

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

Misturas Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da
Resistência à Compressão Simples para Cura Acelerada

Rodrigo Beck Saldanha

Porto Alegre

2014

Rodrigo Beck Saldanha

**MISTURAS CINZA VOLANTE E CAL DE CARBURETO:
COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
SIMPLES PARA CURA ACELERADA**

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. Coorientação: Prof. Dra. Cecília Gravina da Rocha.

Porto Alegre

2014

CIP - Catalogação na Publicação

Saldanha, Rodrigo Beck

Misturas cinza volante e cal de carbureto:
comportamento da resistência à compressão simples
para cura acelerada / Rodrigo Beck Saldanha. -- 2014.
170 f.

Orientadora: Nilo Cesar Consoli.

Coorientadora: Cecília Gravina da Rocha.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-
RS, 2014.

1. Sustentabilidade. 2. Cinza volante e cal de
carbureto. 3. Relação porosidade/teor volumétrico de
cal. 4. Tempo de cura. 5. Temperatura. I. Consoli,
Nilo Cesar, orient. II. da Rocha, Cecília Gravina,
coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

RODRIGO BECK SALDANHA

**MISTURAS CINZA VOLANTE E CAL DE CARBURETO:
COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
SIMPLES PARA CURA ACELERAD**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Meio Ambiente, 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, 7 de Abril de 2014.

Prof. Nilo Cesar Consoli

Ph. D. Concordia University, Canadá
Orientador

Cecília Gravina da Rocha

Dra. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
Coorientadora

Armando Miguel Awruch

Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ana Carolina Passuello

Ph. D. Universitat Rovira i Virgili, URV, Espanha.

Prof. Ana Paula Kirchheim

Dra. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Pedro Domingos Marques Prietto

Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Lucas Festugato

Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho à família. Base de tudo que move a
minha vida e as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Esta parte que deveria ser a mais informal e fácil, na verdade é muito difícil, pois são muitas as pessoas que acompanharam a caminhada deste trabalho e tiveram por toda parte um pedaço desta pesquisa. Portanto, para todas que eu conheço de alguma forma, seja em conversas informais, seja em momentos sérios, de alegria ou tristeza, que assim passaram, que marcaram uma época, para todos eu agradeço! Pois sou nada mais do que um pouco de cada um e serei este pouco e mais conforme as pessoas que conhecerei e momentos que passarei.

Agradeço a minha família, a primeira, aquela onde a gente nasce. Minha mãe, Letícia Saldanha, por ser um exemplo de dedicação, superação, inteligência e outros tantos adjetivos que fazem dela a imagem da mulher moderna que ocupa o seu espaço na sociedade sem pedir licença, ocupa, pois é ali o seu lugar. Ao meu pai, Saldanha, que nada mais é do que o homem/pessoa em que eu me espelho e espero ser algum dia. Minhas irmãs, Patrícia e Simone, que tenho muito amor, pelo incentivo, companhia para “as sempre as sextas” e pelas pessoas que vocês são.

Agradeço a minha família, aquela que estamos montando com alguém e com este alguém vem outra família e que vira a sua família. Então agradeço a Juliana, com quem divido o mesmo teto e a mesma cama com muito amor, por ser compreensiva nos momentos de dedicação para este trabalho, por ser uma conselheira para os momentos de dificuldade, por ser a pessoa com quem divido conquistas e felicidade, por ser esta pessoa maravilhosa que faz a plenitude da minha vida. Agradeço a imensa família da Juliana, que para citar todos precisaria de outra dissertação, mas de forma geral aos pais, avós, tios e agregados que sempre me deram todo apoio para o meu trabalho e fazem eu me sentir parte desta imensa família.

Agradeço aos professores Nilo Consoli e Cecília da Rocha que me orientaram com toda a dedicação possível, passando para mim todo o conhecimento e sabedoria. Muito obrigado por tudo que vocês fizeram para que este trabalho existisse.

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

A todos os meus queridos colegas do mestrado e do LEGG/ENVIRONGEO. Foi lá em 2007 que tudo começou com a iniciação científica. Nesta época conheci o Lucas Festugato, amizade que cativo até hoje e outros tantos que conheci ao longo dos anos: Carina, Sergio,

Isadora, Lucas Zampieri, Alison, Marina, Daniel, Mariana, João... Em especial ao meu único bolsista, Leo Dorfman, que tive por uns três meses e me ajudou uma “barbaridade”. Muito obrigado a todos!

Agradecimento especial a CIENTEC que me acolheu para a realização dos meus ensaios, principalmente o Eduardo Mallmann com quem tive uma ótima convivência e pude aprender muito sobre cinzas e reações pozolânicas, meus sinceros agradecimentos. Agradeço também a equipe que trabalha no setor do meio ambiente da CIENTEC: ao Claudiomiro que me ajudou a organizar os equipamentos e arrumar os mesmos e ao Rohde por fornecer materiais de pesquisa e pelo interesse no meu trabalho.

À companhia Celulose Riograndense por disponibilizar a cinza volante utilizada neste trabalho e à companhia White Martins por disponibilizar a cal de carbureto.

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 obrigado!

RESUMO

SALDANHA, RODRIGO BECK. Misturas Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples para Cura Acelerada. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A questão ambiental vem se tornando tema recorrente nos foros nacionais e internacionais, estando atualmente inserida na opinião pública, nas comunidades e sendo norteadora na geração de novos produtos e serviços na área industrial e comercial voltados para a sustentabilidade. Neste sentido, a indústria da construção é um dos principais causadores de impacto ambiental, pois consome consideráveis recursos naturais e gera grandes quantidades de resíduos. Sendo assim, a utilização de resíduos como matéria prima na indústria da construção possibilita benefícios ambientais e econômicos. Buscando avançar nesta discussão, a presente pesquisa procurou inserir dois resíduos (cinza volante e cal de carbureto), gerados na região metropolitana de Porto Alegre, como possibilidade de solução de Engenharia. Para isto, é necessário um estudo do seu comportamento mecânico decorrente da cimentação proporcionada pela mistura e compactação destes materiais. Contudo, ainda não existe uma formulação de dosagem dessa mistura baseadas em critérios mais racionais. Assim, a presente pesquisa busca fornecer subsídios para que, através do uso da relação porosidade/teor volumétrico de cal obtidas a partir da identificação e quantificação das variáveis mais importantes no controle da resistência da mistura de dois resíduos, possa determinar o seu comportamento. Isto é, a formulação de equações para previsão da resistência à compressão simples do material cimentado em cura acelerada. Para isso, foram realizados ensaios de compressão simples em corpos-de-prova com 5, 10 e 15% de cal, com peso específico aparente seco de 11, 12 e 13 kN/m³; curados por 1, 3 e 7 dias em câmara vaporizadora nas temperaturas 40, 60 e 80°C; e 3, 7 e 14 dias para cura sem vapor a 23°C. Os resultados demonstram que o aumento da quantidade de cal, do peso específico aparente seco, do tempo de cura e da temperatura provoca o aumento da resistência à compressão simples da mistura compactada. Entretanto, a temperatura apresentou um limite de influência para 3 e 7 dias, onde a variação de 60°C para 80°C não aumentou a resistência. A relação porosidade(η)/teor volumétrico de cal (L_v), ajustado por um expoente [$\eta/(L_v)^{0,11}$], mostrou-se adequado na formulação de equações na previsão da resistência do material cimentado para todas as temperaturas e tempos de cura estudadas. Além disso, a existência de relações únicas e distintas no controle da resistência à compressão simples em função da porosidade, teor volumétrico de cal e temperatura, assim como para o tempo de cura mostraram-se úteis para formulações de dosagem. Os resultados foram submetidos à análise de variância que comprovou que todos os fatores controláveis escolhidos para o experimento são significativos, assim como todas as interações entre eles.

Palavras-chave: sustentabilidade; cinza volante e cal de carbureto; relação porosidade/teor volumétrico de cal; tempo de cura; temperatura.

ABSTRACT

SALDANHA, RODRIGO BECK. Misturas Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples para Cura Acelerada. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The environmental issue is becoming a recurring theme in national and international forums, currently inserted in the public opinion, communities and being guiding the generation of new products and services in the industrial and commercial area focused to sustainability. In this sense, the construction industry is a major cause of environmental impact, it consumes considerable natural resources and generates large amounts of waste. Thus, the use of waste as a raw material in the construction industry provides economic and environmental benefits. Looking for progress in this discussion, this research sought to insert two wastes (fly ash and carbide lime), generated in the metropolitan region of Porto Alegre, as a possibility for solution of Engineering. For this, a study of its mechanical behavior due to cementation and compaction provided by the mixture of these materials is necessary. However there is not a rational dosage formulation of this mixture. Therefore, this research seeks to provide subsidy to determine behavior through the use of the relation of porosity/volumetric lime content obtained from the identification and quantification of the most important variables in the controlling of strength to the mixture of two residues. That is, the formulation of equations for predicting the compressive strength of cemented material into accelerated healing. For this, tests were conducted on samples with 5, 10 and 15% of lime; with dry unit weight of 11, 12 and 13 kN/m³; for 1, 3 and 7 curing days with steam in the temperature of 40, 60 and 80°C; and 3, 7 and 14 days without steam for 23°C. The results show that increasing the amount of carbide lime, dry unit weight, curing time and temperature has as consequence the increase of unconfined compression strength of the compacted mixture. However, the temperature had a limit of influence for 3 and 7 days, where the range of 60°C to 80°C did not increase the unconfined compression strength. The porosity(η)/volumetric lime content (L_v) ratio adjusted by an exponent [$\eta/(L_v)^{0,11}$], proved to be adequate to formulate equations to predict the strength of the cemented material for all temperatures and curing times studied. Furthermore, the existence of unique and distinct relationships in the control of unconfined compression strength of the mixture studied as a function of porosity, lime volumetric content, temperature, as for the cure time proved to be useful in dosage formulations. The results were subjected to analysis of variance showing that all the controllable factors chosen for the experiment are significant, as well as all interactions between them.

Key-words: sustainability; fly ash; carbide lime; porosity/volumetric lime content ratio; curing time; temperature

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	20
1.2 OBJETIVOS.....	23
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 A CINZA DE CARVÃO MINERAL E O MEIO AMBIENTE.....	25
2.1.1 Resíduos produzidos pela queima do carvão.....	25
2.1.2 Características da cinza e o meio ambiente.....	28
2.1.3 A cinza como subproduto.....	30
2.2 EMPREGO DA CINZA E CAL.....	31
2.3 MATERIAIS ESTABILIZADOS POZOLANICAMENTE.....	34
2.3.1 Fatores que influenciam as reações pozolânicas.....	37
2.4 VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS CINZA-CAL.....	38
2.4.1 Efeito da cal.....	38
2.4.2 Efeito da porosidade.....	40
2.4.3 Efeito do tempo de cura.....	41
2.4.4 Efeito da temperatura de cura.....	42
2.4.5 Efeito da relação entre porosidade e teor volumétrico de cal.....	44
3. MÉTODO DE PESQUISA.....	52
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	54
3.1.1 Métodos de caracterização.....	55
3.1.1.1 Coleta de amostras.....	55
3.1.1.2 Preparação das amostras.....	56
3.1.1.3 Ensaios de Caracterização.....	56
3.1.1.4 Ensaio de compactação.....	57
3.1.2 Materiais da mistura.....	57

3.1.2.1 Cinza Volante	57
3.1.2.2 Cal.....	60
3.1.3 Programa de ensaios de resistência à compressão simples	62
3.1.3.1 Definição dos teores de cal.....	62
3.1.3.2 Definição da Porosidade.....	64
3.1.3.3 Definição do Tempo e Temperatura de Cura	66
3.1.4 Ensaios de Resistência à Compressão Simples	66
3.1.4.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova	66
3.1.4.2 Molde e Câmara de Vapor.....	68
3.1.4.3 Ensaios de Resistência à Compressão Simples	69
3.1.4.4 Sucção Matricial	70
4. RESULTADOS E ANÁLISES	74
4.1 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES	74
4.1.1 Efeito do teor de cal.....	74
4.1.1.1 Amostras curadas a 80°C em câmara de vapor	74
4.1.1.2 Amostras curadas a 60°C em câmara de vapor	80
4.1.1.3 Amostras curadas a 40°C em câmara de vapor	82
4.1.1.4 Amostras curadas a 23°C sem cura a vapor.	85
4.1.2 Efeito da Porosidade.....	88
4.1.2.1 Amostras curadas a 80°C em câmara de vapor	88
4.1.2.2 Amostras curadas a 60°C em câmara de vapor	93
4.1.2.3 Amostras curadas a 40°C em câmara de vapor	95
4.1.2.4 Amostras curadas a 23°C sem cura a vapor	97
4.1.3 Efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal	99
4.1.3.1 Amostras curadas a 80°C.....	99
4.1.3.2 Amostras curadas a 60°C.....	106
4.1.3.3 Amostras curadas a 40°C.....	112
4.1.3.4 Amostras curadas a 23°C.....	118

4.1.2 Efeito do tempo de cura.....	123
4.1.2.1 Efeito do tempo de cura para amostras curadas a 80°C	123
4.1.2.2 Efeito do tempo de cura para amostras curadas a 60°C	125
4.1.2.2 Efeito do tempo de cura para amostras curadas a 40°C	127
4.1.3 Efeito da Temperatura	130
4.2 ANÁLISE DA VARIÂNCIA	138
4.2.1 Comparação de Médias	139
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	148
5.1 CONCLUSÕES	148
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	151
6 REFERÊNCIAS	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre adição de cal de carbureto em solo argiloso e resistência a compressão simples para 28 dias de cura. Fonte: Horpibulsuk et al. (2012)	39
Figura 2 – Evolução da resistência com o aumento da porcentagem de cal e tempo de cura. Fonte: Andrade, 1991.	41
Figura 3 – Tendência de ganho de resistência frente à variação do período de cura. Fonte: adaptado de Dalla Rosa (2009).....	42
Figura 4 – Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Larnach, 1960).....	45
Figura 5 – relação vazios/cimento expresso em termos da porosidade e do teor volumétrico de cimento. Fonte: Foppa, 2005.	46
Figura 6 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 28 dias de cura. Fonte: Lopes Junior, 2007	47
Figura 7 – Fator vazios/cimento expresso em termos da porosidade e do teor de cimento volumétrico para amostras com 7 dias de cura. Fonte: Lopes Junior, 2007.....	47
Figura 8 – 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. Fonte: Dalla Rosa, 2009.	49
Figura 9 – Mudança na resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta/(\text{Liv})^{0,3}$ para todas a temperaturas. Fonte: Silvani (2013)	50
Figura 10 – Variação da resistência à compressão simples ajustada com a temperatura. Fonte: Silvani (2013)	50
Figura 11 – Local de armazenamento e cinza volante coletada – Celulose Riograndense.	58
Figura 12 – Curva granulométrica da cinza volante.	59
Figura 13 – Local de coleta (a), armazenamento (b) e cal de carbureto após a secagem (c). ..	61
Figura 14 – Determinação do teor mínimo de cal.	63
Figura 15 – Teste piloto para determinação do teor máximo de cal através da variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal.	64
Figura 16 – Ensaio de compactação estática e determinação da massa específica e umidade adotadas na pesquisa.....	65
Figura 17 – Prensa e molde adaptado para confecção dos corpos-de-prova.	68
Figura 18 – Câmara de vapor utilizada para cura dos corpos-de-prova em temperaturas de 40°C, 60°C e 80°C.....	69
Figura 19 – Aspecto do corpo de prova curado e capeado.	70
Figura 20 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 80°C ensaiadas com 1 dia de cura em câmara de vapor.....	75
Figura 21 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 80°C ensaiadas com 3 dias de cura em câmara de vapor.	75
Figura 22 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 80°C ensaiadas com 7 dias de cura em câmara de vapor.	76
Figura 23- Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 1 dia a 80°C.	78
Figura 24 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 3 dias 80°C.....	78
Figura 25 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 7 dias a 80°C.	79
Figura 26 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 1 dia a 60°C.	80

