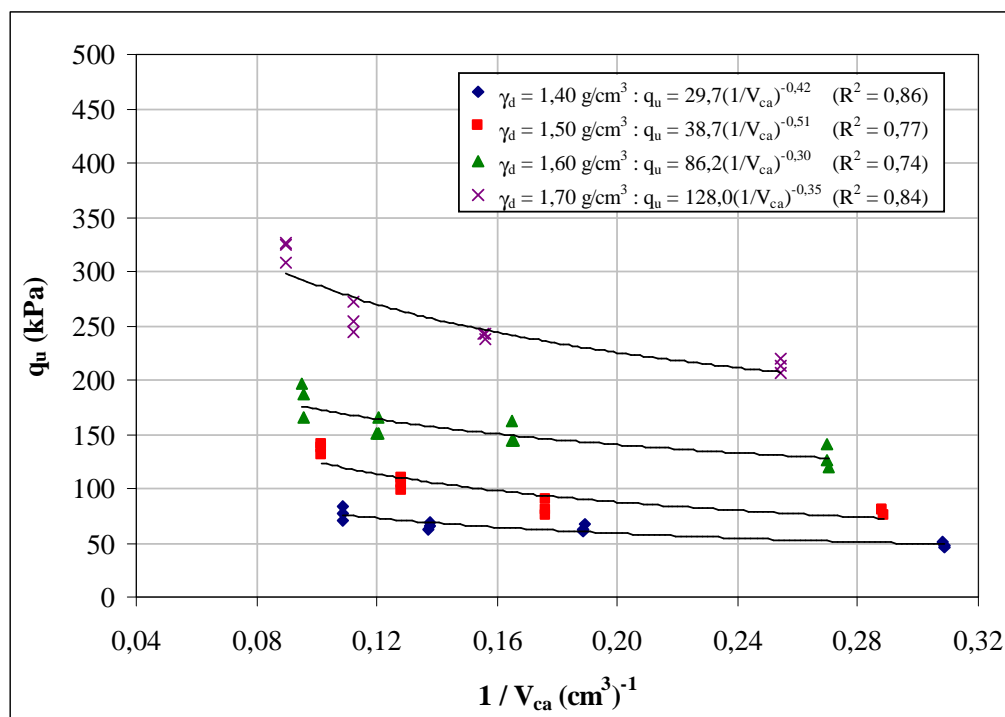


Figura 5.12 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Ocorre que dada uma variação no volume de vazios, uma variação proporcional no volume de cal assume que seria suficiente para contrabalançar a perda ou ganho na resistência. Em termos matemáticos tem-se:

$$\frac{V_v}{V_{ca}} = K \text{ e } \frac{V_v + \Delta V_v}{V_{ca} + \Delta V_{ca}} = K, \text{ então } \Delta V_{ca} = \frac{V_{ca}}{V_v} \times \Delta V_v.$$

Onde:  $\Delta V_v$  = variação no volume de vazios.

$\Delta V_{ca}$  = variação no volume de cal.

$K$  = constante.

Mesma tendência verificada para solo-cimento em Larnach (1960), Foppa (2005) e Lopes Junior (2007), tanto em amostras de solo-cal como em amostras de solo-cimento.

Se observarmos agora a Figura 5.11, que mostra a relação das grandezas volume de vazios ( $V_v$ ), e a Figura 5.12, que relaciona o inverso do volume de cal ( $1/V_{ca}$ ) com a resistência à compressão simples, para amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura, pode-se notar que as taxas de variação  $q_u$  em relação a cada uma dessas grandezas são substancialmente diferentes.

Uma maneira de compatibilizarmos as taxas de variação das grandezas acima citadas é através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Após diversas tentativas obteve-se que, aplicando uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro  $V_{ca}$ , haveria uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, resultando num melhor ajuste para o fator vazios/cal, para amostras com 90 dias de cura. A Figura 5.13 apresenta a variação da resistência à compressão simples em relação ao fator  $1/(V_{ca})^{0,12}$ , para amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura. Pode-se observar agora, comparando as Figuras 5.13 e 5.11 que a taxa de variação dos dois fatores são similares.

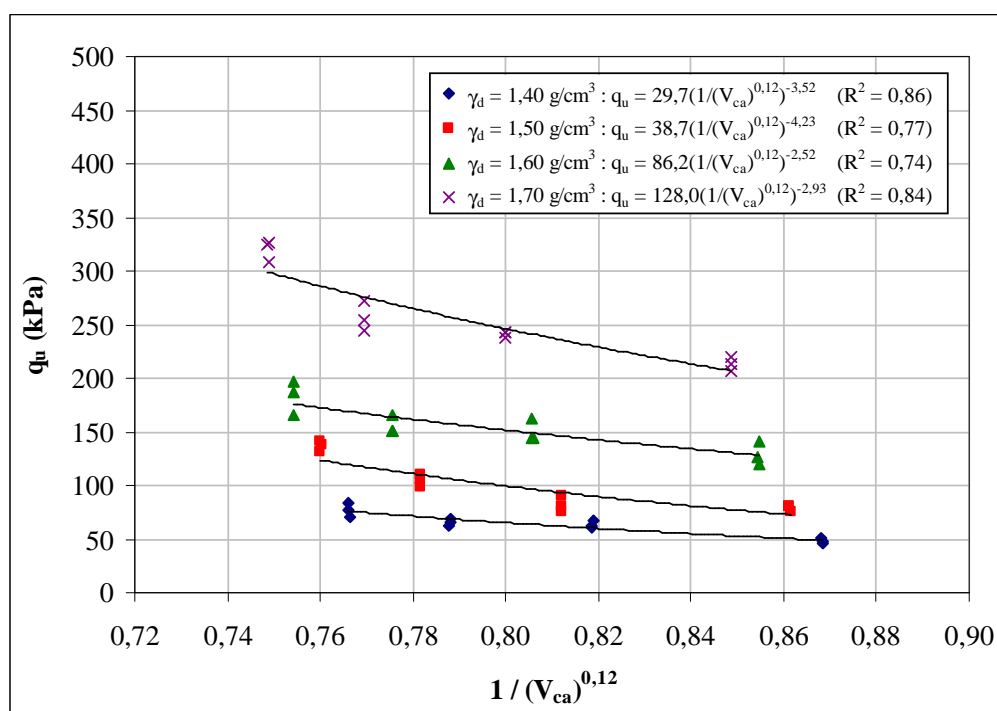


Figura 5.13 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Aplicando a formulação obtida para o fator vazios/cal obtemos o gráfico da Figura 5.14, onde pode-se verificar o melhor ajuste dos pontos a esse novo fator.

Pela Figura 5.14, nota-se que a resistência à compressão simples do material em estudo pode ser avaliada, com um excelente grau de precisão, através do fator vazios/cal ajustado pelo expoente 0,12. Entretanto, uma forma mais elegante de expressar o fator vazios/cal pode ser feita utilizando, ao invés do volume de vazios, a porosidade do material ( $\eta$ ) expressa em porcentagem e, ao invés do volume de cal, o teor volumétrico de cal expresso em porcentagem do volume total ( $C_{av}$ ).

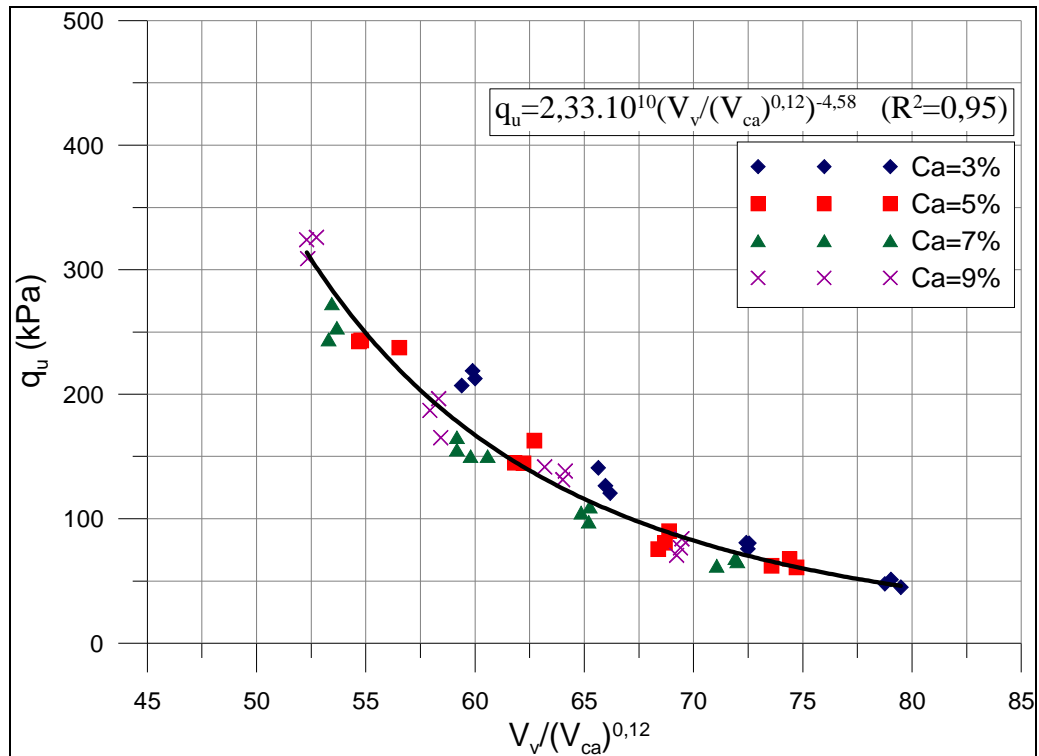


Figura 5.14 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

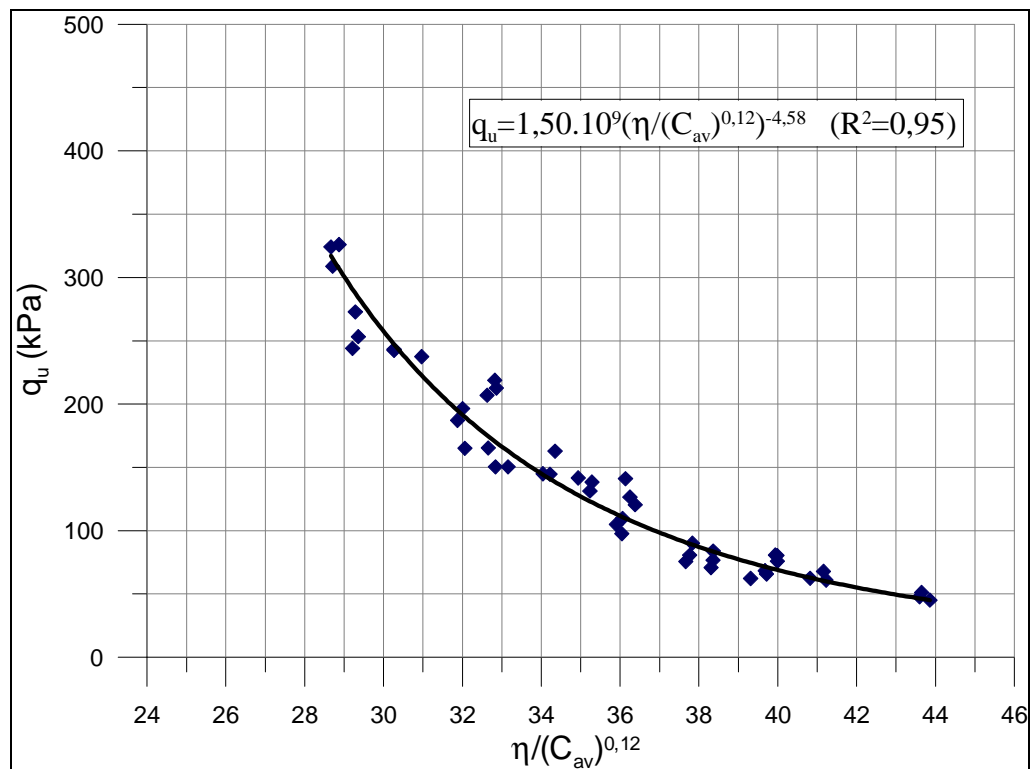


Figura 5.15 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

A Figura 5.15 apresenta o novo ajuste utilizando essa relação  $[\eta/(C_{av})^{0,12}]$ , para as amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura. Percebe-se que não ocorre alteração na qualidade dos ajustes dos dados, uma vez que as novas variáveis são proporcionais às utilizadas anteriormente.

### 5.3.2 Amostras com 12,5% de Cinza Volante

Nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 são apresentadas às correlações entre a resistência à compressão simples e a razão do volume total de vazios pelo volume total de cal para as amostras com 12,5% de cinza volante e 28, 60 e 90 dias de cura, plotados pelo seu teor de cal.

Pode-se observar nas Figuras 5.16 a 5.18 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

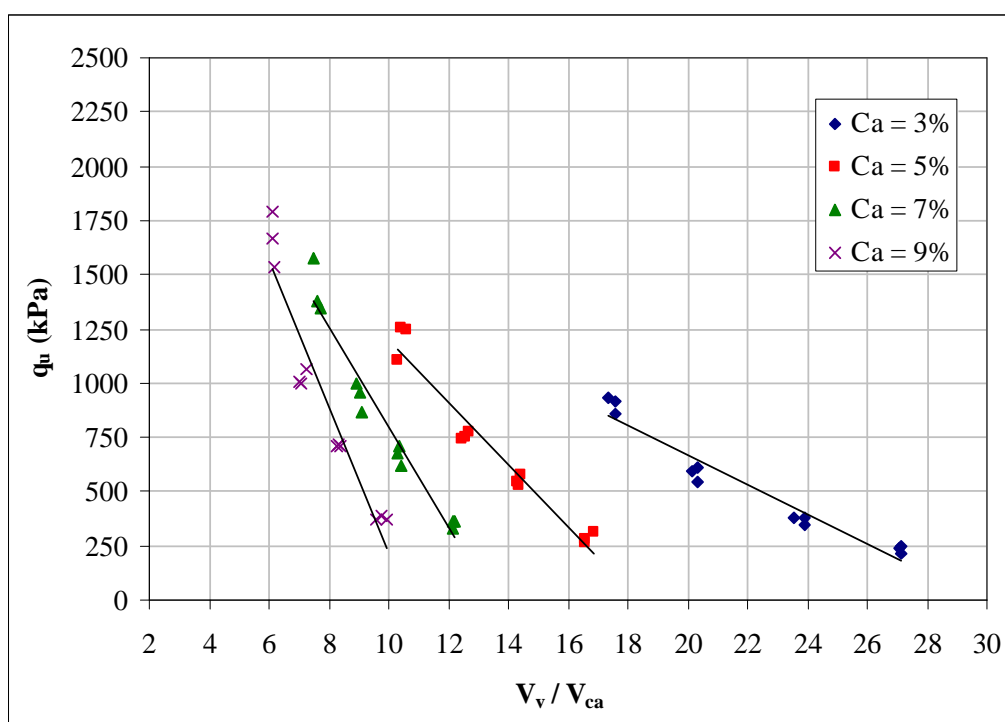


Figura 5.16 – Relação vazios/cal para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

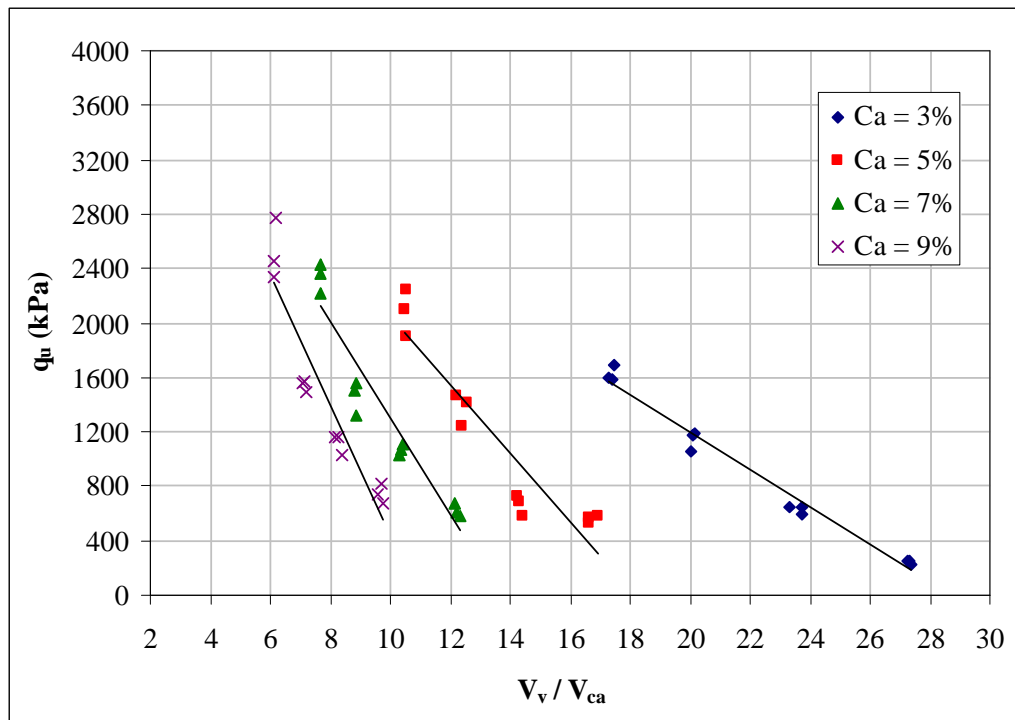


Figura 5.17 – Relação vazios/cal para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

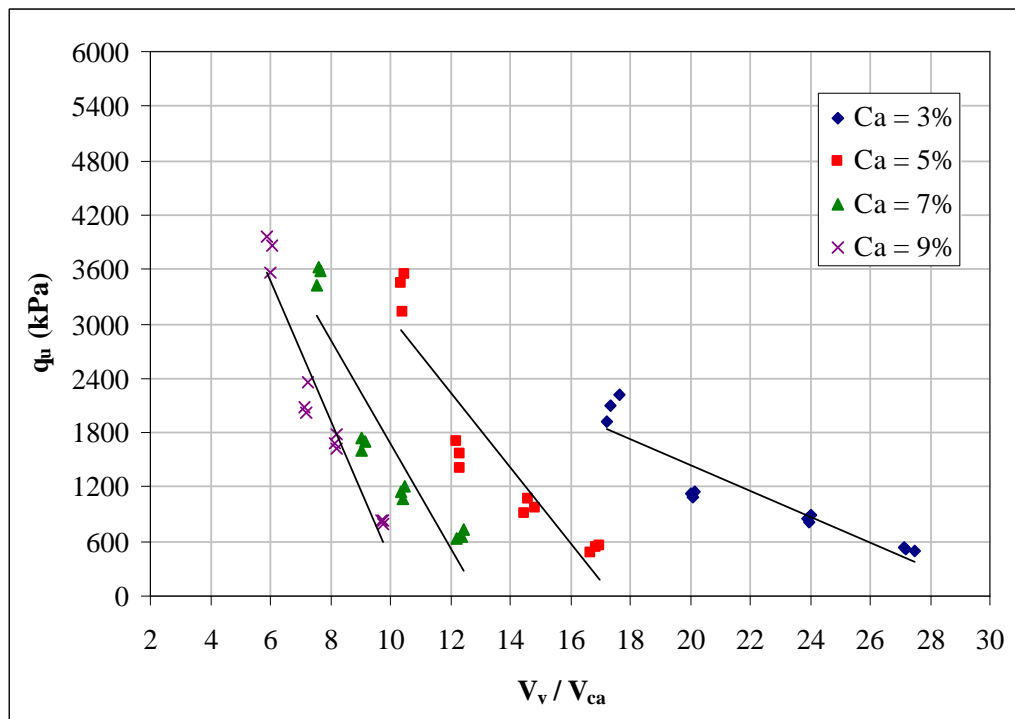


Figura 5.18 – Relação vazios/cal para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Verifica-se claramente que pontos com mesmo fator vazios/cal obtidos de modos diferentes (um por densificação e outro por aumento do teor de cimento), apresentam resistências distintas, sendo que os pontos com menor porosidade e menor quantidade de cal atingem, sistematicamente, resistências maiores, tanto para amostras com 28 e 60 dias de cura como para amostras com 90 dias de cura.

Ocorre que dada uma variação no volume de vazios, uma variação proporcional no volume de cal assume que seria suficiente para contrabalançar a perda ou ganho na resistência. Mesma tendência verificada para solo-cimento em Larnach (1960), Foppa (2005) e Lopes Junior (2007) tanto em amostras de solo-cal como em amostras de solo-cimento.

Se observarmos agora as Figuras 5.19 a 5.21, que mostram a relação das grandezas volume de vazios ( $V_v$ ), e as Figuras 5.22 e 5.24, que relacionam o inverso do volume de cimento ( $1/V_{ca}$ ) com a resistência à compressão simples, para amostras com 28, 60 e 90 dias de cura. Pode-se notar que as taxas de variação  $q_u$  em relação a cada uma dessas grandezas são substancialmente diferentes.

Uma maneira de compatibilizarmos as taxas de variação das grandezas acima citadas é através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Após diversas tentativas obteve-se que, aplicando uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro  $V_{ca}$ , haveria uma melhor compatibilização entres as taxas de variação, resultando num melhor ajuste para o fator vazios/cal, tanto para amostras com 28 e 60 dias como para amostras com 90 dias de cura. As Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 apresentam a variação da resistência à compressão simples em relação ao fator  $1/(V_{ca})^{0,12}$ , para amostras com 12,5% de cinza volante e 28, 60 e 90 dias de cura. Pode-se observar agora, comparando as Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 com as Figuras 5.19, 5.20 e 5.21, que a taxa de variação dos dois fatores são similares.

Aplicando a formulação obtida para o fator vazios/cal obtemos os gráficos das Figuras 5.28, 5.29 e 5.30, onde se pode verificar o melhor ajuste dos pontos a esse novo fator.

Pelas figuras 5.28, 5.29 e 5.30, vimos que a resistência à compressão simples do material em estudo pode ser avaliada, com um excelente grau de precisão, através do fator vazios/cal ajustado pelo expoente 0,12. Entretanto, uma forma mais elegante de expressar o fator vazios/cal pode ser feita utilizando, ao invés do volume de vazios, a porosidade do material ( $\eta$ ) expressa em porcentagem e, ao invés do volume de cal, o teor volumétrico de cal expresso em porcentagem do volume total ( $C_{av}$ ).