Figura 27 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 3 dias a 60°C.....	81
Figura 28 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 7 dias a 60°C.....	81
Figura 29 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 1 dia a 40°C.	83
Figura 30 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 3 dias a 40°C.....	83
Figura 31 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 7 dias a 40°C.....	84
Figura 32 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 3 dias a 23°C.....	86
Figura 33 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 7 dias a 23°C.....	86
Figura 34 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 14 dias a 23°C.....	87
Figura 35 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 1 dia de cura e 80°C.....	89
Figura 36 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 3 dias de cura e 80°C.....	89
Figura 37 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 7 dias de cura e 80°C.....	90
Figura 38 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 1 dia de cura e 80°C.....	91
Figura 39 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 3 dias de cura e 80°C.....	92
Figura 40 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 7 dias de cura e 80°C.....	92
Figura 41- Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 1 dia de cura e 60°C.....	93
Figura 42 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 3 dias de cura e 60°C.....	94
Figura 43 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 7 dias de cura e 60°C.....	94
Figura 44 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 1 dias de cura e 40°C.....	96
Figura 45 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 3 dias de cura e 40°C.....	96
Figura 46 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 7 dias de cura e 40°C.....	97
Figura 47 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 7 dias de cura e 23°C.....	98
Figura 49 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 14 dias de cura e 23°C.....	99
Figura 49 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 1 dia.	100
Figura 50 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 3 dias.....	100
Figura 51 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 7 dias.....	101

Figura 52 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 1 dia a 80°C.	102
Figura 53 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 3 dias a 80°C.	103
Figura 54 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 7 dias a 80°C.	103
Figura 55- Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 1 dia de cura a 80°C.	104
Figura 56- Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 3 dias de cura a 80°C.	105
Figura 57- Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 7 dias de cura a 80°C.	105
Figura 58 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 1 dia – 60°C.	107
Figura 59 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 3 dias – 60°C.	107
Figura 60 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 7 dias – 60°C.	108
Figura 61 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 1 dia a 60°C.	108
Figura 62 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 3 dias a 60°C.	109
Figura 63 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 7 dias a 60°C.	109
Figura 64 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 1 dias de cura a 60°C.	110
Figura 65- Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 3 dias de cura a 60°C.	111
Figura 67- Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 7 dias de cura a 60°C.	111
Figura 67 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 1 dia – 40°C.	113
Figura 68 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 3 dias – 40°C.	113
Figura 69 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 7 dias – 40°C.	114
Figura 70 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 1 dia a 40°C.	114
Figura 71 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 3 dias a 40°C.	115
Figura 72 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 7 dias a 40°C.	115
Figura 73 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 1 dia de cura a 40°C.	116
Figura 74 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 3 dias de cura a 40°C.	117
Figura 75 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 7 dias de cura a 40°C.	117
Figura 76 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 7 dias – 23°C.	119
Figura 77 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 14 dias – 23°C.	119
Figura 78 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 7 dias a 23°C.	120
Figura 79 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 14 dias a 23°C.	120
Figura 80 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 7 dias de cura a 23°C.	121
Figura 81 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 14 dias de cura a 23°C.	122
Figura 82 – Efeito do tempo de cura nas amostras curadas a 80°C com 1, 3 e 7 dias.	123

Figura 83 – Ajuste de curva e equação para variação do tempo de cura – 80°C.	124
Figura 84 – Efeito do tempo de cura nas amostras curadas a 60°C com 1, 3 e 7 dias.....	125
Figura 85 – Ajuste de curva e equação para variação do tempo de cura – 60°C.	126
Figura 86 – Efeito do tempo de cura nas amostras curadas a 40°C com 1, 3 e 7 dias.....	127
Figura 87 – Ajuste de reta e equação para variação do tempo de cura – 40°C.	128
Figura 88 – Efeito do tempo de cura nas amostras curadas a 23°C com 7 e 14 dias.....	129
Figura 89 – Ajuste de reta e equação para variação do tempo de cura – 23°C.	130
Figura 90 – Efeito da variação da temperatura para 1 dia de cura.	131
Figura 91 – Ajuste de reta e equação para variação de temperatura – 1 dia de cura.....	132
Figura 92– Efeito da variação da temperatura para 3 dias de cura.....	133
Figura 93 – Ajuste de reta e equação para variação de temperatura – 3 dias de cura.	134
Figura 94 – Efeito da variação da temperatura para 7 dias de cura.	135
Figura 95 – Ajuste de reta e equação para variação de temperatura – 7 dias de cura.	136
Figura 96 – Comportamento global da resistência frente à variação da temperatura.....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial de geração de cinzas em termelétricas brasileiras.	27
Tabela 2 – Fases e Ensaio do Programa Experimental.	55
Tabela 3 – Caracterização e procedimentos empregados para os materiais utilizados.	56
Tabela 4 – Propriedades físicas da amostra de cinza volante.....	59
Tabela 5 – Análise química da cinza volante gerada na Celulose Riograndense.....	60
Tabela 6 – Propriedades da cal de carbureto.	61
Tabela 7 – Parâmetros e variáveis estabelecidas.	62
Tabela 8 – Pontos de moldagem.....	65
Tabela 9 – Tabela de resultados do ensaio de sucção.....	72
Tabela 10- Resistência à compressão simples (RCS) média e ganho de resistência para variação de cal para cura a 80°C.	77
Tabela 11 – Resistência à compressão simples média e ganho de resistência para variação de cal para cura a 60°C.....	82
Tabela 12 – Resistência à compressão simples média e ganho de resistência para variação de cal para cura a 40°C.....	84
Tabela 13 – Resistência à compressão simples média e ganho de resistência para variação de cal em cura a 23°C.....	87
Tabela 14 – Tabela ANOVA para as variáveis independentes estudadas.	138
Tabela 15- Tabela de médias.	140
Tabela 16 – Comparação de média para o fator Cal (A).	141
Tabela 17 – Comparação de média para o fator Massa Específica (B).	143
Tabela 18 – Comparação de média para o fator Tempo de cura (C).	145
Tabela 19 – Comparação de média para o fator Temperatura (D).	146
Tabela A 1- Dados gerais corpos-de-prova curados por 3 dias - 23°C.	161
Tabela A 2 - Dados gerais corpos-de-prova curados por 7 dias - 23°C.	161
Tabela A 3- Dados gerais corpos-de-prova curados por 14 dias - 23°C	162
Tabela A 4- Dados gerais corpos-de-prova curados por 1 dia - 40°C.....	163
Tabela A 5- Dados gerais corpos-de-prova curados por 3 dias - 40°C	164
Tabela A 6- Dados gerais corpos-de-prova curados por 7 dias - 40°C.	164
Tabela A 7- Dados gerais corpos-de-prova curados por 1 dia - 60°C.....	165
Tabela A 8- Dados gerais corpos-de-prova curados por 3 dias - 60°C.	166
Tabela A 9- Dados gerais corpos-de-prova curados por 7 dias - 60°C.	167
Tabela A 10- Dados gerais corpos-de-prova curados por 1 dia - 80°C.....	168
Tabela A 11- Dados gerais corpos-de-prova curados por 3 dias - 80°C.	168
Tabela A 12- Dados gerais corpos-de-prova curados por 7 dias - 80°C.	169

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANOVA: Analysis of Variance

ASTM: American Society for Testing and Materials

L: teor de cal calculado em relação à massa cinza volante seca e expresso em porcentagem

L_v : teor volumétrico de cal, expresso em porcentagem do volume total

LACER: Laboratório de Materiais Cerâmicos

CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia - RS

C_u : coeficiente de uniformidade

D_{10} : diâmetro efetivo

e: índice de vazios

ENVIRONGEO: Laboratório de Resíduos, Novos Materiais e Geotecnia Ambiental

GLD: Graus de Liberdade

LEGG: Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

LL: limite de liquidez

LP: limite de plasticidade

MQ: Média Quadrada

NBR: Norma Brasileira

q_u : resistência à compressão simples

S_i : grau de saturação de moldagem.

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

SQ: Soma Quadrada

TRB: Transportation Research Board

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USACE: United States Army Corps of Engineers

USBR: United States Bureau of Reclamation

w : teor de umidade do papel filtro

γ_d : peso específico aparente seco

γ : massa específica aparente seca

η : porosidade

ω : teor de umidade

ω_f : teor de umidade após a imersão do corpo-de-prova por 24 horas.

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A questão ambiental vem se tornando tema recorrente nos foros nacionais e internacionais, estando atualmente mais inserida na opinião pública, nas comunidades e sendo norteadora na geração de novos produtos e serviços na área industrial e comercial. Este processo de afirmação das premissas ambientais junto ao cotidiano da sociedade está intimamente relacionado com a questão de sustentabilidade ambiental, palavra que tem como origem o processo de preservação dos recursos naturais que possibilite suprir as necessidades atuais sem comprometer as gerações futuras (WCED, 1987).

Neste sentido, a indústria da construção é um dos principais causadores de impacto ambiental, pois consome consideráveis quantidades de recursos naturais e gera grandes quantidades de resíduos. Portanto, o desenvolvimento e utilização de novas técnicas e materiais que tenham a preocupação com a questão ambiental podem contribuir para um desenvolvimento mais sustentável nos processos construtivos (Pacheco-Torgal and Jalali, 2012). Sendo assim, o reaproveitamento de resíduos tornou-se uma alternativa eficaz para o desenvolvimento da sustentabilidade na indústria da construção. Isto possibilita a diminuição da utilização dos recursos naturais. Além disso, também contribui para que o resíduo utilizado não seja disposto em pontos de estocagem permanentes, aumentando a vida útil de aterros, ou em locais irregulares, evitando contaminações no ambiente.

Buscando avançar nesta discussão, a presente pesquisa procurou inserir dois resíduos gerados na região metropolitana de Porto Alegre como possibilidade de solução de Engenharia através de um estudo do seu comportamento mecânico. Dentre eles, o resíduo gerado na produção de energia elétrica, através da queima do carvão mineral, que pode ocorrer em grandes centrais termoelétricas ou em até pequenas unidades industriais. Este processo produtivo proporciona a geração de grandes quantidades de cinzas, dentre elas está a cinza volante (cinza leve) com

magnitude de geração na casa de milhões toneladas/ano no Brasil. Em uma visão mais sustentável Rohde et al. (2006) consideram este resíduo como substituto de recurso natural e amplamente produzido no Estado do Rio Grande do Sul. Entretanto, seu aproveitamento está restrito na fabricação do cimento pozolânico, onde aproximadamente 25 a 30% da cinza volante gerada são utilizadas (Chies, 2003).

Portanto, a procura por novas aplicações deste material, abundante e disponível, se faz necessária na busca da preservação dos recursos naturais. Além do mais, a cinza volante requer cuidados ambientais, pois possui potencial poluidor devido à presença de elementos-traços, como por exemplo, zinco, cobre, cromo, chumbo, mercúrio e fósforo sendo classificada como resíduo não inerte (Mallmann, 1996). Conseqüentemente, a sua destinação final deve ser ambientalmente correta para que os elementos-traços não sejam disponibilizados para o meio ambiente, assim evitando a contaminação do mesmo. Deste modo, um caminho mais sustentável para cinza volante é o seu aproveitamento como matéria-prima (recurso) para outros fins, assim possibilitando a sua reutilização e evitando a geração de passivos ambientais.

Outro resíduo gerado no Estado do Rio Grande do Sul (RS) é o da produção do gás acetileno, que é obtido através da reação química entre o carbureto de cálcio e a água para a obtenção do gás, o subproduto (resíduo) gerado nesta reação é o hidróxido de cálcio, também conhecido como cal de carbureto. Este resíduo (produzido mundialmente) possui potencial poluidor devido a sua alta alcalinidade, desta maneira o mesmo é destinado para aterros industriais ou comercializado. Entretanto, possui grande potencial de reação com a cinza volante sendo considerado como um agente imprescindível para reações de cimentação com a cinza (Thome, 1999).

Resíduos hoje, materiais semelhantes foram utilizados pela humanidade desde as antigas civilizações como ligantes dos materiais de construção. Foram os romanos, na construção da via Ápia e dos primeiros aquedutos em 312 a.C., que misturaram cal com cinzas vulcânicas obtendo uma argamassa hidráulica capaz de ligar as pedras utilizadas (Andrade, 1991). Atualmente, sabe-se que este processo ocorre devido à presença de sílica ativa na cinza que quando misturada com hidróxido de cálcio em presença de água, reagem quimicamente formando compostos cimentantes através de reações conhecidas como pozolânicas. Mais recentemente, a mistura ou adição destes materiais vem sendo utilizadas e estudadas na área de Geotecnia Ambiental, onde Horpibulsuk et al. (2012) utilizaram cal de carbureto e cinza

volante na estabilização de solo na Tailândia, proporcionando uma melhor capacidade de carga do solo. Na produção de tijolos/blocos para habitações, em que é possível obter bom desempenho mecânico de materiais formados pela compactação da mistura entre cinza e cal (Andrade, 1991). Assim como para solidificação e estabilização de contaminantes produzidos em processo produtivos, proporcionando a inertização de elementos nocivos a saúde e ao meio ambiente (como Pb, Cu e Fe) que ficam presos à matriz cimentícia gerada pelas reações pozolânicas (Manjunath, 2013).

Apesar das diversas aplicações destes resíduos, não existem equações que definam uma formulação de dosagem que possa prever o comportamento mecânico da resistência à compressão simples da mistura de cinza volante e cal de carbureto compactada. A dosagem e compreensão do comportamento mecânico são necessárias, pois as reações pozolânicas são extremamente afetadas por diversos fatores, como: tempo de cura, temperatura, porosidade e quantidade de cal (Nardi, 1979; Mateos, 1961; Consoli et al. 2001, 2007)

Neste sentido, trabalhos desenvolvidos pelo PPGEC-UFRGS, nas dependências do Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG), estabeleceram relações entre a porosidade e teor volumétrico de agente cimentante na estimativa da resistência a compressão simples de materiais cimentados. Para isso, é indispensável à verificação da influência de variáveis determinantes, como: tempo de cura, temperatura de cura, porosidade e teor de cal no controle da resistência mecânica da mistura compactada proposta.

A análise das variáveis e a suas relações possibilita a determinação do fator porosidade/teor volumétrico de agente cimentante, com um expoente de ajuste no teor volumétrico, na estimativa da resistência à compressão para um solo estabilizado com cimento (Foppa, 2005). Este fator também pode ser utilizado para dosagens, onde é possível escolher a quantidade de agente cimentante e o esforço de compactação para fornecer uma mistura que resulte na resistência à compressão simples desejada (Consoli et al., 2007). Alguns estudos o utilizaram para determinar o comportamento de solos estabilizados com cal e adição de resíduos (cinza volante e pó de britagem), onde foi possível quantificar a influência destes na resistência para longos períodos de cura (Lopes Junior, 2007; Dalla Rosa, 2009). Outro utilizou para avaliar e quantificar a influência da temperatura na resistência (Silvani, 2012). Entretanto, algumas questões ainda perduram, entre elas a influência da temperatura e a utilização de diferentes materiais para curtos períodos de cura na resistência, que exigirão ajuste na relação

porosidade/teor volumétrico de cal para formular equações na determinação do comportamento e previsão da resistência à compressão simples.

Deste modo, a presente pesquisa visa preencher a lacuna na questão do equacionamento do comportamento da resistência à compressão de uma mistura entre cinza volante e cal de carbureto e possibilitar um melhor entendimento da influência da temperatura e tempo de cura na previsão da resistência mecânica. Para isto, é imprescindível o estudo dos fatores que governam a resistência desta mistura para determinar o comportamento deste novo material, ampliando o conhecimento do mesmo e, assim, proporcionando a sua aplicabilidade. Dentro de uma visão Geotécnica Ambiental, a estabilização da cinza volante pode ser uma alternativa de projeto mais sustentável com aplicação na construção de base para pavimentos, na proteção de taludes e como camada de suporte para fundações superficiais (Foppa, 2005). A priori nada impede que os resultados obtidos na presente pesquisa sejam utilizados como base de estudo para a utilização desta mistura para outros fins.

Assim, a presente pesquisa busca fornecer subsídios para que, através das relações porosidade/teor volumétrico de cal, obtidas a partir da identificação e quantificação das variáveis mais importantes no controle da resistência da mistura de dois resíduos, possa determinar uma dosagem para previsão do comportamento mecânico à compressão do material cimentado. Sendo o foco verificar a influência da cura acelerada, que consiste no aumento da temperatura para curtos períodos de cura.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o comportamento da resistência à compressão simples da mistura compactada de cinza volante e cal de carbureto para curas aceleradas.

Têm-se como objetivos específicos estabelecidos nesta pesquisa:

- Quantificar a influência isolada de cada uma das variáveis (quantidade de cal, quantidade de cinza volante, porosidade, tempo de cura, temperatura de cura) na resistência à compressão simples.
- Avaliar se as variáveis estudadas e suas interações são determinantes no incremento de resistência, assim como, qual das variáveis estudadas possui maior influência na resistência a compressão simples.

- Avaliar a adequação do parâmetro porosidade/teor volumétrico de agente cimentante na estimativa da resistência a compressão simples para as misturas estudadas.
- Formular equações que definem resistência à compressão simples das misturas, incorporando temperatura e tempo de cura como variáveis.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

No capítulo 1 é feita 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 materiais cimentados.

O capítulo 3 apresenta o método de pesquisa utilizado no desenvolvimento do estudo, onde serão relatadas as variáveis de interesse, o programa experimental, os métodos e materiais utilizados.

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

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

São apresentadas, por fim, as referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É apresentada, neste capítulo, uma revisão da literatura sobre a geração do resíduo (cinza volante), seu aspecto ambiental e seu potencial de aplicação. Uma revisão sobre os mecanismos da reação pozolânica gerada pela adição de cal na cinza volante, proporcionando a estabilização da mesma. Por fim, a identificação das variáveis determinantes do comportamento da resistência à compressão simples da mistura compactada de cinza e cal.

A estreita relação entre crescimento populacional e meio ambiente está cada vez mais presente na sociedade, com um crescimento exponencial evidenciado desde a década de 50 juntamente com a industrialização a sociedade como um todo, crescentemente, necessita extrair recursos naturais para sustentar a sua existência. Não bastasse esta grande demanda de recursos para manter 7 bilhões de habitantes no planeta (UNFPA, 2011), ainda é necessário o gerenciamento dos resíduos gerados pela sociedade e processos produtivos que muitas vezes são negligenciados, assim causando impactos ambientais irreversíveis. Um dos grandes acontecimentos referentes à incorreta disposição final de resíduos é o caso do Canal Love (Love Canal), ocorrido em 1978 próximo às cataratas do Niagara nos EUA, onde uma indústria química descartou, em um antigo canal, grandes quantidades de produtos químicos altamente tóxicos, que obrigou mais tarde a evacuação dos bairros construídos em cima do solo contaminado (Brown, 1981). Este caso é considerado pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) norte americana como uma das tragédias ambientais mais impactantes na história americana (EPA Journal, 1979) e tornou-se marco na questão de destinação de resíduos no mundo.

2.1 A CINZA DE CARVÃO MINERAL E O MEIO AMBIENTE

2.1.1 Resíduos produzidos pela queima do carvão

Dentre os resíduos gerados pela população mundial, a cinza resultante da combustão do carvão mineral para geração de energia elétrica e para processos produtivos torna-se

importante à medida que o carvão mineral vem sendo utilizado amplamente na matriz energética mundial. O mundo consumiu em 2010 perto de 6,5 bilhões de toneladas de carvão mineral, sendo 55% destinadas à geração elétrica. As reservas provadas de carvão mineral no mundo passam de 800 bilhões de toneladas (BEN, 2010). Silva et al. (1997) estimam que a demanda mundial de carvão, até o ano de 2020, será crescente e provavelmente duplicará.

A queima de carvão mineral nas usinas termelétricas produz resíduos classificados como (Rohde et al, 2006):

- Cinza leve (cinza volante – *fly-ash*) – constituída por partículas extremamente finas (100% com dimensões inferiores a 0,15 mm), transportada pelo fluxo dos gases da combustão, coletadas nos ciclones mecânicos ou precipitadores elétricos.
- Cinza pesada (*bottom-ash*) – é mais pesada e de granulometria mais grossa que a cinza leve, caindo no fundo da fornalha e gaseificadores, sendo frequentemente retirada por um fluxo de água; e
- Escória (cinza grossa) – é a cinza originada na queima ou gaseificação do carvão granulado em grelhas móveis. Retirado pelo fundo da fornalha após ser resfriada com água.

No Brasil para a geração elétrica é utilizado o carvão vapor, de origem nacional, cujos estados produtores são Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O uso do carvão para geração de eletricidade em 2010 cresceu 28,3% em relação ao ano anterior (BEN, 2010). Portanto, a intensificação do uso do carvão como matéria-prima energética tende a aumentar o problema de gestão destes resíduos gerados no Brasil.

No Rio Grande do Sul a questão dos resíduos gerados na queima do carvão se faz muito presente, pois possui 89% das reservas de carvão mineral do Brasil utilizados por termoelétricas e pequenas unidades industriais na geração de energia e processos produtivos (CME, 2005). A Associação Brasileira do Carvão Mineral calcula que as reservas conhecidas poderiam gerar hoje 17 mil megawatts (ANEL, 2008) confirmando a potencialidade das termoelétricas na diversificação da matriz energética. Dentro desta perspectiva é possível projetar a manutenção da utilização do carvão na produção de energia e a sua ampliação conforme a crescente demanda brasileira.

Conforme o Plano Nacional de Energia Elétrica 2030, a participação do carvão mineral na geração de energia elétrica irá aumentar de 1,6% para 2,7% (MME, 2007). Neste sentido

paralelamente terá o aumento na geração dos resíduos desta atividade, mais especificamente da cinza, que será pauta permanente quanto ao seu destino ambientalmente correto.

Dentre as questões de geração de cinza e o seu gerenciamento é necessário uma visualização quanto a quantidades referente à produção deste resíduo. De forma geral podemos aproximar a geração de cinza na queima do carvão do Sul do Brasil conforme esquema ilustrativo abaixo (CGTEE, 2013):

- 1kg de carvão = 500 gramas de cinza + 1 kWh de energia.
- 500 g de cinza = 400 g equivalem a cinza leve (cinza volante) e 100g a cinza pesada.

Portanto, para se manter acesa uma lâmpada de 100 W por 10 horas serão gerados 500 gramas de cinzas na termoelétrica.

No Brasil são encontradas sete usinas termoelétricas em operação que forneceram 1.905 MW de potência instalada em 2008, onde se estima a geração de 3 a 4 milhões de toneladas ao ano de cinzas, sendo a produção de cinza volante entre 65 a 85% e entre 15 a 35% para as cinzas pesadas (Levandowski e Kalkreuth, 2009). Conforme Tabela 1 é possível verificar-se a quantidade máxima de geração de cinzas nas diferentes usinas termoelétricas no Sul do país e algumas indústrias que utilizam a queima do carvão no seu processo produtivo.

Tabela 1 – Potencial de geração de cinzas em termelétricas brasileiras.

Termelétricas	Resíduos (tonelada/ano)		
	Cinza volante	Cinza pesada	Escórias
Presidente Médici – A/B/C	2.500.000	625.000	-
São Jerônimo	5.000	-	50.000
Charqueadas	295.058	126.453	
Jorge Lacerda – I/II/III/IV	1.500.000	500.000	
Total	4.300.058	1.251.453	50.000
Indústria Geradora	Resíduos (tonelada/ano)		
	Cinza volante	Cinza pesada	Escória
Copesul – Companhia Petroquímica do Sul, Triunfo RS	144.000	54.000	-
Aracruz Celulose, Guaíba – RS	50.400	14.400	-

Adaptado de Rohde, 2006

O carvão na Região Sul é sub-betuminoso com poder calorífico variando entre 4200 a 2600 kcal/kg e teor de cinzas variando de 42 a 59% (CGTEE, 2013). Portanto, o carvão brasileiro possui moderado poder calorífico com elevada geração de cinzas.

2.1.2 Características da cinza e o meio ambiente

As características físicas e químicas das cinzas de carvão variam conforme as características do mineral que as originou, como o tipo de carvão, projeto e operação de caldeira, grau de beneficiamento e moagem do carvão, sistema de extração e manuseio (Adriano et al., 1980). Devido às diversas variáveis que podem influenciar nos aspectos físicos e químicos da cinza, dificilmente teremos características iguais para cinzas produzidas em diferentes plantas de queima e até mesmo para cinzas de um mesmo local, elas estarão inseridas em faixas que possam melhor caracteriza-las.

As cinzas geradas no Brasil, assim como qualquer resíduo, devem ser investigadas quanto a sua capacidade de impacto ambiental. Neste sentido a NBR 10004 (ABNT, 2004) tem como objetivo classificar os resíduos para que possam ser destinados a locais (aterros sanitários, industriais, autoclavagem) corretos, assim evitando danos ambientais. Os ensaios para determinar a sua classificação são os de lixiviação e solubilização propostos pela NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004), respectivamente.

Um importante indicativo da capacidade de impacto ambiental dos resíduos é a sua composição química elementar, assim é possível verificar elementos que possam indicar potencial contaminante, por exemplo, metais pesados que possam estar presentes no resíduo analisado. De maneira geral, 26 elementos no carvão e nas cinzas são considerados de interesse ambiental, dos quais Arsênio (As), Cádmiio (Cd), Cromo (Cr), Mercúrio (Hg), Chumbo (Pb) e Selênio (Se) ocasionam os maiores impactos no meio ambiente (Swaine, 2000). Por exemplo, o Alumínio (Al) possui moderada toxicidade para a maioria das plantas e pequena toxicidade para mamíferos estando associada com a doença de Alzheimer e outras patologias neurológicas, assim como o Chumbo (Pb) que é extremamente tóxico para plantas e acumulativo para os mamíferos (Huheey et al., 1993)

Os elementos que se apresentam em maior quantidade na cinza, denominados de “componentes maiores” são: sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e carbono (C). Entretanto, existem outros elementos denominados de “elementos-traço”, por exemplo, zinco, cobre, cromo, chumbo, mercúrio, fósforo etc., que são responsáveis pelo potencial tóxico da cinza. (Mallmann, 1996).

Contudo, a presença de elementos-traço na cinza não é determinante na decisão da sua periculosidade, pois é necessária a realização de ensaios que possam determinar quais

elementos são liberados nos processos de lixiviação e solubilização. Neste sentido, as cinzas brasileiras, em sua maioria, são classificadas como não perigosos e não inertes (Classe II – A) conforme NBR 10004, devendo, assim, serem encaminhadas para aterros sanitários quando a alternativa de reciclagem tiver sido descartada (Rohde, 1995). Portanto, os constituintes das cinzas não são considerados tóxicos, porém a solubilização de determinados componentes (como: alumínio, arsênio, cromo) podem ser disponibilizados para o meio ambiente e acarretar impactos ambientais no solo e nas águas subterrâneas e superficiais.

Na questão da metodologia de determinação de lixiviados em cinzas, existem discussões referentes à melhor representatividade de resultados com a forma de lixiviação propostos por normas. Neste sentido os ensaios de lixiviação determinados pela norma brasileira (NBR 10005), assim como o ensaio de extração (EP test) recomendado pela EPA (Environmental Protection Agency – USA), utilizam soluções ácidas como líquido de extração na amostra pulverizada, potencializando a mobilidade dos metais presentes na amostra. Devido a estes fatores, este ensaio fornece o indicativo da pior situação que pode encontrar em campo. Egemen & Yurteri (1996) realizaram estudo na comparação do potencial de lixiviação de metais pesados de cinzas leves da Turquia para diversos métodos de ensaios de lixiviação, entre eles: EP, TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) e ensaio padronizado pela ASTM que não utiliza solução ácida na extração, sendo usado apenas água destilada. Analisaram que o ensaio EP lixiviou maior quantidade de metais, e que o pH do meio é um fator predominante na mobilidade dos metais na amostra. Os metais lixiviados conforme ASTM, com pH natural, foram muito inferiores em relação aos métodos que utilizaram o meio acidificado, assim os autores concluíram que os ensaios EPA e TCLP superestimam as quantidades de metais lixiviados e que o método que utiliza pH neutro representa melhor as condições observadas em campo.

A seleção de um método de lixiviação não é uma tarefa simples ou trivial. O comitê da ASTM-50.03, atualmente, vem desenvolvendo um guia ou procedimento padrão para identificar os melhores ensaios de lixiviação disponíveis para materiais específicos. (Kim, 2002)

Apesar do conhecimento dos possíveis impactos causados pelo incorreto descarte de cinzas de termelétricas, historicamente, no sul do Brasil, ainda são dispostas nas cercanias das fontes geradoras (Rohde, 2006). Em o estudo realizado por Binotto (1997) na região de Charqueadas/São Jerônimo na detecção de contaminação de águas subterrâneas dos locais de

disposição de rejeito de carvão e cinzas, constatou que teores de solubilização/lixiviação dos elementos Níquel (Ni), Manganês (Mn) e Zinco (Zn) estavam correlacionados às cinzas. Confirmaram que, apesar do menor potencial poluidor em relação aos rejeitos de carvão, estes resíduos não se configuram como inertes, afetando, ainda que em menor proporção, as águas subterrâneas. Os elementos Fe e Al também foram detectados, mas estavam em acordo com o ponto branco (*background*) estabelecido na pesquisa.

Entretanto, quando a cinza está em estado cimentado, podendo ocorrer quando é adicionada ao cimento (cimento pozolânico – CP IV) ou mesmo com adição de cal diretamente na cinza, o processo de cimentação proporciona a fixação de elementos traços na matriz cimentícia. Ubbriaco & Calabrese (1998) avaliaram a estabilização de matrizes a partir de testes de lixiviação subsequente determinação das concentrações dos metais pesados Pb, Cd, Zn, Cu, Ni e Hg no lixiviado da mistura entre cimento Portland, pozolana natural italiana (*piroclasto de Vulture*) e cinza volante oriunda da incineração de resíduos sólidos. Os autores acreditam que uma baixa concentração de metais pesados na solução de extração torna possível estabelecer a eficiência da matriz cimentícia em fixar os poluentes.

A estabilização ou fixação dos metais pesados dentro de matrizes cimentícias é alcançada por meios físicos e químicos. No primeiro caso, procura-se uma matriz de baixa permeabilidade enquanto que no segundo, procura-se garantir uma alta alcalinidade na solução intersticial, que permite a transformação de metais pesados em compostos insolúveis, do ponto de vista ambiental, garantindo que uma vez isolados na matriz cimentícia, lá permaneçam, os mecanismos físicos e químicos ocorrem conjuntamente (Mesquita, 2008). No presente trabalho não serão feitas análises de lixiviação para a mistura proposta, mas existe a tendência de que os elementos traços da cinza volante sejam estabilizados no processo de cimentação.

2.1.3 A cinza como subproduto

Como já citado, o uso de carvão deverá intensificar-se na geração de energia elétrica no Brasil, portanto a questão de diminuição de geração de resíduos acaba sendo uma alternativa pouco viável na minimização do impacto ambiental. Para a redução de cinzas seria necessária uma política que privilegiasse o uso de recursos renováveis (sol, água e vento) na geração de energia elétrica o que possibilitaria a diminuição da necessidade da queima do carvão para suprir a demanda de energia crescente no Brasil e no mundo.

Para mitigar os impactos ambientais proporcionados pela produção de cinzas é necessário analisarmos o resíduo (cinzas) como subproduto/matéria-prima/recurso, assim proporcionando uma destinação mais nobre para o material gerado da queima do carvão, proporcionando benefícios ambientais e econômicos.

Em uma perspectiva estrita de geração de energia, as cinzas de carvão são consideradas resíduos, entretanto ao avaliar suas características e possibilidade de uso, estas podem ser consideradas como um recurso, ou seja, um subproduto da combustão a ser amplamente utilizadas e exploradas (Wang e Wu, 2006)

Uma das maneiras de se reduzir os impactos ambientais decorrentes da disposição das cinzas de carvão no meio ambiente consiste na aplicação das potencialidades de sua utilização (Fungaro *et. al.*, 2005). Portanto, no capítulo seguinte veremos algumas potenciais aplicações deste resíduo.

2.2 EMPREGO DA CINZA E CAL

No período do império romano existia na ilha de Santorim solo vulcânico que possuía material pozolânico, o mesmo encontrado nas cinzas de carvão geradas nas recentes termelétricas. Na época, o ligante usado na construção de edificações era a cal (argamassa de cal), que teve o acréscimo de solo vulcânico tornando mais resistente à água. (Andrade, 1991) Em 312 a.C., quando os romanos iniciaram a construção da via Ápia e dos primeiros aquedutos, cinzas vulcânicas foram misturadas à cal viva para a obtenção de uma argamassa hidráulica que ligasse o material utilizado (Da Silva, 1982). A cinza vulcânica também foi aproveitada na construção de Calígula, do Coliseu e do Panteão, neste último foi utilizada mistura de cal com duas a três partes de cinza vulcânica. A reação entre a mistura de cinza e cal em ambiente hidratado é conhecida como pozolânica. Neste sentido, podemos constatar que a exploração das propriedades das cinzas já era aplicada na antiguidade, principalmente com o uso da cal.