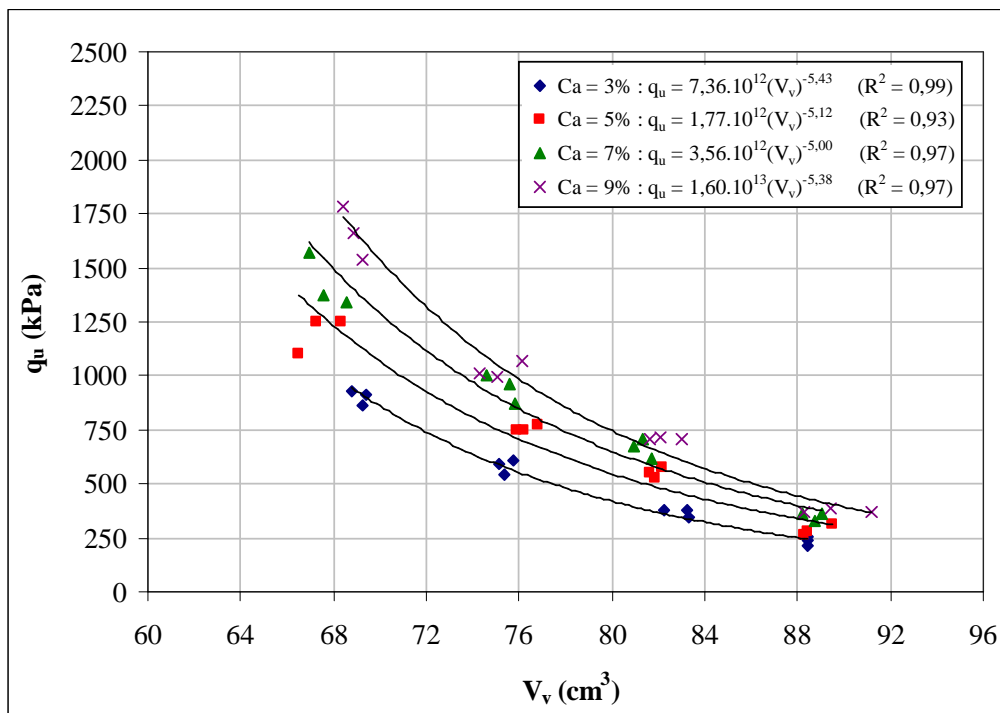


Figura 5.19 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

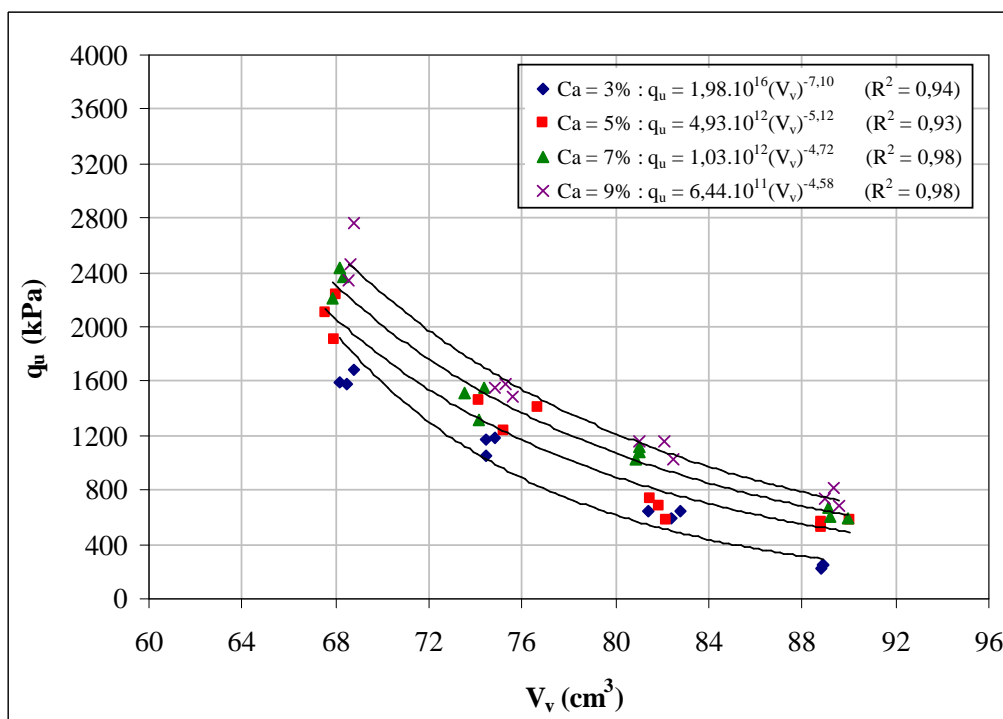


Figura 5.20 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura



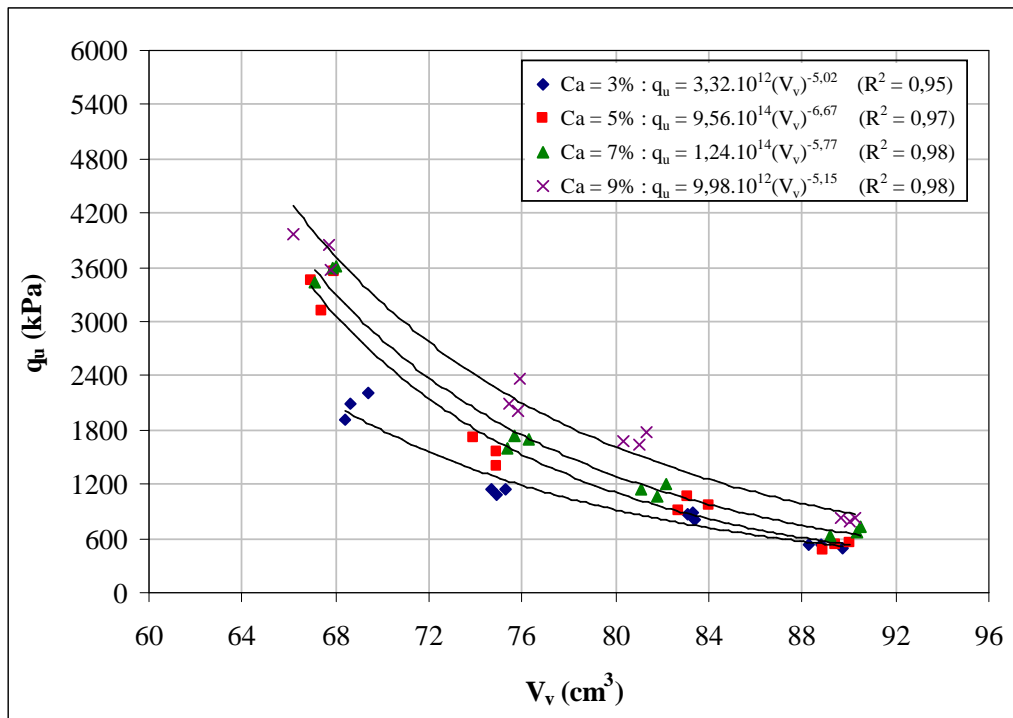


Figura 5.21 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

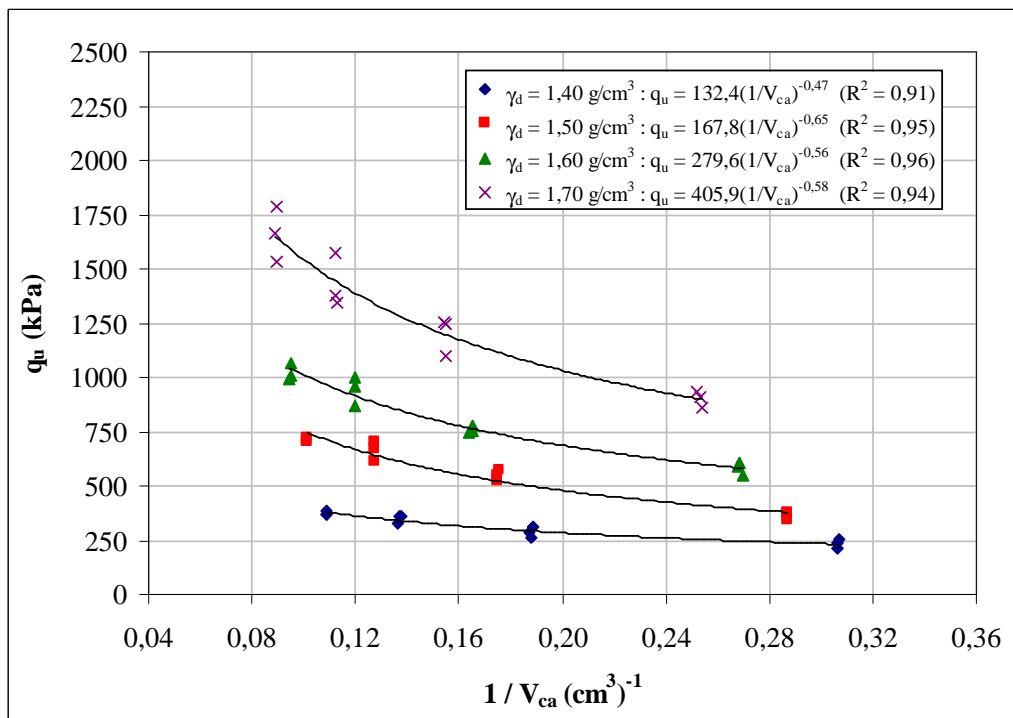


Figura 5.22 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

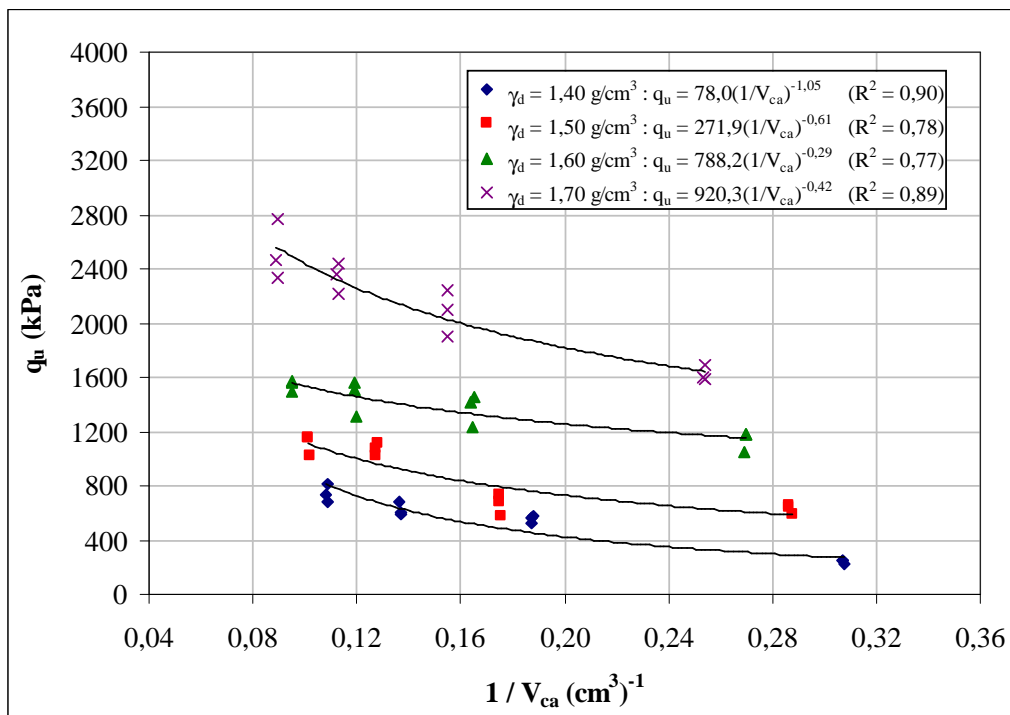


Figura 5.23 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

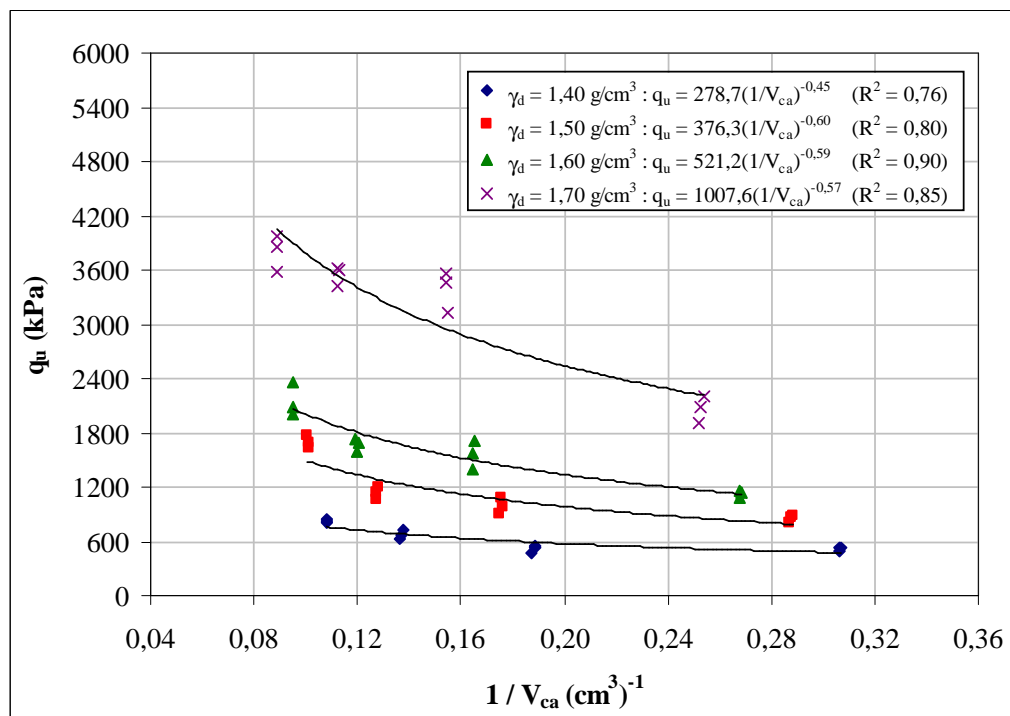


Figura 5.24 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

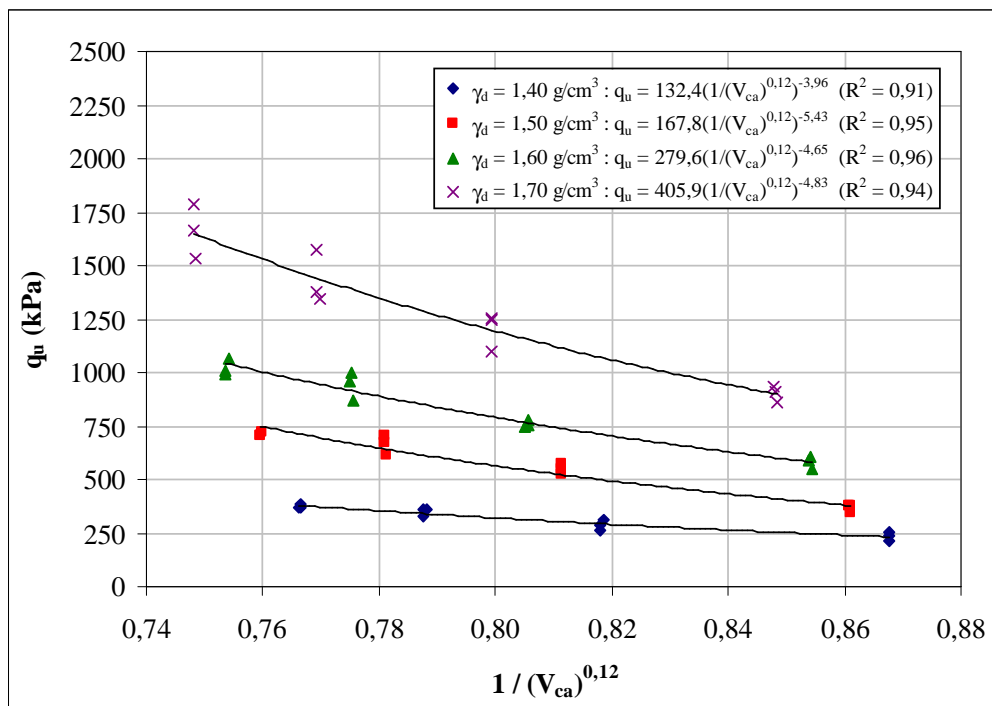


Figura 5.25 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

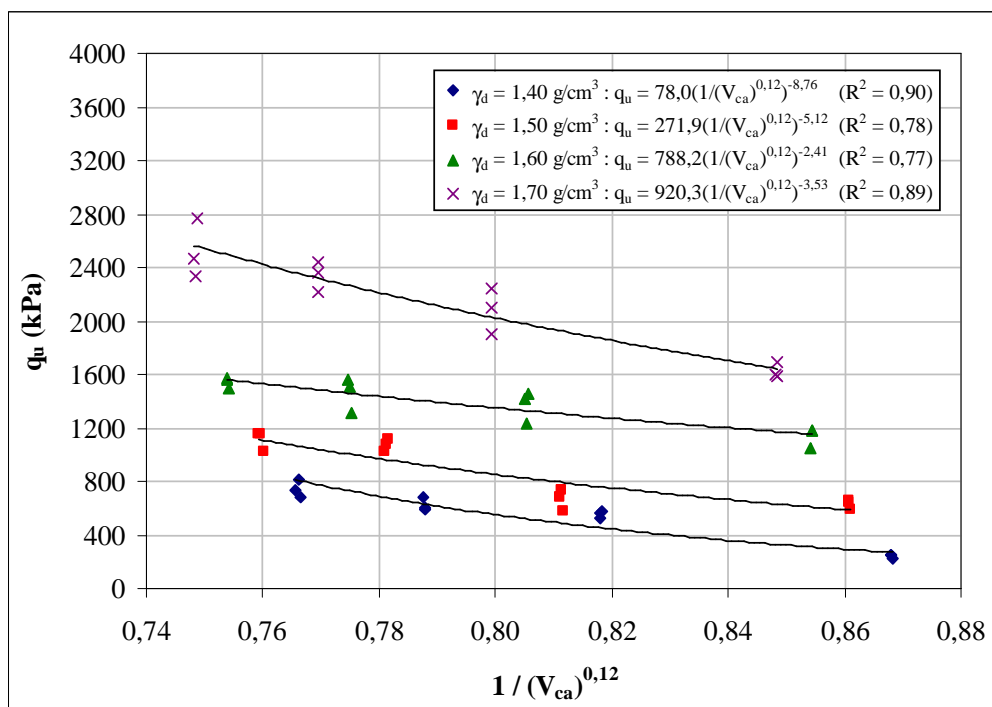


Figura 5.26 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

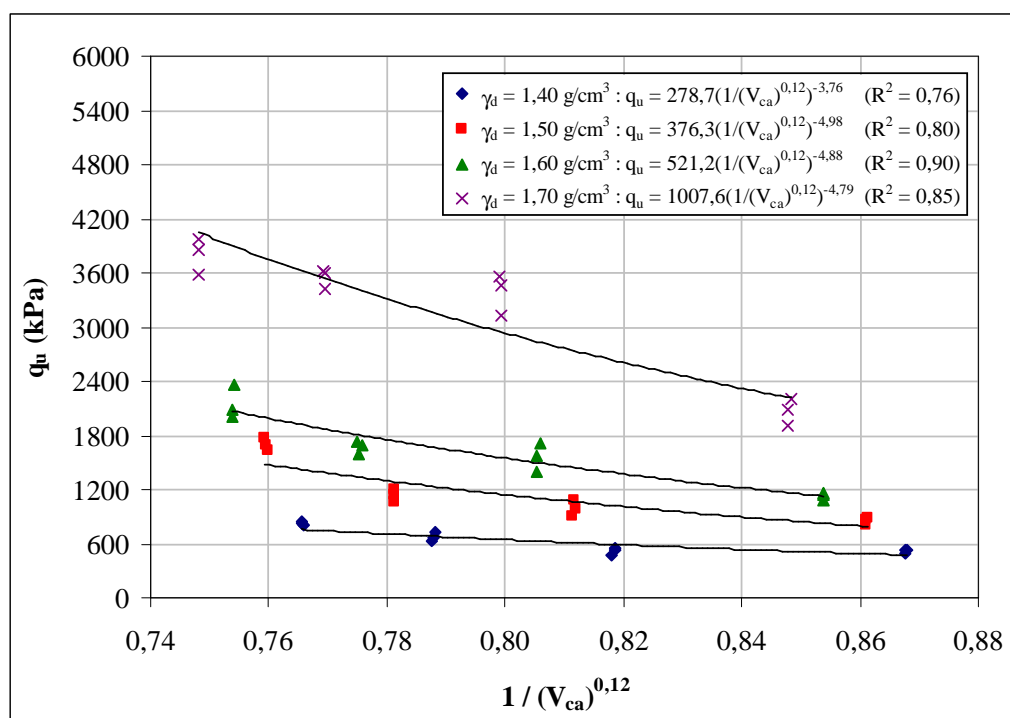


Figura 5.27 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

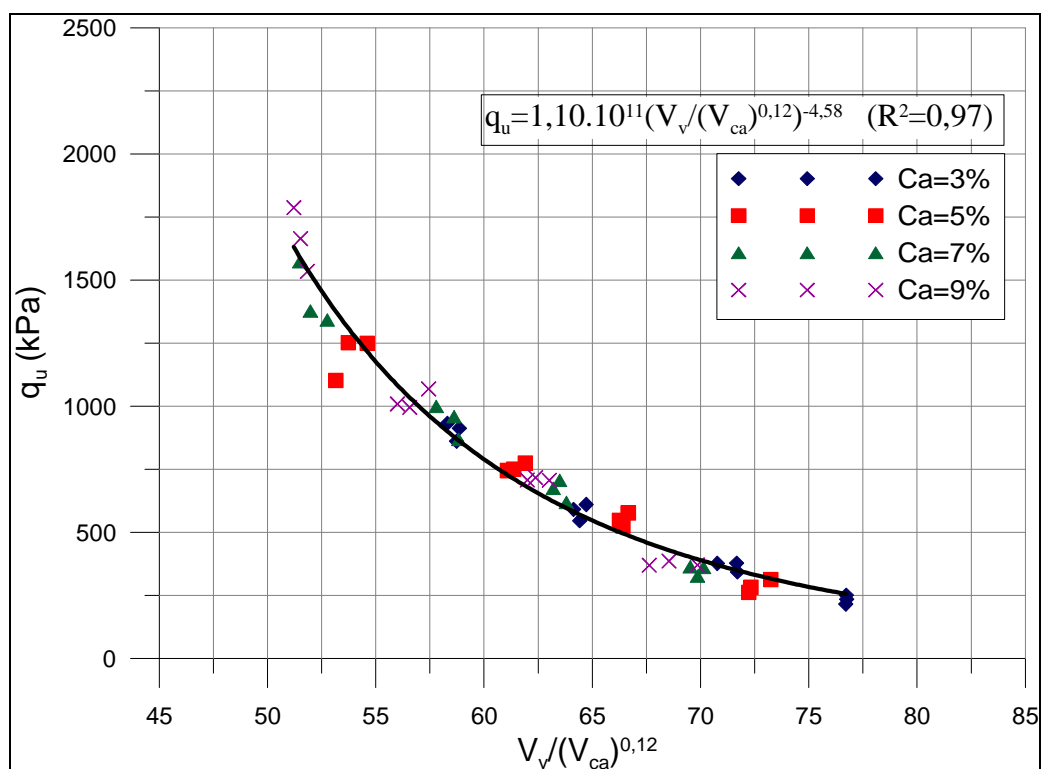


Figura 5.28 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

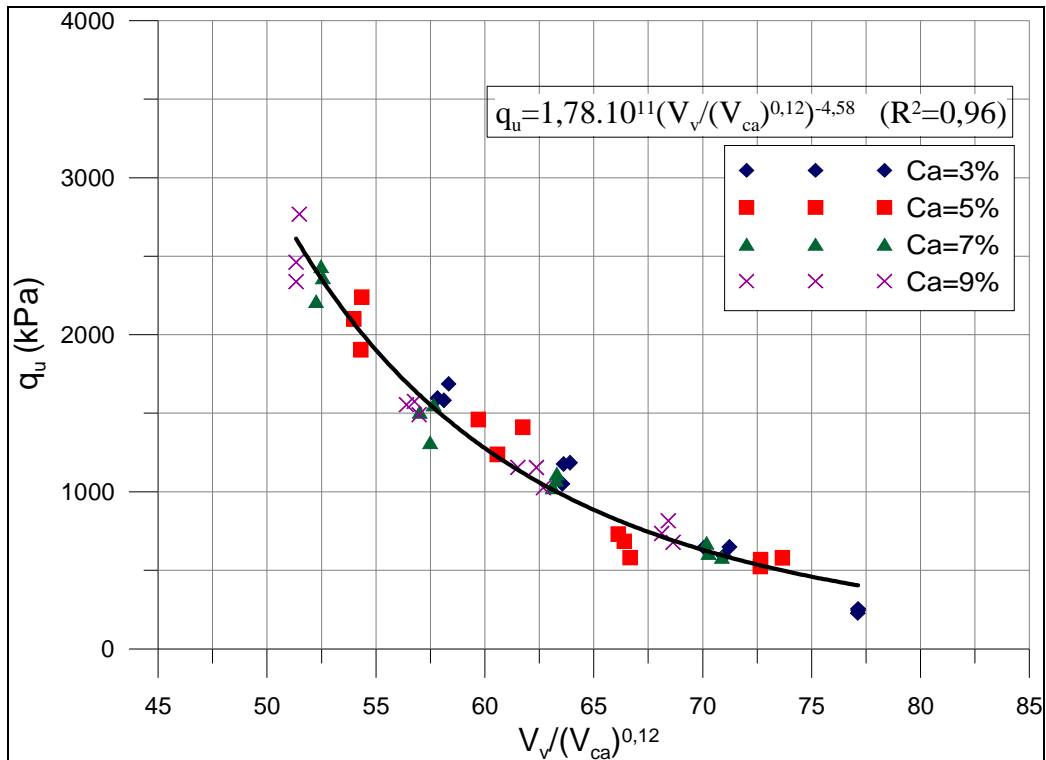


Figura 5.29 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

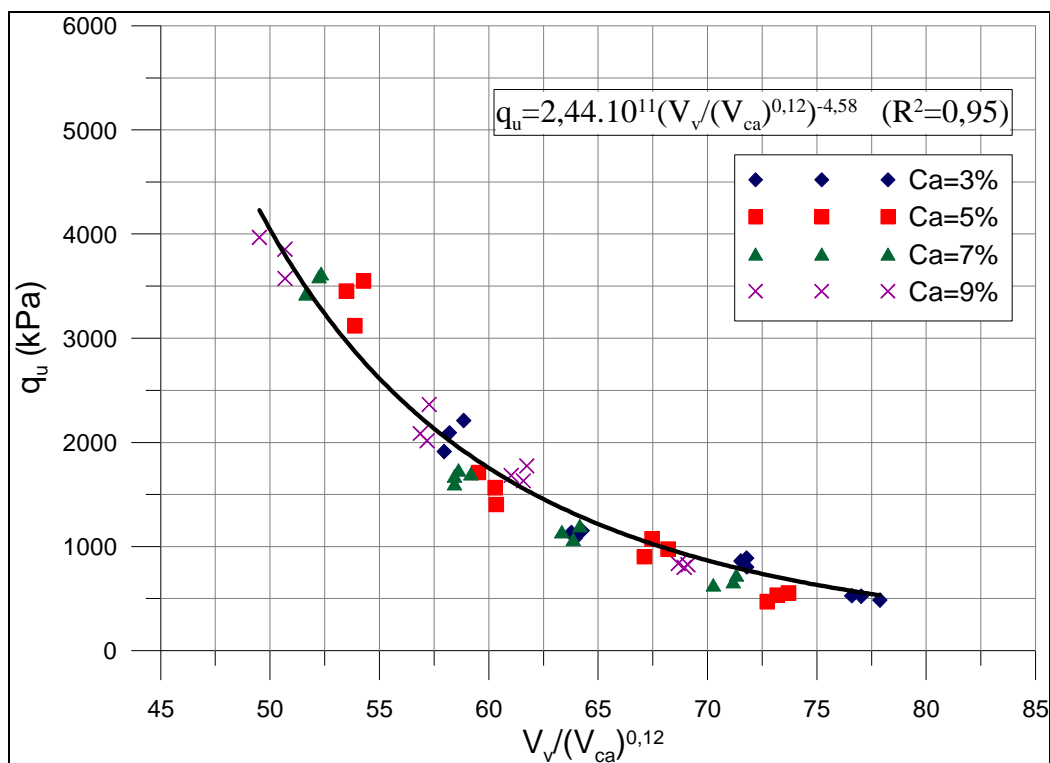


Figura 5.30 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

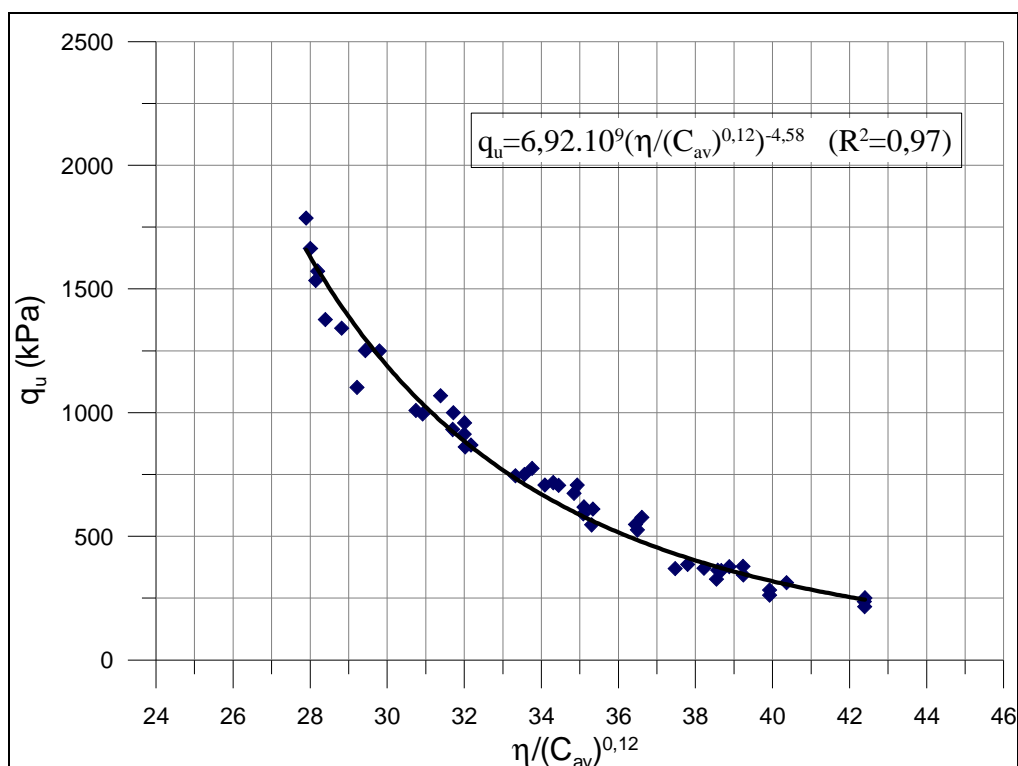


Figura 5.31 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

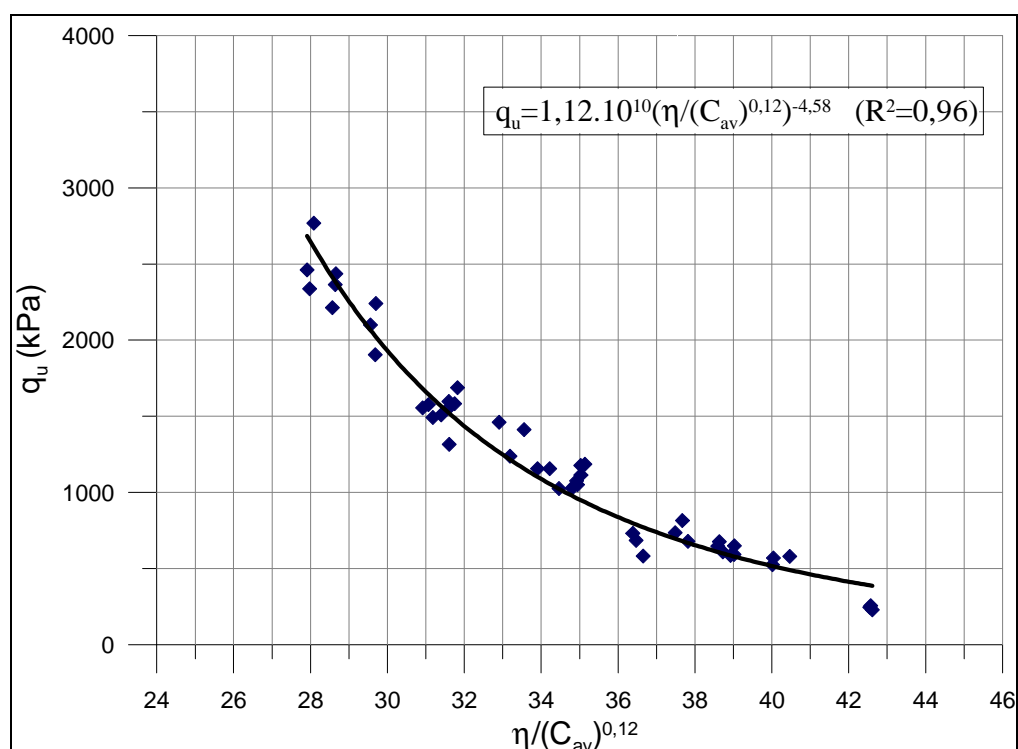


Figura 5.32 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

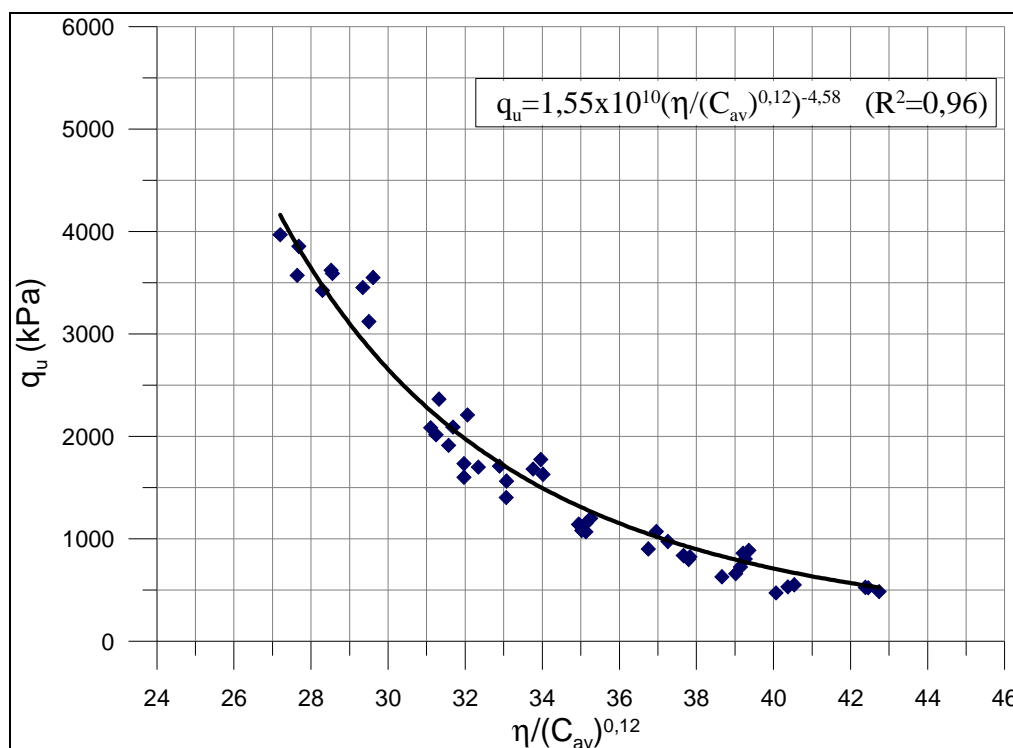


Figura 5.33 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

As Figuras 5.31 a 5.33 apresentam o novo ajuste utilizando essa relação  $[\eta/(C_{av})^{0,12}]$ , para as amostras com 12,5% de cinza volante e 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente. Percebe-se também, que não ocorre alteração na qualidade dos ajustes dos dados, uma vez que as novas variáveis são proporcionais às utilizadas anteriormente.

### 5.3.3 Amostras com 25% de Cinza Volante

Nas Figuras 5.34, 5.35 e 5.36 são apresentadas às correlações entre a resistência à compressão simples e a razão do volume total de vazios pelo volume total de cal para as amostras com 25% de cinza volante e 28, 60 e 90 dias de cura, plotados pelo seu teor de cal.

Pode-se observar nas Figuras 5.34 a 5.36 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

Verifica-se claramente que pontos com mesmo fator vazios/cal obtidos de modos diferentes (um por densificação e outro por aumento do teor de cimento), apresentam resistências distintas, sendo que os pontos com menor porosidade e menor quantidade de cal atingem,

sistematicamente, resistências maiores, tanto para amostras com 28 e 60 dias de cura como para amostras com 90 dias de cura.

Ocorre que dada uma variação no volume de vazios, uma variação proporcional no volume de cal assume que seria suficiente para contrabalançar a perda ou ganho na resistência. Mesma tendência verificada para solo-cimento em Larnach (1960), Foppa (2005) e Lopes Junior (2007) tanto em amostras de solo-cal como em amostras de solo-cimento.

Se observarmos agora as Figuras 5.37 a 5.39, que mostram a relação das grandezas volume de vazios ( $V_v$ ), e as Figuras 5.40 e 5.42, que relacionam o inverso do volume de cimento ( $1/V_{ca}$ ) com a resistência à compressão simples, para amostras com 28, 60 e 90 dias de cura. Pode-se notar que as taxas de variação  $q_u$  em relação a cada uma dessas grandezas são substancialmente diferentes.

Uma maneira de compatibilizarmos as taxas de variação das grandezas acima citadas é através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Após diversas tentativas obteve-se que, aplicando uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro  $V_{ca}$ , haveria uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, resultando num melhor ajuste para o fator vazios/cal, tanto para amostras com 28 e 60 dias como para amostras com 90 dias de cura, independentemente da porcentagem de cinza volante. As Figuras 5.43, 5.44 e 5.45 apresentam a variação da resistência à compressão simples em relação ao fator  $1/(V_{ca})^{0,12}$ , para amostras com 25% de cinza volante e 28, 60 e 90 dias de cura. Pode-se observar agora, comparando as Figuras 5.43, 5.44 e 5.45 com as Figuras 5.37, 5.38 e 5.39, que a taxa de variação dos dois fatores são similares.

Aplicando a formulação obtida para o fator vazios/cal obtemos os gráficos das Figuras 5.46, 5.47 e 5.48, onde se pode verificar o melhor ajuste dos pontos a esse novo fator.

Pelas figuras 5.46, 5.47 e 5.48, vimos que a resistência à compressão simples do material em estudo pode ser avaliada, com um excelente grau de precisão, através do fator vazios/cal ajustado pelo expoente 0,12. Entretanto, uma forma mais elegante de expressar o fator vazios/cal pode ser feita utilizando, ao invés do volume de vazios, a porosidade do material ( $\eta$ ) expressa em porcentagem e, ao invés do volume de cal, o teor volumétrico de cal expresso em porcentagem do volume total ( $C_{av}$ ).



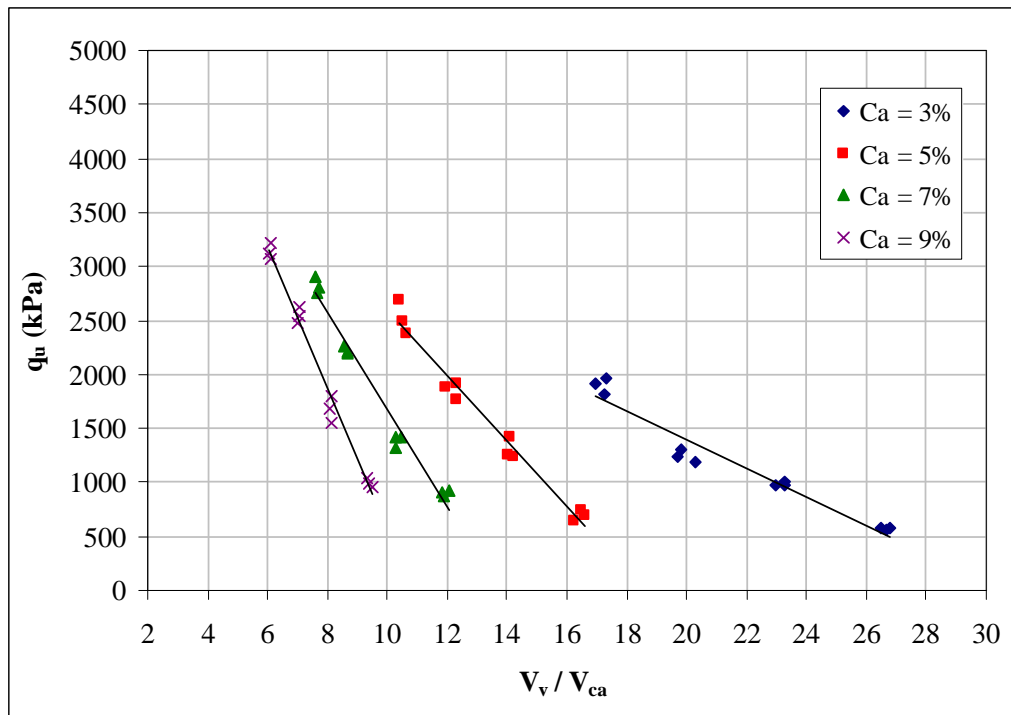


Figura 5.34 – Relação vazios/cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

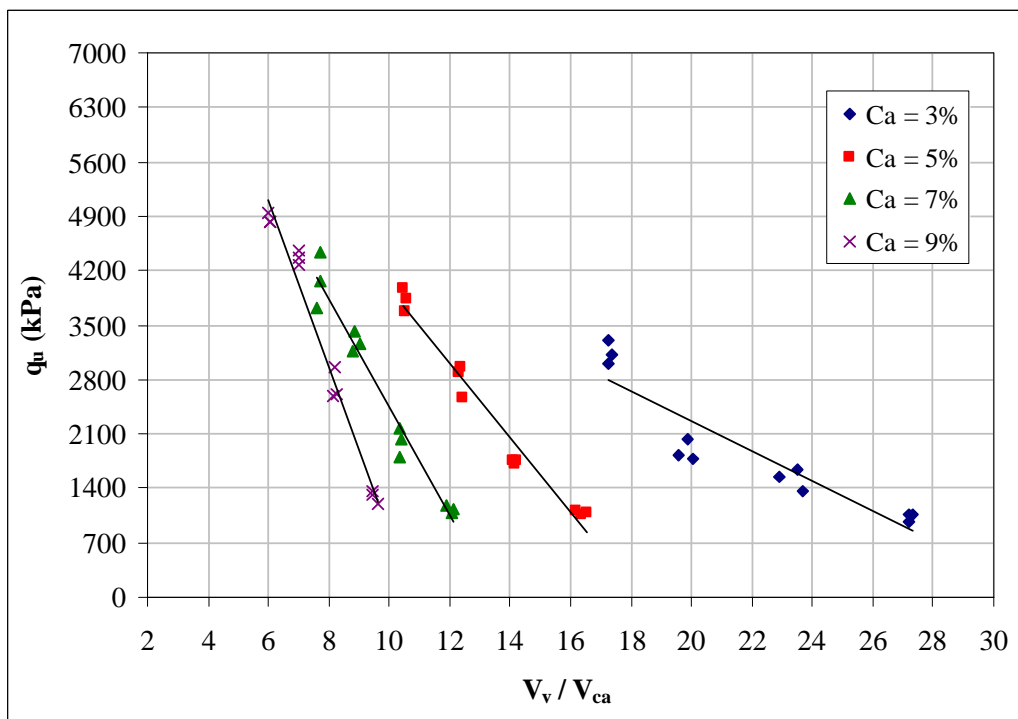


Figura 5.35 – Relação vazios/cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

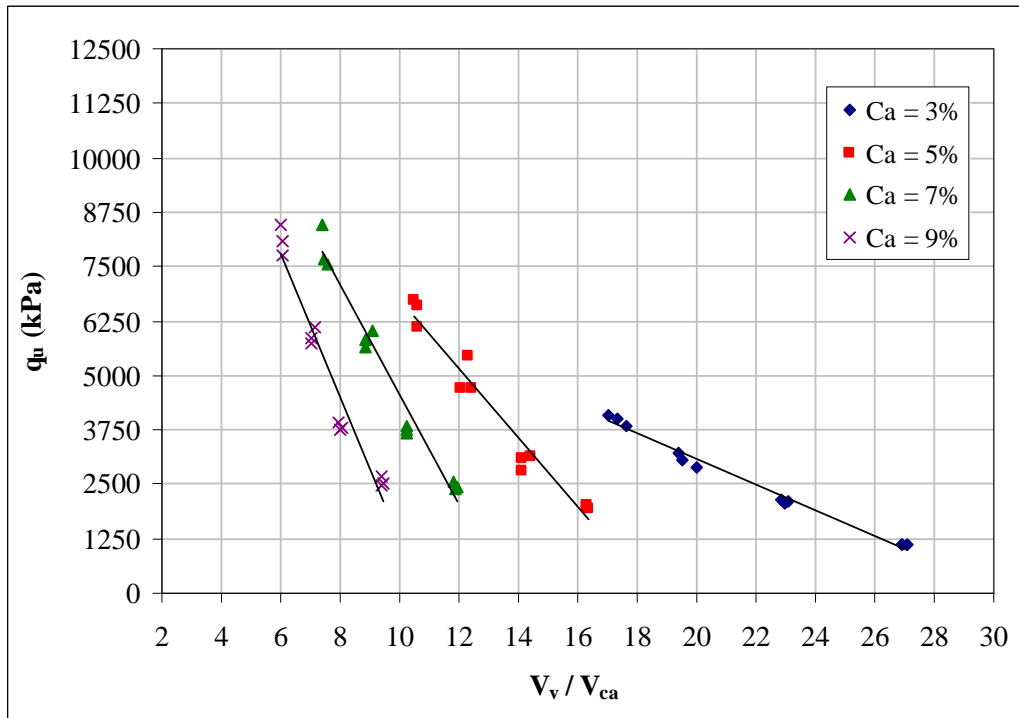


Figura 5.36 – Relação vazios/cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