Mais recentemente, final do século XIX e início de século XX, devido ao aumento de geração de cinzas com a proliferação de termelétricas, iniciaram-se estudos para a combinação do cimento Portland com cinzas que acabaram formando o cimento Portland pozolânico com ampla aceitação e utilização no mercado mundial. (Da Silva, 1982)

A utilização de cinzas pelo mundo varia de um mínimo de 3% a um máximo de 57%, sendo que em média 16% das cinzas geradas são usadas como subproduto (Joshi *et al.*, 1997). No Rio Grande do Sul, apenas 25-30% das cinzas produzidas são comercializadas (Chies et al, 2003). Neste sentido, a utilização das cinzas como subproduto deve ser intensificada para que um maior volume deste material possa ser utilizado como matéria prima em técnicas e produtos desenvolvidos, evitando que este resíduo seja disposto em aterros a um custo significativo para a empresa que o produz e em locais inadequados que possam causar danos ambientais.

Desta forma algumas propriedades das cinzas quando combinadas com cal tornam este resíduo em um importante recurso mineral produzido no Rio Grande do Sul, tendo em vista que: (Rohde et al., 2006)

- As cinzas, principalmente a cinza volante, possuem propriedades físico-químicas e mineralógicas pouco encontradas em outros materiais, caracterizadas por uma alta capacidade de reação com aglomerantes do tipo cal;
- As cinzas, na área da construção civil, quando empregadas na forma estabilizada com cal podem ser empregadas na pavimentação, estabilização de maciços, estabilização de solos, produção de peças rígidas como: tijolos, blocos e placas que possibilitam a imobilizar dos elementos tóxicos contidos nas cinzas;
- As cinzas estão disponíveis logo após a sua formação, não necessitando de beneficiamentos para o seu uso, apenas em alguns casos é necessária a secagem quando há presença de excesso de umidade;
- A cinza é um dos recursos minerais mais produzidos no Rio Grande do Sul.

Diversos estudos comprovaram os efeitos da adição de cal e cinza volante nas propriedades de um solo residual, concluindo que é possível a utilização desta técnica em bases de pavimento (Ceratti 1979; Silva, 1981; Pinto et al, 1983; Dias, 1995). Ceratti (1979) *apud* Thomé (1994) em estudo com solo residual com adição de cal e cinza volante na verificação dos efeitos causados desta mistura, concluiu que é possível a utilização deste tipo composição em bases de pavimentos, onde foram encontrados valores superiores de compressão simples em relação aos recomendados pela norma, tornando viável utilização de refugo industrial produzido em grandes termoelétricas para fins de pavimentação. No projeto CICASOL (Zwonok & Chies, 1989) comprovou-se através de pistas experimentais a viabilidade de pavimentos com base pozolânica através de solos estabilizados com cinza volante e cal.

Carraro (1997) estudou a utilização de dois resíduos na estabilização de um solo: cinza volante proveniente da termelétrica de Candiota e o resíduo de cal de carbureto proveniente da produção do gás acetileno. Estes materiais tiveram capacidade de estabilizar o solo residual arenito de botucatu para sua utilização em fundações superficiais. Thome (1999) também utilizou os resíduos industriais de cinza pesada e cal de carbureto na estabilização de um solo, analisando a reatividade da cinza pesada com a cal de carbureto, a influência da temperatura e do tempo de cura no desenvolvimento das reações pozolânicas. Ainda verificou a influência de diferentes teores de resíduos na resistência à compressão simples, compressão diametral e durabilidade e o impacto ambiental da mistura através de ensaios de lixiviação e solubilização, concluindo que é possível a utilização destes resíduos para a estabilização de solos.

A utilização de cinza e cal na estabilização de solos possui vasto estudo e aplicação, entretanto outros estudos foram realizados para a utilização destes materiais em outras áreas da Engenharia Civil.

Baradan (1987) realizou ensaios com cinza volante misturada com diferentes teores de cimento Portland, cal virgem e cinza de fundo para formar novos materiais como tijolos ou painéis de construção. A cura foi realizada a 60°C e 100% de umidade relativa do ar por três horas, os resultados dos ensaios de resistência à compressão e flexão foram satisfatórios, mas os de absorção foram elevados.

Andrade (1991) investigou o comportamento geral de tijolos feitos de uma mistura de cinza volante proveniente da termoelétrica de Charqueadas e cal hidratada dolomítica quanto à resistência a compressão simples, durabilidade e absorção. Os ensaios de RCS (resistência à compressão simples) dos tijolos foram superiores às exigências das normas brasileiras. Os ensaios de absorção tiveram valores muito elevados em relação ao limite máximo estabelecido em norma, entretanto o seu uso em paredes internas não apresentaria nenhuma inconveniência; com exceção dos teores de cal 5% e 10 % para período de cura de 7 dias os tijolos de cinza e cal foram aprovados nos testes de durabilidade. Portanto, concluiu-se que os tijolos são viáveis na utilização na construção de alvenarias, sendo os maiores problemas observados na questão de absorção.

CINCAL (1993) foi o nome do projeto desenvolvido pela CIENTEC na fabricação de tijolos e blocos para habitações com cinza e cal, que possui como principais características:

- flexibilidade do material: possibilita conformação nas mais diversas formas e dimensões;
- precisão dimensional: as peças moldadas mantêm-se praticamente invariáveis desde a moldagem até após a cura;
- conforto ambiental: é um bom isolante térmico;
- facilidade de manuseio e transporte: apresenta massa específica mais baixa do que outros produtos similares.

Portanto, na história antiga, assim como na história recente diversas são as possibilidades de uso para as cinzas de termoelétricas com cal, que viabilizam a diminuição da disposição destes resíduos na natureza e ao mesmo tempo possibilitam a sua utilização como matéria prima na geração de um novo produto, assim como para técnicas de melhoramento de solos.

2.3 MATERIAIS ESTABILIZADOS POZOLANICAMENTE

O conhecimento sobre as reações pozolânicas possibilita um melhor entendimento sobre a cimentação entre cal de carbureto e cinza volante que proporcionam o surgimento de resistência mecânica na mistura. Os materiais pozolânicos podem ser divididos em naturais e artificiais (NBR 12653/1992; Montanheiro et al, 2002). Pozolanas naturais são aquelas cuja origem é vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO₂) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica. Já as pozolanas artificiais são materiais resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico com atividade pozolânica, e podem ser divididas em argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais.

As cinzas volantes são constituídas, basicamente, de duas frações: fração vítrea (amorfa) de natureza silicosa ou sílico-aluminosa; e da fração cristalina representada por cristais de quartzo, mulita e hematita. O teor de fase vítrea bem como outros fatores intervenientes na cinética de reação da cinza volante ainda são pouco explorados.

A reação pozolânica caracteriza-se pela interação da fase amorfa do material pozolânico com o hidróxido de cálcio que na presença de umidade reagem quimicamente formando compostos com propriedades cimentantes. Podendo ser resumida da seguinte forma (MASSAZZA, 1998)

Pozolana + Hidróxido de cálcio + água => Compostos hidratados

Portanto, a cinza volante e o hidróxido de cálcio quando misturados com água, resultam na rápida dissipação do hidróxido de cálcio provendo íons cálcio e hidroxila para a solução (Equação 1 e 2)



Os íons cálcio, positivos, são rapidamente adsorvidos pela superfície das partículas da cinza volante (Massazza, 1998). Este processo proporciona a floculação da cinza volante alterando a sua granulometria.

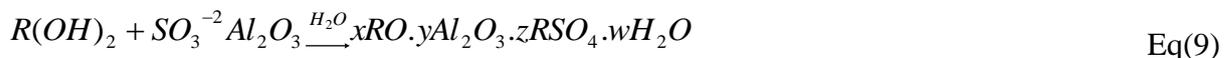
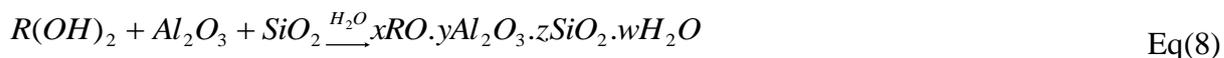
Na sequência, as hidroxilas atacam a matriz vítrea, composta por Al_2O_3 e SiO_2 , rompendo as ligações O-Al e O-Si, proporcionando uma concentração elevada de íons SiO_3^{-2} e AlO_2^- em solução (Berry *et al.*, 1994; Fu *et al.*, 2002; Malek *et al.*, 2005). A dissolução dos principais compostos vítreos da cinza volante, em pH maior que 12, ocorre da seguinte forma (Brouwers, Van Eijk, 2003), apresentadas nas equações 3, 4 e 5:



Após a dissolução iniciam-se as reações da cal com a sílica e alumina formando géis de silicato (C-S-H) que são ainda ligantes fracos, após serão cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos (Inglês e Metcalf, 1972). Os íons alumínio na solução irão formar aluminato de cálcio hidratado (C4AH13) que, posteriormente, irá converter-se em hidrogranada (C3AH6) e katoita (C3ASH4) (Malek *et al.*, 2005). Onde: C=CaO; S=SiO₂; A=Al₂O₃ e H=H₂O.

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 (Equações 6, 7, 8 e 9) :





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

Neste mesmo estudo, 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) No estudo realizado por Roy & Johnson apud Mallmann (1996), enumera outros 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 gyrolita, xonotlita, wallastonita e hidrogranada, que são minerais encontrados na natureza e conferem ligantes fortes no processo de cimentação.

Além das reações 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.

Para que estas reações ocorram deve haver a dissolução da sílica, alumina e ferro vítreos na interface com a solução, sendo esta solubilização dependente da alcalinidade da água da mistura (Brouwers, Van Eijk, 2003). A fase vítrea da cinza volante é relativamente estável sob a ação de hidróxido de cálcio e a velocidade de solubilização da sua estrutura amorfa neste sistema é bastante lenta devido a solução saturada possuir pH igual a 12,6 a 25°C (Antihos & Tsimas, 2005; Fu *et al.*, 2002; Glasser, 2003), pois para uma expressiva solubilização é necessário um pH mínimo de 13,3 (Fraay *et al.*, 1989). Em estudo realizado por Alexander *et al.* (1954 apud Mallmann, 1996) sobre a solubilidade da sílica amorfa, verificaram que a mesma ocorre a valores de pH maiores que 11. Não só a sílica, mas também a alumina, tem sua solubilidade aumentada em valores altos de pH (TRB, 1987)

Mateos (1961 *apud* Mallmann, 1996), 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.

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 forma o carbonato de cálcio (TRB, 1987). Estes carbonatos são cimentos fracos e inviabilizam as reações pozolânicas, portanto não é desejável a sua ocorrência (Harty & Thompson, 1973). No caso da cal de carbureto, a carbonatação é uma questão importante, pois o material tende a ficar estocado ao ar livre na empresa geradora deste resíduo propiciando a diminuição da capacidade deste material em reagir com a cinza volante.

2.3.1 Fatores que influenciam as reações pozolânicas

Múltiplos são os fatores que influenciam o desenvolvimento das reações de natureza pozolânica entre as misturas contendo cal e cinza volante. Esquemáticamente, estes fatores podem ser subdivididos 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 se podem destacar, em relação à mistura: o modo de execução, o tempo decorrido até a compactação, a energia de compactação, tempo de cura e temperatura de cura (Cru *et al*, 1955 *apud* Dalla Rosa, 2009; Foppa, 2005; Lopes Junior, 2007).

Portanto, a questão das características do material utilizado merece atenção especial, pois representam a capacidade básica do desenvolvimento das reações. Sendo assim, 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). Para a cinza volante existem 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).

Em estudo realizado por Kihara (1983 *apud* Andrade, 1991) verificou-se que em curto prazo a atividade pozolânica está relacionada fundamentalmente à superfície específica, em longo prazo a atividade recai sobre o conteúdo de sílica e alumina reativas presentes na cinza.

Portanto, cinzas com maiores teores de sílica/alumínio em estado reativo e com maior superfície específica dos grãos serão mais reativas. Mateos (1961 *apud* Mallmann, 1996) em seu experimento constatou que os tipos de cinzas com maior superfície específica obtiveram maiores resistências à compressão simples.

A superfície específica pode ser correlacionada com a granulometria do material, assim quanto menor a partícula maior será a sua superfície específica, proporcionando uma maior área de contato entre a cinza e a cal e potencializando as reações. Portanto, cinzas com menor granulometria tornam-se mais reativas e com maior capacidade de cimentação proporcionando maiores resistências.

Com relação ao tipo de cal utilizada, segundo Andrade (1991), a quantidade de óxidos de cálcio representa o grau de pureza da cal, indicando, conseqüentemente, um maior número de reações possíveis entre esta e a cinza volante. A mesma autora relata que a finura da cal representa uma característica importante para as reações, portanto cales com uma maior finura possibilitam, assim como para as cinzas, uma maior área de contato para as reações químicas.

2.4 VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS CINZA-CAL

Nos itens subseqüentes serão detalhados os efeitos de variáveis consideradas de grande valia na determinação e modificação da resistência da mistura cinza-cal e que tem relação com as variáveis de estudo escolhidas nesta pesquisa. Além de possibilitar uma visão do comportamento da resistência, a alteração destas variáveis também possibilita a criação de relações entre elas (porosidade/teor volumétrico de cal) que permitirá a geração de curva e equação de dosagem na estimativa da resistência à compressão simples.

2.4.1 Efeito da cal

As misturas de cinza volante e cal tornam-se resistentes a partir do desenvolvimento de reações entre os silicatos e aluminatos da cinza volante. Como a cinza volante entra em proporção muito maior na mistura existe carência do hidróxido de cálcio e qualquer aumento do mesmo provocará ocorrências de novas reações, conduzindo a maiores resistências (Andrade, 1991)

Estudo realizado por Dalla Rosa (2009) no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal para o solo tratado por diferentes proporções de cal dolomítica e cinza volante de

Charqueadas verificou que a resistência aumenta com o aumento da porcentagem de cinza volante adicionada, demonstrando que os produtos das reações entre a cinza volante e a cal são os principais responsáveis pelo aumento da resistência. Para uma mesma proporção de cinza volante com adição de cal (3 a 9%) foi observado ganhos lineares na resistência a compressão simples do solo tratado, assim quanto maior a porcentagem de cal adicionada à mistura maior será a resistência obtida.

Entretanto, o ganho proporcionado pela adição de cal possui um limite no incremento da resistência à compressão simples. Estudo desenvolvido por Horpibulsuk et al. (2012) verificaram na estabilização de um solo argiloso com cinza volante e cal de carbureto que existem zonas que determinam o comportamento de ganho de resistência através da adição de cal, definindo a existência de três zonas: zona ativa, zona inerte e zona de deterioração que explicam o comportamento de ganho de resistência (Figura 1). Quando adicionada a cinza volante à mistura foi verificado o incremento da resistência à compressão simples proporcionada pela maior disponibilidade de material pozolânico para as reações com a cal de carbureto.

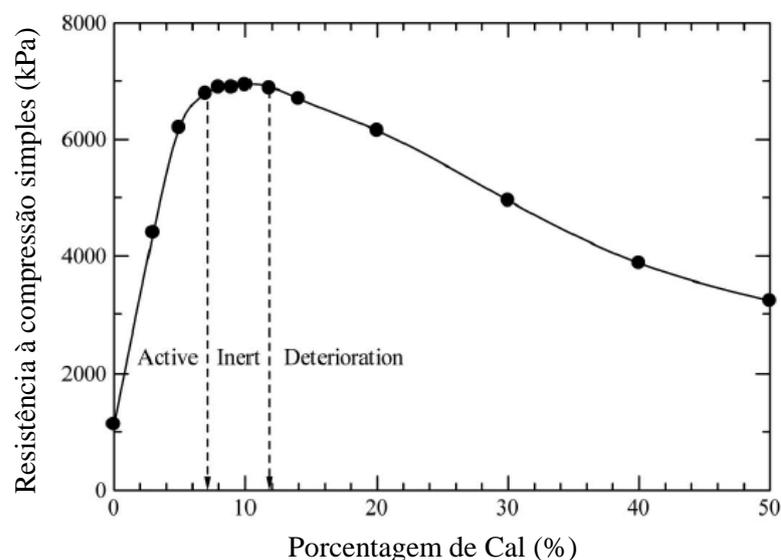


Figura 1 – Relação entre adição de cal de carbureto em solo argiloso e resistência a compressão simples para 28 dias de cura. Fonte: Horpibulsuk et al. (2012)

Com relação à cal de carbureto (utilizada nesta pesquisa), esta é obtida a partir da reação entre carbureto de cálcio (CaC_2) e água (H_2O), conforme a seguinte expressão (Thome, 1999)



Portanto, desta reação é possível a obtenção do gás acetileno (C_2H_2) que é utilizado para o alcance de altas temperaturas através da sua queima, sendo utilizado nos processos de solda, corte de metais e processos produtivos que necessitem de altas temperaturas.

Além da produção do gás acetileno existe a geração do resíduo de composição básica o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) na forma líquida que é levado para tanques de decantação e, após, para o redutor de umidade.

A cal de carbureto possui algumas peculiaridades que acabam restringindo o seu uso na construção civil, devido a sua coloração um pouco azulada e devido a sua granulometria mais grosseira. Entretanto, estas características não devem ser fatores que inviabilizem a sua utilização, pois o importante é a sua boa afinidade com silicatos e aluminatos para o desenvolvimento das reações pozolânicas. Outro importante aspecto da cal de carbureto é a sua maior pureza em comparação à cal dolomítica comercializada no RS. (Thome 1999).

2.4.2 Efeito da porosidade

Com efeito similar à quantidade de cal, a massa específica aparente seca da mistura afeta diretamente a sua resistência, portanto a energia de compactação possui correlação com a proximidade das partículas que em uma mistura com cinza e cal proporcionam uma maior capacidade de cimentação. Mallmann (1996) concluiu que os resultados da resistência à compressão simples mostraram que o aumento de energia de moldagem desenvolveu um significativo acréscimo na resistência juntamente com a variável tempo de cura através da análise de variância. Em média os acréscimos de resistência foram de 20 a 40% para os períodos de cura estudados.

Rushad et al (2011) que realizou estudos com blocos de solo-cinza-cal com diferentes proporções de mistura, observou que o aumento da força de compactação para misturas com apenas cinza volante e cal com proporções de 20, 30 e 40% de agente cimentante foram maiores conforme o aumento da compactação (10 kN, 30 kN e 50 kN), a resistência à compressão simples para os blocos com 40% de cal compactados na força de 10Kn tiveram resultados de 1MPa que passaram a ter uma resistência de 4 MPa quando moldados a 50 kN.

Assim como ocorre para misturas solo-cal, a adição de cal modifica o peso específico aparente máximo (γ_d) da mistura cinza-cal para uma mesma energia de compactação. À

medida que o teor de cal aumenta o γ_d continua diminuindo. Além disso, a umidade ótima aumenta com aumento do teor de cal (TRB, 1987).

Tratando-se da curva de compactação Mateos e Davidson (1963 *apud* Carraro, 1995) observaram que na estabilização de um solo arenoso com cinza volante e cal hidratada, não existe correlação direta entre o teor de umidade que assegura à confecção de amostras na máxima massa específica (umidade ótima de compactação) e o teor de umidade em que se observa os maiores valores de resistência a compressão simples. Porém, verificaram que o teor de umidade que leva a máximas resistências à compressão localiza-se no ramo seco da curva de compactação. Comportamento bastante similar pode ser observado para o solo residual, estabilizado com cinza volante e cal hidratada, estudado por Ceratti (1979).

2.4.3 Efeito do tempo de cura

Andrade (1991) realizou estudo de blocos de cinza-cal com sete diferentes proporções de cal (5,10, 15, 20, 25, 35 e 45% de cal), assim como diferentes períodos de cura (7, 14, 28 e 60 dias) verificando o crescimento da resistência com a idade, que ocorre acentuadamente nas primeiras idades fazendo-se de forma cada vez mais lenta com o passar do tempo e com a elevação do teor de cal (Figura 2). Em análise estatística, afirmou-se que o período de cura tem influência na resistência para todas as proporções de cal.

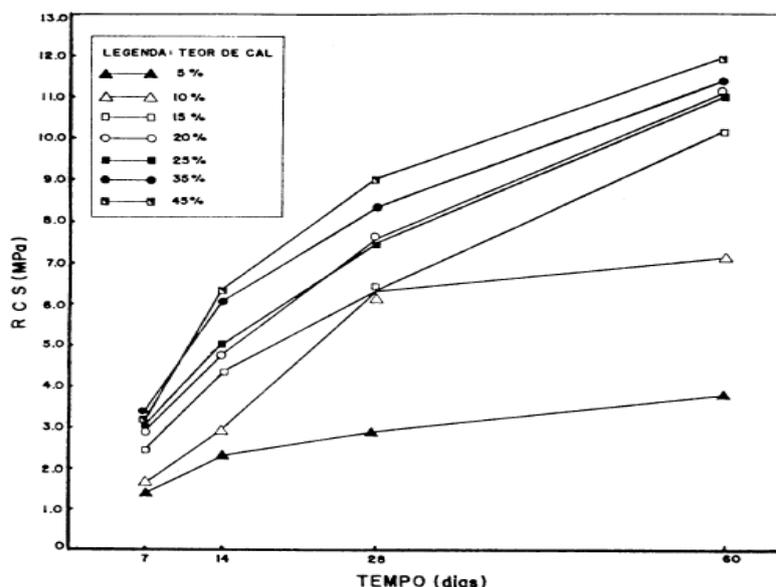


Figura 2 – Evolução da resistência com o aumento da porcentagem de cal e tempo de cura. Fonte: Andrade, 1991.

Thome (1999) realizou estudo de estabilização do solo residual arenito de Botucatu através da adição de cinza pesada de termoelétrica e cal de carbureto, ambos resíduos industriais e verificou que as RCS e RCD da mistura ótima crescem com o tempo de cura. O valor máximo de resistência foi obtido para a idade de cura de 129 dias (6 MPa), sendo que aos 28 dias foi obtido somente 28,4% do valor desta resistência. O pH da mistura reduz com o tempo de cura devido ao consumo de OH^- nas reações pozolânicas. No entanto, mesmo após 120 dias o valor do pH manteve-se alto o suficiente (aproximadamente 12) para que ocorra a solubilização da sílica.

O tempo de cura é variável importante para o desenvolvimento das reações pozolânicas, entretanto seu efeito sobre o ganho de resistência à compressão simples não será constante, fato este observado no trabalho de Dalla Rosa (2009) que utilizou cinza volante e cal na estabilização de um solo em longos períodos de cura (28, 60, 90, 180 e 360 dias). Através da Figura 3 é possível verificar que o comportamento da resistência é curvo e possui um acentuado crescimento para os períodos iniciais e uma diminuição dos ganhos que tendem a uma estabilização da resistência à compressão simples.

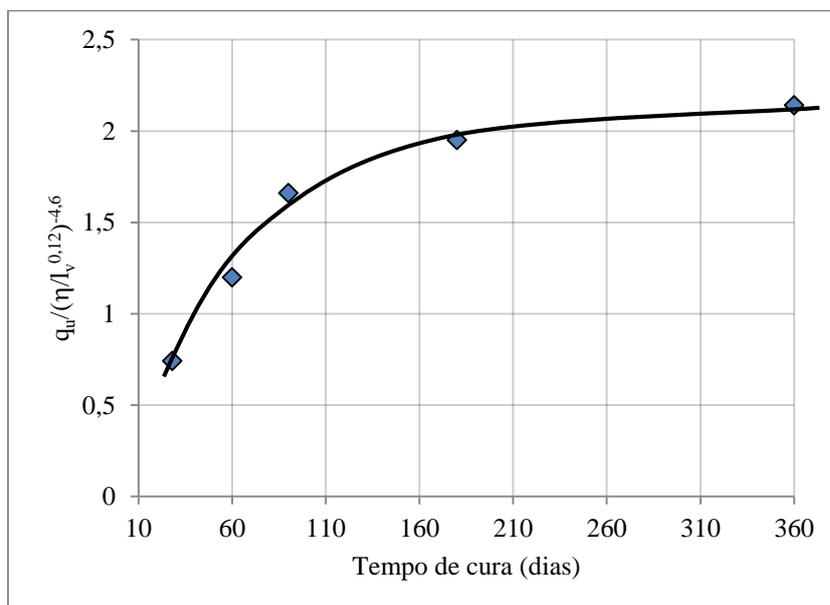


Figura 3 – Tendência de ganho de resistência frente à variação do período de cura. Fonte: adaptado de Dalla Rosa (2009).

2.4.4 Efeito da temperatura de cura

Marcialis *et al.* (1983) realizaram estudo com cinza e cal curada a vapor de baixa pressão para diferentes razões de cinzas volantes para cal, compactadas a pressão 50 e 150 MPa. Com uma

umidade de 10%, as pastas foram curadas durante 8 a 72h a 60°, 75° e 90°C. Para efeitos comparativos, amostras em duplicata foram tratadas durante 28 dias a 25°C, após a cura foram feitos ensaios de resistência a compressão simples. O efeito da temperatura proporciona uma maior resistência à compressão simples, sendo o efeito da temperatura de 60°C a 75°C mais pronunciada do que a produzida pelo aumento de 75°C a 90°C. Quase todas as amostras tratadas a 75° C e 90°C apresentam, mesmo após apenas 8 horas de cura, resistências mais elevadas do que os obtidos a 25°C. Portanto, temperatura mais elevada acelera a velocidade de reação pozolânica e produz um aumento da resistência, mesmo que seja moderado como o observado ao passar de 75°C a 90°C.

Este efeito de acréscimo na velocidade das reações pozolânicas através do aumento da temperatura pode ser observado em qualquer mistura que tenha esta reação cimentante como principal fator no incremento da resistência. Isto se deve ao fato de que as reações pozolânicas são endotérmicas, portanto, a taxa de desenvolvimento da resistência será maior quanto maior a temperatura de cura.

Dalla Rosa e Thomé (2002) estudaram um mistura de solo (argila muito plástica), cal e resíduo da rolagem de pedras preciosas curadas a temperaturas de 5°C, 20°C, 30°C e 40°C. Encontraram para todas as misturas aumento da resistência com o aumento da temperatura de cura e maiores valores para as misturas com maior proporção do resíduo utilizado.

Mallmann (1996) realizou trabalho com objetivo de verificar o comportamento mecânico de pozolanas artificiais (cinza volante e cinza pesada) da Usina de Candiota – RS estabilizadas quimicamente com cal dolomítica hidratada e com areia do Rio Guaíba em altas temperaturas. O processo de cura utilizado foi o de autoclave com temperaturas na faixa de 149°C a 188°C e cura em câmara com temperatura constante de 21°C. Verificou-se que a cura por autoclave com tempo de cura que variou de 4 a 6 horas proporcionou acréscimo de resistências de 30 a 60% em comparação aos corpos-de-prova curados a 21°C com tempos de cura de 7, 14, 28 e 60 dias, mostrando que o fator temperatura tem como finalidade acelerar as reações pozolânicas.

Silvani (2012) estudou a influência da temperatura para uma mistura de areia, cinza volante e cal, para isso foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e de tração na compressão diametral em corpos de prova com 3, 5 e 7% de cal, com peso específico aparente seco de 14, 15 e 16 kN/m³, curados a 20, 27, 35 e 50°C por 28 dias e com 25% de cinza

volante. Os resultados encontrados demonstram que ambas as resistências estudadas aumentam linearmente com o aumento da quantidade de cal e exponencialmente com a redução da porosidade. Com relação à temperatura foi observado que a resistência à tração na compressão diametral aumentou 1,6 vezes quando a temperatura de cura passou de 20°C para 27°C, 1,4 vezes quando a temperatura de cura foi elevada de 27°C para 35°C, porém não houve acréscimo relevante quando a temperatura variou de 35°C para 50°C. O comportamento da resistência a compressão simples foi diferente, pois quando a temperatura de cura foi elevada de 20°C para 27°C houve um aumento de cerca de 2 vezes na resistência, a partir desta temperatura não houve grande incremento no crescimento da resistência à compressão simples com a elevação da temperatura de cura. A mesma autora conclui que a parada no aumento das resistências é provavelmente devido à extinção das reações entre a cal e a cinza volante.

2.4.5 Efeito da relação entre porosidade e teor volumétrico de cal

A dificuldade de se empregar um fator água/cimento (muito utilizado na determinação de resistência para concretos) para materiais compactados deve-se ao fato de que a compactação nunca consegue expulsar completamente o ar do sistema solo-água-ar ou solo-cimento-água-ar (Foppa, 2005). Portanto, a resistência não pode ser correlacionada com o fator água/água-cimentante, 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 (Larnach, 1960).

Neste sentido, o mesmo autor (Larnach, 1960) propõe a utilização da relação vazios/cimento (Eq.10) após a verificação de um bom ajuste dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (q_u) das amostras de solo-cimento curadas por sete dias (Figura 4).

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar + água)}}{\text{Volume absoluto de cimento}} \quad \text{Eq(10)}$$

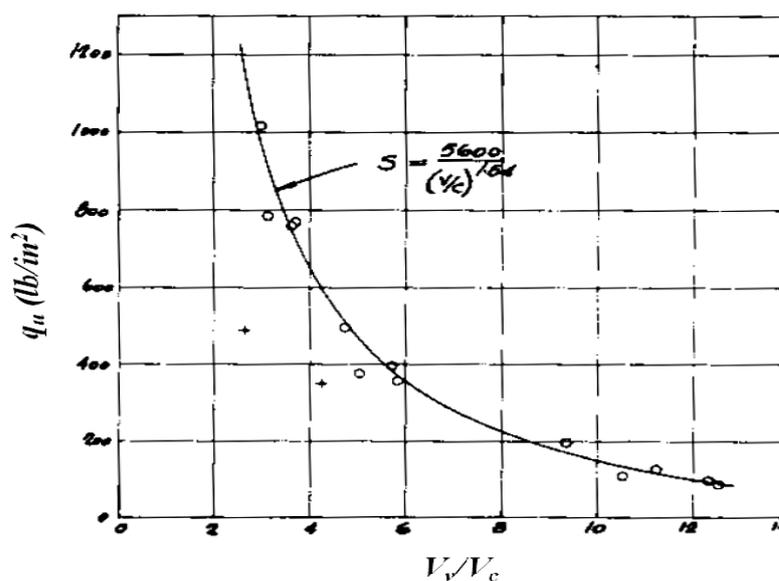


Figura 4 – Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Larnach, 1960).

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. Portanto, quando a resistência de materiais compactados é verificada pela relação vazios/ágente-cimentante é possível a previsão da resistência que se quer atingir.

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. O autor verificou que a relação vazios/Cimento, como definida por Larnach (1960), apesar de apresentar uma correlação razoável com os valores obtidos para a resistência à compressão simples, não se constitui na melhor forma de representar o fenômeno, pois assume que dada uma variação no volume de vazios, uma variação proporcional no volume de cimento seria suficiente para contrabalancear a perda ou ganho na resistência. Portanto, para um melhor ajuste dos dados experimentais foi obtido para uma relação vazios/cimento expressa em termos da porosidade da mistura compactada e do teor de cimento volumétrico ajustado por um expoente igual a 0,28 (Figura 5). Acredita-se que este expoente é uma função do tipo de material utilizado.