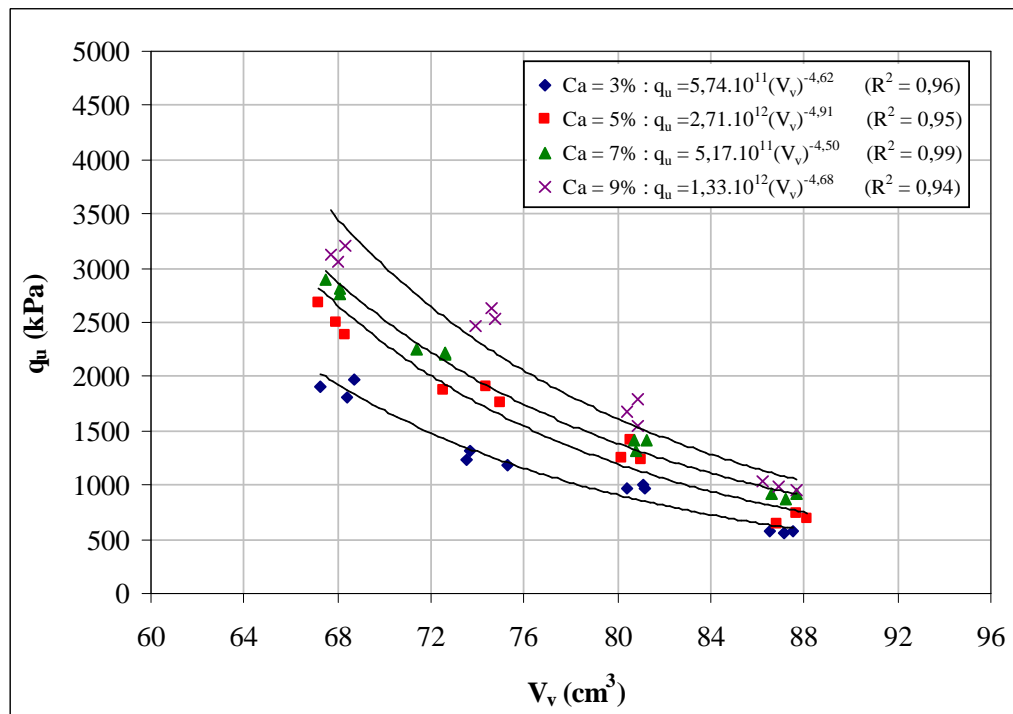


Figura 5.37 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

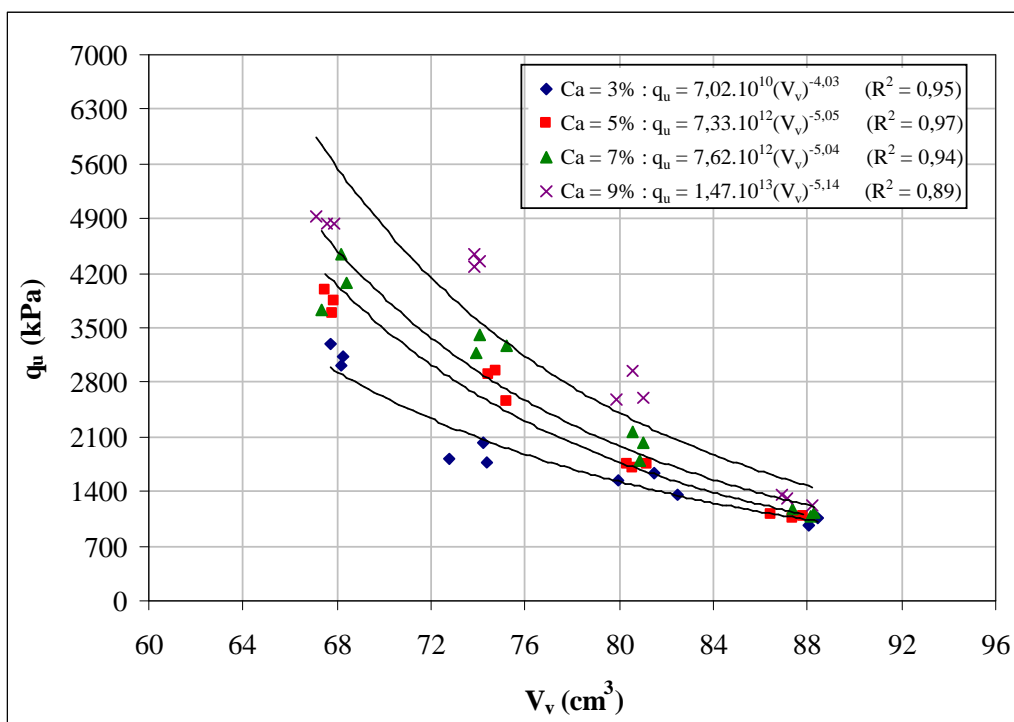


Figura 5.38 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

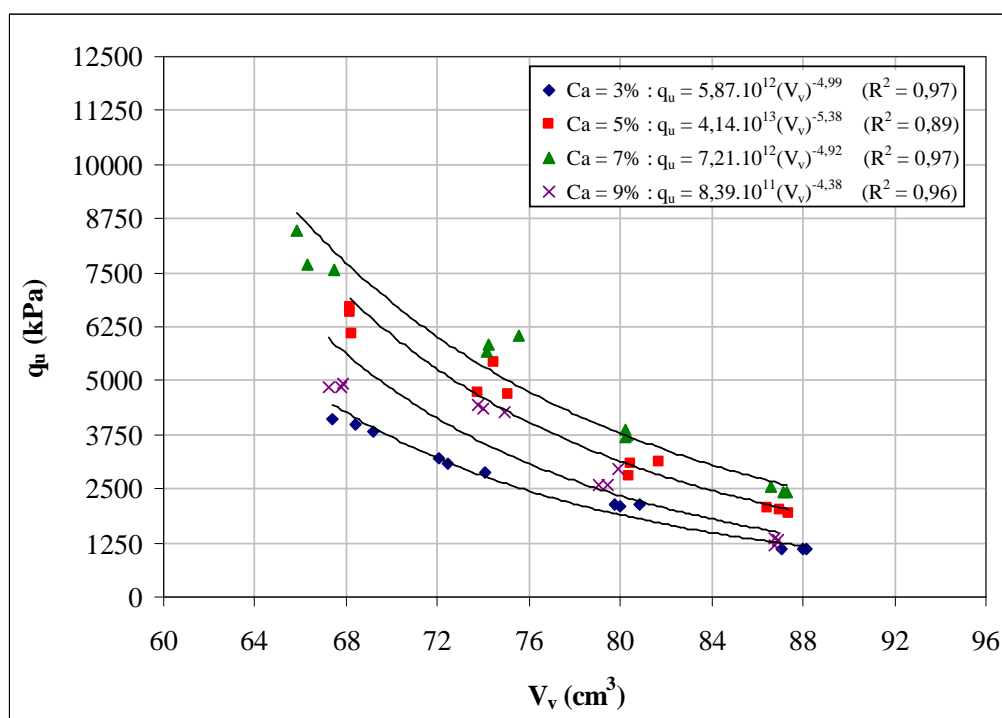


Figura 5.39 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

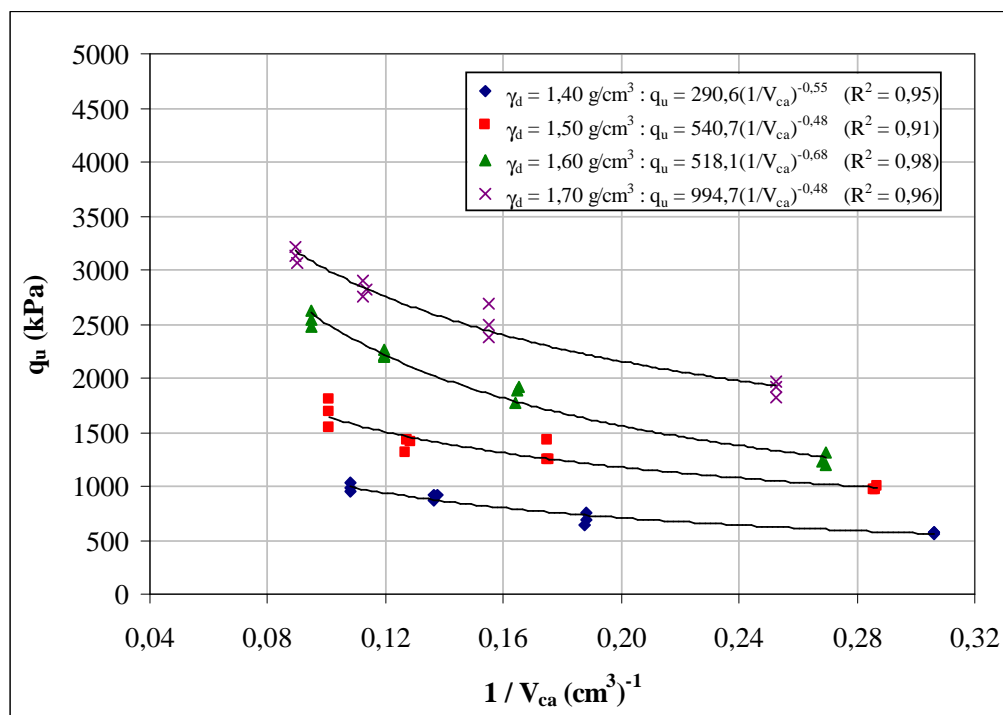


Figura 5.40 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

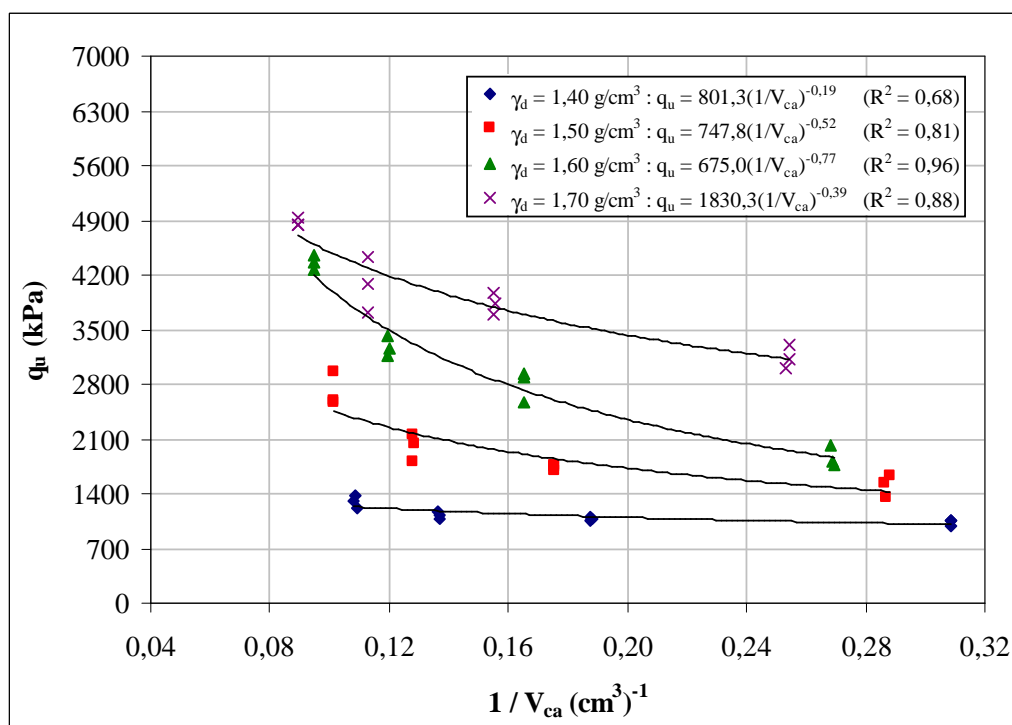


Figura 5.41 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

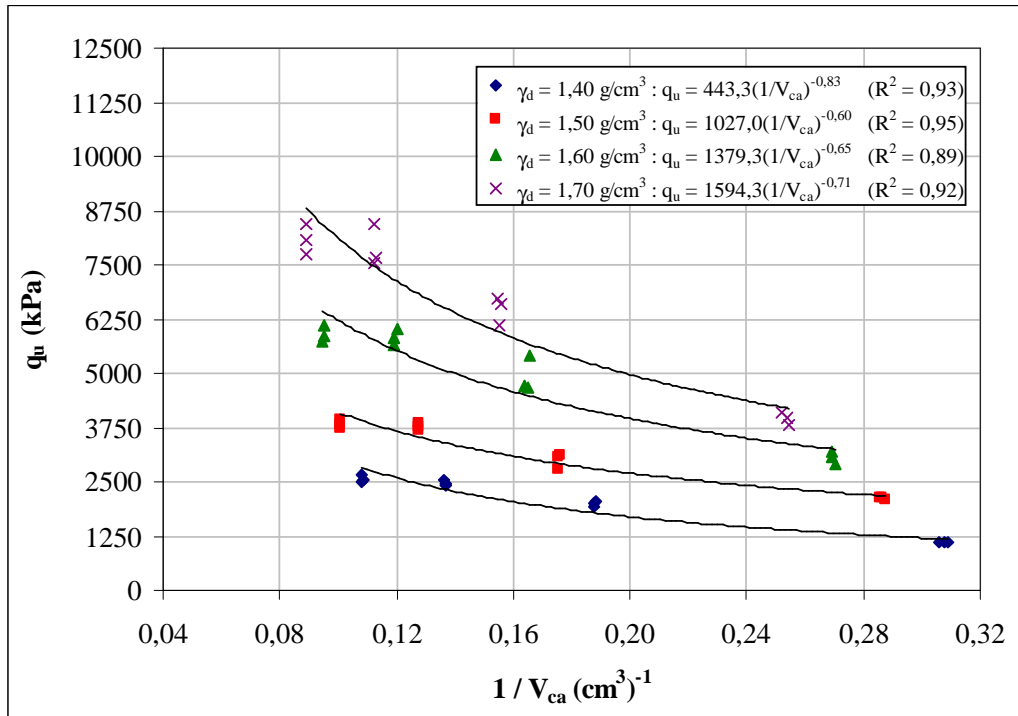


Figura 5.42 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

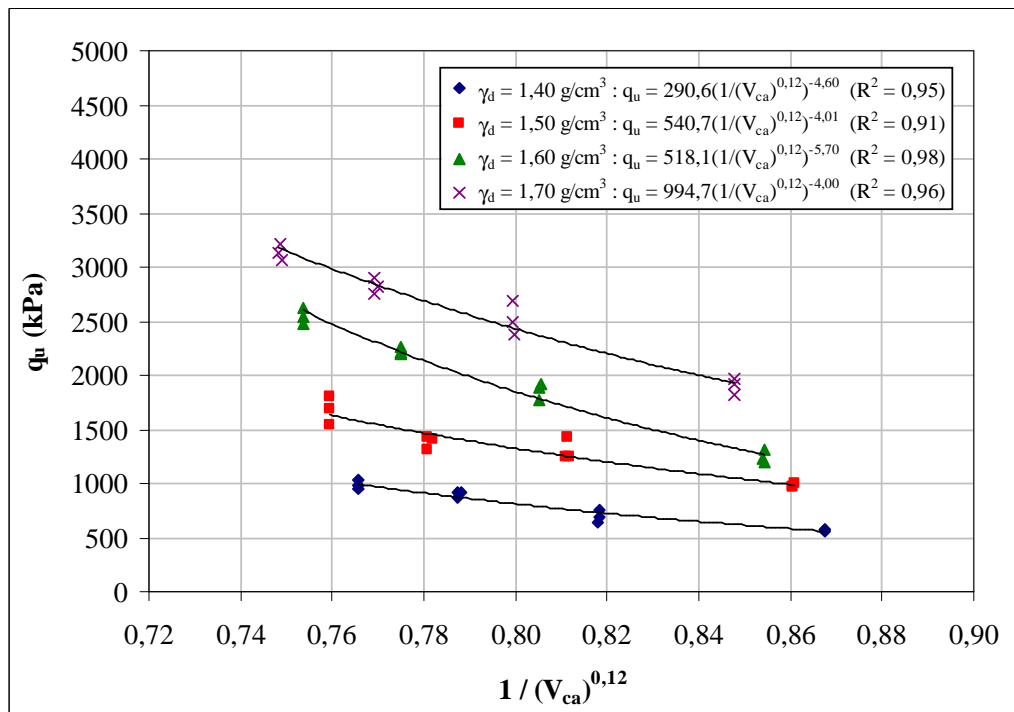


Figura 5.43 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

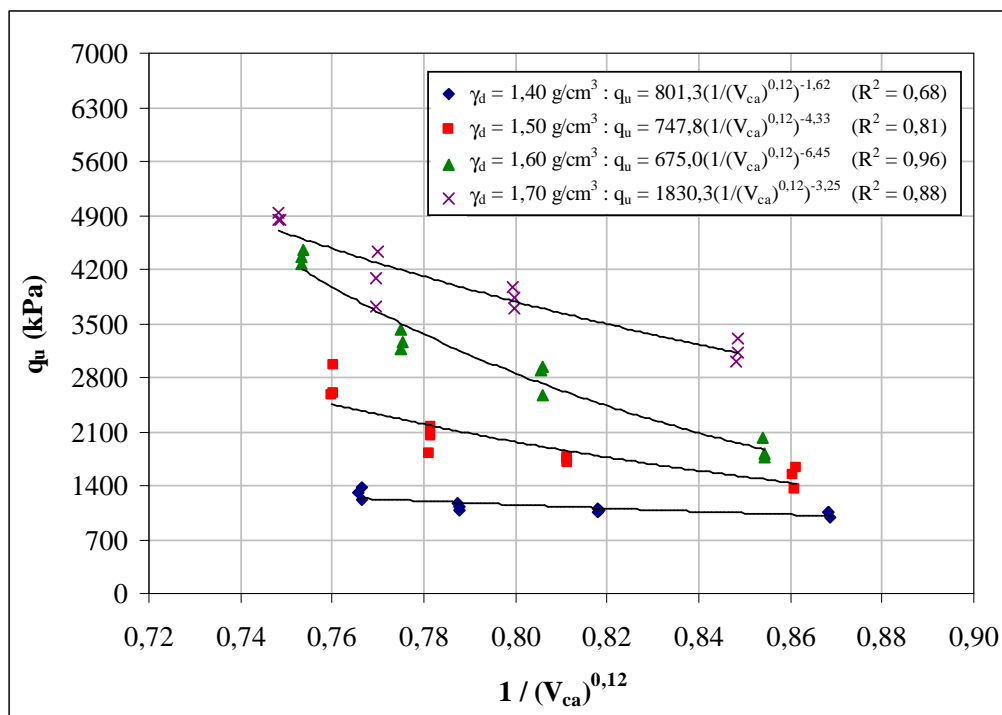


Figura 5.44 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

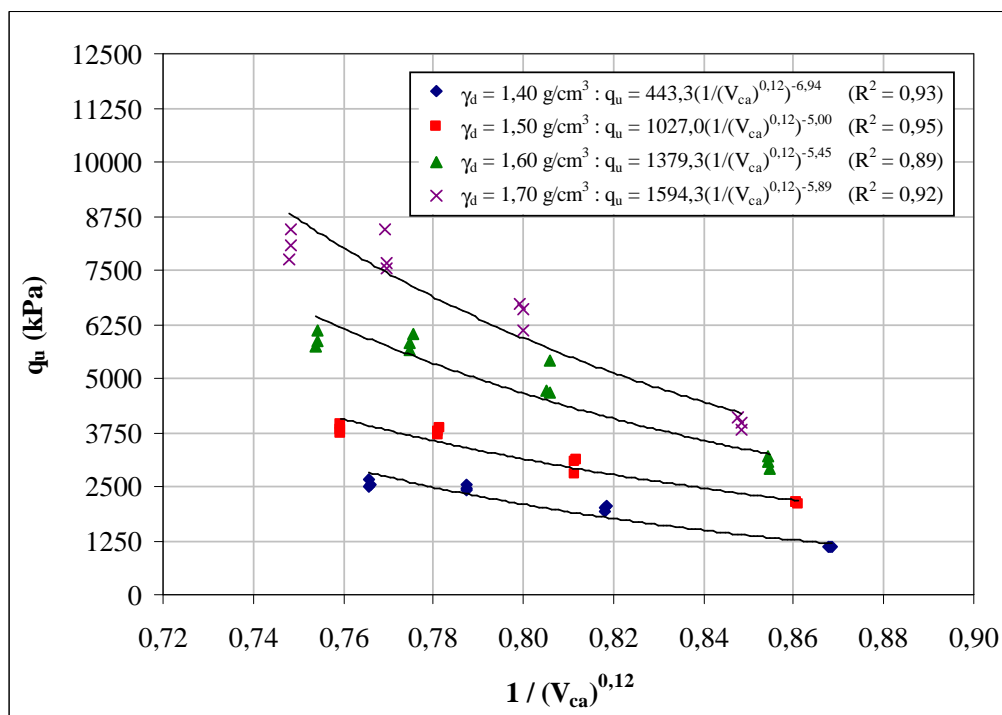


Figura 5.45 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

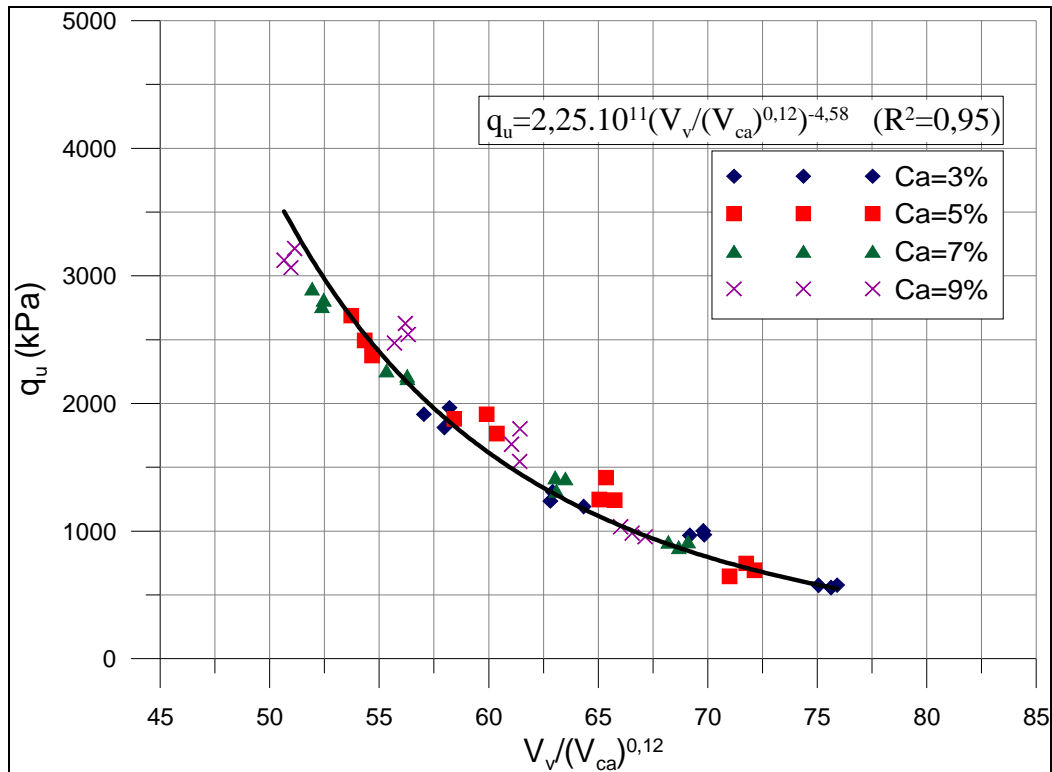


Figura 5.46 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

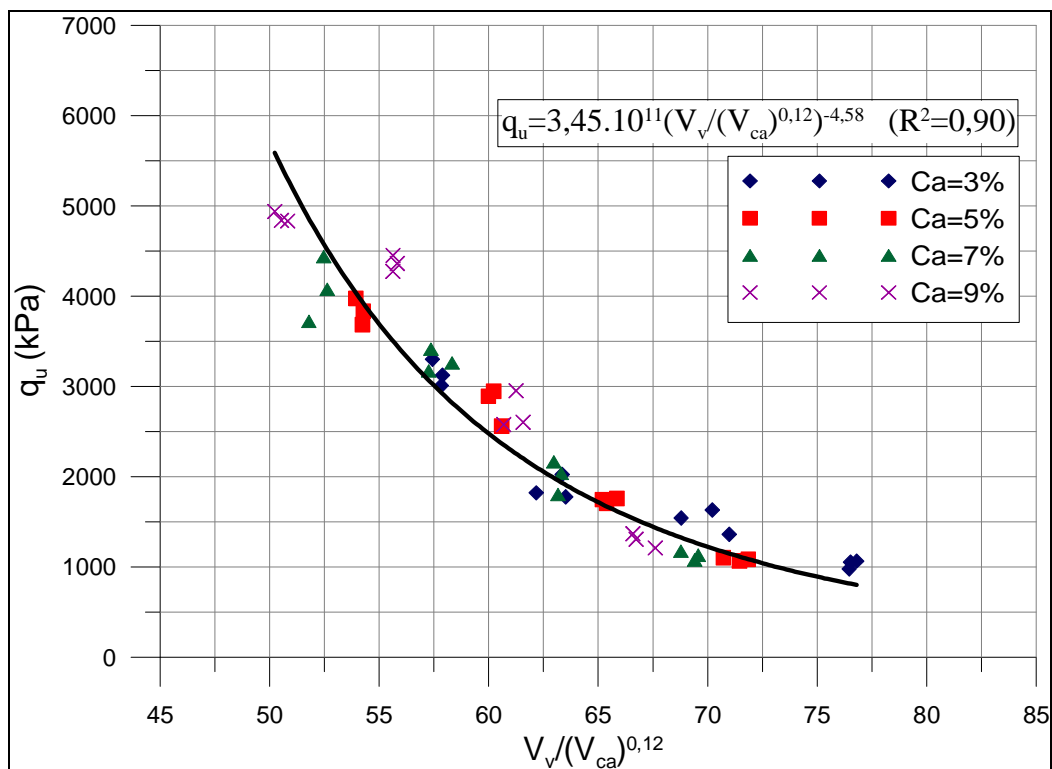


Figura 5.47 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

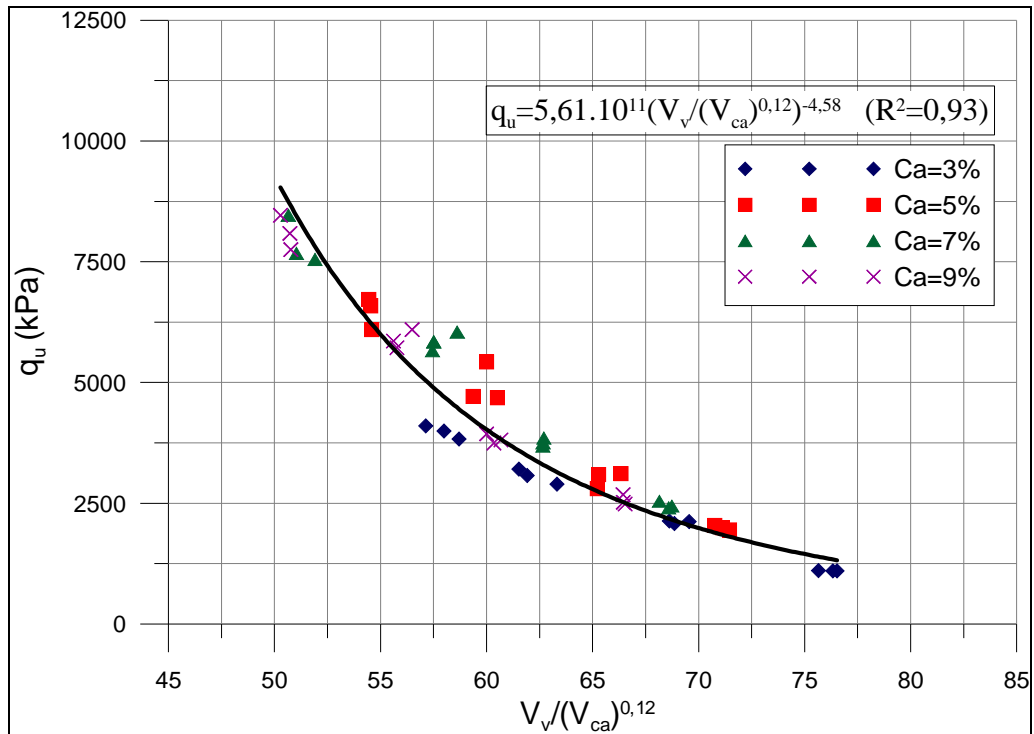


Figura 5.48 – Fator vazios/cal ajustado para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

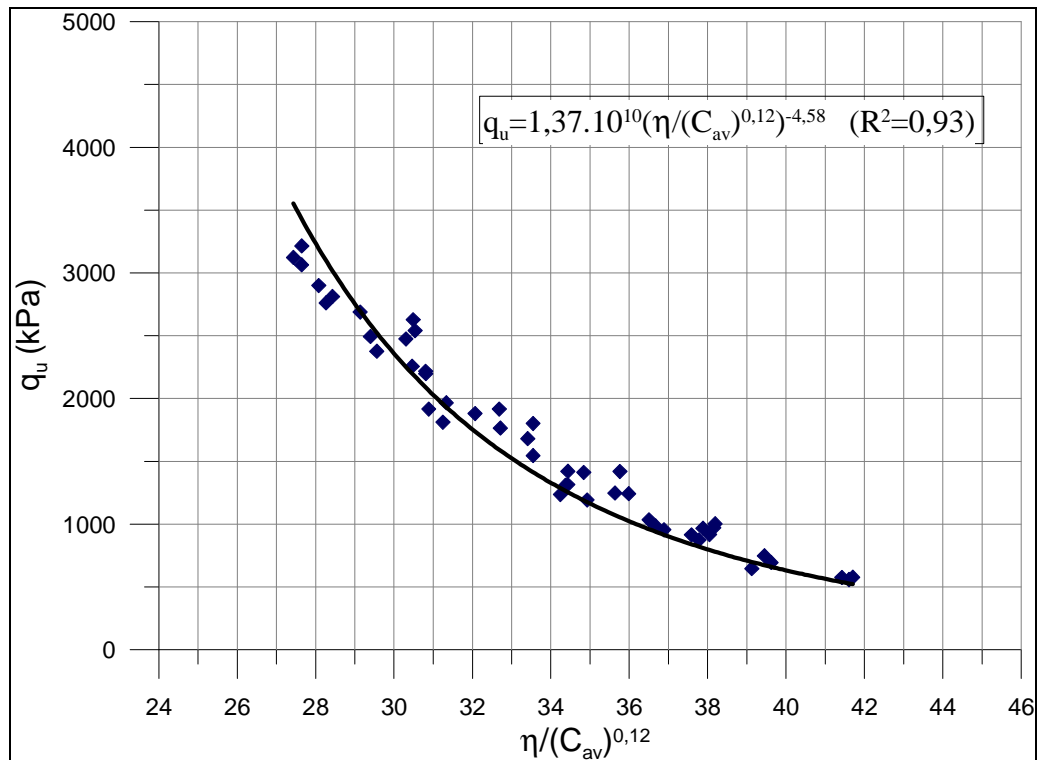


Figura 5.49 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura



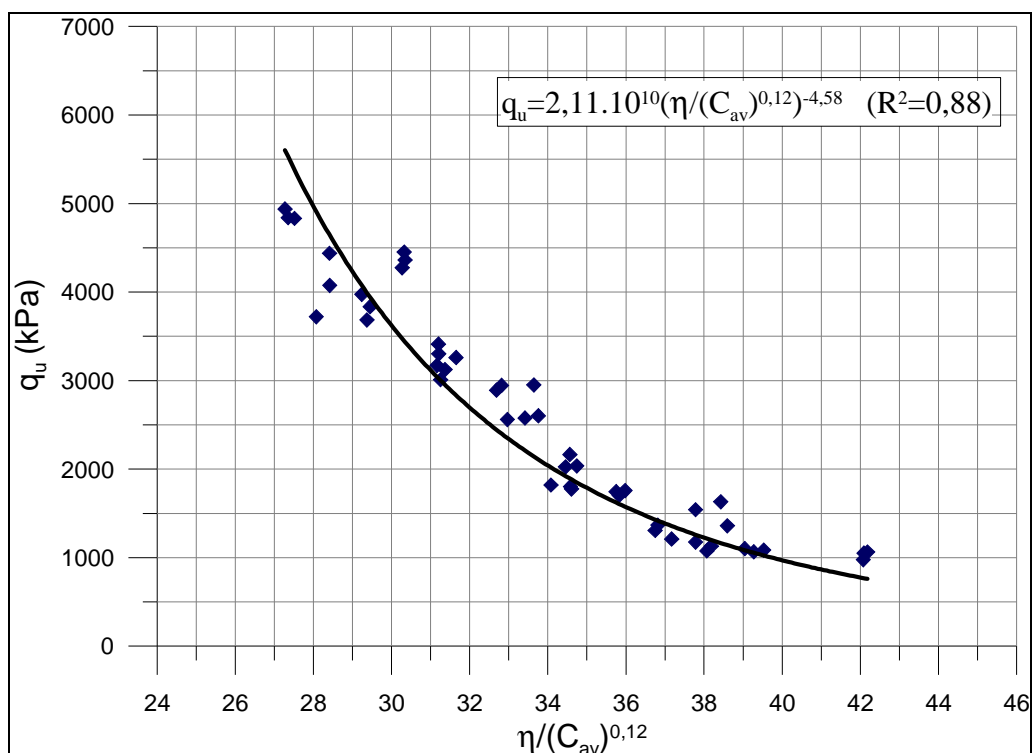


Figura 5.50 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

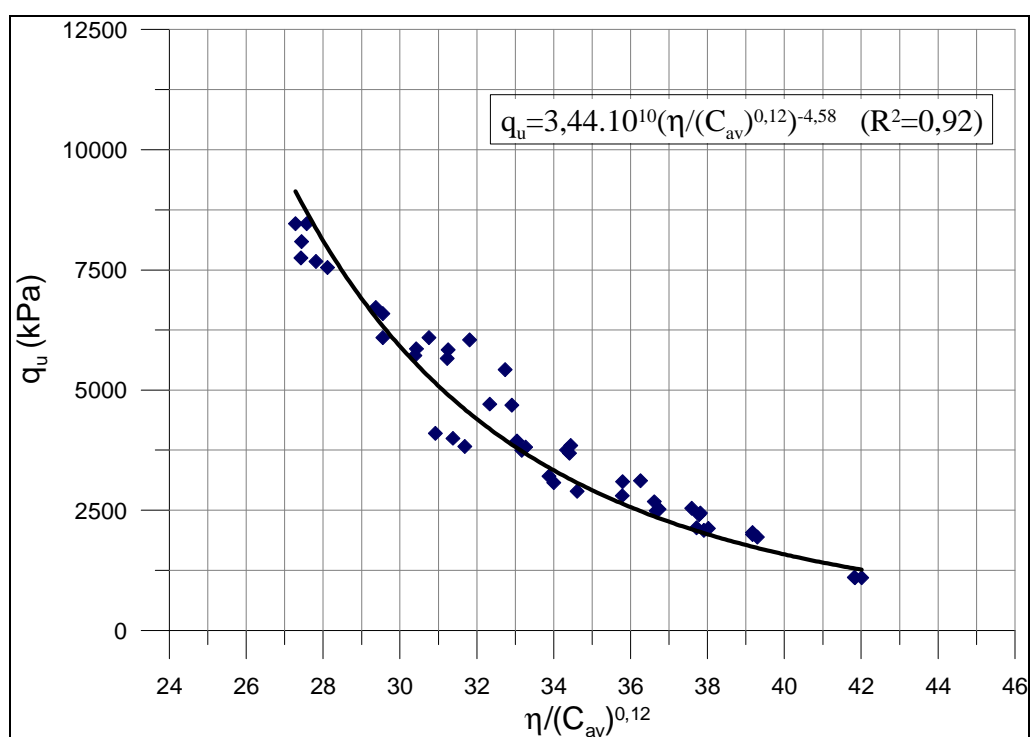


Figura 5.51 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

As Figuras 5.49 a 5.51 apresentam o novo ajuste utilizando essa relação  $[\eta/(C_{av})^{0,12}]$ , para as amostras com 25% de cinza volante e 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente. Percebe-se também, que não ocorre alteração na qualidade dos ajustes dos dados, uma vez que as novas variáveis são proporcionais às utilizadas anteriormente.