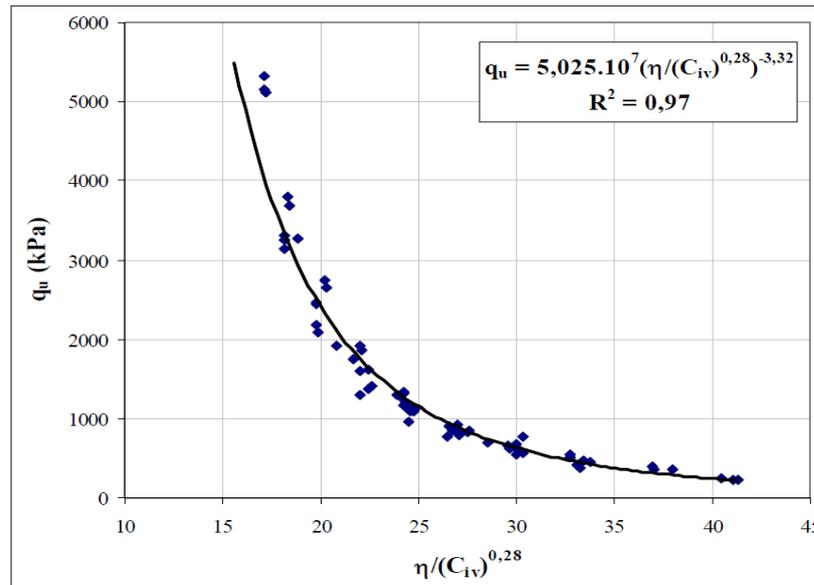


Figura 5 – relação vazios/cimento expresso em termos da porosidade e do teor volumétrico de cimento. Fonte: Foppa, 2005.

Lopes Junior (2007) estudou a relação vazios/cal tratando um solo arenoso com resíduo de britagem de 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. A Figura 6 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples das amostras tratadas com cal e com 28 dias de cura e a Figura 7 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).

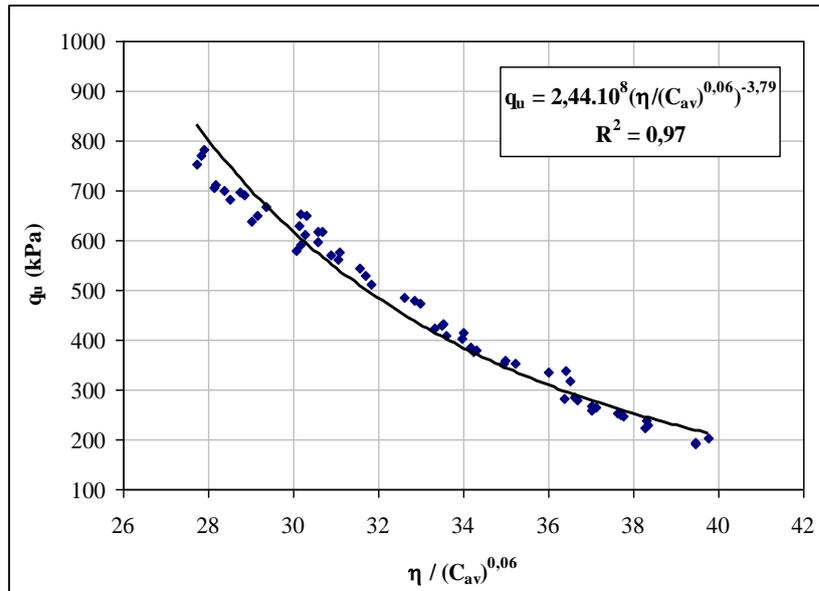


Figura 6 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 28 dias de cura. Fonte: Lopes Junior, 2007

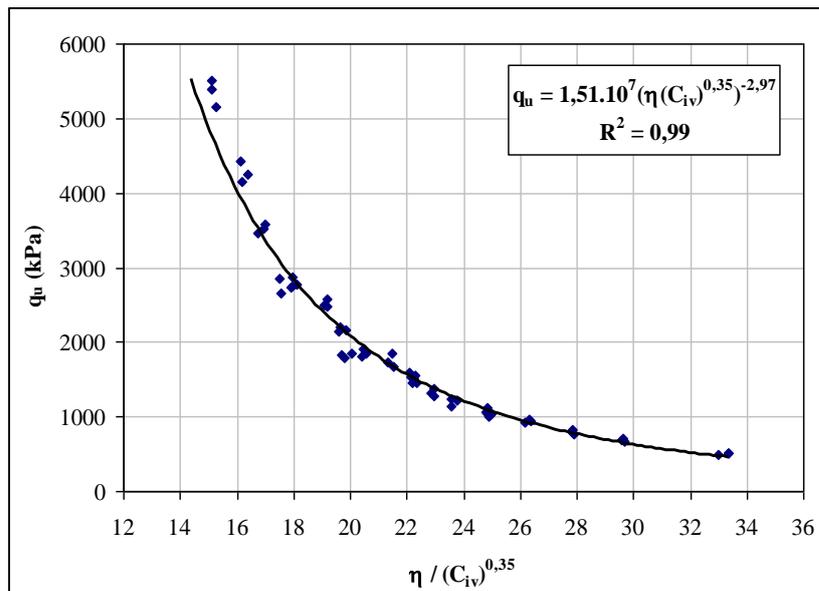


Figura 7 – Fator vazios/cimento expresso em termos da porosidade e do teor de cimento volumétrico para amostras com 7 dias de cura. Fonte: Lopes Junior, 2007

Dalla Rosa (2009) estabilizou um solo residual arenito da formação Botucatu com adição de 0%,12,5% e 25% de cinza volante, 3%,5%,7% e 9% de cal e tempos de cura de 28, 60, 90 dias, onde obteve 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 (Figura 8), 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. Neste trabalho foi estabelecida uma curva potência e equações de dosagens para diferentes períodos de cura, como demonstrado na Figura 8.

Para a definição da porosidade e teor volumétrico de cal são utilizadas as seguintes equações (11 e 12) apresentada pela respectiva autor (Consoli, Dalla Rosa *et al*, 2011):

$$L_v = 100 \left\{ \frac{\left[\frac{\gamma}{1 + \frac{L}{100}} \right] \left[\frac{L}{100} \right]}{\gamma_L} \right\} \quad \text{Eq. (11)}$$

$$\eta = 100 - 100 \left\{ \frac{\gamma}{1 + \left(\frac{L}{100} \right)} \left[\frac{(100 - FA)}{\gamma_s} + \frac{\left(\frac{FA}{100} \right)}{\gamma_{FA}} + \frac{\left(\frac{L}{100} \right)}{\gamma_L} \right] \right\} \quad \text{Eq. (12)}$$

Onde : η =porosidade; L_v = teor volumétrico de cal; γ = Peso específico do solo seco; L = teor de cal; γ_L =peso específico real da cal; FA = teor de cinza volante; γ_{sfa} = peso específico real da cinza volante; γ_s = peso específico real do solo.

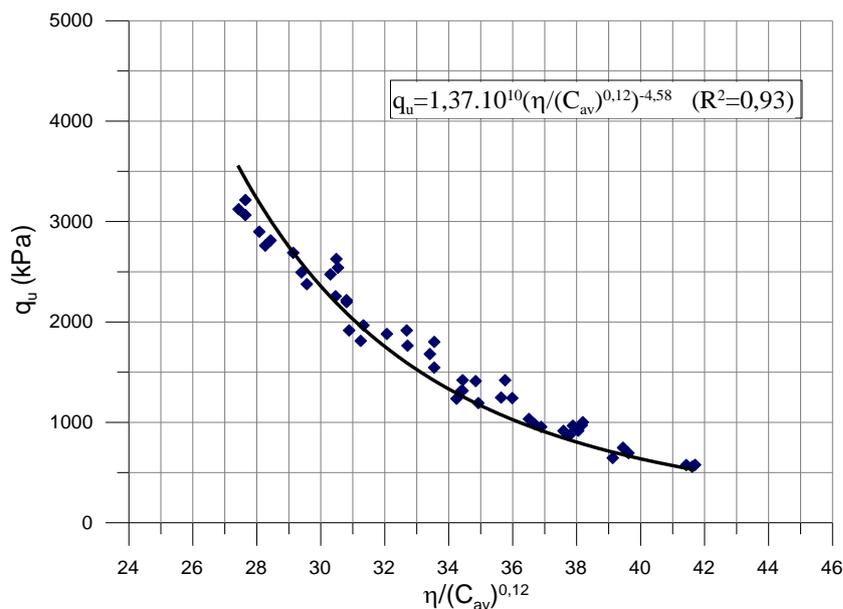


Figura 8 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura. Fonte: Dalla Rosa, 2009.

Silvani (2013) que realizou estudo sobre a influencia do coeficiente $\eta/(L_{iv})$ na variação de resistência à compressão simples e à tração na compressão diametral para diferentes temperaturas. Para isso, foram realizados ensaios de compressão simples e de tração na compressão diametral em corpos de prova com 3, 5 e 7% de cal, com peso específico aparente seco de 14, 15 e 16 kN/m³, curados a 20, 27, 35 e 50°C por 28 dias e com 25% de cinza volante. Os resultados encontrados demonstram que ambas as resistências estudadas aumentam linearmente com o aumento da quantidade de cal e exponencialmente com a redução da porosidade. A relação porosidade/teor volumétrico de ajustado por um coeficiente $[\eta/(L_{iv})^{0,3}]$, mostrou-se adequado na previsão da resistência a tração e compressão para todas as temperaturas estudadas (Figura 9). Assim, como a correlação entre porosidade, teor volumétrico de cal, temperatura e resistência da mistura cimentada, gerou um gráfico e equação (Figura 10) para o comportamento mecânico das amostras.

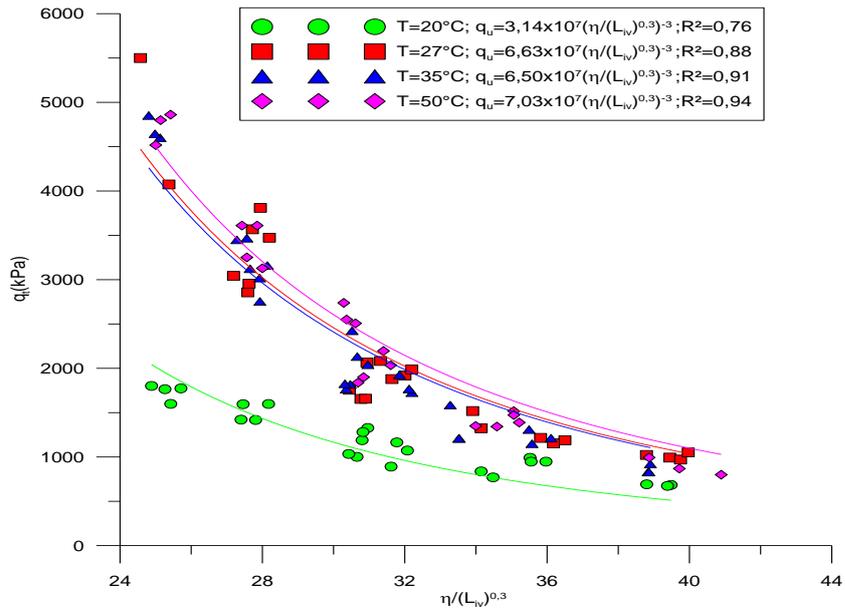


Figura 9 – Mudança na resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para todas a temperaturas. Fonte: Silvani (2013)

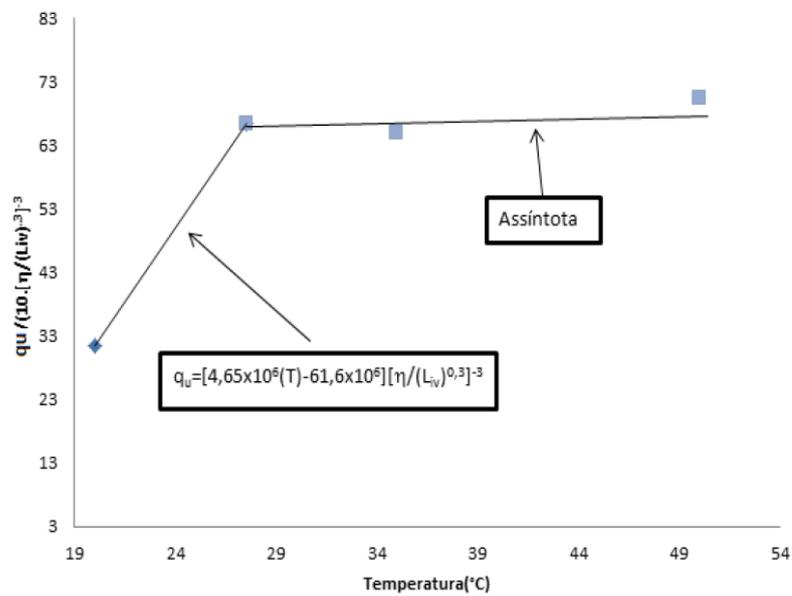


Figura 10 – Variação da resistência à compressão simples ajustada com a temperatura. Fonte: Silvani (2013)

A mesma autora verificou que os ganhos obtidos pela variação da temperatura foram crescentes e lineares para o aumento de 20°C para 27°C e para as demais temperaturas estabelecidas (35 e 50°C) não houve crescimento perceptível, formando uma assíntota.

Portanto, fica evidente que os fatores revisados (teor de cal, porosidade, tempo de cura e temperatura) são importantes na variação da resistência à compressão simples de materiais cimentados, assim como a relação entre porosidade e teor volumétrico de cal. Neste sentido os mesmos serão estudados na presente pesquisa para a determinação do comportamento da resistência à compressão simples para a mistura entre cinza volante e cal de carbureto.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O método utilizado na presente pesquisa está apoiado em conceitos estatístico, destinados a otimizar o planejamento, a execução e a análise do experimento. Esta abordagem permite que se estruture a sequência 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 (Ribeiro & Ten Caten, 2003).

Portanto, as variáveis foram organizadas em dois grupos (variáveis independentes e variáveis dependentes) de forma a atender aos objetivos propostos para a presente pesquisa. As variáveis independentes estão relacionadas ao objetivo desta pesquisa que visa investigar a influência/efeito sobre a variável dependente (resistência à compressão simples).

As variáveis independentes são divididas em fatores controláveis e fatores constantes:

- Fatores controláveis:
 - *Porosidade da cinza-cal*: expressa através da porosidade (η) ou do peso específico aparente seco (γ_d) da mistura compactada;
 - *Quantidade de cal (L)*: massa de cal dividida pela massa de cinza seca, expressa em porcentagem;
 - *Tempo de cura (d)*: tempo de permanência do corpo-de-prova na câmara com temperatura controlada após a moldagem até o seu rompimento, expresso em dias;
 - *Temperatura de cura (t)*: temperatura submetida ao corpo-de-prova, expresso em graus celsius.

- Fatores constantes:
 - *Tipo de cinza*: cinza volante proveniente da empresa Celulose Riograndense;
 - *Tipo de agente cimentante*: cal carbureto proveniente da empresa White Martins;
 - *Teor de umidade (ω)*: massa de água (a) dividida pela massa de material seco (cinza volante + cal), expresso em porcentagem;
 - *Taxa de deformação nos ensaios de compressão simples*: 1,14 mm por minuto.

Além dos fatores controláveis e constantes existem os fatores de ruído, como: equipamentos utilizados, operadores, temperatura e umidade do ambiente que podem ser minimizados, mas dificilmente eliminados causando distorções na variável resposta. Alguns procedimentos foram adotados para minimiza-los, como: utilização de um único equipamento, climatização do local de experimento, misturas realizadas de forma única e aleatória para cada corpo-de-prova confeccionado e número de operadores restritos no processo de mistura e moldagem.

Na avaliação 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 de diferentes massas específicas foi moldado com diferentes níveis de cal, com diferentes níveis de temperaturas de cura e diferentes níveis de tempo de cura. Foram utilizados no mínimo 3 níveis para cada variável controlável, assim possibilitou uma melhor determinação do comportamento da resistência à compressão simples. A confecção de amostras repetidas (3 corpos-de-prova para cada variação estabelecida) foi determinada para possibilitar uma comparação de médias e sua avaliação para um número exequível de amostras para o presente estudo. Neste caso 108 combinações foram estabelecidas com 3 repetições para cada, totalizado 324 amostras analisadas.

Deste modo, possibilitou a determinação da influência de cada variável na resistência mecânica da mistura cinza-cal. Os resultados obtidos foram avaliados através da Análise de Variância (ANOVA) para verificar se as variáveis de interesse e suas interações são determinantes (significativas) na modificação da resistência à compressão simples (variável

dependente). Para a análise da variância dos resultados do presente estudo não foram incluídas as amostras curadas em 23°C, pois não foi possível uma completa variação dos parâmetros estabelecidos para este estudo.