#### 5.4 EFEITO DO TEOR DE CINZA VOLANTE

Na Figura 5.52 são apresentados os resultados das relações  $\eta/C_{av}$  (ajustados) pela resistência à compressão simples das amostras com 12,5% e 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura. As amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura não apresentaram resistência à compressão simples. Pode ser observado que as curvas que definem a relação  $\eta/C_{av}$  das amostras com 12,5% e 25% de cinza volante e 28 dias de cura têm a mesma tendência exponencial.

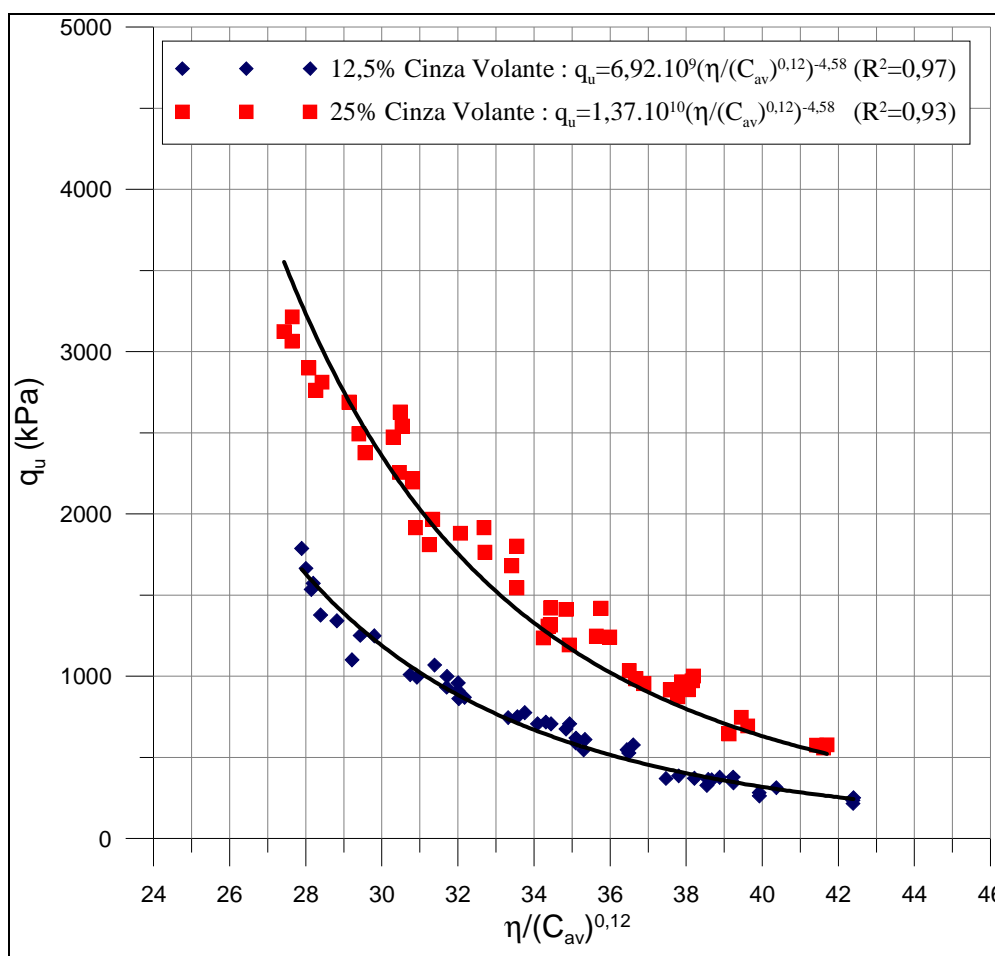


Figura 5.52 – Efeito da quantidade de cinza volante nas amostras com 12,5% e 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura

Os pontos que formam a curva das amostras de 25% de cinza volante e 28 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 130% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 12,5% de cinza volante e 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação  $\eta/C_{av}$ .

Na Figura 5.53 são apresentados os resultados das relações  $\eta/C_{av}$  (ajustados) pela resistência à compressão simples das amostras com 12,5% e 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura. As amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura não apresentaram resistência à compressão simples. Pode ser observado que as curvas que definem a relação  $\eta/C_{av}$  das amostras com 12,5% e 25% de cinza volante e 60 dias de cura têm a mesma tendência exponencial.

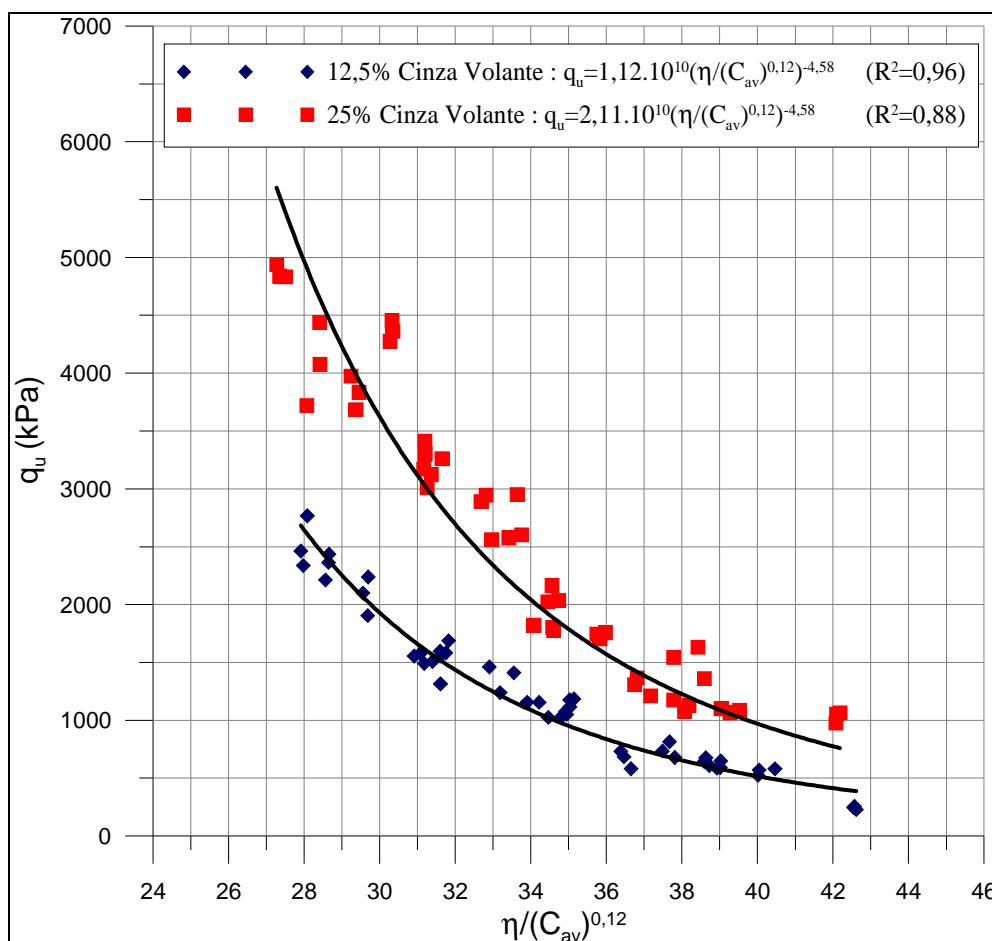


Figura 5.53 – Efeito da quantidade de cinza volante nas amostras com 12,5% e 25% de cinza volante ensaiadas com 60 dias de cura

Os pontos que formam a curva das amostras com 25% de cinza volante e 60 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 120% mais altas que os pontos que formam a

curva das amostras com 12,5% de cinza volante e 60 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação  $\eta/C_{av}$ .

Na Figura 5.54 são apresentados os resultados das relações  $\eta/C_{av}$  (ajustados) pela resistência à compressão simples das amostras com 0%, 12,5% e 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura. Pode ser observado que as curvas que definem a relação  $\eta/C_{av}$  das amostras com 0%, 12,5% e 25% de cinza volante e 90 dias de cura têm a mesma tendência exponencial.

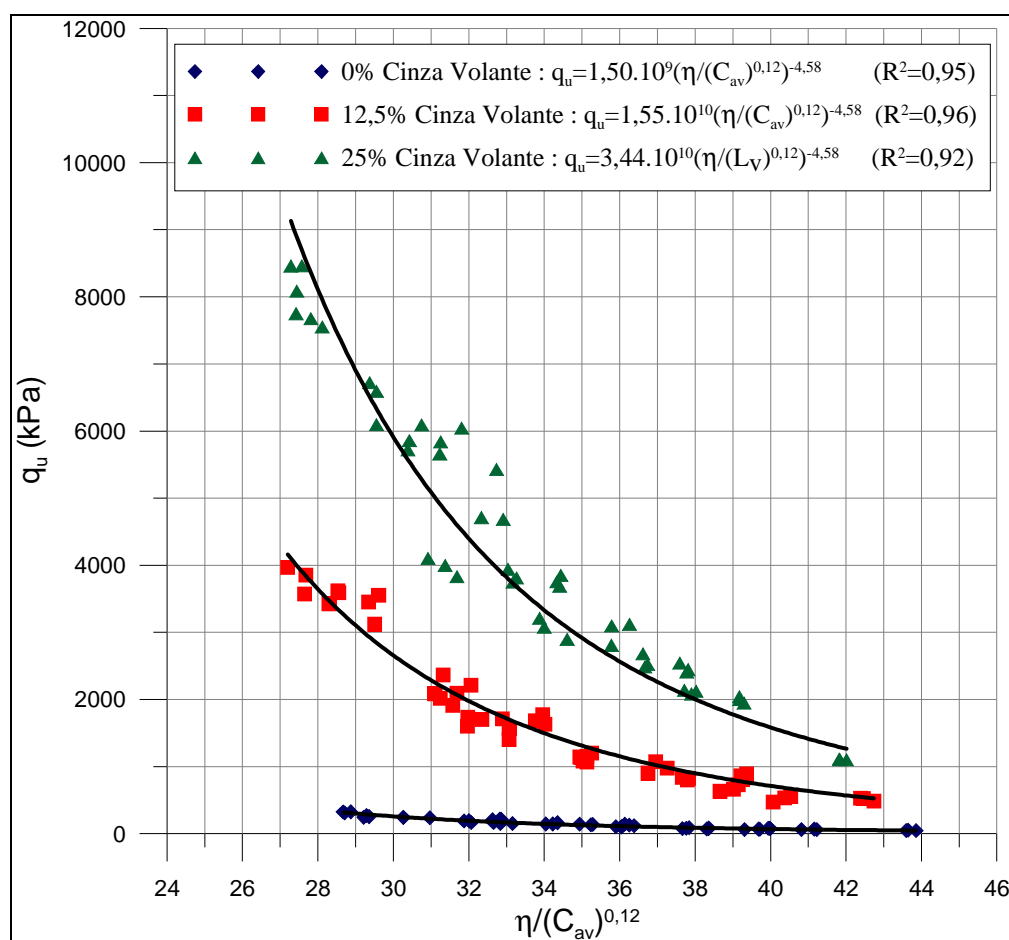


Figura 5.54 – Efeito da quantidade de cinza volante nas amostras com 0%, 12,5% e 25% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura

Os pontos que formam a curva das amostras com 25% de cinza volante e 90 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 175% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 12,5% de cinza volante e 90 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação  $\eta/C_{av}$ . Os pontos que formam a curva das amostras de 12,5% de cinza volante e 90 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 1005% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura,

independente da quantidade de cal e da relação  $\eta/C_{av}$ . E os pontos que formam a curva das amostras de 25% de cinza volante e 90 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 2935% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação  $\eta/C_{av}$ .

A explicação para esse comportamento, é que a cinza volante é uma pozolana artificial que por si só possui pouca ou nenhuma capacidade de cimentação, porém em forma finamente dividida e na presença de umidade reage quimicamente com hidróxidos alcalinos e alcalinos terrosos à temperatura ambiente para formar ou ajudar na formação de compostos possuindo propriedades cimentantes.

## 5.5 EFEITO DO TEMPO DE CURA

O efeito do tempo de cura nas amostras com 0% de cinza volante é claramente notado pelo fato de as amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 28 e 60 dias de cura não apresentarem resistência à compressão simples, enquanto que as amostras ensaiadas com 90 dias de cura apresentaram valores significativos de resistência à compressão simples. Sendo que, a curva que define os resultados das relações  $\eta/C_{av}$  (ajustados) das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 90 dias de cura têm uma tendência exponencial (Figura 5.15).

Na Figura 5.55 são apresentados os resultados das relações  $\eta/C_{av}$  (ajustados) pela resistência à compressão simples das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura. Pode ser observado que as curvas que definem a relação  $\eta/C_{av}$  das amostras ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura têm a mesma tendência exponencial.

Os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 90 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 35% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 60 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação  $\eta/C_{av}$ . Os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 60 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 65% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação  $\eta/C_{av}$ . E os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 90 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 115% mais altas que os pontos que formam a curva das

amostras ensaiadas com 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação  $\eta/C_{av}$ .

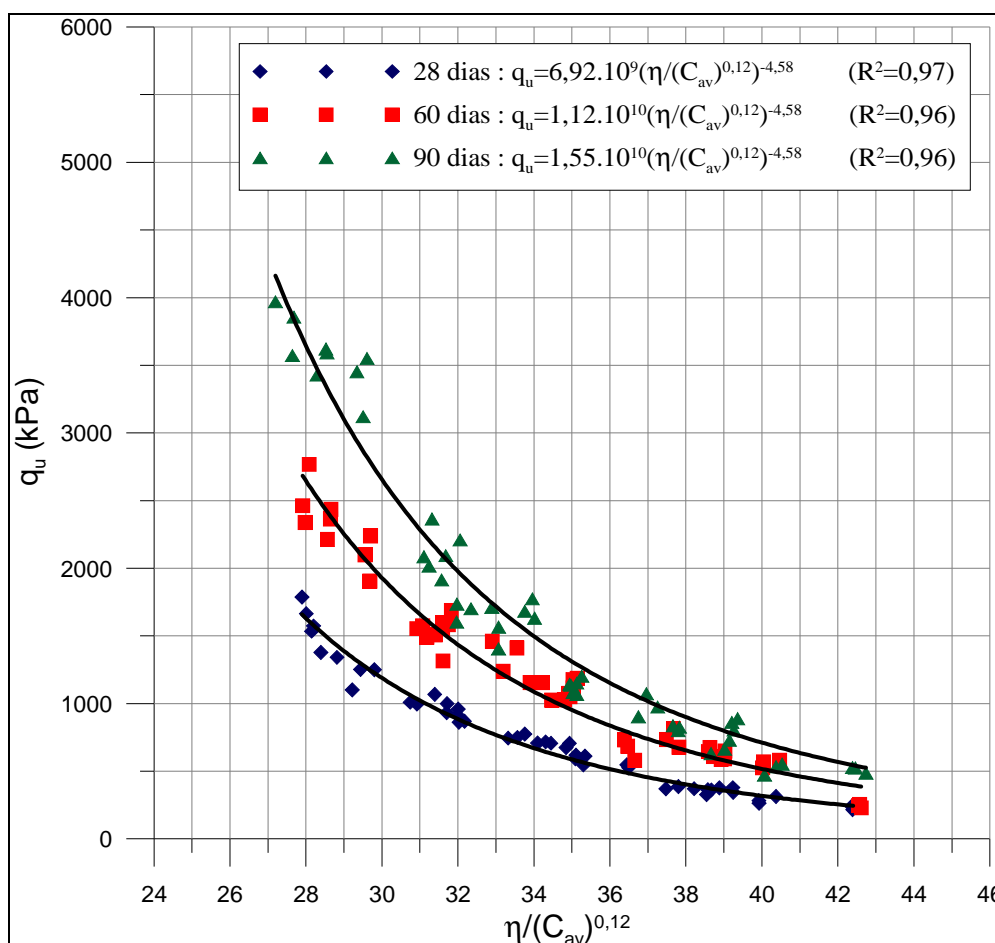


Figura 5.55 – Efeito do tempo de cura nas amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura

Na Figura 5.56 são apresentados os resultados das relações  $\eta/C_{av}$  (ajustados) pela resistência à compressão simples das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura. Pode ser observado que as curvas que definem a relação  $\eta/C_{av}$  das amostras ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura têm a mesma tendência exponencial.

Os pontos que formam a curva das amostras de 90 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 65% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 60 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação  $\eta/C_{av}$ . Os pontos que formam a curva das amostras de 60 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 50% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação  $\eta/C_{av}$ . E os pontos que formam a curva das amostras de 90

dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 150% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação  $\eta/C_{av}$ .

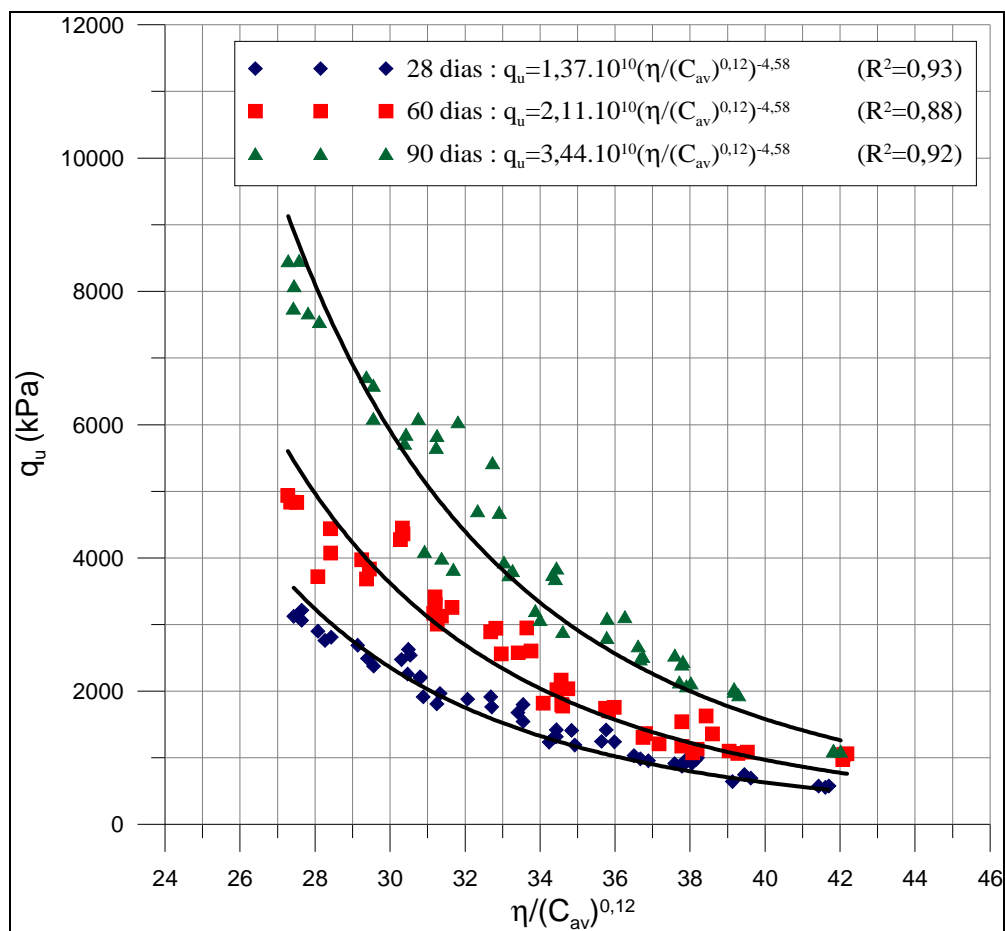


Figura 5.56 – Efeito do tempo de cura nas amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias de cura

A explicação para esse comportamento consiste em que as reações pozolânicas, as quais proporcionam ganhos efetivos de resistências às misturas compactadas de solo e cal ou solo, cinza volante e cal, são lentas, estendendo-se por anos e só se iniciam certo tempo depois da compactação. O ganho de resistência só ocorre se houver pH suficientemente elevado para dissolução da sílica e da alumina dos argilos minerais do solo e se a combinação delas com a cal derem origem a novos compostos cimentantes. Pois tanto para a manutenção do pH elevado, como para a formação de aluminatos, silicatos e/ou alumino-silicatos de cálcio, é fundamental a participação da cal. Daí que para tempos de cura de 60 e 90 dias seja tão expressiva a dependência da resistência à compressão simples em relação ao teor desse

estabilizante. A mesma tendência foi verificada por Lopes Junior (2007) em amostras de solo-cal.

## 5.6 RELAÇÕES ÚNICAS NO CONTROLE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO ESTUDADO

Os resultados apresentados na Figura 5.52, indicam a existência de relações distintas e únicas para as amostras ensaiadas com 28 dias de cura com 12,5% de cinza volante (equação 5.1) e 25% de cinza volante (equação 5.2), lembrando que para 0% de cinza volante e 28 dias de cura as amostras não apresentaram nenhuma resistência á compressão simples.

$$q_u = 6,92 \cdot 10^9 (\eta / (C_{av})^{0,12})^{-4,58} \quad (R^2=0,97) \quad (5.1)$$

$$q_u = 1,37 \cdot 10^{10} (\eta / (C_{av})^{0,12})^{-4,58} \quad (R^2=0,93) \quad (5.2)$$

Os resultados apresentados na Figura 5.53, também, indicam a existência de relações distintas e únicas para as amostras ensaiadas com 60 dias de cura com 12,5% de cinza volante (equação 5.3) e 25% de cinza volante (equação 5.4), lembrando que para 0% de cinza volante e 60 dias de cura as amostras não apresentaram nenhuma resistência á compressão simples.

$$q_u = 1,12 \cdot 10^{10} (\eta / (C_{av})^{0,12})^{-4,58} \quad (R^2=0,96) \quad (5.3)$$

$$q_u = 2,11 \cdot 10^{10} (\eta / (C_{av})^{0,12})^{-4,58} \quad (R^2=0,88) \quad (5.4)$$

E os resultados apresentados na Figura 5.54, também, indicam a existência de relações distintas e únicas para as amostras ensaiadas com 90 dias de cura com 0% de cinza volante (equação 5.5), 12,5% de cinza volante (equação 5.6) e 25% de cinza volante (equação 5.7).

$$q_u = 1,50 \cdot 10^9 (\eta / (C_{av})^{0,12})^{-4,58} \quad (R^2=0,95) \quad (5.5)$$

$$q_u = 1,55 \cdot 10^{10} (\eta / (C_{av})^{0,12})^{-4,58} \quad (R^2=0,96) \quad (5.6)$$

$$q_u = 3,44 \cdot 10^{10} (\eta / (C_{av})^{0,12})^{-4,58} \quad (R^2=0,92) \quad (5.7)$$

Comparando as equações obtidas em cada tempo de cura, pode-se observar que a resistência à compressão simples tem um relacionamento direto com  $[\eta / (C_{av})^{0,12}]$  para as três misturas (0%, 12,5% e 25% de cinza volante) e para os três tempos de cura, tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito da quantidade de cinza volante. Portanto, uma relação única pode



ser conseguida relacionando a resistência a compressão simples com a porosidade ( $\eta$ ), com o teor volumétrico de cal ( $C_{av}$ ) e com a quantidade de cinza volante (CV), como apresentado na Figura 5.57, podendo-se observar as retas obtidas para 28 dias de cura (equação 5.8), 60 dias de cura (equação 5.9) e 90 dias de cura (equação 5.10).

$$q_u = [5,49 \cdot 10^8(CV) + 1,90 \cdot 10^7] \cdot [(\eta/C_{av})^{0,12}]^{-4,58} \quad (R^2=0,99) \quad (5.8)$$

$$q_u = [8,44 \cdot 10^8(CV) + 2,30 \cdot 10^8] \cdot [(\eta/C_{av})^{0,12}]^{-4,58} \quad (R^2=0,99) \quad (5.9)$$

$$q_u = [1,32 \cdot 10^9(CV) + 6,69 \cdot 10^8] \cdot [(\eta/C_{av})^{0,12}]^{-4,58} \quad (R^2=1,00) \quad (5.10)$$

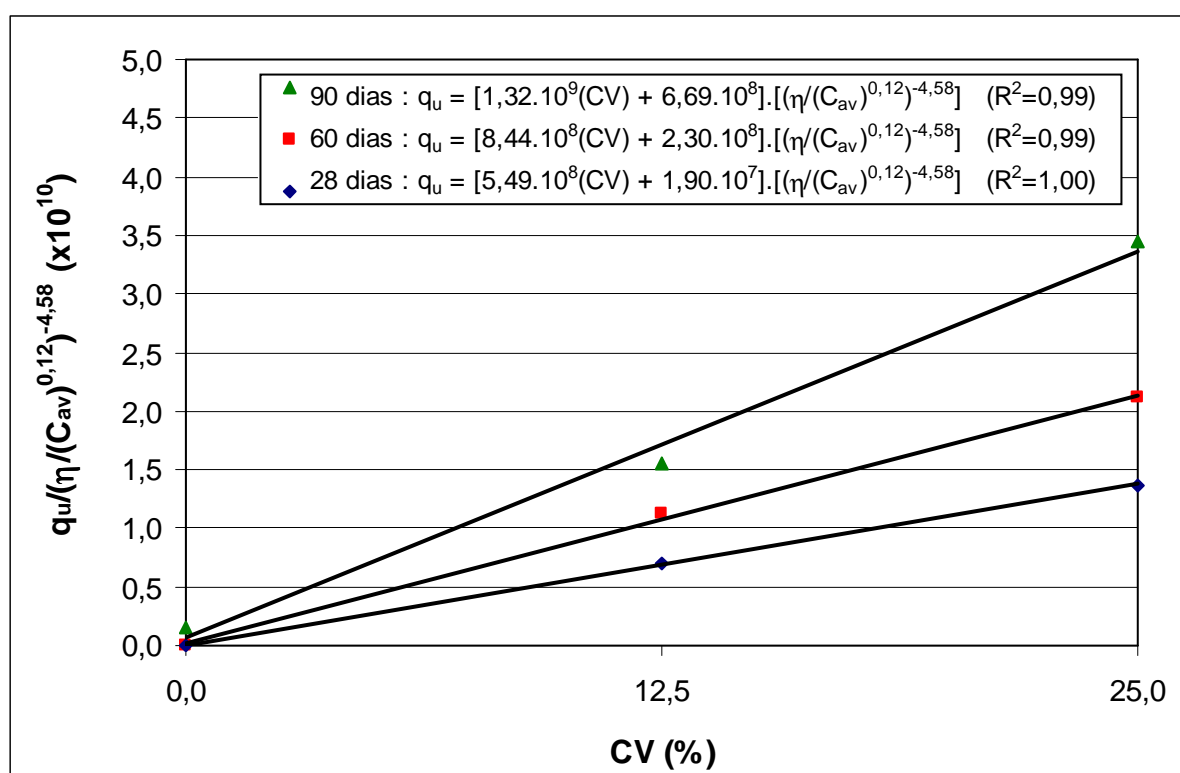


Figura 5.57 – Variação da resistência à compressão simples com a porosidade ( $\eta$ ), com o teor volumétrico de cal ( $C_{av}$ ) e com a quantidade de cinza volante (CV) para 28, 60 e 90 dias de cura

A Figura 5.57 demonstra também, que para as misturas estudadas na presente pesquisa, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento do teor de cinza volante, nos tempos de cura.

Assim, as equações 5.8, 5.9 e 5.10 podem ser utilizadas em relações de dosagem. Para o estudo de misturas de solo-cinza-cal, existem várias maneiras alcançar um valor-alvo de

resistência à compressão simples para um determinado projeto: redução da porosidade e/ou aumento da quantidade de cal e/ou adição de cinza volante. Os resultados apresentados neste trabalho, portanto, sugerem que pode-se escolher a quantidade de cal, a quantidade de cinza volante e o esforço de compactação adequado para fornecer uma mistura que resulte na resistência à compressão simples desejada.

## 5.7 COMPARAÇÃO DA RELAÇÃO VAZIOS/CAL COM TRABALHOS ENCONTRADOS NA LITERATURA

Lopes Junior (2007) estudou o mesmo solo desta pesquisa, tratado com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal e 25% de resíduo de britagem. As curvas granulométricas dos materiais estudados para comparação, incluindo os materiais desta pesquisa, são apresentadas na Figura 5.58.

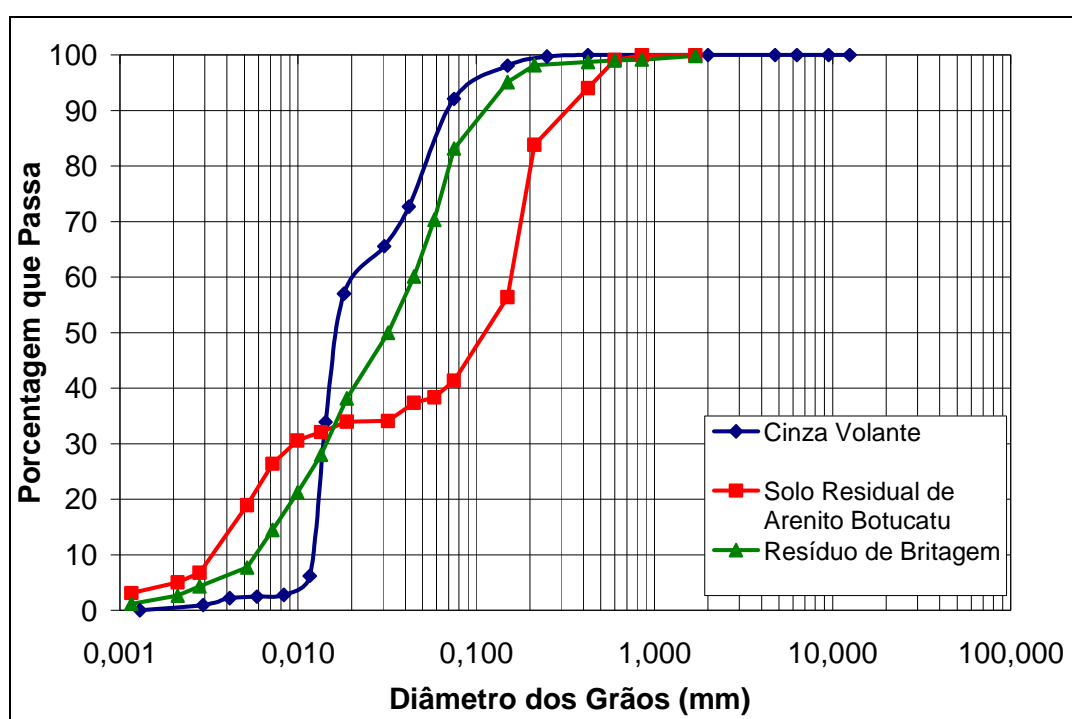


Figura 5.58 – Curvas granulométricas dos materiais em estudo e dos materiais para comparação

Nas Figuras 5.59 e 5.60 são apresentadas comparações, respectivamente aos 28 e 90 dias de cura, dos resultados de resistência à compressão simples em função dos resultados das relações  $\eta/C_{av}$  (ajustados pelo expoente 0,12) do trabalho realizado por Lopes Junior (2007) com os resultados obtidos neste trabalho. Os resultados desta pesquisa a serem comparados com Lopes Junior (2007) são os ensaios realizados para as amostras de 25% de cinza volante

com 28 e 90 dias de cura e os ensaios realizados para as amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura.

Pode-se evidenciar nas Figuras 5.59 e 5.60 a mesma tendência de curva exponencial para todos os resultados plotados. A tendência apresentada pela resistência à compressão simples em função dos resultados das relações  $\eta/C_{av}$  parece não apresentar influência significativa ao tipo de material envolvido, tendo a mesma tendência exponencial. Porém, o ajuste dos resultados das relações  $\eta/C_{av}$  pelo expoente 0,12 parece ser um bom ajuste para as amostras com 25% de resíduo de britagem e 90 dias de cura, sendo que para as amostras com 28 dias de cura e 25% de resíduo de britagem não parece ser um bom ajuste por apresentar um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) igual a 0,73.

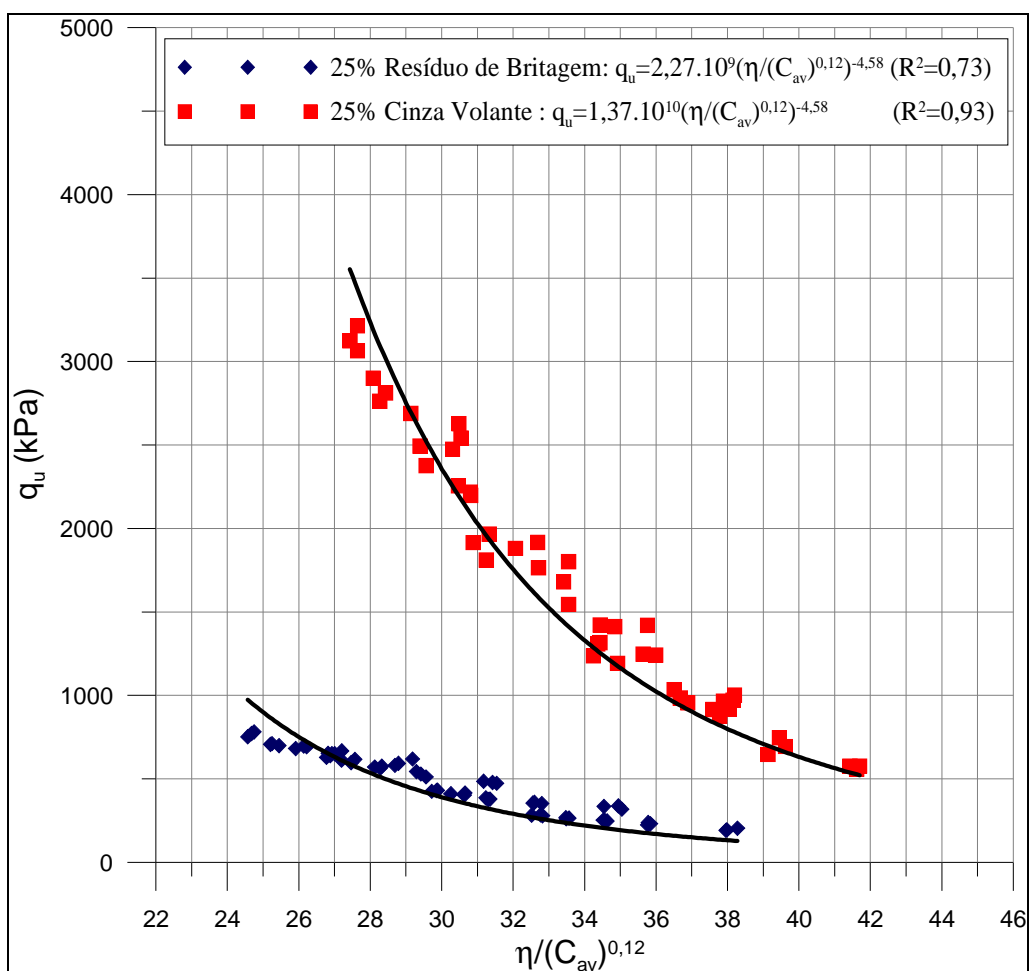


Figura 5.59 – Comparação dos resultados das relações  $\eta/C_{av}$  (ajustados) para as amostras com 28 dias de cura

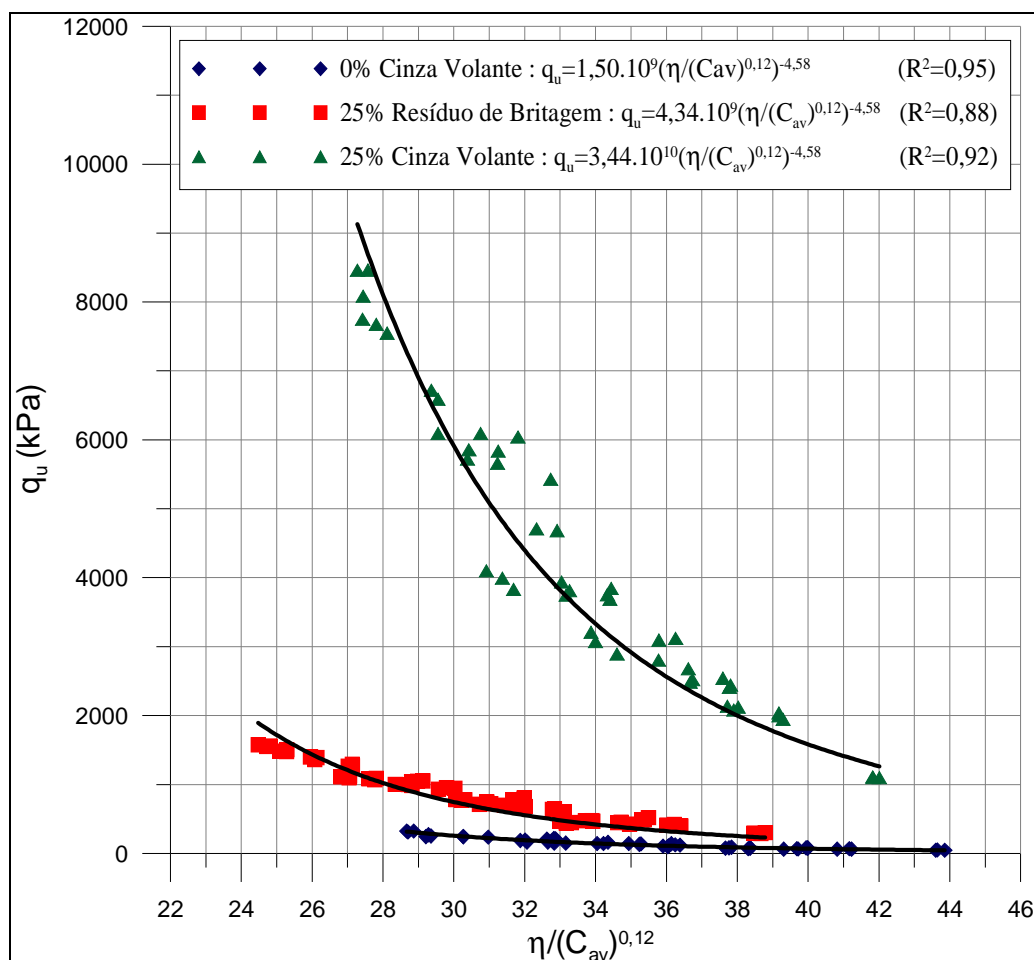


Figura 5.60 – Comparação dos resultados das relações  $\eta/C_{av}$  (ajustados) para as amostras com 90 dias de cura

Nota-se que as amostras apresentadas por Lopes Junior (2007) com valores de relações  $\eta/C_{av}$  e teores de cal iguais ao desta pesquisa, apresentam valores menores de resistência à compressão simples em relação as amostras com 25% de cinza volante, tanto para 28 como para 90 dias de cura e apresentam valores maiores de resistência à compressão simples em relação as amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura. Este fato ocorre pela diferença mineralógica dos materiais envolvidos e conseqüentemente pelas diferentes reações químicas desenvolvidas em cada caso.

Além disso, as amostras apresentadas por Lopes Junior (2007) apresentam valores das relações  $\eta/C_{av}$  menores do que os obtidos nesta pesquisa, isso se deve principalmente às diferentes massas específicas aparentes secas e aos diferentes índices de vazios adotados em cada caso específico.

## 5.8 ANÁLISE DA VARIÂNCIA

A análise da variância do experimento realizado foi dividida em duas partes, pelo fato de as amostras de 28 e 60 dias de cura com 0% de cinza volante não apresentarem resistência à compressão simples, e isso poderia ocultar informações importantes na análise do experimento. Assim, primeiro foi realizada a análise da variância para o experimento sem os resultados das amostras com 0% de cinza volante e posteriormente foi realizada a análise da variância com os resultados das amostras com 0%, 12,5% e 25% de cinza volante com apenas 90 dias de cura.

### 5.8.1 Análise para o Experimento Sem 0% de Cinza Volante

#### 5.8.1.1 Tabela ANOVA

A análise da variância foi realizada a partir da Tabela ANOVA com 4 fatores controláveis (quantidade cal, quantidade de cinza volante, porosidade e tempo de cura), que consiste na análise dos fatores controláveis e das interações dos fatores controláveis para um nível de significância de 95%. A Tabela 5.8 apresenta a Tabela ANOVA realizada para o experimento em estudo, onde SQ é a soma quadrada correspondente a variabilidade causada por cada um dos fatores controláveis, suas interações e o erro residual, GDL é o número de graus de liberdade correspondente a cada termo, MQ a média quadrada, Teste F o valor da coordenada correspondente da distribuição F, dada por  $MQ(\text{fator})/MQ(\text{erro})$  e Prob o valor da probabilidade de que resultados obtidos ao se modificar o nível do fator controlável correspondente pertençam a uma mesma distribuição, considerando-se então que probabilidades inferiores a 5% indicam que os resultados pertencem a distribuições diferentes, ou seja, o fator controlável provoca alteração significativa nos resultados.

A Tabela 5.8 demonstra que todos os fatores, as interações de 1ª e 2ª ordem e a interação de 3ª ordem são significativos. O Fator A corresponde ao fator controlável cinza volante, o Fator B corresponde ao fator controlável cal, o fator C corresponde ao fator controlável massa específica aparente seca e o Fator D corresponde ao fator controlável tempo de cura. Porém, pode-se perceber que os efeitos dos fatores A, B, C e D são mais fortemente significativos que os efeitos das interações de 1ª ordem, que por sua vez são mais fortemente significativas que as interações de 2ª ordem por apresentarem um teste F de maior valor. Sendo que, por este mesmo motivo, as interações de 2ª ordem são também, mais fortemente significativas que a interação de 3ª ordem.

Tabela 5.8 – Tabela ANOVA para o experimento sem 0% de cinza volante

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob	SIG
A	181559704,76	2	90779852,38	3831,25	0,0000%	significativo
B	51838410,43	3	17279470,14	729,26	0,0000%	significativo
C	231666273,39	3	77222091,13	3259,06	0,0000%	significativo
D	142356653,45	2	71178326,73	3003,99	0,0000%	significativo
AB	9707569,37	6	1617928,23	68,28	0,0000%	significativo
AC	22223443,13	6	3703907,19	156,32	0,0000%	significativo
AD	33917012,91	4	8479253,23	357,86	0,0000%	significativo
BC	9506168,68	9	1056240,96	44,58	0,0000%	significativo
BD	10418416,72	6	1736402,79	73,28	0,0000%	significativo
CD	33049417,05	6	5508236,17	232,47	0,0000%	significativo
ABC	2278488,86	18	126582,71	5,34	0,0000%	significativo
ABD	4957464,75	12	413122,06	17,44	0,0000%	significativo
ACD	3689189,75	12	307432,48	12,97	0,0000%	significativo
BCD	3455132,06	18	191951,78	8,10	0,0000%	significativo
ABCD	1665743,46	36	46270,65	1,95	0,2993%	significativo
Erro	3435712,89	145	23694,57			
Total	745724801,66	288				

Percebe-se também, na Tabela 5.8, que o fator B é menos significativo que os fatores A, C e D por apresentar um Teste F de menor valor em relação ao teste F dos fatores A, C e D. Além disso, percebe-se que o experimento foi realizado de maneira correta, por apresentar uma MQ do erro de pequeno valor em comparação com as demais MQ. Isto se deve ao fato de a resistência individual de cada corpo-de-prova não poder se afastar mais de 10% da resistência média do conjunto de três corpos-de-prova, sendo que isso causa conseqüências sobre a variabilidade obtida nos experimentos, e, conseqüentemente, sobre a identificação de que fatores ou interações são significativos.

#### 5.8.1.2 Comparação de Médias

Como todos os fatores e as interações entre eles são significativos, deve-se fazer a comparação de médias entre níveis, fixando-se três fatores e variando um para identificar em que nível de cada fator há diferença entre médias. A Tabela 5.9 apresenta a tabela de médias do experimento.

Tabela 5.9 – Tabela de médias do experimento sem 0% de cinza volante

		Cinza Volante (A)									
		12,5%				25%					
		Cal(B)									
		3%	5%	7%	9%	3%	5%	7%	9%		
$\gamma_d$ (C)	1,40 g/cm <sup>3</sup>	Tempo de Cura (D)	28	234,21	286,08	350,57	375,73	570,16	695,56	901,94	991,56
			60	243,29	557,86	623,46	742,60	1030,46	1084,41	1127,24	1294,69
			90	512,31	518,74	673,30	820,16	1102,21	1993,54	2464,58	2561,64
	1,50 g/cm <sup>3</sup>		28	366,29	549,88	666,73	710,40	979,80	1302,41	1382,35	1675,58
			60	628,70	665,96	1072,82	1112,28	1510,97	1735,43	2001,21	2709,78
			90	850,77	983,11	1137,18	1695,66	2112,52	3005,67	3761,90	3831,79
	1,60 g/cm <sup>3</sup>		28	582,60	756,84	942,61	1024,23	1245,55	1853,58	2223,61	2547,30
			60	1137,54	1370,24	1459,61	1540,41	1873,50	2798,93	3281,19	4362,06
			90	1122,64	1559,86	1678,99	2154,54	3058,40	4940,11	5845,50	5889,92
	1,70 g/cm <sup>3</sup>		28	902,19	1200,66	1430,48	1662,02	1897,72	2519,59	2824,33	3134,05
			60	1622,50	2081,31	2337,43	2522,55	3144,54	3831,15	4078,17	4869,75
			90	2071,80	3374,82	3546,20	3798,62	3975,02	6467,48	7894,99	8097,72

A partir da tabela de médias pode-se fazer a comparação de médias para cada nível de cada um dos fatores A, B, C e D. A comparação é realizada a partir de um limite de decisão (LD) para um nível de significância de 95%. O LD é dependente também do desvio padrão e do erro residual dos dados do experimento, e neste caso é igual a 351,30.

As Tabelas 5.10 a 5.13 apresentam respectivamente a comparação de médias para o fator A variando, o fator B variando, o fator C variando e o fator D variando. Quando a comparação de médias é igual, significa que a diferença entre as médias dos níveis analisados é menor do que poderia ser explicado pela variabilidade residual do próprio experimento e assim elas não são diferentes e são explicadas pela mesma distribuição. Quando a comparação de médias é diferente, significa que a diferença entre as médias dos níveis analisados é maior do que poderia ser explicado pela variabilidade residual do próprio experimento e conseqüentemente são diferentes e não podem ser explicadas pela mesma distribuição.

A escolha de cada um dos níveis dos fatores controláveis depende do que se quer no experimento. A escolha dos níveis dos fatores B, C e D deve feita com o objetivo de obter

maior resistência com maior economia. Pode-se observar no experimento em análise, que junto com o aumento do nível desses fatores ocorre um aumento da resistência à compressão simples das misturas estudadas, porém o custo desses fatores também aumenta em cada nível. Assim, quando a comparação de médias for igual deve-se optar pelo menor nível do fator controlável e quando a comparação de médias for diferente deve-se optar pelo seu maior nível.

Com o aumento do nível do fator controlável A também ocorre o aumento da resistência à compressão simples das misturas estudadas. Porém, a escolha do nível do fator A, pode ser feita através de duas opções devido ao custo no seu transporte. Quando a cinza volante estiver disponível próximo à obra a ser realizada e a comparação de médias for igual deve-se utilizar o maior nível de A, mas quando a cinza volante não estiver disponível próximo à obra a ser realizada e a comparação de médias for igual deve-se utilizar o menor nível de A. No caso em que as comparações de médias são diferentes deve-se utilizar o maior nível de A, independente do local que a cinza volante está disponível.

Analisando-se a Tabela 5.10 percebe-se que praticamente todas as comparações de médias são diferentes, o que significa que a variação dos níveis do fator A resulta em comparações de médias diferentes (não podendo ser explicadas pela variabilidade residual) em qualquer um dos níveis de combinação dos fatores B, C e D. Assim, pode-se perceber que todos os níveis dos fatores B, C e D interferem na escolha dos níveis do fator A, comprovando as suas interações.

Analisando-se a Tabela 5.11 percebe-se que utilizando  $A=12,5$  e os níveis mais baixos de C e D, a maioria das comparações de médias dos níveis do fator B são iguais, sendo que para os níveis mais altos dos fatores C e D as comparações de médias tornam-se diferentes. Quando  $A=25$  a maioria das comparações de médias são diferentes, sendo que para os níveis mais baixos de C e D algumas comparações de médias são iguais. Assim, pode-se verificar que a variação dos níveis de A, C e D influenciam na escolha do nível do fator B a ser utilizado, comprovando as suas interações.



Tabela 5.10 – Comparação de médias do fator A para o experimento sem 0% de cinza volante

A variando e BCD fixos							
B=3; C=1,4; D=28	A1-A2	335,95	igual	B=7; C=1,4; D=28	A1-A2	551,38	diferente
B=3; C=1,4; D=60	A1-A2	787,17	diferente	B=7; C=1,4; D=60	A1-A2	503,77	diferente
B=3; C=1,4; D=90	A1-A2	589,90	diferente	B=7; C=1,4; D=90	A1-A2	1791,28	diferente
B=3; C=1,5; D=28	A1-A2	613,51	diferente	B=7; C=1,5; D=28	A1-A2	715,63	diferente
B=3; C=1,5; D=60	A1-A2	882,26	diferente	B=7; C=1,5; D=60	A1-A2	928,38	diferente
B=3; C=1,5; D=90	A1-A2	1261,75	diferente	B=7; C=1,5; D=90	A1-A2	2624,71	diferente
B=3; C=1,6; D=28	A1-A2	662,96	diferente	B=7; C=1,6; D=28	A1-A2	1281,00	diferente
B=3; C=1,6; D=60	A1-A2	735,96	diferente	B=7; C=1,6; D=60	A1-A2	1821,58	diferente
B=3; C=1,6; D=90	A1-A2	1935,76	diferente	B=7; C=1,6; D=90	A1-A2	4166,51	diferente
B=3; C=1,7; D=28	A1-A2	995,53	diferente	B=7; C=1,7; D=28	A1-A2	1393,85	diferente
B=3; C=1,7; D=60	A1-A2	1522,04	diferente	B=7; C=1,7; D=60	A1-A2	1740,74	diferente
B=3; C=1,7; D=90	A1-A2	1903,21	diferente	B=7; C=1,7; D=90	A1-A2	4348,80	diferente
B=5; C=1,4; D=28	A1-A2	409,48	diferente	B=9; C=1,4; D=28	A1-A2	615,83	diferente
B=5; C=1,4; D=60	A1-A2	526,55	diferente	B=9; C=1,4; D=60	A1-A2	552,09	diferente
B=5; C=1,4; D=90	A1-A2	1474,80	diferente	B=9; C=1,4; D=90	A1-A2	1741,48	diferente
B=5; C=1,5; D=28	A1-A2	752,53	diferente	B=9; C=1,5; D=28	A1-A2	965,18	diferente
B=5; C=1,5; D=60	A1-A2	1069,48	diferente	B=9; C=1,5; D=60	A1-A2	1597,49	diferente
B=5; C=1,5; D=90	A1-A2	2022,55	diferente	B=9; C=1,5; D=90	A1-A2	2136,13	diferente
B=5; C=1,6; D=28	A1-A2	1096,75	diferente	B=9; C=1,6; D=28	A1-A2	1523,07	diferente
B=5; C=1,6; D=60	A1-A2	1428,69	diferente	B=9; C=1,6; D=60	A1-A2	2821,65	diferente
B=5; C=1,6; D=90	A1-A2	3380,25	diferente	B=9; C=1,6; D=90	A1-A2	3735,38	diferente
B=5; C=1,7; D=28	A1-A2	1318,93	diferente	B=9; C=1,7; D=28	A1-A2	1472,04	diferente
B=5; C=1,7; D=60	A1-A2	1749,84	diferente	B=9; C=1,7; D=60	A1-A2	2347,20	diferente
B=5; C=1,7; D=90	A1-A2	3092,66	diferente	B=9; C=1,7; D=90	A1-A2	4299,10	diferente

Na Tabela 5.12 observa-se que utilizando  $A=12,5$  quase todas as comparações de médias são diferentes, sendo apenas iguais em alguns casos que utilizam os níveis mais baixos de C e D. Quando  $A=25$  percebe-se que praticamente todas as comparações de média são diferentes, o que significa que a variação dos níveis do fator C quando  $A=25$  resulta em comparações de médias diferentes em quase todos os níveis de combinação dos fatores B e D. Assim, pode-se perceber que todos os níveis dos fatores A, B e D interferem na escolha dos níveis do fator C, comprovando as suas interações.

Na Tabela 5.13 observa-se que para  $A=12,5$  o aumento dos níveis dos fatores B e C tornam as comparações de médias diferentes. Quando  $A=25$  percebe-se que praticamente todas as comparações de média são diferentes, o que significa que a variação dos níveis do fator D resulta em comparações de médias diferentes na maioria dos níveis de combinação dos fatores A, B e C. Assim, pode-se perceber que todos os níveis dos fatores A, B e C interferem na escolha dos níveis do fator D, comprovando as suas interações.

Tabela 5.11 – Comparação de médias do fator B para o experimento sem 0% de cinza volante

B variando e ACD fixos							
A=12,5; C=1,4; D=28	B1-B2	51,87	igual	A=25; C=1,4; D=28	B1-B2	125,40	igual
	B1-B3	116,36	igual		B1-B3	331,78	igual
	B1-B4	141,52	igual		B1-B4	421,40	diferente
	B2-B3	64,49	igual		B2-B3	206,38	igual
	B2-B4	89,65	igual		B2-B4	296,00	igual
	B3-B4	25,16	igual		B3-B4	89,62	igual
A=12,5; C=1,4; D=60	B1-B2	314,57	igual	A=25; C=1,4; D=60	B1-B2	53,95	igual
	B1-B3	380,17	diferente		B1-B3	96,77	igual
	B1-B4	499,31	diferente		B1-B4	264,23	igual
	B2-B3	65,60	igual		B2-B3	42,83	igual
	B2-B4	184,74	igual		B2-B4	210,29	igual
	B3-B4	119,14	igual		B3-B4	167,46	igual
A=12,5; C=1,4; D=90	B1-B2	183,59	igual	A=25; C=1,4; D=90	B1-B2	891,33	diferente
	B1-B3	300,44	igual		B1-B3	1362,37	diferente
	B1-B4	344,11	igual		B1-B4	1459,43	diferente
	B2-B3	116,84	igual		B2-B3	471,04	diferente
	B2-B4	160,52	igual		B2-B4	568,10	diferente
	B3-B4	43,68	igual		B3-B4	-97,06	igual
A=12,5; C=1,5; D=28	B1-B2	183,59	igual	A=25; C=1,5; D=28	B1-B2	322,61	igual
	B1-B3	300,44	igual		B1-B3	402,55	diferente
	B1-B4	344,11	igual		B1-B4	695,78	diferente
	B2-B3	116,84	igual		B2-B3	79,94	igual
	B2-B4	160,52	igual		B2-B4	373,17	diferente
	B3-B4	43,68	igual		B3-B4	293,23	igual
A=12,5; C=1,5; D=60	B1-B2	37,25	igual	A=25; C=1,5; D=60	B1-B2	224,47	igual
	B1-B3	444,12	diferente		B1-B3	490,24	diferente
	B1-B4	483,58	diferente		B1-B4	1198,81	diferente
	B2-B3	406,87	diferente		B2-B3	265,77	igual
	B2-B4	446,33	diferente		B2-B4	974,34	diferente
	B3-B4	39,46	igual		B3-B4	708,57	diferente
A=12,5; C=1,5; D=90	B1-B2	132,35	igual	A=25; C=1,5; D=90	B1-B2	893,15	diferente
	B1-B3	286,42	igual		B1-B3	1649,38	diferente
	B1-B4	844,90	diferente		B1-B4	1719,27	diferente
	B2-B3	154,07	igual		B2-B3	756,23	diferente
	B2-B4	712,55	diferente		B2-B4	826,12	diferente
	B3-B4	558,48	diferente		B3-B4	69,89	igual
A=12,5; C=1,6; D=28	B1-B2	174,24	igual	A=25; C=1,6; D=28	B1-B2	608,03	diferente
	B1-B3	360,02	diferente		B1-B3	978,06	diferente
	B1-B4	441,64	diferente		B1-B4	1301,75	diferente
	B2-B3	185,77	igual		B2-B3	370,02	diferente
	B2-B4	267,40	igual		B2-B4	693,72	diferente
	B3-B4	81,62	igual		B3-B4	323,69	igual
A=12,5; C=1,6; D=60	B1-B2	232,69	igual	A=25; C=1,6; D=60	B1-B2	925,43	diferente
	B1-B3	322,07	igual		B1-B3	1407,69	diferente
	B1-B4	402,87	diferente		B1-B4	2488,56	diferente
	B2-B3	89,37	igual		B2-B3	482,26	diferente
	B2-B4	170,17	igual		B2-B4	1563,13	diferente
	B3-B4	80,80	igual		B3-B4	1080,87	diferente

Tabela 5.11 (continuação) – Comparação de médias do fator B para o experimento sem 0% de cinza volante

B variando e ACD fixos							
A=12,5; C=1,6; D=90	B1-B2	437,21	diferente	A=25; C=1,6; D=90	B1-B2	1881,70	diferente
	B1-B3	556,35	diferente		B1-B3	2787,10	diferente
	B1-B4	1031,90	diferente		B1-B4	2831,52	diferente
	B2-B3	119,14	igual		B2-B3	905,40	diferente
	B2-B4	594,68	diferente		B2-B4	949,82	diferente
	B3-B4	475,55	diferente		B3-B4	44,42	igual
A=12,5; C=1,7; D=28	B1-B2	298,47	igual	A=25; C=1,7; D=28	B1-B2	621,87	diferente
	B1-B3	528,29	diferente		B1-B3	926,61	diferente
	B1-B4	759,83	diferente		B1-B4	1236,33	diferente
	B2-B3	229,82	igual		B2-B3	304,74	igual
	B2-B4	461,36	diferente		B2-B4	614,47	diferente
	B3-B4	231,53	igual		B3-B4	309,72	igual
A=12,5; C=1,7; D=60	B1-B2	458,82	diferente	A=25; C=1,7; D=60	B1-B2	686,62	diferente
	B1-B3	714,93	diferente		B1-B3	933,63	diferente
	B1-B4	900,05	diferente		B1-B4	1725,21	diferente
	B2-B3	256,11	igual		B2-B3	247,01	igual
	B2-B4	441,24	diferente		B2-B4	1038,59	diferente
	B3-B4	185,12	igual		B3-B4	791,58	diferente
A=12,5; C=1,7; D=90	B1-B2	1303,02	diferente	A=25; C=1,7; D=90	B1-B2	2492,46	diferente
	B1-B3	1474,39	diferente		B1-B3	3919,97	diferente
	B1-B4	1726,82	diferente		B1-B4	4122,70	diferente
	B2-B3	171,38	igual		B2-B3	1427,51	diferente
	B2-B4	423,80	diferente		B2-B4	1630,24	diferente
	B3-B4	252,43	igual		B3-B4	202,73	igual

Como realização da comparação de médias pode-se escolher a melhor combinação dos fatores controláveis. Neste caso a combinação que proporciona maior resistência às misturas estudadas, é o uso de 25% de cinza volante, 9% de cal, massa específica aparente seca de 1,7 g/cm<sup>3</sup> e 90 dias de cura.

Tabela 5.12 – Comparação de médias do fator C para o experimento sem 0% de cinza volante

C variando e ABD fixos							
A=12,5; B=3; D=28	C1-C2	132,08	igual	A=25; B=3; D=28	C1-C2	409,63	diferente
	C1-C3	348,39	igual		C1-C3	675,39	diferente
	C1-C4	667,98	diferente		C1-C4	1327,56	diferente
	C2-C3	216,31	igual		C2-C3	265,76	igual
	C2-C4	535,90	diferente		C2-C4	917,92	diferente
	C3-C4	319,59	igual		C3-C4	652,17	diferente
A=12,5; B=3; D=60	C1-C2	385,41	diferente	A=25; B=3; D=60	C1-C2	480,51	diferente
	C1-C3	894,25	diferente		C1-C3	843,04	diferente
	C1-C4	1379,20	diferente		C1-C4	2114,08	diferente
	C2-C3	508,84	diferente		C2-C3	362,53	diferente
	C2-C4	993,79	diferente		C2-C4	1633,57	diferente
	C3-C4	484,95	diferente		C3-C4	1271,04	diferente
A=12,5; B=3; D=90	C1-C2	338,45	igual	A=25; B=3; D=90	C1-C2	1010,31	diferente
	C1-C3	610,33	diferente		C1-C3	1956,19	diferente
	C1-C4	1559,49	diferente		C1-C4	2872,81	diferente
	C2-C3	271,88	igual		C2-C3	945,88	diferente
	C2-C4	1221,04	diferente		C2-C4	1862,50	diferente
	C3-C4	949,16	diferente		C3-C4	916,61	diferente
A=12,5; B=5; D=28	C1-C2	263,80	igual	A=25; B=5; D=28	C1-C2	606,85	diferente
	C1-C3	470,76	diferente		C1-C3	1158,02	diferente
	C1-C4	914,58	diferente		C1-C4	1824,03	diferente
	C2-C3	206,96	igual		C2-C3	551,17	diferente
	C2-C4	650,78	diferente		C2-C4	1217,18	diferente
	C3-C4	443,82	diferente		C3-C4	666,00	diferente
A=12,5; B=5; D=60	C1-C2	108,10	igual	A=25; B=5; D=60	C1-C2	651,03	diferente
	C1-C3	812,38	diferente		C1-C3	1714,52	diferente
	C1-C4	1523,45	diferente		C1-C4	2746,75	diferente
	C2-C3	704,28	diferente		C2-C3	1063,49	diferente
	C2-C4	1415,35	diferente		C2-C4	2095,72	diferente
	C3-C4	711,07	diferente		C3-C4	1032,23	diferente
A=12,5; B=5; D=90	C1-C2	464,37	diferente	A=25; B=5; D=90	C1-C2	1012,13	diferente
	C1-C3	518,74	diferente		C1-C3	2946,57	diferente
	C1-C4	518,74	diferente		C1-C4	4473,94	diferente
	C2-C3	576,74	diferente		C2-C3	1934,44	diferente
	C2-C4	2391,71	diferente		C2-C4	3461,81	diferente
	C3-C4	1814,96	diferente		C3-C4	1527,38	diferente
A=12,5; B=7; D=28	C1-C2	316,16	igual	A=25; B=7; D=28	C1-C2	480,41	diferente
	C1-C3	592,05	diferente		C1-C3	1321,67	diferente
	C1-C4	1079,91	diferente		C1-C4	1922,39	diferente
	C2-C3	275,89	igual		C2-C3	841,26	diferente
	C2-C4	763,76	diferente		C2-C4	1441,98	diferente
	C3-C4	487,87	diferente		C3-C4	600,72	diferente
A=12,5; B=7; D=60	C1-C2	449,36	diferente	A=25; B=7; D=60	C1-C2	873,97	diferente
	C1-C3	386,79	diferente		C1-C3	2153,95	diferente
	C1-C4	1713,97	diferente		C1-C4	2950,93	diferente
	C2-C3	386,79	diferente		C2-C3	1279,98	diferente
	C2-C4	1264,60	diferente		C2-C4	2076,96	diferente
	C3-C4	877,82	diferente		C3-C4	796,98	diferente

Tabela 5.12 (continuação) – Comparação de médias do fator C para o experimento sem 0% de cinza volante

C variando e ABD fixos							
A=12,5; B=7; D=90	C1-C2	463,88	diferente	A=25; B=7; D=90	C1-C2	1297,31	diferente
	C1-C3	1005,69	diferente		C1-C3	3380,92	diferente
	C1-C4	2872,89	diferente		C1-C4	5430,41	diferente
	C2-C3	541,81	diferente		C2-C3	2083,61	diferente
	C2-C4	2409,01	diferente		C2-C4	4133,10	diferente
	C3-C4	1867,20	diferente		C3-C4	2049,49	diferente
A=12,5; B=9; D=28	C1-C2	334,67	igual	A=25; B=9; D=28	C1-C2	684,02	diferente
	C1-C3	648,50	diferente		C1-C3	1555,74	diferente
	C1-C4	1286,28	diferente		C1-C4	2142,49	diferente
	C2-C3	313,83	igual		C2-C3	871,72	diferente
	C2-C4	951,61	diferente		C2-C4	1458,47	diferente
	C3-C4	637,78	diferente		C3-C4	586,75	diferente
A=12,5; B=9; D=60	C1-C2	369,68	diferente	A=25; B=9; D=60	C1-C2	1415,08	diferente
	C1-C3	797,81	diferente		C1-C3	3067,37	diferente
	C1-C4	1779,95	diferente		C1-C4	3575,05	diferente
	C2-C3	428,13	diferente		C2-C3	1652,28	diferente
	C2-C4	1410,26	diferente		C2-C4	2159,97	diferente
	C3-C4	982,14	diferente		C3-C4	507,68	diferente
A=12,5; B=9; D=90	C1-C2	875,50	diferente	A=25; B=9; D=90	C1-C2	1270,15	diferente
	C1-C3	1334,38	diferente		C1-C3	3328,28	diferente
	C1-C4	2978,46	diferente		C1-C4	5536,08	diferente
	C2-C3	458,88	diferente		C2-C3	2058,13	diferente
	C2-C4	2102,96	diferente		C2-C4	4265,93	diferente
	C3-C4	1644,08	diferente		C3-C4	2207,80	diferente

Tabela 5.13 – Comparação de médias do fator D para o experimento sem 0% de cinza volante

D variando e ACB fixos							
A=12,5; B=3; C=1,4	D1-D2	9,08	igual	A=25; B=3; C=1,4	D1-D2	460,30	diferente
	D1-D3	278,10	igual		D1-D3	532,05	diferente
	D2-D3	269,02	igual		D2-D3	71,75	igual
A=12,5; B=3; C=1,5	D1-D2	262,42	igual	A=25; B=3; C=1,5	D1-D2	531,17	diferente
	D1-D3	484,48	diferente		D1-D3	979,80	diferente
	D2-D3	222,06	igual		D2-D3	601,55	diferente
A=12,5; B=3; C=1,6	D1-D2	554,95	diferente	A=25; B=3; C=1,6	D1-D2	627,95	diferente
	D1-D3	540,05	diferente		D1-D3	1812,85	diferente
	D2-D3	-14,90	igual		D2-D3	1184,90	diferente
A=12,5; B=3; C=1,7	D1-D2	720,31	diferente	A=25; B=3; C=1,7	D1-D2	1246,82	diferente
	D1-D3	1169,61	diferente		D1-D3	2077,30	diferente
	D2-D3	449,31	diferente		D2-D3	830,48	diferente
A=12,5; B=5; C=1,4	D1-D2	271,78	igual	A=25; B=5; C=1,4	D1-D2	388,85	diferente
	D1-D3	232,66	igual		D1-D3	1297,98	diferente
	D2-D3	-39,12	igual		D2-D3	909,13	diferente
A=12,5; B=5; C=1,5	D1-D2	116,08	igual	A=25; B=5; C=1,5	D1-D2	433,02	diferente
	D1-D3	433,23	diferente		D1-D3	1703,26	diferente
	D2-D3	317,16	igual		D2-D3	1270,23	diferente

Tabela 5.13 (continuação) – Comparação de médias do fator D para o experimento sem 0% de cinza volante

D variando e ACB fixos							
A=12,5; B=5; C=1,6	D1-D2	613,40	diferente	A=25; B=5; C=1,6	D1-D2	945,34	diferente
	D1-D3	803,02	diferente		D1-D3	3086,52	diferente
	D2-D3	189,62	igual		D2-D3	2141,18	diferente
A=12,5; B=5; C=1,7	D1-D2	880,65	diferente	A=25; B=5; C=1,7	D1-D2	1311,57	diferente
	D1-D3	2174,16	diferente		D1-D3	3947,89	diferente
	D2-D3	1293,51	diferente		D2-D3	2636,33	diferente
A=12,5; B=7; C=1,4	D1-D2	272,89	igual	A=25; B=7; C=1,4	D1-D2	225,29	igual
	D1-D3	322,74	igual		D1-D3	1562,64	diferente
	D2-D3	49,84	igual		D2-D3	1337,35	diferente
A=12,5; B=7; C=1,5	D1-D2	406,10	diferente	A=25; B=7; C=1,5	D1-D2	618,85	diferente
	D1-D3	470,46	diferente		D1-D3	2379,54	diferente
	D2-D3	64,36	igual		D2-D3	1760,69	diferente
A=12,5; B=7; C=1,6	D1-D2	517,00	diferente	A=25; B=7; C=1,6	D1-D2	1057,58	diferente
	D1-D3	736,38	diferente		D1-D3	3621,90	diferente
	D2-D3	219,38	igual		D2-D3	2564,32	diferente
A=12,5; B=7; C=1,7	D1-D2	906,94	diferente	A=25; B=7; C=1,7	D1-D2	1253,84	diferente
	D1-D3	2115,71	diferente		D1-D3	5070,66	diferente
	D2-D3	1208,77	diferente		D2-D3	3816,82	diferente
A=12,5; B=9; C=1,4	D1-D2	366,87	diferente	A=25; B=9; C=1,4	D1-D2	303,14	igual
	D1-D3	444,43	diferente		D1-D3	1570,08	diferente
	D2-D3	77,56	igual		D2-D3	1266,95	diferente
A=12,5; B=9; C=1,5	D1-D2	401,88	diferente	A=25; B=9; C=1,5	D1-D2	1034,20	diferente
	D1-D3	985,26	diferente		D1-D3	2156,21	diferente
	D2-D3	583,38	diferente		D2-D3	1122,01	diferente
A=12,5; B=9; C=1,6	D1-D2	516,18	diferente	A=25; B=9; C=1,6	D1-D2	1814,76	diferente
	D1-D3	1130,31	diferente		D1-D3	3342,62	diferente
	D2-D3	614,13	diferente		D2-D3	1527,86	diferente
A=12,5; B=9; C=1,7	D1-D2	860,53	diferente	A=25; B=9; C=1,7	D1-D2	1735,69	diferente
	D1-D3	2136,60	diferente		D1-D3	4963,67	diferente
	D2-D3	1276,07	diferente		D2-D3	3227,98	diferente

### 5.8.1.3 Gráficos dos fatores significativos e das suas interações

Com a realização da Tabela ANOVA pode-se identificar os fatores e as interações entre eles que são significativos. A partir da obtenção destes dados, foram gerados gráficos com as médias do experimento para a melhor visualização destes fenômenos.