A relação Porosidade/Teor volumétrico de cal (η/L_v) definida como sendo a porosidade da mistura compactada (η) dividida pelo teor volumétrico de cal (L_v) presentes nas amostras compactadas, é uma variável derivada dos fatores controláveis e será utilizada na análise dos dados. Nesta relação é adicionado um fator de correção no teor volumétrico de cal (L_v) através de um expoente que possibilita uma melhor proporção com a porosidade. Este procedimento possibilitou a formulação de equações que definem o comportamento e estas, por sua vez, podem ser usados para definição de dosagem. Este assunto está mais aprofundado no capítulo de revisão bibliográfica (item 2.4.5).

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em três fases (Tabela 2). Na primeira fase foram realizadas as etapas de coleta e preparação das amostras, o ensaio de caracterização dos materiais utilizados neste estudo e o ensaio de compactação. Cada uma destas etapas é descritas detalhadamente nas seções 3.1.1.1, 3.1.1.2, 3.1.1.3 e 3.1.1.4 respectivamente. Assim, permitiu a determinação das características físicas e químicas da cinza volante e da cal de carbureto (item 3.1.2.1 e 3.1.2.2).

A segunda fase resultou na definição dos níveis das variáveis analisadas para determinar os teores de cal, a porosidade, as temperaturas e os tempos de cura utilizados na presente pesquisa (item 3.1.2). Como o programa de ensaios de compressão simples foi baseado em alguns resultados obtidos na etapa de caracterização, ele será apresentado após os itens referentes a primeira fase.

A terceira fase constituiu na execução da moldagem e cura dos corpos-de-prova (item 3.1.1.5) e a realização dos ensaios de compressão simples (item 3.1.1.6) para as misturas pré-estabelecidas de acordo com o programa de ensaios detalhados no item 3.1.2. O foco principal foi a determinação da alteração de uma variável controlável e a fixação das demais. Isto possibilitou a avaliação da influência dos fatores controláveis, de forma independente, bem como sua contribuição na resistência à compressão simples. O ensaio de sucção matricial (item 3.1.4.4) foi realizado após o rompimento dos corpos-de-prova.

Tabela 2 – Fases e Ensaio do Programa Experimental.

Fases		Material	Tipo de Ensaio/Procedimento	
Primeira Fase	Métodos de Caracterização e Materiais da mistura	Cinza Volante e Cal de Carbureto	Coleta e preparação das amostras	
		Cinza Volante	Caracterização	Massa Específica Real dos Grãos
				Análise Granulométrica
				Limite de Plasticidade
				Limite de Liquidez
				Análise química
				Compactação
		Cal de carbureto	Caracterização	Massa Específica
				Análise Química
				Perda ao fogo
Óxido de cálcio disponível				
Segunda fase	Programa de ensaios de compressão simples	Mistura com cinza volante e cal de carbureto	Definição do teor de cal	
			Definição da porosidade	
			Definição do tempo e temperatura de cura	
Terceira fase	Ensaio de Resistência à compressão simples	Mistura com cinza volante e cal de carbureto	Moldagem, compactação, cura e compressão Simples	
		Mistura com cinza volante e cal de carbureto	Sucção Matricial	

3.1.1 Métodos de caracterização

Inserido na primeira fase do programa experimental, neste item serão discutidos os métodos utilizados para coleta, preparação e ensaios de caracterização da cinza volante e da cal de carbureto utilizadas na pesquisa.

3.1.1.1 Coleta de amostras

O resíduo industrial cinza volante foi coletado diretamente dos reservatórios dos equipamentos da empresa Celulose Riograndense, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. A amostra assim obtida foi armazenada e transportada em tonéis plásticos adequadamente vedados para o laboratório.

O resíduo industrial cal de carbureto, adquirido da empresa White Martins Gases Industriais S.A., foi retirado das bacias de decantação do processo produtivo do gás acetileno e armazenadas em tonéis plásticos vedados. A amostra retirada possibilitou quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios.

3.1.1.2 Preparação das amostras

A preparação das amostras 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.

A cal de carbureto obtida da bacia de decantação possui altos teores de água que se apresenta misturada de forma homogênea com a cal, portanto foi necessário manter esta mistura por um dia de descanso nos toneis de coleta possibilitando a decantação da cal. Após este procedimento, o excesso de água sobrenadante foi retirado através do emprego de mangueira e o método sifão. A cal decantada presente no fundo do tonel ainda apresentava alto teor de umidade, portanto o resíduo foi secado em estufa à temperatura de 60°C durante 24 horas. Após este período, a umidade da cal estava reduzida, possibilitando o destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica conforme os procedimentos preconizados na NBR 6457 (ABNT, 1986A)

3.1.1.3 Ensaios de Caracterização

Para a caracterização da cinza volante e da cal de carbureto foram realizados os ensaios de granulometria, análise química elementar, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade e determinação do teor de umidade conforme procedimentos e normas da Tabela 3. Estes ensaios foram realizados nos laboratórios do LEGG/Environgeo; LACER e CIENTEC.

Tabela 3 – Caracterização e procedimentos empregados para os materiais utilizados.

Caracterização	Procedimento
Determinações do teor de umidade	NBR 6457/86
Análise química elementar (cinza e cal de carbureto)	Fluorescência de raio X.
Análise Granulométrica	NBR 7181/84 (com defloculante)
Massa específica dos grãos (cinza)	NBR 6508/84
Massa específica da cal	NM 23/2001
Perda ao fogo	NBR NM 18/2004
Óxido de cálcio disponível em cal	NBR 6473/2003
Determinação dos limites de liquidez e de plasticidade (cinza)	NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente

3.1.1.4 Ensaio de compactação

Nesta pesquisa definiu-se a determinação do peso específico aparente seco através de compactação estática com o intuito de se obter um maior peso específico do que proporcionado pelo ensaio de compactação dinâmica – Proctor (NBR 7182).

Para a determinação do peso específico e a umidade a ser utilizada nesta pesquisa, foram realizados ensaios de compactação estática em prensa automatizada.

Como não existe normativa que estabeleça ensaio de compactação estático na determinação do peso específico aparente seco, este trabalho definiu um método para a determinação deste parâmetro através de compactação estática. Para isso, foi utilizado molde cilíndrico de 10 cm de diâmetro, onde foi colocada cinza volante com uma determinada umidade que totalizasse 200g de material úmido. Este material foi compactado através da prensa automatizada em diferentes forças (cargas), após o corpo-de-prova era retirado do cilindro e as suas dimensões (altura e diâmetro) eram medidas, assim como o seu peso. Posteriormente, o corpo de prova era desmanchado e dele era retirado uma fração do material para a determinação da umidade.

Para uma mesma força foram realizados ensaios com a cinza em diferentes umidades na tentativa de verificar o comportamento do peso específico aparente seco frente à variação da umidade da cinza compactada. Com estes dados foi possível a determinação da massa específica aparente seca para diferentes níveis de força de compactação e umidade exequíveis para a pesquisa.

3.1.2 Materiais da mistura

Inserido na primeira fase do programa experimental, neste item serão discorridos os materiais utilizados na presente pesquisa. As características físicas e químicas da cinza volante e cal de carburetos foram obtidas pelos métodos de caracterização apresentados no item anterior (3.1.1).

3.1.2.1 Cinza Volante

A cinza volante utilizada nesta pesquisa é oriunda da Celulose Riograndense, empresa fabricante de papel, localizado no município de Guaíba no Estado do Rio Grande do Sul, que possui unidade de geração de vapor através de câmara de combustão de carvão mineral. O vapor gerado é utilizado para a movimentação de turbinas na geração de energia elétrica para a fábrica, e parte do vapor é utilizado para processos produtivos.

Conforme informações cedidas pela empresa, atualmente, são queimadas 500 toneladas de carvão mineral por dia, gerando, aproximadamente, 120 toneladas de cinza volante/dia. A cinza volante gerada, atualmente, vem sendo vendida para cimenteiras (Figura 11).



Figura 11 – Local de armazenamento e cinza volante coletada – Celulose Riograndense.

A seguir são apresentadas algumas propriedades físicas da cinza volante obtida através de ensaios realizados no LEGG/Envirogeo, LACER e CIENTEC. Na Figura 12 é apresentada a curva granulométrica da cinza volante.

Na Tabela 4 são apresentadas as frações granulométricas, bem como, os demais resultados obtidos dos ensaios de caracterização da cinza volante.

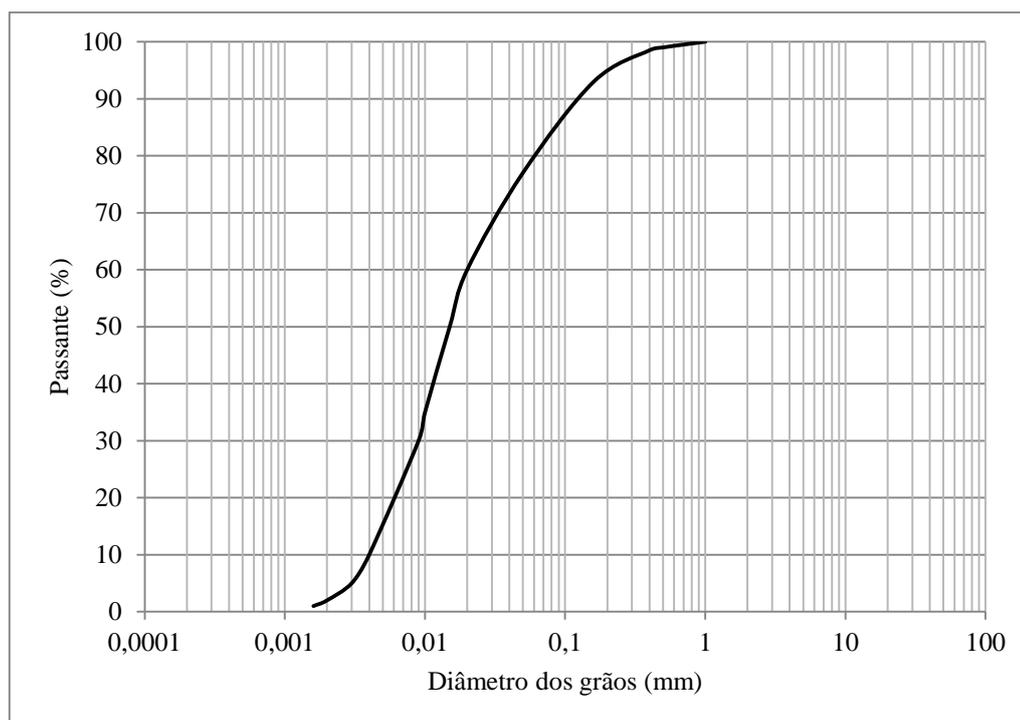


Figura 12 – Curva granulométrica da cinza volante.

Tabela 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	-	-
Massa Específica dos Grãos (G)	2,16 g/cm ³	NBR 6508/84	-
% de Areia Grossa (0,6<Ø<2,00mm)	1	NBR 6502/95	Com uso de defloculante
% de Areia Média (0,2<Ø<0,6 mm)	4		
% de Areia Fina (0,06<Ø<0,2 mm)	15		
% de Silte (0,002<Ø<0,06 mm)	78		
% de Argila (Ø<0,002 mm)	2		
Diâmetro Efetivo (D ₁₀)	0,004	NBR 6502/95	-
Coefficiente de Uniformidade (C _u)	5	NBR 6502/95	-

As cinzas volantes são compostas principalmente por sílica, alumina e óxido de ferro. A Tabela 5 apresenta a composição química da cinza volante gerada pela Celulose Riograndense. Observa-se que a soma do óxido de silício (SiO₂), Óxido de alumínio (Al₂O₃) e

óxido de ferro (Fe_2O_3) compõem mais de 90% do total dos óxidos e são considerados elementos imprescindíveis para a ocorrência das reações pozolânicas.

Tabela 5 – Análise química da cinza volante gerada na Celulose Riograndense.

Características Químicas	Resultados (%)
SiO_2	66,281
Al_2O_3	22,505
Fe_2O_3	2,839
K_2O	1,960
CaO	1,865
TiO_2	1,600
SO_3	0,223
P_2O_5	0,098
ZrO_2	0,095
Cr_2O_3	0,040
Y_2O_3	0,037
ZnO	0,035
MnO	0,029
SrO	0,024
Rb_2O	0,023
CuO	0,013
NiO	0,013
CO_2	1,870

Com relação à fração de material amorfo que irá propiciar as reações pozolânicas com a presença da cal, Hoppe Filho (2008) verificou (através do método de Rietveld) para a cinza volante de mesma procedência do presente trabalho, que o percentual amorfo (fase vítrea) desta cinza volante é de 57,7% da sua composição, sendo as demais partes constituídas de Mulita (28,6%), Quartzo (13,6%) e Hematita (0,1%). A fração vítrea da cinza volante procedente de diferentes locais da região sul do Brasil varia entre 50% e 70% (Gobbo *et al.*, 2007)

3.1.2.2 Cal

A cal utilizada no trabalho, um resíduo do processo produtivo do gás acetileno, é chamada de cal de carbureto, proveniente da unidade da empresa White Martins Gases Industriais S.A., localizada no município de Esteio do Estado do Rio Grande do Sul. São gerados,

aproximadamente, 2160 toneladas/ano de cal de carbureto pela empresa citada. Na Figura 13 é apresentado o local de coleta da cal utilizada e seu aspecto após a secagem.

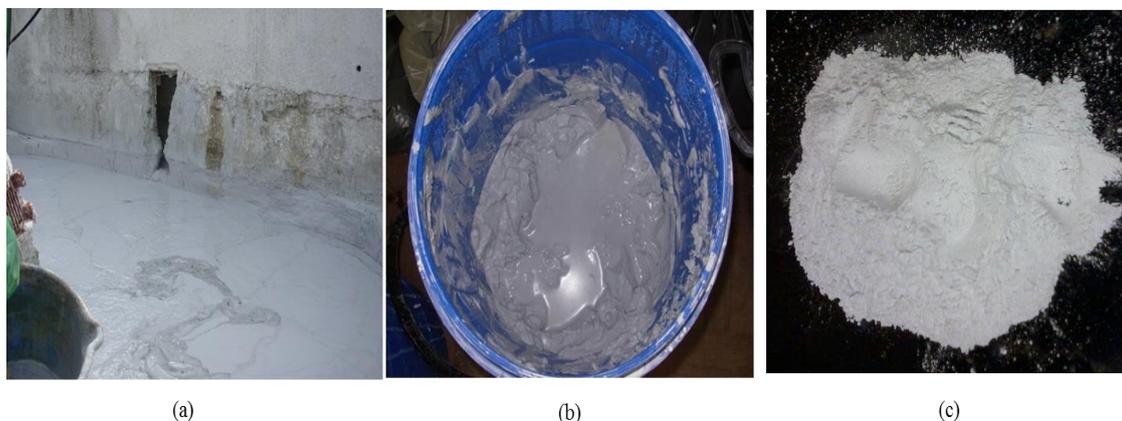


Figura 13 – Local de coleta (a), armazenamento (b) e cal de carbureto após a secagem (c).

Conforme a Tabela 6 é possível verificar que a cal de carbureto é formada basicamente por óxido de cálcio, portanto possui pureza de cálcio maior do que a cal dolomítica comercializada no RS. O óxido de cálcio disponível representa a fração da cal de carbureto capaz de reagir com a cinza-volante. Os ensaios de de caracterização foram realizados com o material após o processos de secagem.

Tabela 6 – Propriedades da cal de carbureto.

Propriedade	Cal de carbureto	Cal comercial dolomítica*
Óxido de cálcio (CaO)	70,2%	44,8%
Óxido de magnésio (MgO)	0,3%	27,9%
Resíduos insolúveis	1,5%	4,7%
Perda ao Fogo	27%	23,3%
Óxido de cálcio disponível	64,6%	---
Massa Específica	2,12 g/cm ³	2,49 g/cm ³

*Dalla Rosa (2009)

3.1.3 Programa de ensaios de resistência à compressão simples

Este item está inserido na segunda fase do programa experimental e apresenta na Tabela 7 as variáveis e os níveis estabelecidos para o presente estudo, sendo apresentados nas seções subsequentes os motivos desta definição.

Tabela 7 – Parâmetros e variáveis estabelecidas.