A Figura 5.61 apresenta os gráficos de interação entre os fatores significativos A, B, C e D. As interações (AB, AC, AD, BC, BD E CD) são comprovadas pela falta de paralelismo entre as linhas dos gráficos. A falta de paralelismo significa o quanto uma variável interfere na outra e ela pode estar presente em toda a extensão ou em apenas algumas regiões das linhas que estão sendo comparadas.

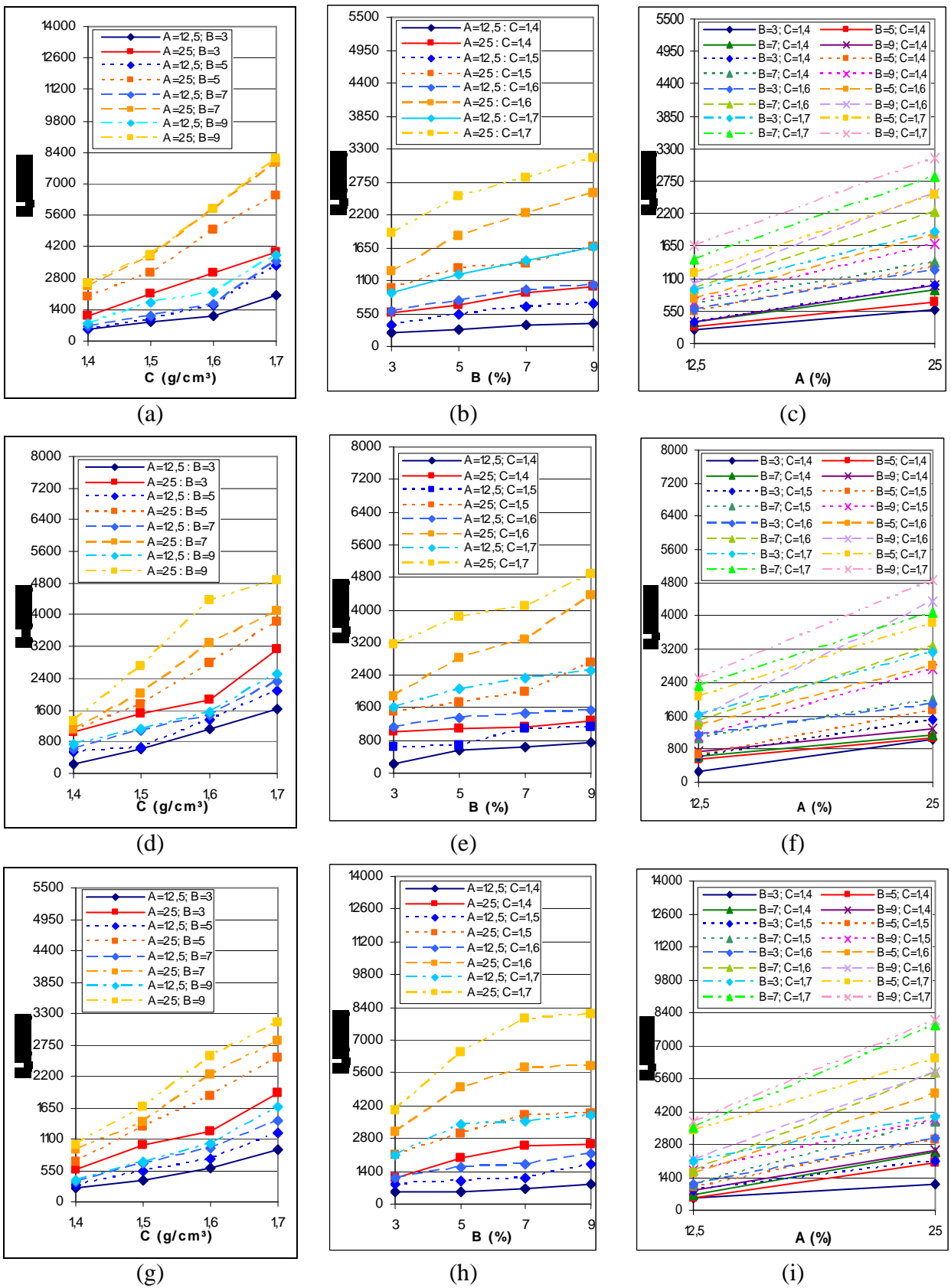


Figura 5.61 – Gráfico de interação AB x C (a), AC x B (b) e BC x A (c) para D=28, AB x C (d), AC x B (e) e BC x A (f) para D=60 e AB x C (g), AC x B (h) e BC x A (i) para D=90 para o experimento sem 0% de cinza volante

A Figura 5.62 apresenta a influência dos fatores significativos A, B, C e D. Analisando a Figura 5.62 observa-se que com o aumento do nível dos fatores (A, B, C e D) a resistência à compressão simples aumenta, como foi observado anteriormente.

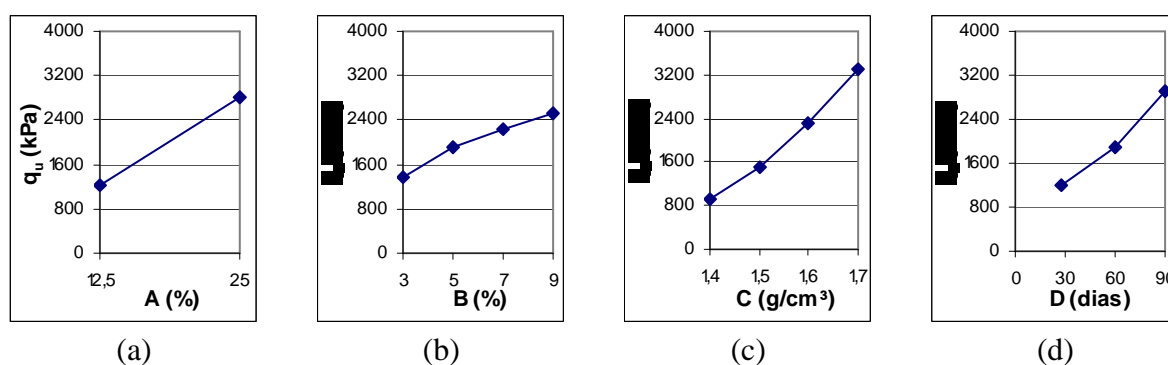


Figura 5.62 – Influência dos fatores significativos A (a), B (b), C (c) e D (d)

## 5.8.2 Análise para o Experimento Com 90 dias de Cura

### 5.8.2.1 Tabela ANOVA

A análise da variância foi realizada a partir da Tabela ANOVA com 3 fatores controláveis (as variáveis de interesse), que consiste na análise dos fatores controláveis e das interações dos fatores controláveis para um nível de significância de 95%. A Tabela 5.14 apresenta a Tabela ANOVA realizada para o experimento em estudo.

A Tabela 5.14 demonstra que todos os fatores, as interações de 1ª ordem e a interação de 2ª ordem são significativos. O Fator A corresponde ao fator controlável cinza volante, o Fator B corresponde ao fator controlável cal e o fator C corresponde ao fator controlável massa específica aparente seca. Porém, pode-se perceber que os efeitos dos fatores A, B, C e a interação AC são mais fortemente significativos que os efeitos das interações AB, BC e ABC por apresentarem um Teste F de maior valor. Percebe-se também que, o fator B é menos significativo que os fatores A e C por apresentar um Teste F de menor valor em relação ao Teste F dos fatores A e C. Além disso, percebe-se que o experimento foi realizado de maneira correta, por apresentar uma MQ do erro de pequeno valor em comparação com as demais MQ. Isto se deve ao fato de a resistência individual de cada corpo-de-prova não poder se afastar mais de 10% da resistência média do conjunto de três corpos-de-prova, sendo que isso causa conseqüências sobre a variabilidade obtida nos experimentos, e, conseqüentemente, sobre a identificação de que fatores ou iterações são significativos.



Tabela 5.14 – Tabela ANOVA para o experimento com 90 dias de cura

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob	SIG
A	400734249,73	2	200367124,86	9226,59	0,0000%	significativo
B	30084632,26	3	10028210,75	461,78	0,0000%	significativo
C	120691778,31	3	40230592,77	1852,56	0,0000%	significativo
AB	25293178,75	6	4215529,79	194,12	0,0000%	significativo
AC	68671137,23	6	11445189,54	527,03	0,0000%	significativo
BC	6519031,02	9	724336,78	33,35	0,0000%	significativo
ABC	4605608,94	18	255867,16	11,78	0,0000%	significativo
Erro	2106478,57	97	21716,27			
Total	658706094,81	144				

### 5.8.2.2 Comparação de Médias

Como todos os fatores e as interações entre eles são significativos, deve-se fazer a comparação de médias entre níveis, fixando-se dois fatores e variando um para identificar em que nível de cada fator há diferença entre médias. A Tabela 5.15 apresenta a tabela de médias do experimento.

A partir da tabela de médias pode-se fazer a comparação de médias para cada nível de cada um dos fatores A, B e C. A comparação é realizada a partir de um limite de decisão (LD) para um nível de significância de 95%. O LD é dependente também do desvio padrão e do erro residual dos dados do experimento, e neste caso é igual a 337,72.

As Tabelas 5.16 a 5.18 apresentam respectivamente a comparação de médias para o fator A variando, o fator B variando e o fator C variando. Quando a comparação de médias é igual, significa que a diferença entre as médias dos níveis analisados é menor do que poderia ser explicado pela variabilidade residual do próprio experimento e assim elas não são diferentes e são explicadas pela mesma distribuição. Quando a comparação de médias é diferente, significa que a diferença entre as médias dos níveis analisados é maior do que poderia ser explicado pela variabilidade residual do próprio experimento e conseqüentemente são diferentes e não podem ser explicadas pela mesma distribuição.

A escolha de cada um dos níveis dos fatores controláveis depende do que se quer no experimento. A escolha dos níveis dos fatores B e C deve feita com o objetivo de obter maior resistência com maior economia. Pode-se observar no experimento em análise, que junto com o aumento desses fatores ocorre um aumento da resistência à compressão simples das

misturas estudadas, porém o custo desses fatores também aumenta em cada nível. Assim, quando a comparação de médias for igual deve-se optar pelo menor nível do fator controlável e quando a comparação de médias for diferente deve-se optar pelo seu maior nível.

Tabela 5.15 – Tabela de médias do experimento com 90 dias de cura

		$\gamma_d$ (C)					
		1,40 g/cm <sup>3</sup>	1,50 g/cm <sup>3</sup>	1,60 g/cm <sup>3</sup>	1,70 g/cm <sup>3</sup>		
Cinza Volante (A)	0%	Cal (B)	3%	48,07	78,97	129,33	212,79
			5%	63,70	82,11	150,77	241,02
			7%	65,45	104,08	155,37	256,70
			9%	77,13	137,11	182,86	319,63
	12,5%	Cal (B)	3%	512,31	850,77	1122,64	2071,80
			5%	518,74	983,11	1559,86	3374,82
			7%	673,30	1137,18	1678,99	3546,20
			9%	820,16	1695,66	2154,54	3798,62
	25%	Cal (B)	3%	1102,21	2112,52	3058,40	3975,02
			5%	1993,54	3005,67	4940,11	6467,48
			7%	2464,58	3761,90	5845,50	7894,99
			9%	2561,64	3831,79	5889,92	8097,72

Com o aumento do nível do fator controlável A também ocorre o aumento da resistência à compressão simples das misturas estudadas. Porém, a escolha do nível do fator A, pode ser feita através de duas opções devido ao custo no seu transporte. Quando a cinza volante estiver disponível próximo à obra a ser realizada e a comparação de médias for igual deve-se utilizar o maior nível de A, mas quando a cinza volante não estiver disponível próximo à obra a ser realizada e a comparação de médias for igual deve-se utilizar o menor nível de A. No caso em que as comparações de médias são diferentes deve-se utilizar o maior nível de A, independente da disponibilidade da cinza volante.

Analisando-se a Tabela 5.16 percebe-se que todas as comparações de média são diferentes, o que significa que a variação dos níveis do fator A resulta em comparações de médias diferentes (não podendo ser explicadas pela variabilidade residual) em qualquer um dos níveis de combinação dos fatores B e C. Assim, pode-se perceber que todos os níveis dos fatores B e C interferem na escolha dos níveis do fator A, comprovando as suas interações.

Tabela 5.16 – Comparação de médias do fator A para o experimento com 90 dias de cura

A variando e BC fixos							
B=3; C=1,4	A1-A2	464,25	diferente	B=7; C=1,4	A1-A2	607,85	diferente
	A1-A3	1054,14	diferente		A1-A3	2399,13	diferente
	A2-A3	589,90	diferente		A2-A3	1791,28	diferente
B=3; C=1,5	A1-A2	771,79	diferente	B=7; C=1,5	A1-A2	1033,11	diferente
	A1-A3	2033,55	diferente		A1-A3	3657,82	diferente
	A2-A3	1261,75	diferente		A2-A3	2624,71	diferente
B=3; C=1,6	A1-A2	993,32	diferente	B=7; C=1,6	A1-A2	1523,63	diferente
	A1-A3	2929,08	diferente		A1-A3	5690,14	diferente
	A2-A3	1935,76	diferente		A2-A3	4166,51	diferente
B=3; C=1,7	A1-A2	1859,01	diferente	B=7; C=1,7	A1-A2	3289,49	diferente
	A1-A3	3762,23	diferente		A1-A3	7638,29	diferente
	A2-A3	1903,21	diferente		A2-A3	4348,80	diferente
B=5; C=1,4	A1-A2	455,05	diferente	B=9; C=1,4	A1-A2	743,03	diferente
	A1-A3	1929,84	diferente		A1-A3	2484,51	diferente
	A2-A3	1474,80	diferente		A2-A3	1741,48	diferente
B=5; C=1,5	A1-A2	901,00	diferente	B=9; C=1,5	A1-A2	1558,55	diferente
	A1-A3	2923,56	diferente		A1-A3	3694,68	diferente
	A2-A3	2022,55	diferente		A2-A3	2136,13	diferente
B=5; C=1,6	A1-A2	1409,08	diferente	B=9; C=1,6	A1-A2	1971,68	diferente
	A1-A3	4789,33	diferente		A1-A3	5707,06	diferente
	A2-A3	3380,25	diferente		A2-A3	3735,38	diferente
B=5; C=1,7	A1-A2	3133,80	diferente	B=9; C=1,7	A1-A2	3478,99	diferente
	A1-A3	6226,46	diferente		A1-A3	7778,09	diferente
	A2-A3	3092,66	diferente		A2-A3	4299,10	diferente

Analisando-se a Tabela 5.17 percebe-se que todas as comparações de médias dos níveis do fator B são iguais quando A=0, mas quando A=12,5 a maioria das comparações de médias são iguais para os níveis mais baixos de C e são diferentes para os níveis mais altos de C. Já quando A=25 a maioria das comparações de médias são diferentes, não podendo ser explicada pela variabilidade residual do experimento. Assim, pode-se verificar que a variação dos níveis de A e C influenciam na escolha do nível do fator B a ser utilizado, comprovando as suas interações.

O mesmo ocorre na Tabela 5.18, onde pode-se perceber que todas as comparações de médias dos níveis do fator C são iguais quando A=0, mas quando A=12,5 a maioria das comparações de médias são diferentes, apresentando apenas uma comparação de médias igual para o nível mais baixo de B. Já quando A=25 todas as comparações de médias são diferentes, não podendo ser explicada pela variabilidade residual do experimento. Assim, verifica-se que a variação dos níveis de A e B influenciam na escolha do nível do fator C a ser utilizado, comprovando as interações entre eles.

Tabela 5.17 – Comparação de médias do fator B para o experimento com 90 dias de cura

B variando e AC fixos							
A=0; C=1,4	B1-B2	15,63	igual	A=12,5; C=1,6	B1-B2	437,21	diferente
	B1-B3	17,38	igual		B1-B3	556,35	diferente
	B1-B4	29,07	igual		B1-B4	1031,90	diferente
	B2-B3	-1,75	igual		B2-B3	119,14	igual
	B2-B4	-13,44	igual		B2-B4	594,68	diferente
	B3-B4	-11,68	igual		B3-B4	475,55	diferente
A=0; C=1,5	B1-B2	3,14	igual	A=12,5; C=1,7	B1-B2	1303,02	diferente
	B1-B3	25,11	igual		B1-B3	1474,39	diferente
	B1-B4	58,14	igual		B1-B4	1726,82	diferente
	B2-B3	21,97	igual		B2-B3	171,38	igual
	B2-B4	55,00	igual		B2-B4	423,80	diferente
	B3-B4	33,04	igual		B3-B4	252,43	igual
A=0; C=1,6	B1-B2	21,45	igual	A=25; C=1,4	B1-B2	891,33	diferente
	B1-B3	26,04	igual		B1-B3	1362,37	diferente
	B1-B4	53,53	igual		B1-B4	1459,43	diferente
	B2-B3	4,59	igual		B2-B3	471,04	diferente
	B2-B4	32,09	igual		B2-B4	568,10	diferente
	B3-B4	27,49	igual		B3-B4	-97,06	igual
A=0; C=1,7	B1-B2	28,23	igual	A=25; C=1,5	B1-B2	893,15	diferente
	B1-B3	43,91	igual		B1-B3	1649,38	diferente
	B1-B4	106,84	igual		B1-B4	1719,27	diferente
	B2-B3	15,68	igual		B2-B3	756,23	diferente
	B2-B4	78,61	igual		B2-B4	826,12	diferente
	B3-B4	62,93	igual		B3-B4	69,89	igual
A=12,5; C=1,4	B1-B2	6,43	igual	A=25; C=1,6	B1-B2	1881,70	diferente
	B1-B3	160,99	igual		B1-B3	2787,10	diferente
	B1-B4	307,85	igual		B1-B4	2831,52	diferente
	B2-B3	154,56	igual		B2-B3	905,40	diferente
	B2-B4	301,41	igual		B2-B4	949,82	diferente
	B3-B4	-146,85	igual		B3-B4	44,42	igual
A=12,5; C=1,5	B1-B2	132,35	igual	A=25; C=1,7	B1-B2	2492,46	diferente
	B1-B3	286,42	igual		B1-B3	3919,97	diferente
	B1-B4	844,90	diferente		B1-B4	4122,70	diferente
	B2-B3	154,07	igual		B2-B3	1427,51	diferente
	B2-B4	712,55	diferente		B2-B4	1630,24	diferente
	B3-B4	558,48	diferente		B3-B4	202,73	igual

Tabela 5.18 – Comparação de médias do fator C para o experimento com 90 dias de cura

C variando e AB fixos							
A=0; B=3	C1-C2	30,91	igual	A=12,5; B=7	C1-C2	463,88	diferente
	C1-C3	81,26	igual		C1-C3	1005,69	diferente
	C1-C4	164,72	igual		C1-C4	2872,89	diferente
	C2-C3	50,35	igual		C2-C3	541,81	diferente
	C2-C4	133,82	igual		C2-C4	2409,01	diferente
	C3-C4	83,47	igual		C3-C4	1867,20	diferente
A=0; B=5	C1-C2	18,41	igual	A=12,5; B=9	C1-C2	875,50	diferente
	C1-C3	63,70	igual		C1-C3	1334,38	diferente
	C1-C4	63,70	igual		C1-C4	2978,46	diferente
	C2-C3	68,66	igual		C2-C3	458,88	diferente
	C2-C4	158,91	igual		C2-C4	2102,96	diferente
	C3-C4	90,25	igual		C3-C4	1644,08	diferente
A=0; B=7	C1-C2	38,63	igual	A=25; B=3	C1-C2	1010,31	diferente
	C1-C3	89,92	igual		C1-C3	1956,19	diferente
	C1-C4	191,25	igual		C1-C4	2872,81	diferente
	C2-C3	51,29	igual		C2-C3	945,88	diferente
	C2-C4	152,62	igual		C2-C4	1862,50	diferente
	C3-C4	101,34	igual		C3-C4	916,61	diferente
A=0; B=9	C1-C2	59,98	igual	A=25; B=5	C1-C2	1012,13	diferente
	C1-C3	105,73	igual		C1-C3	2946,57	diferente
	C1-C4	242,50	igual		C1-C4	4473,94	diferente
	C2-C3	45,75	igual		C2-C3	1934,44	diferente
	C2-C4	182,52	igual		C2-C4	3461,81	diferente
	C3-C4	136,77	igual		C3-C4	1527,38	diferente
A=12,5; B=3	C1-C2	338,45	diferente	A=25; B=7	C1-C2	1297,31	diferente
	C1-C3	610,33	diferente		C1-C3	3380,92	diferente
	C1-C4	1559,49	diferente		C1-C4	5430,41	diferente
	C2-C3	271,88	igual		C2-C3	2083,61	diferente
	C2-C4	1221,04	diferente		C2-C4	4133,10	diferente
	C3-C4	949,16	diferente		C3-C4	2049,49	diferente
A=12,5; B=5	C1-C2	464,37	diferente	A=25; B=9	C1-C2	1270,15	diferente
	C1-C3	1041,11	diferente		C1-C3	3328,28	diferente
	C1-C4	2856,08	diferente		C1-C4	5536,08	diferente
	C2-C3	576,74	diferente		C2-C3	2058,13	diferente
	C2-C4	2391,71	diferente		C2-C4	4265,93	diferente
	C3-C4	1814,96	diferente		C3-C4	2207,80	diferente

Como realização da comparação de médias pode-se escolher a melhor combinação dos fatores controláveis. Neste caso a combinação que proporciona maior resistência e maior economia às misturas estudadas, é o uso de 25% de cinza volante, 7% de cal e massa específica aparente seca de 1,7 g/cm<sup>3</sup>.

### 5.8.1.3 Gráficos dos fatores significativos e das suas interações

Com a realização da Tabela ANOVA pode-se identificar os fatores e as interações entre eles que são significativos. A partir da obtenção destes dados, foram gerados gráficos com as médias do experimento para a melhor visualização destes fenômenos.

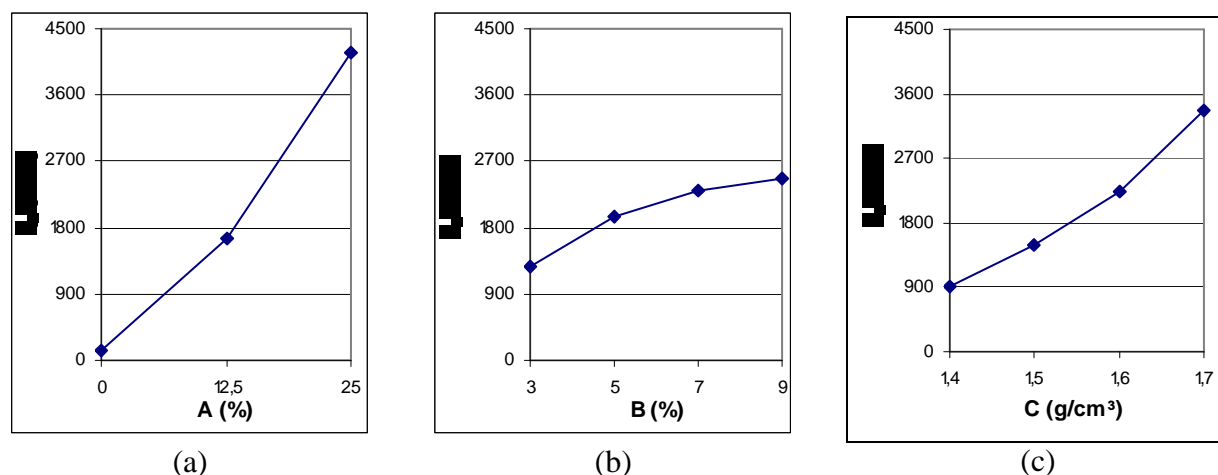


Figura 5.63 – Influência dos fatores significativos A (a), B (b) e C (c)

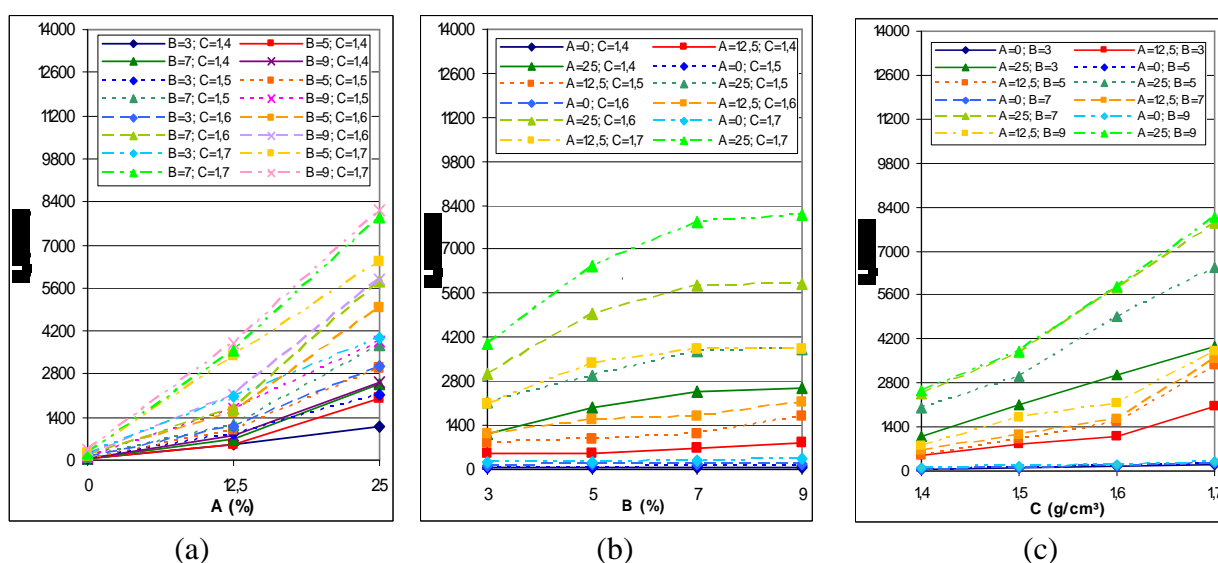


Figura 5.64 – Gráfico de interação AB x C (a), AC x B (b) e BC x A (c) para o experimento com 90 dias de cura

A Figura 5.63 apresenta a influência dos fatores significativos A, B e C. Analisando a Figura 5.63 observa-se que com o aumento do nível dos fatores (A, B e C) a resistência à compressão simples aumenta, como foi observado anteriormente.

A Figura 5.64 apresenta os gráficos de interação entre os fatores significativos A, B e C. As interações (AB, AC, BC e ABC) entre os fatores significativos são comprovadas pela falta de

paralelismo entre as linhas dos gráficos. A falta de paralelismo significa o quanto uma variável interfere na outra e ela pode estar presente em toda a extensão ou em apenas algumas regiões das linhas que estão sendo comparadas.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **6.1 CONCLUSÕES**

A partir da análise e discussão dos resultados, bem como da avaliação da influência dos fatores controláveis (quantidade de cal, quantidade de cinza volante, porosidade, tempo de cura) sobre a resistência mecânica de um solo arenoso artificialmente cimentado foram estabelecidas, dentro das condições e limites específicos deste estudo, as seguintes conclusões:

#### **a) Quanto à influência da quantidade de cal**

Como as amostras com 0% de cinza volante e 28 e 60 dias de cura não sobreviveram à imersão, não pode-se verificar se a cal tem efeito significativo sobre a resistência à compressão simples do material. Sendo que, aos 90 dias de cura pode-se perceber a sua influência, onde a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal. Para os materiais com 12,5% e 25% de cinza volante também pode-se perceber a influência da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples, tanto para corpos-de-prova ensaiados a 28, 60 e 90 dias. Mesmo pequenas adições de cal são suficientes para gerar ganhos de resistência nesses materiais, verificando-se que na faixa de teores estudados (3% até 9%), a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cal. Além disso, a taxa de ganho de resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, aumentou com o aumento da massa específica aparente seca do material compactado e com o aumento do teor de cinza volante, indicando que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactas e com maior porcentagem de cinza volante. A existência de um número maior de contatos e, conseqüentemente, a maior possibilidade da cal promover a união das partículas nesses contatos parece ser a causa desse fenômeno.



**b) Quanto à influência da porosidade**

Como as amostras com 0% de cinza volante e 28 e 60 dias de cura não sobreviveram à imersão, não pode-se verificar se a porosidade tem efeito significativo sobre a resistência à compressão simples do material. Sendo que, aos 90 dias de cura pode-se perceber a sua influência, onde a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução na porosidade do material. Para os materiais com 12,5% e 25% de cinza volante também pode-se perceber a influência da porosidade sobre a resistência à compressão simples, tanto para corpos-de-prova ensaiados a 28, 60 e 90 dias, que aumentou exponencialmente com a redução da porosidade das misturas compactadas. Com a redução na porosidade, os materiais estudados adquirem um maior número de contatos e um maior intertravamento entre as partículas, ocorrendo então, uma cimentação mais efetiva e conseqüentemente o aumento da resistência à compressão simples. Além disso, a maior capacidade de distribuição de tensões e mobilização de atrito no interior da amostra, nas porosidades mais baixas, pode também contribuir para o ganho de resistência do material.

**c) Relação vazios/cal**

A relação vazios/cal, apesar de apresentar uma correlação razoável com os valores obtidos para a resistência à compressão simples, tanto para amostras com 0% de cinza volante como para as amostras com 12,5% e 25% de cinza volante, não constitui-se na melhor forma de representar o fenômeno, pois assume que dada uma variação no volume de vazios, uma variação proporcional no volume de agente estabilizante seria suficiente para contrabalançar a perda ou ganho na resistência. Um melhor ajuste dos dados experimentais foi obtido para uma relação vazios/cal expressa em termos da porosidade da mistura compactada e do teor de agente cimentante volumétrico ajustado por um expoente igual a 0,12, qual seja:  $[\eta/(C_{av})^{0,12}]$ , para as amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura, e também para as amostras com 12,5% e 25% de cinza volante com 28, 60 e 90 dias de cura.

**d) Quanto à influência da quantidade de cinza volante**

A cinza volante tem efeito sobre a resistência à compressão simples do solo-cinza-cal estudado, tanto para corpos-de-prova ensaiados a 28, 60 e 90 dias de cura. Sendo que, na faixa de teores estudados (0% até 25%), a resistência à compressão simples aumenta com o

aumento da quantidade de cinza volante. Isto ocorre pelo fato da cinza volante ser um material que possui propriedades pozolânicas, sendo praticamente sílica amorfa, conseqüentemente aumentando a resistência do solo. Sendo que, o ganho dessa resistência aumentou também, com o aumento da quantidade de cal e da massa específica aparente seca utilizada. A existência de um número maior de contatos e, conseqüentemente, a maior possibilidade de promover a união das partículas nesses contatos parece ser a causa desse fenômeno.

#### **e) Quanto à influência do tempo de cura**

O tempo de cura da mistura compactada exerce influência sobre a resistência a compressão simples do material com 0% de cinza volante, onde apenas os corpos-de-prova com 90 dias de cura apresentam resistência à compressão simples. Para os materiais com 12,5% e 25% de cinza volante o tempo de cura da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência a compressão simples dos materiais que aumenta com o aumento do tempo de cura independentemente da quantidade cal e da massa específica aparente seca utilizada. Isso pode ser explicado pelo fato das reações solo-cal serem lentas, estendendo-se por anos e só iniciarem certo tempo depois da compactação. Por isso, para tempos de cura de 60 e 90 dias a dependência da resistência à compressão simples em relação ao teor de estabilizante é tão expressiva.

#### **f) Relações únicas no controle da resistência à compressão simples do solo estudado**

A existência de relações únicas e distintas no controle da resistência à compressão simples do solo estudado em função da porosidade, do teor volumétrico de cal e da quantidade de cinza volante para 28, 60 e 90 dias de cura mostrou-se muito eficiente para o uso em relações de dosagem. Assim, os resultados apresentados neste trabalho, sugerem que pode-se escolher a quantidade de cal, a quantidade de cinza volante e o esforço de compactação adequado para fornecer uma mistura que resulte na resistência à compressão simples desejada.

#### **g) Análise da Variância**

Para a análise da variância sem incluir 0% de cinza volante todos os fatores controláveis analisados no experimento (quantidade cal, quantidade de cinza volante, porosidade e tempo de cura) são significativos, bem como todas as interações entre eles. Para o experimento com somente 90 dias de cura verificou-se também, que todos os fatores controláveis (quantidade

de cal, quantidade de cinza volante e porosidade) e todas as interações entre eles são significativos. Assim, a metodologia de Projeto de Experimentos mostrou-se eficiente na determinação de quais fatores intervenientes são importantes e em que níveis fazem diferença para o fenômeno em estudo.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a dar prosseguimento ao trabalho realizado nesta dissertação e ampliar o conhecimento sobre o comportamento de solos artificialmente cimentados, o autor sugere os seguintes tópicos de pesquisa:

- A verificação do aumento da resistência à compressão simples, para o solo-cinza-cal em estudo, em tempos de cura mais longos, como 180 e 360 dias.
- A verificação da validade da relação vazios/cal para um solo mais argiloso e para um solo mais arenoso do que o utilizado, estabilizados com cinza volante.
- A execução de ensaios de resistência à tração, de ensaios triaxiais drenados e não-drenados, de ensaios de permeabilidade e microscopia para análise do comportamento de corpos-de-prova com mesma relação vazios/cal, como definido por esse trabalho.
- A verificação do efeito da trajetória de tensões sobre o comportamento de corpos-de-prova com mesma relação vazios/cal.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 5102: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures**. Philadelphia, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Uso de resíduos de combustão de carvão na indústria brasileira de cimento**. São Paulo, 1992, 19p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Solo – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica**. 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Solo – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica**. 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175: Cal hidratada para argamassa - Especificação**. 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. 2001.
- ATTOH-OKINE, N. O. **Lime Treatment of laterite soils and gravels – revisited**. Construction and Building Material, v.9, n.5, p.283-287. 1995.
- AKOTO, B. K. A.; SINGH, G. **Behaviour of Lime Stabilized Laterite Under Repeated Loading**. Australian Road Research, Victoria. v.16, p.259-267, 1986.
- BELL, F. G. **Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils**. Engineering Geology. n.42, p.223-237. 1996.
- BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J. I.; TODRES, H. A. **Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime – A Critical Review of Literature**. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA. PCA R&D Serial n. 2066. 60p., 2003.
- BITTENCOURT, R. M.; TRABOULSI, M. A.; BITTENCOURT MACHADO, R.; FONSECA, A. C.; PINTO, J. L. A. **Estudo da Influência de Variáveis no Controle da Resistência do Concreto Compactado com Rolo**. Trabalho da Disciplina Concretos Especiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

BOTTIN FILHO, I.A.; CARRARO, J.A.H; LEMOS, M.T.;SALES,L.F.P. **Estudo da influência da adição de cinzas de casca de arroz na estabilização de um solo mole tratado com cal.** 1995. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. (não publicado).

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

CERATTI, J. A. P. **Efeitos da Adição de Cal e Cinza Volante nas Propriedades de um Solo Residual Compactado.** 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, N. S. **Cemented Sands Under Static Loading.** Journal of Geotechnical Engineering Division, New York: ASCE, v.107, n.GT6, p.799-817, 1981.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. **Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.133, n.2, p.197-205, 2007.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; CARRARO, J. A. H.; HEINECK, K. S. **Behavior of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime Mixtures.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.127, n.9, p.774-782, 2001.

CRUZ, R. C. **Análise e Controle de Resistência de uma Areia Artificialmente Cimentada.** 2006. 83p. Qualificação de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CURTIL, L.; COULET, C.; RAKOTONDRAMANITRA, J.D. **Mud ashes from a purification station being re-used.** In: ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 1996, Osaka. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, 1996. v.2, p.691-695.

DA SILVA, M. A. M. **Efeito da Estabilização de solos mediante a adição de cal e cinza volante, visando a sua utilização em construção civil e em pavimentação.** 1982. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. **A Quicktest to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization.** Highway Research Record, Washington, D.C., n.139, p.61-72. 1966.

FEUERHARMEL, C. **Aspectos do Comportamento Não Saturado de dois Solos Coluvionares – Gasoduto Bolívia – Brasil.** 2003. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FOGAÇA, B.C.; CERATTI, J.A.P. **Estudo do comportamento mecânico e de deformabilidade de misturas de cinza volante, cal e areia do litoral do Rio Grande do Sul.** In: 29º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1995, Cuiabá. Anais... , p.347-360.

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

GENS, A.; NOVA, R. **Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks**. In: INT. SYMO. ON GEOTECHNICAL ENGINEERING OF HARD SOILS – SOFT ROCKS, 1993, Athens. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, 1993. 3v. v.1, p.485-494.

GUIMARÃES, J. E. P. **Estabilização de Solos – Nova e importante aplicação da cal – Seus conceitos e suas vantagens**. Boletim nº1. São Paulo: ABPC, 1971.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2002.

HEINECK, K, S. **Estudo da Influência de Cimentações Introduzidas sob Tensão**. 1998. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HERRIN, M.; MITCHELL, H. **Lime-soil Mixtures**. Highway Research Board Bulletin, Washington, D.C., v.304, p.99-121, 1961.

HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. **Lime Fixation in Clayey Soils**. Highway Research Board, Washington, D.C., n.262, p.20-32. 1960.

HUANG, J. T.; AIREY, D. W. **Effects of Cement and Density on a Artificially Cemented Sand**. In: INTERNATIONAL SUMPOSIUM ON GEOTECHNICAL ENGINEERING OF HARD SOILS – SOFT ROCKS, 1993, Athens. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, 1993. 3v. v.1, p.553-560.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento de Recursos Naturais**. Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. v.33, Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 796p.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Sidney: Butterworths, 1972. 374p.

KANIRAJ, S.R.; HAVANAGI, V. **Fly ash and fly ash-soil mixture for embankment construction**. In.: ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 1996, Osaka. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, 1996. v.2, p.757-762.

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 and Co., vol.55, n.648, p.903-905, 1960.

LEE, M.T.; DING, M.; NICHOLSON, P.G. **A study of use of H-power ash mixtures as a landfill final cover and a soil stabilizing agent**. In: ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 1996, Osaka. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, 1996. v.2, p.803-807.

LONG, N.T. **Utilization of used tyres in civil engineering – The Pneusol “Tyresoil”**. In: ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 1996, Osaka. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, 1996. v.2, p.809-813.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. 2007. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MALLMAN, J.E.C. **Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante**. 1996. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARINHO, F. A. M. **A técnica do Papel Filtro para Medição da Sucção**. In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 1995, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: CPGEC/CNPQ/FINEP/FAPERGS/ABMS, 1995, 2v, v.1, p.111-125.

MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash**. Ames, 1961. 247 p. Tese (Ph. D.) – Iowa State University Of Science and Technology.

MATEOS, M. **Soil Lime Research at Iowa State University**. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions. ASCE, New York, v.90, p.127-153, 1964.

MINNICK, L. J. **Reactions of hydrated lime with pulverized coal fly ash**. In: FLY ASH UTILIZATION, 1967, Pittsburgh. Proceedings... Edison Electric Institute, American public Power Association, Bureau of Mines Symposium. 1967, p.287-315.

NARDI, J. V. **Estabilização de areia com cinza volante e cal; Efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura**. 1975. 167p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

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

NÚÑEZ, W. P. **Notas de Aula de Estabilização de Solos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

OMINE, K.; OCHIAI, H.; YASUFUKU, N.; KATO, T. **Effect of plastic waste in improving cement-treated soils**. In: ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 1996, Osaka. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, 1996. v.2, p.875-880.

ORMSBY, W. C.; KINTER, E. B. **Effects of Dolomitic and Calcitic Limes on Strenght Development in Mistures with Two Clay Minerals**. Public Roads. v.37, n.4, p.149-160. 1973.

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

PRUSINSKI, J.R.; BHATTACHARJA, S. **Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils**. Transportation Research Record, Washington, D.C., n. 1652, p.215-227, 1999.

RIBEIRO, J. L.; TEN CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

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. 91p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ROCHA NETO, J. B.; MULLER, L. E.; TORMES, A. S.; THOMÉ, A. **Caracterização das cales hidratadas consumidas na região de Santa Maria-RS**. Tecnologia, Santa Maria, v.14, n.1-2, p.89-98, 1991.

ROGERS, C. D. F., GLENDINNING, S., AND ROFF, T. E. J. **Lime modification of clay soils for construction expediency**. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, v. 125, p. 242-249, 1997.

ROTTA, G. V. **Cimentação Introduzida sob Tensão: Compreendendo a Importância do Índice de Vazios de Formação da Estrutura no Comportamento Mecânico de Solos Cimentados**. 2000. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.

SCHNAID, F.; PRIETTO, P.D.M.; CONSOLI, N.C. **Prediction of Cemented Sand Behavior in Triaxial Compression**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.127, n.10, p.857-868, 2001.

SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. **Delay in Compaction and Importance of the Lime Fixation Point on the Strength and Compaction Characteristics of Soil**. Ground Improvement, n.2, p.27-32. 1998.

THOMÉ, A. **Estudo do Comportamento de um Solo Mole Tratado com Cal, Visando seu Uso em Fundações Superficiais**. 1994. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

THOMPSON, M. R. **Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils**. Highway Research Record, Washington, D.C. v.92, p.69-82. 1965.



THOMPSON, M. R. **Lime Reactivity of Illinois Soils.** Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, v.92, p.67-92.1966.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime-fly Ash-stabilized Bases and Subbases.** Washington, D.C., 1976, 66p.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization, reactions, properties, design and construction.** Washington: TRB, 1987. 58p. (State of the art report, 5).

ZWONOK, O.; CHIES, F. **Projeto CICASOL – pavimentos de solos estabilizados com cinza volante e cal.** Cientec, Fundação de Ciência e Tecnologia. Publicação interna, Porto Alegre, 1989.

**APÊNDICE A – DADOS DOS CORPOS-DE-PROVA ENSAIADOS À  
COMPRESSÃO SIMPLES**

Tabela A.1 – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 0% de cinza volante e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rf</sub> (%)	Sucção (KPa)
A1-97 <sub>90</sub>	3,0	1,65	1,41	0,863	46,3	14,31	195,8	90,7	3,24	28,0	78,8	43,6	48	48	42,4	x	x
A1-98 <sub>90</sub>	3,0	1,65	1,41	0,864	46,4	14,17	196,3	91,0	3,25	28,0	79,0	43,6	51		42,0	63,9	6
A1-99 <sub>90</sub>	3,0	1,65	1,41	0,872	46,6	14,46	196,5	91,5	3,24	28,3	79,5	43,9	45		42,4	x	x
A1-100 <sub>90</sub>	5,0	2,72	1,42	0,853	46,0	14,05	195,3	89,9	5,31	16,9	73,6	40,8	62	64	41,3	x	x
A1-101 <sub>90</sub>	5,0	2,70	1,41	0,867	46,4	14,28	196,5	91,3	5,30	17,2	74,7	41,2	61		41,3	61,8	5
A1-102 <sub>90</sub>	5,0	2,70	1,41	0,865	46,4	14,49	196,0	90,9	5,29	17,2	74,4	41,2	68		42,0	x	x
A1-103 <sub>90</sub>	7,0	3,70	1,41	0,867	46,4	14,46	196,5	91,2	7,28	12,5	71,9	39,7	68	65	41,0	x	x
A1-104 <sub>90</sub>	7,0	3,70	1,41	0,868	46,5	14,47	196,6	91,4	7,27	12,6	72,0	39,7	66		41,0	x	x
A1-105 <sub>90</sub>	7,0	3,73	1,42	0,853	46,0	13,95	196,0	90,2	7,31	12,3	71,1	39,3	62		40,2	62,1	7
A1-106 <sub>90</sub>	9,0	4,69	1,42	0,856	46,1	14,08	195,9	90,3	9,19	9,8	69,2	38,3	71	77	39,6	x	x
A1-107 <sub>90</sub>	9,0	4,69	1,41	0,858	46,2	14,21	196,2	90,6	9,20	9,8	69,4	38,4	77		39,9	x	x
A1-108 <sub>90</sub>	9,0	4,69	1,41	0,858	46,2	14,01	196,3	90,7	9,21	9,8	69,5	38,4	84		39,4	61,1	6
A2-109 <sub>90</sub>	3,0	1,76	1,51	0,748	42,8	14,48	196,8	84,2	3,47	24,3	72,5	40,0	80	79	49,5	x	x
A2-110 <sub>90</sub>	3,0	1,76	1,51	0,748	42,8	14,49	196,6	84,1	3,47	24,3	72,5	40,0	76		49,5	x	x
A2-111 <sub>90</sub>	3,0	1,76	1,51	0,747	42,8	14,49	196,6	84,1	3,47	24,2	72,4	39,9	81		49,6	69,0	6
A2-112 <sub>90</sub>	5,0	2,87	1,50	0,753	42,9	14,42	197,5	84,8	5,67	15,0	68,9	37,8	90	82	48,0	x	x
A2-113 <sub>90</sub>	5,0	2,88	1,51	0,747	42,8	14,43	196,9	84,2	5,67	14,8	68,4	37,7	76		48,4	67,5	12
A2-114 <sub>90</sub>	5,0	2,88	1,50	0,751	42,9	14,42	197,3	84,6	5,68	14,9	68,7	37,8	81		48,2	x	x
A2-115 <sub>90</sub>	7,0	3,97	1,51	0,741	42,5	14,32	196,2	83,5	7,79	10,7	65,3	36,1	110	104	47,5	x	x
A2-116 <sub>90</sub>	7,0	3,97	1,51	0,740	42,5	14,49	196,1	83,4	7,79	10,7	65,2	36,0	98		48,1	65,7	6
A2-117 <sub>90</sub>	7,0	3,98	1,52	0,735	42,4	14,38	195,8	83,0	7,80	10,6	64,9	35,9	105		48,1	x	x
A2-118 <sub>90</sub>	9,0	4,98	1,50	0,748	42,8	14,48	197,2	84,4	9,83	8,6	64,1	35,3	138	137	46,7	x	x
A2-119 <sub>90</sub>	9,0	5,02	1,51	0,736	42,4	14,40	196,1	83,1	9,84	8,4	63,2	34,9	142		47,1	x	x
A2-120 <sub>90</sub>	9,0	4,99	1,50	0,746	42,7	14,46	197,1	84,2	9,83	8,6	64,0	35,2	131		46,7	63,2	11

Tabela A.1 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 0% de cinza volante e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>a</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rf</sub> (%)	Sucção (KPa)
A3-121 <sub>90</sub>	3,0	1,88	1,61	0,642	39,1	14,22	197,5	77,2	3,71	20,8	66,0	36,3	127	129	56,7	72,8	10
A3-122 <sub>90</sub>	3,0	1,88	1,61	0,639	39,0	14,24	197,0	76,8	3,71	20,7	65,6	36,1	141		57,0	x	x
A3-123 <sub>90</sub>	3,0	1,87	1,60	0,646	39,2	14,50	197,4	77,4	3,70	20,9	66,2	36,4	120		57,5	x	x
A3-124 <sub>90</sub>	5,0	3,06	1,60	0,647	39,3	14,30	198,2	77,8	6,06	12,8	62,7	34,4	163	151	55,4	68,7	10
A3-125 <sub>90</sub>	5,0	3,06	1,60	0,643	39,1	14,49	197,3	77,2	6,04	12,8	62,2	34,2	145		56,5	x	x
A3-126 <sub>90</sub>	5,0	3,07	1,61	0,638	39,0	14,35	197,0	76,7	6,05	12,7	61,8	34,0	145		56,4	x	x
A3-127 <sub>90</sub>	7,0	4,23	1,61	0,635	38,8	14,50	196,5	76,3	8,30	9,2	59,2	32,7	165	155	56,1	70,1	7
A3-128 <sub>90</sub>	7,0	4,21	1,60	0,640	39,0	14,25	197,6	77,1	8,32	9,3	59,8	32,8	150		54,7	x	x
A3-129 <sub>90</sub>	7,0	4,19	1,59	0,650	39,4	14,45	198,3	78,1	8,31	9,4	60,6	33,2	150		54,7	x	x
A3-130 <sub>90</sub>	9,0	5,30	1,60	0,644	39,2	14,47	197,8	77,5	10,48	7,4	58,4	32,1	165	183	54,2	x	x
A3-131 <sub>90</sub>	9,0	5,32	1,60	0,638	39,0	14,41	197,2	76,8	10,48	7,3	57,9	31,9	187		54,4	x	x
A3-132 <sub>90</sub>	9,0	5,30	1,60	0,642	39,1	14,48	197,8	77,3	10,49	7,4	58,3	32,0	196		54,4	67,2	11
A4-133 <sub>90</sub>	3,0	1,98	1,70	0,555	35,7	14,47	198,2	70,7	3,93	18,0	60,0	32,9	213	213	66,7	x	x
A4-134 <sub>90</sub>	3,0	1,99	1,70	0,549	35,4	14,45	197,5	70,0	3,93	17,8	59,4	32,6	207		67,4	x	x
A4-135 <sub>90</sub>	3,0	1,98	1,70	0,554	35,6	14,45	198,1	70,6	3,93	18,0	59,9	32,8	219		66,8	77,9	25
A4-136 <sub>90</sub>	5,0	3,24	1,69	0,554	35,7	14,48	198,2	70,7	6,42	11,0	56,5	31,0	237	241	65,5	x	x
A4-137 <sub>90</sub>	5,0	3,28	1,71	0,536	34,9	14,49	195,9	68,4	6,42	10,6	54,7	30,3	242		67,8	73,6	26
A4-138 <sub>90</sub>	5,0	3,28	1,71	0,536	34,9	14,21	196,3	68,5	6,43	10,6	54,8	30,3	243		66,4	x	x
A4-139 <sub>90</sub>	7,0	4,49	1,71	0,540	35,1	13,51	198,1	69,5	8,89	7,8	53,4	29,3	273	257	61,5	x	x
A4-140 <sub>90</sub>	7,0	4,48	1,71	0,542	35,1	13,60	198,5	69,8	8,90	7,8	53,7	29,4	253		61,7	x	x
A4-141 <sub>90</sub>	7,0	4,49	1,71	0,538	35,0	13,60	198,0	69,3	8,90	7,8	53,3	29,2	244		62,1	73,6	29
A4-142 <sub>90</sub>	9,0	5,62	1,69	0,551	35,5	14,49	198,3	70,4	11,14	6,3	52,7	28,9	326	320	63,4	x	x
A4-143 <sub>90</sub>	9,0	5,63	1,70	0,546	35,3	14,43	197,9	69,9	11,15	6,3	52,3	28,7	309		63,6	x	x
A4-144 <sub>90</sub>	9,0	5,64	1,70	0,545	35,3	14,20	198,0	69,9	11,17	6,3	52,3	28,7	324		62,8	72,6	40

Tabela A.2 – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 12,5% de cinza volante e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>a</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rf</sub> (%)	Sucção (KPa)
A1-145 <sub>28</sub>	3,0	1,66	1,42	0,820	45,1	13,55	196,2	88,4	3,26	27,1	76,7	42,4	251	234	41,5	x	x
A1-146 <sub>28</sub>	3,0	1,66	1,42	0,820	45,1	13,61	196,2	88,4	3,26	27,1	76,7	42,4	216		41,7	x	x
A1-147 <sub>28</sub>	3,0	1,66	1,42	0,820	45,0	13,54	196,3	88,5	3,26	27,1	76,7	42,4	236		41,5	64,7	18
A1-148 <sub>28</sub>	5,0	2,72	1,42	0,819	45,0	13,53	196,5	88,4	5,34	16,6	72,3	39,9	283	286	40,7	x	x
A1-149 <sub>28</sub>	5,0	2,72	1,42	0,819	45,0	13,52	196,2	88,3	5,33	16,6	72,2	39,9	262		40,7	x	x
A1-150 <sub>28</sub>	5,0	2,69	1,41	0,834	45,5	14,28	196,8	89,5	5,30	16,9	73,2	40,4	313		42,1	65,1	8
A1-151 <sub>28</sub>	7,0	3,71	1,41	0,827	45,3	14,00	196,7	89,0	7,30	12,2	70,1	38,7	362	351	40,9	x	x
A1-152 <sub>28</sub>	7,0	3,72	1,42	0,823	45,1	13,81	196,6	88,7	7,32	12,1	69,9	38,5	327		40,5	x	x
A1-153 <sub>28</sub>	7,0	3,72	1,42	0,824	45,2	14,49	195,3	88,2	7,27	12,1	69,5	38,6	363		42,5	63,0	14
A1-154 <sub>28</sub>	9,0	4,63	1,40	0,849	45,9	14,41	198,5	91,1	9,18	9,9	69,9	38,2	371	376	40,2	x	x
A1-155 <sub>28</sub>	9,0	4,67	1,41	0,834	45,5	14,47	196,6	89,4	9,17	9,7	68,5	37,8	387		41,1	61,8	13
A1-156 <sub>28</sub>	9,0	4,70	1,42	0,822	45,1	14,30	195,6	88,3	9,19	9,6	67,6	37,5	370		41,2	x	x
A2-157 <sub>28</sub>	3,0	1,77	1,51	0,713	41,6	13,83	197,5	82,2	3,49	23,6	70,8	38,9	377	366	48,7	x	x
A2-158 <sub>28</sub>	3,0	1,75	1,50	0,724	42,0	14,08	198,4	83,3	3,48	23,9	71,7	39,2	343		48,8	72,5	14
A2-159 <sub>28</sub>	3,0	1,76	1,50	0,723	42,0	14,03	198,3	83,2	3,48	23,9	71,7	39,2	379		48,7	x	x
A2-160 <sub>28</sub>	5,0	2,89	1,51	0,712	41,6	13,81	197,6	82,2	5,70	14,4	66,7	36,6	576	550	47,8	x	x
A2-161 <sub>28</sub>	5,0	2,90	1,51	0,707	41,4	13,70	197,2	81,7	5,71	14,3	66,2	36,4	547		47,7	67,3	38
A2-162 <sub>28</sub>	5,0	2,89	1,51	0,708	41,5	13,65	197,5	81,9	5,71	14,3	66,4	36,5	526		47,4	x	x
A2-163 <sub>28</sub>	7,0	3,99	1,52	0,702	41,2	13,51	197,2	81,3	7,86	10,3	63,5	34,9	707	667	46,5	x	x
A2-164 <sub>28</sub>	7,0	3,97	1,51	0,707	41,4	13,81	197,2	81,7	7,84	10,4	63,8	35,1	619		47,1	65,6	24
A2-165 <sub>28</sub>	7,0	3,99	1,52	0,699	41,1	13,51	196,7	80,9	7,85	10,3	63,2	34,8	674		46,7	x	x
A2-166 <sub>28</sub>	9,0	5,02	1,51	0,706	41,4	13,70	197,3	81,6	9,90	8,2	62,0	34,1	708	710	46,0	x	x
A2-167 <sub>28</sub>	9,0	4,98	1,50	0,717	41,8	13,72	198,6	83,0	9,90	8,4	63,0	34,4	706		45,3	66,9	22
A2-168 <sub>28</sub>	9,0	5,00	1,51	0,713	41,6	14,19	197,3	82,1	9,86	8,3	62,4	34,3	717		47,1	x	x

Tabela A.2 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 12,5% de cinza volante e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>0</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rr</sub> (%)	Sucção (KPa)
A3-169 <sub>28</sub>	3,0	1,87	1,60	0,615	38,1	14,27	198,1	75,4	3,71	20,3	64,4	35,3	546	583	58,3	x	x
A3-170 <sub>28</sub>	3,0	1,87	1,60	0,616	38,1	13,77	198,9	75,8	3,72	20,3	64,7	35,3	611		56,2	74,8	52
A3-171 <sub>28</sub>	3,0	1,88	1,61	0,609	37,9	13,53	198,4	75,1	3,73	20,1	64,1	35,1	591		55,8	x	x
A3-172 <sub>28</sub>	5,0	3,05	1,59	0,622	38,4	14,50	198,5	76,2	6,05	12,6	61,4	33,6	750	757	57,3	76,6	28
A3-173 <sub>28</sub>	5,0	3,04	1,59	0,628	38,6	14,50	199,2	76,8	6,05	12,7	61,9	33,8	775		56,8	x	x
A3-174 <sub>28</sub>	5,0	3,06	1,60	0,616	38,1	13,71	199,1	75,9	6,09	12,5	61,1	33,3	745		54,8	x	x
A3-175 <sub>28</sub>	7,0	4,20	1,60	0,614	38,0	13,72	198,9	75,6	8,36	9,0	58,6	32,0	959	943	53,9	72,4	47
A3-176 <sub>28</sub>	7,0	4,19	1,60	0,618	38,2	14,33	198,5	75,9	8,32	9,1	58,8	32,2	869		55,9	x	x
A3-177 <sub>28</sub>	7,0	4,23	1,61	0,605	37,7	13,78	197,8	74,6	8,36	8,9	57,8	31,7	1000		54,9	x	x
A3-178 <sub>28</sub>	9,0	5,32	1,61	0,608	37,8	13,52	198,6	75,1	10,57	7,1	56,6	30,9	995	1024	52,7	70,1	46
A3-179 <sub>28</sub>	9,0	5,34	1,61	0,602	37,6	13,52	197,7	74,3	10,56	7,0	56,0	30,7	1009		53,1	x	x
A3-180 <sub>28</sub>	9,0	5,28	1,59	0,621	38,3	14,50	198,7	76,2	10,49	7,3	57,4	31,4	1068		55,2	x	x
A4-181 <sub>28</sub>	3,0	1,97	1,69	0,532	34,7	14,03	199,9	69,4	3,95	17,6	58,9	32,0	913	902	66,2	80,6	55
A4-182 <sub>28</sub>	3,0	1,97	1,69	0,532	34,7	14,45	199,2	69,2	3,93	17,6	58,7	32,0	861		68,1	x	x
A4-183 <sub>28</sub>	3,0	1,98	1,70	0,525	34,4	13,54	199,8	68,8	3,96	17,4	58,3	31,7	932		64,8	x	x
A4-184 <sub>28</sub>	5,0	3,28	1,71	0,508	33,7	13,81	197,4	66,5	6,47	10,3	53,2	29,2	1102	1201	66,9	68,3	145
A4-185 <sub>28</sub>	5,0	3,27	1,71	0,513	33,9	13,70	198,2	67,2	6,47	10,4	53,7	29,4	1251		65,7	x	x
A4-186 <sub>28</sub>	5,0	3,25	1,70	0,523	34,3	13,82	199,0	68,3	6,46	10,6	54,6	29,8	1249		65,1	x	x
A4-187 <sub>28</sub>	7,0	4,45	1,69	0,526	34,5	14,42	198,8	68,5	8,84	7,8	52,8	28,8	1342	1430	66,2	74,5	102
A4-188 <sub>28</sub>	7,0	4,49	1,71	0,510	33,8	13,52	198,2	66,9	8,91	7,5	51,5	28,2	1573		64,0	x	x
A4-189 <sub>28</sub>	7,0	4,48	1,70	0,515	34,0	13,54	198,8	67,6	8,90	7,6	52,0	28,4	1377		63,5	x	x
A4-190 <sub>28</sub>	9,0	5,60	1,69	0,529	34,6	13,88	200,2	69,3	11,20	6,2	51,8	28,1	1535	1662	62,1	76,0	101
A4-191 <sub>28</sub>	9,0	5,61	1,69	0,525	34,4	13,69	199,9	68,9	11,21	6,1	51,5	28,0	1664		61,7	x	x
A4-192 <sub>28</sub>	9,0	5,62	1,69	0,522	34,3	13,83	199,4	68,4	11,21	6,1	51,2	27,9	1787		62,6	x	x

Tabela A.3 – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 12,5% de cinza volante e 60 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>0</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rr</sub> (%)	Sucção (KPa)
A1-193 <sub>60</sub>	3,0	1,66	1,42	0,827	45,3	14,12	196,2	88,8	3,25	27,3	77,1	42,6	228	243	42,8	x	x
A1-194 <sub>60</sub>	3,0	1,66	1,42	0,825	45,2	13,74	196,6	88,9	3,26	27,3	77,1	42,5	246		41,8	x	x
A1-195 <sub>60</sub>	3,0	1,66	1,42	0,826	45,2	13,88	196,5	88,9	3,25	27,3	77,1	42,6	256		42,2	65,6	16
A1-196 <sub>60</sub>	5,0	2,71	1,42	0,822	45,1	13,51	196,9	88,8	5,34	16,6	72,6	40,0	524	558	40,5	x	x
A1-197 <sub>60</sub>	5,0	2,69	1,41	0,837	45,6	14,04	197,5	90,0	5,31	16,9	73,7	40,5	580		41,3	x	x
A1-198 <sub>60</sub>	5,0	2,71	1,42	0,823	45,1	13,52	196,8	88,8	5,34	16,6	72,7	40,0	569		40,4	65,8	14
A1-199 <sub>60</sub>	7,0	3,71	1,41	0,829	45,3	14,08	196,8	89,2	7,30	12,2	70,3	38,7	609	623	41,0	x	x
A1-200 <sub>60</sub>	7,0	3,69	1,41	0,836	45,5	14,00	197,6	90,0	7,30	12,3	70,9	38,9	586		40,4	x	x
A1-201 <sub>60</sub>	7,0	3,72	1,41	0,826	45,2	13,52	197,1	89,1	7,32	12,2	70,2	38,6	676		39,5	63,1	13
A1-202 <sub>60</sub>	9,0	4,66	1,41	0,835	45,5	14,46	196,9	89,6	9,18	9,8	68,6	37,8	678	743	41,0	x	x
A1-203 <sub>60</sub>	9,0	4,68	1,41	0,829	45,3	14,04	197,0	89,3	9,21	9,7	68,4	37,7	815		40,1	64,8	8
A1-204 <sub>60</sub>	9,0	4,70	1,42	0,822	45,1	13,53	197,1	89,0	9,26	9,6	68,1	37,5	734		38,9	x	x
A2-205 <sub>60</sub>	3,0	1,76	1,51	0,717	41,8	14,25	197,3	82,4	3,48	23,7	71,0	39,0	591	629	49,9	x	x
A2-206 <sub>60</sub>	3,0	1,77	1,52	0,705	41,3	13,70	196,9	81,4	3,49	23,3	70,1	38,6	646		48,8	x	x
A2-207 <sub>60</sub>	3,0	1,76	1,51	0,717	41,8	13,82	198,1	82,7	3,49	23,7	71,2	39,0	649		48,4	73,4	12
A2-208 <sub>60</sub>	5,0	2,89	1,51	0,707	41,4	13,51	197,6	81,9	5,72	14,3	66,4	36,5	685	666	47,0	x	x
A2-209 <sub>60</sub>	5,0	2,90	1,52	0,705	41,3	13,53	197,2	81,5	5,72	14,3	66,1	36,4	731		47,3	70,7	16
A2-210 <sub>60</sub>	5,0	2,88	1,51	0,713	41,6	14,04	197,3	82,1	5,69	14,4	66,7	36,7	581		48,5	x	x
A2-211 <sub>60</sub>	7,0	3,98	1,51	0,705	41,3	14,49	195,9	81,0	7,79	10,4	63,3	35,0	1115	1073	49,6	x	x
A2-212 <sub>60</sub>	7,0	3,99	1,52	0,702	41,2	13,84	196,5	81,0	7,83	10,3	63,3	34,9	1076		47,6	68,6	39
A2-213 <sub>60</sub>	7,0	4,00	1,52	0,698	41,1	13,56	196,7	80,8	7,86	10,3	63,1	34,8	1028		46,9	x	x
A2-214 <sub>60</sub>	9,0	5,00	1,51	0,710	41,5	13,73	197,8	82,1	9,90	8,3	62,4	34,2	1155	1112	45,8	x	x
A2-215 <sub>60</sub>	9,0	5,03	1,52	0,699	41,2	13,52	196,8	81,0	9,91	8,2	61,5	33,9	1156		45,8	68,0	11
A2-216 <sub>60</sub>	9,0	4,98	1,50	0,718	41,8	14,42	197,3	82,5	9,83	8,4	62,7	34,5	1025		47,6	x	x

Tabela A.3 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 12,5% de cinza volante e 60 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>0</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rr</sub> (%)	Sucção (KPa)
A3-217 <sub>60</sub>	3,0	1,88	1,61	0,610	37,9	14,22	197,3	74,8	3,71	20,2	63,9	35,1	1185	1138	58,5	77,0	30
A3-218 <sub>60</sub>	3,0	1,88	1,61	0,605	37,7	13,84	197,3	74,4	3,72	20,0	63,6	34,9	1050		57,4	x	x
A3-219 <sub>60</sub>	3,0	1,88	1,61	0,608	37,8	14,28	197,0	74,4	3,71	20,1	63,6	35,0	1177		59,0	x	x
A3-220 <sub>60</sub>	5,0	3,08	1,61	0,604	37,7	14,16	196,8	74,1	6,06	12,2	59,7	32,9	1461	1370	57,7	x	x
A3-221 <sub>60</sub>	5,0	3,07	1,60	0,612	38,0	14,00	198,1	75,2	6,07	12,4	60,6	33,2	1238		56,3	74,2	28
A3-222 <sub>60</sub>	5,0	3,05	1,59	0,622	38,3	13,67	200,0	76,7	6,09	12,6	61,7	33,6	1411		54,1	x	x
A3-223 <sub>60</sub>	7,0	4,25	1,62	0,596	37,4	13,69	196,9	73,6	8,37	8,8	57,0	31,4	1508	1460	55,4	x	x
A3-224 <sub>60</sub>	7,0	4,24	1,61	0,602	37,6	13,52	198,0	74,4	8,39	8,9	57,6	31,6	1555		54,2	80,9	43
A3-225 <sub>60</sub>	7,0	4,23	1,61	0,602	37,6	13,88	197,3	74,2	8,36	8,9	57,5	31,6	1315		55,6	x	x
A3-226 <sub>60</sub>	9,0	5,30	1,60	0,615	38,1	14,19	198,4	75,6	10,51	7,2	57,0	31,2	1491	1540	54,6	72,7	29
A3-227 <sub>60</sub>	9,0	5,32	1,61	0,607	37,8	13,93	198,0	74,8	10,54	7,1	56,4	30,9	1555		54,3	x	x
A3-228 <sub>60</sub>	9,0	5,31	1,60	0,612	38,0	14,03	198,4	75,3	10,53	7,2	56,8	31,1	1575		54,3	x	x
A4-229 <sub>60</sub>	3,0	1,98	1,69	0,526	34,5	14,18	198,8	68,5	3,94	17,4	58,1	31,8	1583	1622	67,7	80,6	49
A4-230 <sub>60</sub>	3,0	1,98	1,69	0,528	34,5	14,19	199,1	68,8	3,94	17,4	58,3	31,8	1687		67,5	x	x
A4-231 <sub>60</sub>	3,0	1,99	1,70	0,522	34,3	14,04	198,7	68,2	3,95	17,3	57,8	31,6	1597		67,5	x	x
A4-232 <sub>60</sub>	5,0	3,25	1,70	0,520	34,2	13,87	198,7	68,0	6,46	10,5	54,4	29,7	2239	2081	65,6	79,5	265
A4-233 <sub>60</sub>	5,0	3,26	1,70	0,516	34,1	13,83	198,3	67,5	6,46	10,5	54,0	29,6	2100		65,9	x	x
A4-234 <sub>60</sub>	5,0	3,25	1,70	0,520	34,2	13,86	198,7	67,9	6,46	10,5	54,3	29,7	1905		65,7	x	x
A4-235 <sub>60</sub>	7,0	4,46	1,70	0,521	34,3	13,74	199,3	68,3	8,89	7,7	52,6	28,6	2364	2337	63,6	75,8	60
A4-236 <sub>60</sub>	7,0	4,47	1,70	0,519	34,2	13,95	198,6	67,9	8,87	7,7	52,3	28,6	2213		64,8	x	x
A4-237 <sub>60</sub>	7,0	4,46	1,70	0,522	34,3	14,02	198,9	68,2	8,87	7,7	52,5	28,7	2435		64,8	x	x
A4-238 <sub>60</sub>	9,0	5,62	1,69	0,523	34,3	13,65	199,8	68,6	11,23	6,1	51,3	27,9	2462	2523	61,8	74,7	47
A4-239 <sub>60</sub>	9,0	5,60	1,69	0,528	34,5	14,37	199,1	68,8	11,15	6,2	51,5	28,1	2768		64,5	x	x
A4-240 <sub>60</sub>	9,0	5,61	1,69	0,525	34,4	14,07	199,3	68,6	11,19	6,1	51,3	28,0	2338		63,5	x	x



Tabela A.4 – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 12,5% de cinza volante e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>0</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0,12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0,12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rf</sub> (%)	Sucção (KPa)
A1-241 <sub>90</sub>	3,0	1,65	1,41	0,831	45,4	13,51	197,8	89,8	3,27	27,5	77,9	42,7	486	512	40,8	x	x
A1-242 <sub>90</sub>	3,0	1,66	1,42	0,822	45,1	13,53	196,7	88,8	3,27	27,2	77,0	42,5	523		41,3	66,0	7
A1-243 <sub>90</sub>	3,0	1,66	1,42	0,820	45,1	13,76	195,9	88,3	3,26	27,1	76,6	42,4	527		42,1	x	x
A1-244 <sub>90</sub>	5,0	2,69	1,40	0,840	45,6	14,31	197,3	90,0	5,30	17,0	73,7	40,5	552	519	41,9	x	x
A1-245 <sub>90</sub>	5,0	2,69	1,41	0,834	45,5	14,39	196,6	89,4	5,30	16,9	73,2	40,4	533		42,4	65,7	9
A1-246 <sub>90</sub>	5,0	2,71	1,42	0,824	45,2	13,56	196,9	88,9	5,34	16,7	72,7	40,1	472		40,5	x	x
A1-247 <sub>90</sub>	7,0	3,69	1,40	0,839	45,6	14,02	198,0	90,4	7,30	12,4	71,2	39,0	661	673	40,3	x	x
A1-248 <sub>90</sub>	7,0	3,68	1,40	0,844	45,8	14,39	197,7	90,5	7,27	12,4	71,3	39,1	728		41,1	x	x
A1-249 <sub>90</sub>	7,0	3,71	1,41	0,827	45,3	13,68	197,2	89,2	7,32	12,2	70,3	38,7	631		39,9	66,9	9
A1-250 <sub>90</sub>	9,0	4,66	1,41	0,835	45,5	13,62	198,3	90,2	9,25	9,8	69,1	37,8	825	820	38,6	x	x
A1-251 <sub>90</sub>	9,0	4,68	1,41	0,829	45,3	13,52	197,9	89,7	9,26	9,7	68,7	37,7	837		38,6	x	x
A1-252 <sub>90</sub>	9,0	4,67	1,41	0,834	45,5	13,71	198,0	90,0	9,24	9,7	68,9	37,8	799		38,9	66,6	12
A2-253 <sub>90</sub>	3,0	1,75	1,50	0,724	42,0	14,03	198,5	83,4	3,48	23,9	71,8	39,3	804	851	48,6	x	x
A2-254 <sub>90</sub>	3,0	1,76	1,50	0,723	42,0	14,21	198,0	83,1	3,48	23,9	71,5	39,2	861		49,4	x	x
A2-255 <sub>90</sub>	3,0	1,75	1,50	0,727	42,1	14,49	197,9	83,3	3,47	24,0	71,8	39,4	887		50,0	74,0	15
A2-256 <sub>90</sub>	5,0	2,85	1,49	0,732	42,3	14,49	198,8	84,0	5,67	14,8	68,2	37,3	975	983	48,7	x	x
A2-257 <sub>90</sub>	5,0	2,87	1,50	0,722	41,9	14,23	198,2	83,1	5,69	14,6	67,5	37,0	1072		48,5	69,4	14
A2-258 <sub>90</sub>	5,0	2,88	1,51	0,716	41,7	13,77	198,3	82,7	5,71	14,5	67,1	36,8	902		47,3	x	x
A2-259 <sub>90</sub>	7,0	3,99	1,52	0,702	41,2	13,83	196,6	81,1	7,84	10,3	63,3	34,9	1143	1137	47,5	x	x
A2-260 <sub>90</sub>	7,0	3,96	1,51	0,712	41,6	13,98	197,5	82,1	7,82	10,5	64,2	35,3	1201		47,4	68,6	28
A2-261 <sub>90</sub>	7,0	3,97	1,51	0,708	41,5	13,81	197,2	81,8	7,83	10,4	63,9	35,1	1068		47,1	x	x
A2-262 <sub>90</sub>	9,0	5,03	1,52	0,701	41,2	13,51	197,2	81,3	9,92	8,2	61,7	34,0	1774	1696	45,6	68,5	19
A2-263 <sub>90</sub>	9,0	5,05	1,52	0,695	41,0	13,74	196,0	80,3	9,89	8,1	61,0	33,8	1682		46,8	x	x
A2-264 <sub>90</sub>	9,0	5,02	1,52	0,703	41,3	14,17	196,3	81,0	9,86	8,2	61,6	34,0	1630		47,7	x	x

Tabela A.4 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 12,5% de cinza volante e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>0</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rr</sub> (%)	Sucção (KPa)
A3-265 <sub>90</sub>	3,0	1,88	1,61	0,610	37,9	13,52	198,6	75,3	3,73	20,2	64,3	35,1	1151	1123	55,6	x	x
A3-266 <sub>90</sub>	3,0	1,88	1,61	0,607	37,8	13,52	198,2	74,9	3,73	20,1	64,0	35,0	1081		55,9	x	x
A3-267 <sub>90</sub>	3,0	1,88	1,61	0,606	37,7	13,54	197,9	74,7	3,73	20,0	63,8	35,0	1135		56,1	75,4	27
A3-268 <sub>90</sub>	5,0	3,08	1,61	0,604	37,6	14,49	196,2	73,9	6,05	12,2	59,5	32,9	1711	1560	59,1	75,7	29
A3-269 <sub>90</sub>	5,0	3,07	1,61	0,609	37,8	13,93	197,9	74,9	6,08	12,3	60,3	33,1	1565		56,3	x	x
A3-270 <sub>90</sub>	5,0	3,07	1,61	0,609	37,8	13,81	198,1	74,9	6,08	12,3	60,3	33,1	1404		55,8	x	x
A3-271 <sub>90</sub>	7,0	4,21	1,60	0,612	38,0	13,95	198,5	75,4	8,35	9,0	58,4	32,0	1603	1679	54,9	73,2	110
A3-272 <sub>90</sub>	7,0	4,18	1,59	0,623	38,4	14,50	198,7	76,3	8,30	9,2	59,2	32,3	1700		56,1	x	x
A3-273 <sub>90</sub>	7,0	4,21	1,60	0,613	38,0	13,51	199,1	75,7	8,38	9,0	58,6	32,0	1734		53,2	x	x
A3-274 <sub>90</sub>	9,0	5,28	1,59	0,619	38,2	14,41	198,6	75,9	10,49	7,2	57,3	31,3	2364	2155	55,1	x	x
A3-275 <sub>90</sub>	9,0	5,29	1,60	0,617	38,2	14,16	198,7	75,8	10,52	7,2	57,2	31,2	2015		54,3	70,0	67
A3-276 <sub>90</sub>	9,0	5,31	1,60	0,613	38,0	13,97	198,5	75,4	10,53	7,2	56,9	31,1	2084		54,0	x	x
A4-277 <sub>90</sub>	3,0	1,98	1,70	0,524	34,4	13,64	199,6	68,6	3,96	17,3	58,2	31,7	2093	2072	65,3	x	x
A4-278 <sub>90</sub>	3,0	1,99	1,70	0,522	34,3	13,53	199,4	68,4	3,96	17,2	58,0	31,6	1913		65,1	81,5	82
A4-279 <sub>90</sub>	3,0	1,97	1,69	0,533	34,8	14,39	199,4	69,4	3,93	17,6	58,9	32,1	2210		67,7	x	x
A4-280 <sub>90</sub>	5,0	3,27	1,71	0,511	33,8	13,51	197,9	66,9	6,47	10,3	53,5	29,3	3453	3375	65,1	x	x
A4-281 <sub>90</sub>	5,0	3,26	1,70	0,518	34,1	13,52	199,1	67,9	6,48	10,5	54,3	29,6	3551		64,3	77,8	122
A4-282 <sub>90</sub>	5,0	3,26	1,71	0,515	34,0	13,54	198,3	67,4	6,47	10,4	53,9	29,5	3121		64,7	x	x
A4-283 <sub>90</sub>	7,0	4,47	1,70	0,518	34,1	13,52	199,3	68,0	8,91	7,6	52,3	28,5	3621	3546	62,9	78,3	80
A4-284 <sub>90</sub>	7,0	4,49	1,71	0,512	33,9	13,75	198,1	67,1	8,89	7,6	51,6	28,3	3426		64,8	x	x
A4-285 <sub>90</sub>	7,0	4,47	1,70	0,519	34,2	13,96	198,6	67,9	8,87	7,7	52,2	28,6	3592		64,9	x	x
A4-286 <sub>90</sub>	9,0	5,64	1,70	0,517	34,1	13,78	198,8	67,7	11,22	6,0	50,7	27,7	3855	3799	63,1	74,4	207
A4-287 <sub>90</sub>	9,0	5,65	1,70	0,516	34,0	13,52	199,1	67,8	11,24	6,0	50,7	27,6	3572		62,1	x	x
A4-288 <sub>90</sub>	9,0	5,69	1,72	0,504	33,5	13,54	197,5	66,2	11,24	5,9	49,5	27,2	3968		63,6	x	x

Tabela A.5 – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 25% de cinza volante e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rr</sub> (%)	Sucção (KPa)
A1-289 <sub>28</sub>	3,0	1,65	1,41	0,795	44,3	13,52	197,5	87,5	3,27	26,8	75,9	41,7	577	570	41,9	x	x
A1-290 <sub>28</sub>	3,0	1,66	1,42	0,787	44,0	13,54	196,5	86,5	3,26	26,5	75,1	41,4	575		42,4	x	x
A1-291 <sub>28</sub>	3,0	1,66	1,42	0,792	44,2	13,53	197,2	87,2	3,27	26,7	75,6	41,6	558		42,1	68,6	26
A1-292 <sub>28</sub>	5,0	2,71	1,42	0,789	44,1	13,57	196,8	86,8	5,34	16,3	71,0	39,1	646	696	41,5	x	x
A1-293 <sub>28</sub>	5,0	2,69	1,41	0,805	44,6	14,14	197,6	88,1	5,31	16,6	72,1	39,6	694		42,4	x	x
A1-294 <sub>28</sub>	5,0	2,70	1,41	0,800	44,4	13,81	197,3	87,7	5,32	16,5	71,8	39,5	747		41,7	66,6	22
A1-295 <sub>28</sub>	7,0	3,70	1,41	0,802	44,5	14,33	197,0	87,7	7,28	12,0	69,1	38,1	917	902	42,3	x	x
A1-296 <sub>28</sub>	7,0	3,73	1,42	0,786	44,0	13,38	196,8	86,6	7,34	11,8	68,2	37,6	915		40,3	64,3	18
A1-297 <sub>28</sub>	7,0	3,72	1,41	0,793	44,2	13,56	197,2	87,2	7,33	11,9	68,7	37,8	874		40,5	x	x
A1-298 <sub>28</sub>	9,0	4,70	1,42	0,791	44,2	13,74	196,8	86,9	9,24	9,4	66,5	36,7	985	992	40,4	x	x
A1-299 <sub>28</sub>	9,0	4,71	1,42	0,785	44,0	13,56	196,1	86,2	9,24	9,3	66,0	36,5	1035		40,2	64,3	45
A1-300 <sub>28</sub>	9,0	4,68	1,41	0,798	44,4	13,53	197,5	87,7	9,23	9,5	67,1	36,9	955		39,4	x	x
A2-301 <sub>28</sub>	3,0	1,76	1,51	0,682	40,6	13,52	198,3	80,4	3,50	23,0	69,2	37,9	966	980	48,8	x	x
A2-302 <sub>28</sub>	3,0	1,76	1,50	0,691	40,9	13,98	198,4	81,1	3,48	23,3	69,8	38,2	1002		49,9	73,3	84
A2-303 <sub>28</sub>	3,0	1,76	1,50	0,690	40,8	13,51	198,7	81,1	3,49	23,2	69,8	38,2	972		48,3	x	x
A2-304 <sub>28</sub>	5,0	2,87	1,50	0,690	40,8	14,02	198,4	81,0	5,69	14,2	65,7	36,0	1241	1302	49,1	x	x
A2-305 <sub>28</sub>	5,0	2,89	1,51	0,680	40,5	13,51	198,1	80,2	5,72	14,0	65,0	35,6	1247		48,0	71,8	54
A2-306 <sub>28</sub>	5,0	2,88	1,51	0,684	40,6	13,54	198,4	80,6	5,72	14,1	65,4	35,8	1419		47,9	x	x
A2-307 <sub>28</sub>	7,0	3,93	1,50	0,697	41,1	14,79	197,8	81,2	7,77	10,5	63,5	34,8	1411	1382	50,3	x	x
A2-308 <sub>28</sub>	7,0	3,96	1,51	0,684	40,6	13,31	198,8	80,7	7,87	10,3	63,0	34,4	1421		46,1	69,5	29
A2-309 <sub>28</sub>	7,0	3,96	1,51	0,684	40,6	13,23	199,0	80,8	7,88	10,3	63,1	34,4	1316		45,9	x	x
A2-310 <sub>28</sub>	9,0	4,99	1,50	0,686	40,7	13,51	198,8	80,9	9,92	8,2	61,4	33,5	1801	1676	45,8	68,9	44
A2-311 <sub>28</sub>	9,0	5,00	1,51	0,682	40,5	13,53	198,4	80,4	9,92	8,1	61,0	33,4	1681		46,2	x	x
A2-312 <sub>28</sub>	9,0	4,99	1,50	0,686	40,7	13,52	198,8	80,9	9,92	8,2	61,4	33,5	1545		45,9	x	x

Tabela A.5 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 25% de cinza volante e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rr</sub> (%)	Sucção (KPa)
A3-313 <sub>28</sub>	3,0	1,87	1,60	0,589	37,1	14,00	198,8	73,7	3,72	19,8	62,9	34,4	1308	1246	58,6	76,4	54
A3-314 <sub>28</sub>	3,0	1,85	1,58	0,603	37,6	14,18	200,2	75,3	3,71	20,3	64,3	34,9	1192		58,0	x	x
A3-315 <sub>28</sub>	3,0	1,87	1,60	0,585	36,9	13,51	199,2	73,6	3,73	19,7	62,8	34,2	1236		56,9	x	x
A3-316 <sub>28</sub>	5,0	3,04	1,59	0,596	37,4	14,41	199,1	74,4	6,05	12,3	59,9	32,7	1916	1854	58,4	75,7	54
A3-317 <sub>28</sub>	5,0	3,07	1,61	0,579	36,7	13,89	197,7	72,5	6,07	11,9	58,4	32,1	1881		57,9	x	x
A3-318 <sub>28</sub>	5,0	3,04	1,59	0,597	37,4	13,52	200,6	75,0	6,10	12,3	60,4	32,7	1764		54,7	x	x
A3-319 <sub>28</sub>	7,0	4,22	1,61	0,578	36,6	13,54	198,3	72,6	8,38	8,7	56,3	30,8	2198	2224	55,6	74,2	52
A3-320 <sub>28</sub>	7,0	4,25	1,62	0,568	36,2	13,52	197,0	71,4	8,37	8,5	55,3	30,5	2256		56,4	x	x
A3-321 <sub>28</sub>	7,0	4,22	1,61	0,578	36,6	13,52	198,3	72,6	8,38	8,7	56,3	30,8	2217		55,5	x	x
A3-322 <sub>28</sub>	9,0	5,30	1,60	0,588	37,0	13,52	199,7	73,9	10,57	7,0	55,7	30,3	2474	2547	53,5	72,8	61
A3-323 <sub>28</sub>	9,0	5,28	1,59	0,593	37,2	13,51	200,4	74,6	10,58	7,1	56,2	30,5	2627		53,0	x	x
A3-324 <sub>28</sub>	9,0	5,27	1,59	0,594	37,3	13,52	200,5	74,7	10,57	7,1	56,3	30,5	2541		52,9	x	x
A4-325 <sub>28</sub>	3,0	1,96	1,68	0,514	34,0	13,52	202,2	68,7	3,96	17,3	58,2	31,3	1966	1898	64,7	80,4	85
A4-326 <sub>28</sub>	3,0	1,97	1,69	0,504	33,5	13,52	200,8	67,3	3,96	17,0	57,0	30,9	1915		66,1	x	x
A4-327 <sub>28</sub>	3,0	1,96	1,68	0,513	33,9	13,50	201,8	68,4	3,96	17,3	58,0	31,2	1812		64,9	x	x
A4-328 <sub>28</sub>	5,0	3,21	1,68	0,511	33,8	14,01	201,0	68,0	6,45	10,5	54,3	29,4	2493	2520	66,3	81,0	49
A4-329 <sub>28</sub>	5,0	3,23	1,69	0,505	33,5	13,78	200,4	67,2	6,46	10,4	53,7	29,1	2688		66,0	x	x
A4-330 <sub>28</sub>	5,0	3,20	1,67	0,515	34,0	14,26	201,1	68,4	6,44	10,6	54,7	29,6	2377		66,9	x	x
A4-331 <sub>28</sub>	7,0	4,43	1,69	0,505	33,6	13,52	201,1	67,5	8,90	7,6	51,9	28,1	2900	2824	63,4	78,0	281
A4-332 <sub>28</sub>	7,0	4,41	1,68	0,510	33,8	13,57	201,6	68,1	8,90	7,7	52,4	28,3	2761		63,1	x	x
A4-333 <sub>28</sub>	7,0	4,40	1,68	0,514	34,0	14,50	200,6	68,1	8,83	7,7	52,5	28,4	2812		66,8	x	x
A4-334 <sub>28</sub>	9,0	5,55	1,67	0,514	34,0	14,24	201,2	68,3	11,17	6,1	51,1	27,6	3215	3134	64,4	75,3	157
A4-335 <sub>28</sub>	9,0	5,55	1,67	0,514	34,0	14,50	200,4	68,1	11,13	6,1	51,0	27,6	3064		65,6	x	x
A4-336 <sub>28</sub>	9,0	5,57	1,68	0,509	33,7	14,04	200,8	67,7	11,19	6,0	50,7	27,4	3123		64,2	x	x

Tabela A.6 – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 25% de cinza volante e 60 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rr</sub> (%)	Sucção (KPa)
A1-337 <sub>60</sub>	3,0	1,64	1,40	0,811	44,8	14,48	197,6	88,4	3,24	27,3	76,8	42,2	1064	1030	44,0	x	x
A1-338 <sub>60</sub>	3,0	1,64	1,40	0,808	44,7	14,49	197,2	88,1	3,24	27,2	76,5	42,1	1052		44,2	x	x
A1-339 <sub>60</sub>	3,0	1,64	1,40	0,807	44,7	14,50	197,1	88,0	3,24	27,2	76,5	42,1	976		44,3	70,1	43
A1-340 <sub>60</sub>	5,0	2,72	1,42	0,786	44,0	13,51	196,4	86,5	5,34	16,2	70,7	39,0	1101	1084	41,5	x	x
A1-341 <sub>60</sub>	5,0	2,69	1,41	0,802	44,5	14,06	197,2	87,8	5,31	16,5	71,9	39,5	1086		42,3	x	x
A1-342 <sub>60</sub>	5,0	2,71	1,41	0,794	44,3	13,51	197,4	87,4	5,34	16,4	71,5	39,3	1066		41,1	67,5	11
A1-343 <sub>60</sub>	7,0	3,72	1,41	0,793	44,2	13,52	197,5	87,4	7,34	11,9	68,8	37,8	1175	1127	40,4	x	x
A1-344 <sub>60</sub>	7,0	3,69	1,40	0,807	44,7	14,16	197,7	88,3	7,29	12,1	69,6	38,2	1130		41,6	x	x
A1-345 <sub>60</sub>	7,0	3,70	1,41	0,803	44,5	13,76	197,9	88,1	7,31	12,1	69,4	38,1	1077		40,6	65,7	26
A1-346 <sub>60</sub>	9,0	4,69	1,41	0,793	44,2	13,76	197,0	87,1	9,24	9,4	66,7	36,7	1307	1295	40,3	x	x
A1-347 <sub>60</sub>	9,0	4,65	1,40	0,808	44,7	14,49	197,3	88,2	9,18	9,6	67,6	37,2	1210		41,7	65,8	20
A1-348 <sub>60</sub>	9,0	4,68	1,41	0,796	44,3	14,38	196,1	86,9	9,18	9,5	66,6	36,8	1366		42,0	x	x
A2-349 <sub>60</sub>	3,0	1,74	1,49	0,702	41,3	13,94	199,8	82,5	3,49	23,7	71,0	38,6	1360	1511	48,9	x	x
A2-350 <sub>60</sub>	3,0	1,75	1,50	0,698	41,1	14,49	198,4	81,5	3,47	23,5	70,2	38,4	1630		51,2	72,1	28
A2-351 <sub>60</sub>	3,0	1,77	1,51	0,679	40,5	13,71	197,6	79,9	3,49	22,9	68,8	37,8	1542		49,7	x	x
A2-352 <sub>60</sub>	5,0	2,88	1,51	0,686	40,7	13,88	198,1	80,6	5,70	14,1	65,4	35,8	1704	1735	48,9	x	x
A2-353 <sub>60</sub>	5,0	2,87	1,50	0,690	40,8	13,75	198,8	81,2	5,71	14,2	65,9	36,0	1757		48,2	71,5	35
A2-354 <sub>60</sub>	5,0	2,88	1,51	0,683	40,6	13,75	197,9	80,3	5,71	14,1	65,2	35,7	1745		48,6	x	x
A2-355 <sub>60</sub>	7,0	3,95	1,50	0,688	40,8	13,91	198,3	80,9	7,83	10,3	63,2	34,6	1803	2001	47,9	69,4	22
A2-356 <sub>60</sub>	7,0	3,94	1,50	0,693	40,9	14,50	197,8	81,0	7,79	10,4	63,3	34,7	2036		49,6	x	x
A2-357 <sub>60</sub>	7,0	3,95	1,50	0,688	40,8	14,23	197,7	80,6	7,81	10,3	63,0	34,6	2165		49,1	x	x
A2-358 <sub>60</sub>	9,0	4,98	1,50	0,689	40,8	14,46	197,6	80,6	9,84	8,2	61,3	33,6	2951	2710	48,8	70,5	25
A2-359 <sub>60</sub>	9,0	4,97	1,50	0,692	40,9	14,49	198,0	81,0	9,84	8,2	61,6	33,8	2603		48,7	x	x
A2-360 <sub>60</sub>	9,0	5,00	1,51	0,682	40,5	14,18	197,0	79,9	9,85	8,1	60,7	33,4	2576		48,4	x	x

Tabela A.6 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 25% de cinza volante e 60 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rr</sub> (%)	Sucção (KPa)
A3-361 <sub>60</sub>	3,0	1,86	1,59	0,595	37,3	14,09	199,4	74,3	3,71	20,0	63,5	34,6	1775	1874	58,4	75,8	72
A3-362 <sub>60</sub>	3,0	1,88	1,61	0,581	36,8	13,88	198,0	72,8	3,72	19,6	62,2	34,1	1821		58,8	x	x
A3-363 <sub>60</sub>	3,0	1,87	1,60	0,591	37,1	13,71	199,8	74,2	3,73	19,9	63,4	34,5	2025		57,2	x	x
A3-364 <sub>60</sub>	5,0	3,03	1,58	0,604	37,6	14,48	199,7	75,2	6,04	12,4	60,6	33,0	2561	2799	57,9	67,9	227
A3-365 <sub>60</sub>	5,0	3,04	1,59	0,596	37,4	14,25	199,4	74,5	6,06	12,3	60,0	32,7	2890		57,8	x	x
A3-366 <sub>60</sub>	5,0	3,03	1,59	0,600	37,5	14,49	199,4	74,7	6,05	12,4	60,2	32,8	2946		58,4	x	x
A3-367 <sub>60</sub>	7,0	4,16	1,58	0,602	37,6	14,14	200,3	75,2	8,33	9,0	58,3	31,7	3260	3281	55,7	72,8	43
A3-368 <sub>60</sub>	7,0	4,20	1,60	0,588	37,0	13,52	199,6	73,9	8,38	8,8	57,3	31,2	3171		54,5	x	x
A3-369 <sub>60</sub>	7,0	4,19	1,60	0,589	37,1	13,51	199,8	74,0	8,38	8,8	57,4	31,2	3413		54,4	x	x
A3-370 <sub>60</sub>	9,0	5,30	1,60	0,587	37,0	13,52	199,6	73,8	10,58	7,0	55,6	30,3	4274	4362	53,6	85,1	106
A3-371 <sub>60</sub>	9,0	5,29	1,60	0,589	37,1	13,51	199,9	74,1	10,58	7,0	55,8	30,3	4361		53,4	x	x
A3-372 <sub>60</sub>	9,0	5,29	1,60	0,588	37,0	13,80	199,3	73,8	10,55	7,0	55,6	30,3	4451		54,6	x	x
A4-373 <sub>60</sub>	3,0	1,96	1,68	0,513	33,9	13,92	201,2	68,2	3,95	17,3	57,8	31,3	3009	3145	66,9	x	x
A4-374 <sub>60</sub>	3,0	1,96	1,68	0,512	33,8	14,46	200,0	67,7	3,93	17,2	57,4	31,2	3301		69,7	x	x
A4-375 <sub>60</sub>	3,0	1,96	1,68	0,515	34,0	14,47	200,6	68,2	3,93	17,4	57,9	31,4	3124		69,2	83,2	178
A4-376 <sub>60</sub>	5,0	3,21	1,68	0,510	33,8	14,14	200,8	67,8	6,45	10,5	54,2	29,4	3685	3831	67,0	x	x
A4-377 <sub>60</sub>	5,0	3,22	1,68	0,507	33,6	13,92	200,6	67,5	6,46	10,4	53,9	29,2	3974		66,4	83,8	88
A4-378 <sub>60</sub>	5,0	3,21	1,68	0,512	33,9	14,47	200,3	67,9	6,43	10,6	54,3	29,5	3835		68,3	x	x
A4-379 <sub>60</sub>	7,0	4,40	1,68	0,514	33,9	13,96	201,4	68,4	8,87	7,7	52,6	28,4	4075	4078	64,4	75,0	45
A4-380 <sub>60</sub>	7,0	4,43	1,69	0,505	33,6	13,81	200,6	67,3	8,88	7,6	51,8	28,1	3721		64,8	x	x
A4-381 <sub>60</sub>	7,0	4,40	1,68	0,514	33,9	14,35	200,8	68,1	8,84	7,7	52,5	28,4	4438		66,2	x	x
A4-382 <sub>60</sub>	9,0	5,59	1,69	0,504	33,5	14,01	200,2	67,1	11,19	6,0	50,2	27,3	4938	4870	64,6	79,6	265
A4-383 <sub>60</sub>	9,0	5,58	1,68	0,506	33,6	13,74	200,9	67,5	11,21	6,0	50,5	27,4	4839		63,1	x	x
A4-384 <sub>60</sub>	9,0	5,57	1,68	0,511	33,8	14,13	200,9	67,9	11,18	6,1	50,8	27,5	4832		64,3	x	x

Tabela A.7 – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 25% de cinza volante e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rr</sub> (%)	Sucção (KPa)
A1-385 <sub>90</sub>	3,0	1,65	1,41	0,799	44,4	14,49	196,1	87,1	3,24	26,9	75,6	41,8	1108	1102	44,7	69,3	22
A1-386 <sub>90</sub>	3,0	1,65	1,41	0,799	44,4	13,51	198,1	88,0	3,27	26,9	76,3	41,8	1099		41,7	x	x
A1-387 <sub>90</sub>	3,0	1,64	1,41	0,805	44,6	13,87	197,7	88,2	3,25	27,1	76,5	42,0	1099		42,4	x	x
A1-388 <sub>90</sub>	5,0	2,70	1,41	0,795	44,3	13,52	197,3	87,3	5,33	16,4	71,5	39,3	1945	1994	41,1	x	x
A1-389 <sub>90</sub>	5,0	2,71	1,42	0,791	44,2	13,52	196,9	87,0	5,34	16,3	71,1	39,2	1995		41,3	x	x
A1-390 <sub>90</sub>	5,0	2,71	1,42	0,791	44,2	14,22	195,8	86,5	5,31	16,3	70,8	39,2	2040		43,5	67,7	24
A1-391 <sub>90</sub>	7,0	3,71	1,41	0,794	44,3	13,64	197,2	87,3	7,32	11,9	68,7	37,8	2444	2465	40,7	67,2	37
A1-392 <sub>90</sub>	7,0	3,73	1,42	0,787	44,0	13,51	196,6	86,6	7,33	11,8	68,2	37,6	2543		40,7	x	x
A1-393 <sub>90</sub>	7,0	3,72	1,41	0,793	44,2	13,76	196,9	87,1	7,32	11,9	68,6	37,8	2407		41,1	x	x
A1-394 <sub>90</sub>	9,0	4,70	1,42	0,790	44,1	13,63	196,8	86,9	9,24	9,4	66,5	36,7	2485	2562	40,1	x	x
A1-395 <sub>90</sub>	9,0	4,69	1,41	0,793	44,2	14,29	196,1	86,7	9,20	9,4	66,4	36,7	2522		41,9	66,2	46
A1-396 <sub>90</sub>	9,0	4,70	1,42	0,789	44,1	13,53	196,8	86,8	9,25	9,4	66,4	36,6	2678		39,9	x	x
A2-397 <sub>90</sub>	3,0	1,76	1,51	0,686	40,7	13,65	198,6	80,8	3,50	23,1	69,5	38,0	2122	2113	49,0	x	x
A2-398 <sub>90</sub>	3,0	1,77	1,51	0,678	40,4	13,74	197,4	79,7	3,49	22,8	68,6	37,7	2136		50,0	x	x
A2-399 <sub>90</sub>	3,0	1,76	1,51	0,683	40,6	14,25	197,1	80,0	3,48	23,0	68,9	37,9	2080		51,4	74,2	44
A2-400 <sub>90</sub>	5,0	2,88	1,51	0,684	40,6	13,83	198,0	80,5	5,70	14,1	65,3	35,8	3094	3006	48,8	x	x
A2-401 <sub>90</sub>	5,0	2,86	1,49	0,699	41,1	14,31	198,6	81,7	5,67	14,4	66,3	36,3	3118		49,5	72,0	22
A2-402 <sub>90</sub>	5,0	2,88	1,51	0,684	40,6	13,88	197,8	80,4	5,70	14,1	65,2	35,8	2805		49,0	x	x
A2-403 <sub>90</sub>	7,0	3,96	1,51	0,681	40,5	13,52	198,1	80,3	7,85	10,2	62,7	34,3	3753	3762	47,1	x	x
A2-404 <sub>90</sub>	7,0	3,96	1,51	0,684	40,6	14,13	197,6	80,3	7,82	10,3	62,7	34,4	3846		48,9	71,8	38
A2-405 <sub>90</sub>	7,0	3,96	1,51	0,683	40,6	13,97	197,6	80,2	7,83	10,2	62,7	34,4	3687		48,5	x	x
A2-406 <sub>90</sub>	9,0	5,01	1,51	0,677	40,4	13,51	198,0	79,9	9,93	8,1	60,7	33,3	3811	3832	46,4	70,0	54
A2-407 <sub>90</sub>	9,0	5,04	1,52	0,670	40,1	13,51	197,0	79,0	9,92	8,0	60,0	33,0	3937		46,9	x	x
A2-408 <sub>90</sub>	9,0	5,02	1,51	0,674	40,3	13,52	197,4	79,5	9,92	8,0	60,3	33,2	3748		46,7	x	x

Tabela A.7 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova da linha "A" com 25% de cinza volante e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C <sub>av</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	η (%)	ω (%)	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>ca</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> /V <sub>ca</sub>	(V <sub>v</sub> )/(V <sub>ca</sub> <sup>0.12</sup> )	η/(C <sub>av</sub> ) <sup>0.12</sup>	q <sub>u</sub> (KPa)	q <sub>u</sub> média (KPa)	S <sub>r</sub> (%)	S <sub>rr</sub> (%)	Sucção (KPa)
A3-409 <sub>90</sub>	3,0	1,88	1,61	0,576	36,5	14,02	197,1	72,0	3,71	19,4	61,5	33,9	3208	3058	60,0	78,7	67
A3-410 <sub>90</sub>	3,0	1,88	1,61	0,579	36,7	14,05	197,6	72,5	3,71	19,5	61,9	34,0	3073		59,8	x	x
A3-411 <sub>90</sub>	3,0	1,86	1,59	0,595	37,3	14,47	198,7	74,1	3,70	20,0	63,3	34,6	2895		60,0	x	x
A3-412 <sub>90</sub>	5,0	3,06	1,60	0,587	37,0	13,52	199,5	73,8	6,10	12,1	59,4	32,3	4710	4940	55,7	78,9	73
A3-413 <sub>90</sub>	5,0	3,03	1,58	0,602	37,6	14,47	199,8	75,1	6,05	12,4	60,5	32,9	4682		58,1	x	x
A3-414 <sub>90</sub>	5,0	3,04	1,59	0,598	37,4	14,48	199,1	74,5	6,05	12,3	60,0	32,7	5428		58,5	x	x
A3-415 <sub>90</sub>	7,0	4,19	1,59	0,590	37,1	13,53	200,0	74,2	8,38	8,9	57,5	31,3	5836	5846	54,3	73,1	686
A3-416 <sub>90</sub>	7,0	4,19	1,60	0,590	37,1	13,51	199,9	74,2	8,38	8,8	57,5	31,2	5660		54,3	x	x
A3-417 <sub>90</sub>	7,0	4,15	1,58	0,606	37,7	14,43	200,3	75,6	8,31	9,1	58,6	31,8	6041		56,5	x	x
A3-418 <sub>90</sub>	9,0	5,25	1,58	0,601	37,5	14,50	199,6	74,9	10,48	7,1	56,5	30,8	6092	5890	56,1	x	x
A3-419 <sub>90</sub>	9,0	5,29	1,59	0,590	37,1	13,83	199,4	74,0	10,54	7,0	55,8	30,4	5720		54,5	x	x
A3-420 <sub>90</sub>	9,0	5,28	1,59	0,591	37,2	14,47	198,5	73,7	10,49	7,0	55,6	30,4	5857		56,9	72,0	174
A4-421 <sub>90</sub>	3,0	1,96	1,68	0,515	34,0	14,19	201,0	68,4	3,94	17,4	58,0	31,4	3995	3975	67,8	81,5	57
A4-422 <sub>90</sub>	3,0	1,95	1,67	0,523	34,3	14,50	201,5	69,2	3,93	17,6	58,7	31,7	3830		68,3	x	x
A4-423 <sub>90</sub>	3,0	1,97	1,69	0,505	33,5	13,51	201,0	67,4	3,97	17,0	57,1	30,9	4100		66,0	x	x
A4-424 <sub>90</sub>	5,0	3,20	1,68	0,515	34,0	14,48	200,7	68,2	6,43	10,6	54,5	29,6	6590	6467	68,0	83,3	43
A4-425 <sub>90</sub>	5,0	3,21	1,68	0,510	33,8	13,54	201,7	68,1	6,48	10,5	54,4	29,4	6718		64,1	x	x
A4-426 <sub>90</sub>	5,0	3,20	1,68	0,515	34,0	14,41	200,8	68,2	6,43	10,6	54,6	29,6	6094		67,7	x	x
A4-427 <sub>90</sub>	7,0	4,42	1,68	0,506	33,6	13,85	200,8	67,5	8,88	7,6	51,9	28,1	7548	7895	64,9	83,4	48
A4-428 <sub>90</sub>	7,0	4,47	1,70	0,492	33,0	13,51	199,6	65,9	8,91	7,4	50,7	27,6	8462		65,0	x	x
A4-429 <sub>90</sub>	7,0	4,45	1,69	0,499	33,3	14,03	199,3	66,3	8,86	7,5	51,0	27,8	7674		66,7	x	x
A4-430 <sub>90</sub>	9,0	5,57	1,68	0,508	33,7	13,67	201,4	67,9	11,22	6,0	50,8	27,4	7749	8098	62,5	x	x
A4-431 <sub>90</sub>	9,0	5,59	1,69	0,505	33,5	13,97	200,4	67,2	11,20	6,0	50,3	27,3	8460		64,4	74,3	820
A4-432 <sub>90</sub>	9,0	5,57	1,68	0,509	33,7	13,87	201,0	67,8	11,20	6,1	50,7	27,4	8085		63,4	x	x