Variáveis	Definições (níveis)	
Temperatura	80°C – 60°C – 40°C (câmara com vapor)	23°C (câmara sem vapor)
Massa Específica Aparente Seca	1,1 g/cm ³ - 1,2 g/cm ³ - 1,3 g/cm ³	
Teor de Cal	5% - 10% - 15%	
Tempo de Cura	1 dia – 3 dias – 7 dias	3 dias – 7 dias – 14 dias

3.1.3.1 Definição dos teores de cal

As proporções de cal de carbureto foram definidas com o intuito de se proporcionar ambiente favorável para o desenvolvimento das reações pozolânicas e conseqüentemente a obtenção de grandes resistências. O valor estabelecido representa a porcentagem de cal de carbureto em relação a massa seca de cinza volante.

Para a determinação de um teor mínimo de cal foi utilizado o método ICL (Initial Consumption of Lime), proposto por Rogers et al. (1997). Este método consiste em adicionar cal à mistura e realizar medidas do pH da mesma. Pelo método do ICL, o teor mínimo é aquele que leva a um valor máximo e constante de pH que representa o teor de cal para satisfazer as reações iniciais (troca catiônica).

Para a cinza e cal de carbureto utilizados na presente pesquisa foi observado (Figura 14) como teor mínimo de cal o valor de 4% que representa a estabilização do valor máximo do pH para as diferentes proporções de mistura. Portanto, para uma maior segurança em se estabelecer um ambiente favorável para as interações entre cal e cinza foi determinado 5% de teor de cal como valor mínimo para a presente pesquisa.

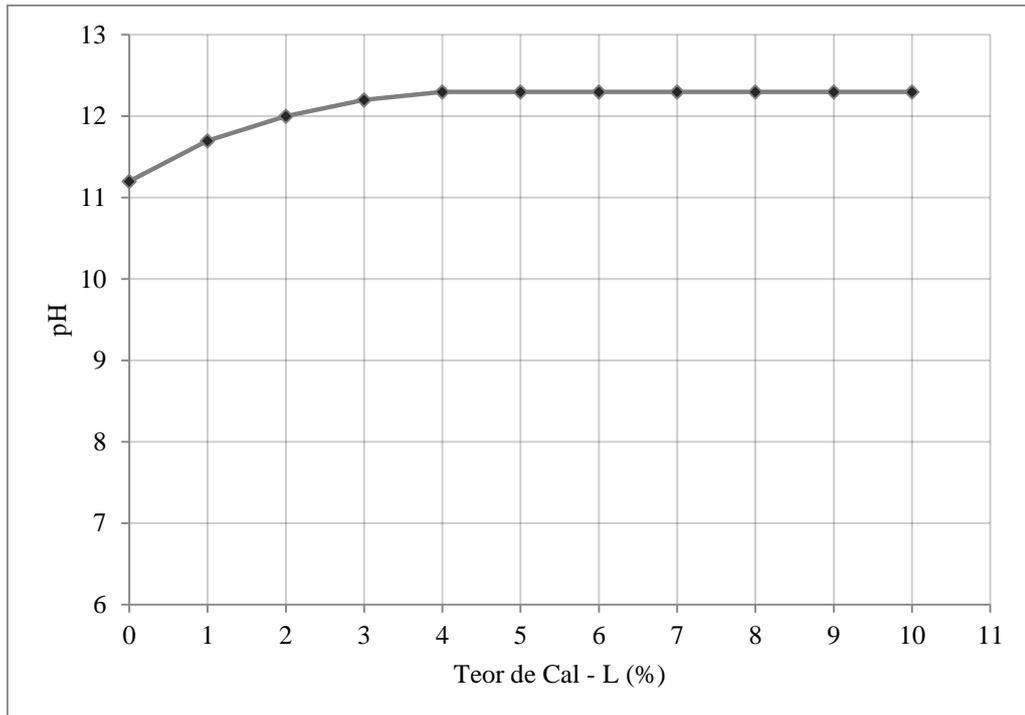


Figura 14 – Determinação do teor mínimo de cal.

A determinação de um teor máximo de cal também se faz importante, pois o acréscimo do mesmo não necessariamente representa maiores resistências. Neste sentido, Andrade (1991) verificou em sua pesquisa que a influência do acréscimo de cal na cinza era significativa até 15%. Entretanto, a cinza e cal utilizadas não eram as mesmas do presente trabalho, portanto foi realizado ensaio piloto de compressão simples na verificação da influência da cal na resistência para a definição das dosagens.

Os corpos-de-prova foram moldados com massa específica aparente seca de $1,2 \text{ g/cm}^3$, umidade de 18%, curados em temperatura de 80°C em câmara de vapor por três dias, o teor de cal foi variada em 5%, 10%, 15% e 20% em relação a massa de cinza seca. Os resultados estão apresentados na Figura 15.

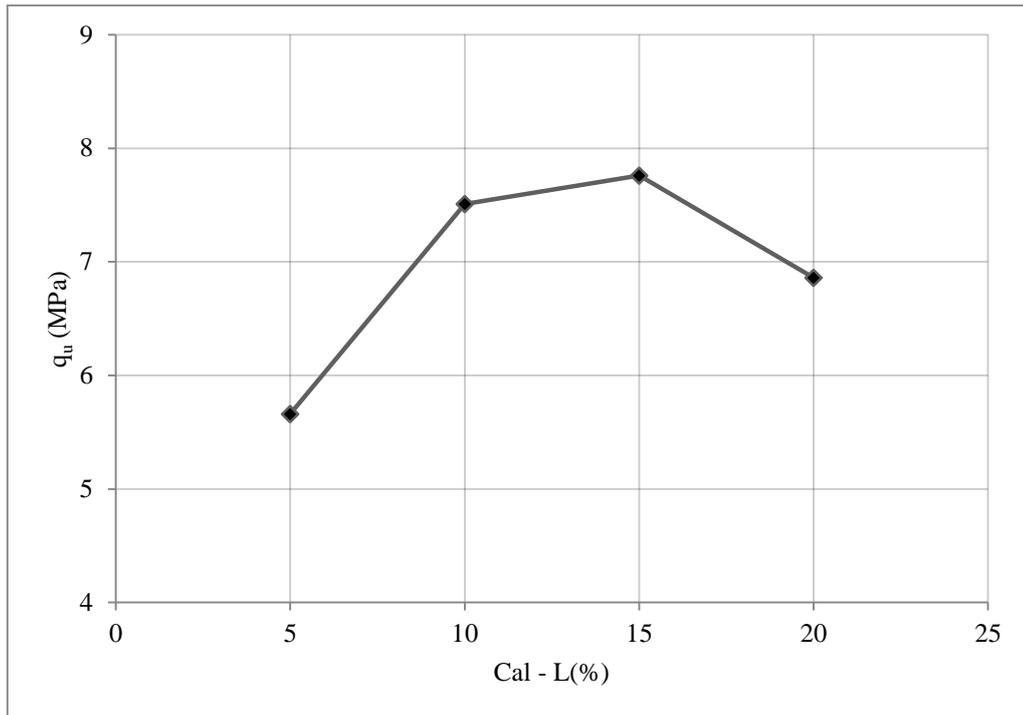


Figura 15 – Teste piloto para determinação do teor máximo de cal através da variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal.

Pode-se observar na Figura 15 que a quantidade de cal exerce influência sobre a resistência à compressão simples do material, entretanto possui ponto máximo quando adicionado 15% e perde resistência em 20% de cal. Sendo assim, foi adotado para o presente trabalho a variação de 5, 10 e 15% de cal em relação à massa de cinza seca.

3.1.3.2 Definição da Porosidade

A porosidade de compactação foi definida a partir do ensaio de compactação estática proposta pelo presente trabalho (Item 3.1.1.4). Neste ensaio não foi possível a verificação da umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo da cinza em estudo, pois o comportamento apresentado foi constante. Entretanto, a compactação estática possibilitou observar limites máximos de compactação possível para a prensa utilizada, assim como a determinação de umidade que pudesse compreender uma faixa para diferentes massas específicas aparentes secas.

A Figura 16 mostra os pontos ensaiados para as diferentes forças aplicadas pela prensa de capacidade máxima de 60 toneladas. Observa-se que os pontos de moldagem foram

posicionados em uma linha vertical (pontos: R1, R2 e R3), denominada linha “R”, com um mesmo teor de umidade e diferentes massas específicas aparentes secas.

A posição dos pontos de moldagem foi estabelecida de modo que estes ficassem compreendidos dentro de uma faixa de massas específicas aparentes secas e teor de umidade exequível para a compactação do material. Os pontos de moldagem estabelecidos são apresentados na Tabela 8.

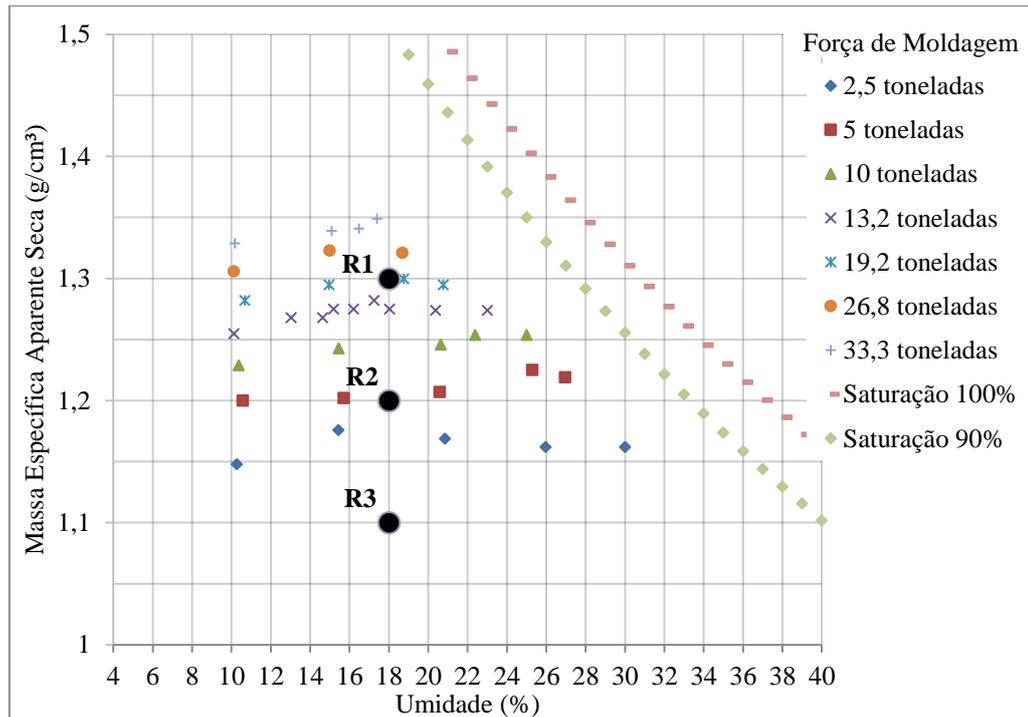


Figura 16 – Ensaio de compactação estática e determinação da massa específica e umidade adotadas na pesquisa.

Portanto, para cada ponto da linha “R”, foram moldadas amostras com 3 diferentes porcentagens de cal (5%, 10% e 15%), com diferentes tempos de cura que são determinados no item seguinte.

Tabela 8 – Pontos de moldagem.

Ponto	γ_d (g/cm ³)	ω (%)	Porosidade (η)	Força de moldagem
R1	1,30	18,0	39,8%	≈ 19 ton
R2	1,20	18,0	44,4%	≈ 5 ton
R3	1,10	18,0	49,0%	≈ 0,8 ton

3.1.3.3 Definição do Tempo e Temperatura de Cura

O tempo de cura foi definido a partir do tempo necessário para que as reações químicas dessas misturas ocorressem. Assim, gerando a cimentação da mistura proposta.

Na cura acelerada, temperaturas mais elevadas proporcionam um aumento da velocidade das reações pozolânicas, portanto necessitam de um menor período de cura. Neste sentido, para a avaliação da influência da temperatura na resistência do material foram definidas as temperaturas de 40, 60 e 80°C curados em câmara de vapor para os períodos de 1, 3 e 7 dias.

Entretanto, quando não ocorre a cura acelerada, com temperaturas mais baixas, o tempo de cura deve ser estendido para que ocorra o processo de cimentação, sendo assim os corpos-de-prova curados em câmara a 23°C (sem vapor) foram curados por 3, 7 e 14 dias.

3.1.4 Ensaios de Resistência à Compressão Simples

Após as fases de caracterização dos materiais e a definição dos níveis das variáveis estudadas, iniciou-se a terceira fase de ensaios de resistência à compressão. Nesta etapa do programa experimental foram realizadas as misturas, moldagem e cura dos corpos-de-prova para posteriormente serem rompidos através do ensaio de compressão simples. Este ensaio promoveu a geração de resultados de resistência à compressão das misturas que serão apresentadas e discutidas no próximo capítulo (4). Também, nesta fase, é apresentado o ensaio de sucção realizado para determinar a homogeneização proporcionada pela imersão dos corpos-de-prova por 24 horas, cujos resultados serão apresentados neste capítulo.

3.1.4.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Foram utilizados, para os ensaios de compressão simples, corpo-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 (cal, cinza volante e água) com resolução de 0,01 g, 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 foi adicionada continuando o processo de mistura até que a homogeneidade fosse obtida. A água utilizada para a moldagem dos corpos-de-prova é a água potável proveniente da rede de abastecimento pública.

A quantidade de 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 cinza volante utilizada, sendo que a quantidade de água (teor de umidade) foi calculada em relação à soma das massas de 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 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, 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.

Os corpos-de-prova assim obtidos eram identificados e ensacados, então, armazenados e curados por um período de 3 dias, 7 dias e 14 dias, em um ambiente com temperatura de 23°C ($\pm 3^\circ\text{C}$). Para este procedimento foi utilizada a câmara da CIENTEC. Os corpos-de-prova confeccionados para cura em temperaturas de 40, 60 e 80°C ($\pm 3^\circ\text{C}$) para os períodos compreendidos de 1, 3 e 7 dias foram colocados em câmara de vapor (Figura 18).

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

- Peso específico aparente seco (γ_d): grau de compactação de 99% a 101%, sendo o grau de compactação definido como o valor de γ_d efetivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de γ_d definido como meta. (Exemplo: para $\gamma_d =$

1,10 g/cm³ consideram-se aceitáveis corpos-de-prova que apresentarem valores de γ_d compreendidos entre 1,08 e 1,12 g/cm³).

- Teor de umidade (ω): valor especificado $\pm 0,5$ pontos percentuais (Exemplo: para um objetivo de $\omega=18\%$ são aceitos valores compreendidos entre 17,5% e 18,5%).
- Dimensões: diâmetro $50 \pm 0,5$ mm e altura 100 ± 1 mm.

3.1.4.2 Molde e Câmara de Vapor

Para a confecção dos corpos-de-prova foi utilizado molde de ferro contínuo, portanto sem repartições, com uma polegada de espessura para poder resistir a maiores forças de compactação. O molde foi adaptado para ser utilizado em prensa automatizada (Figura 17).



Figura 17 – Prensa e molde adaptado para confecção dos corpos-de-prova.

Para a cura dos corpos-de-prova em temperaturas maiores do que 23°C foi utilizado uma câmara com temperatura controlada através da aspersão de vapor de água, portanto o ambiente interno da câmara mantinha-se saturado e aquecido. A Figura 18 apresenta a câmara da CIENTEC utilizada na presente pesquisa.



Figura 18 – Câmara de vapor utilizada para cura dos corpos-de-prova em temperaturas de 40°C, 60°C e 80°C.

3.1.4.3 Ensaios de Resistência à Compressão Simples

Ensaios 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 materiais cimentados. 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 da CIENTEC. A velocidade de deformação destes ensaios era de 1,14 mm por minuto. O procedimento dos ensaios de compressão simples seguiu a norma americana ASTM D 5102/96. Esta norma internacional é indicada para determinação de resistência à compressão simples de amostras compactadas e estabilizadas com cal

Os corpos-de-prova, após serem curados, foram capeados para nivelar suas extremidades e depois submersos em um recipiente com água por um período de 24 horas, visando aproximar a condição de saturação. Portanto, o corpo-de-prova que era curado, por exemplo, sete dias, no sétimo dia era retirado da câmara e colocado em imersão para ser rompido apenas no oitavo dia. Este procedimento foi adotado para todos os corpos-de-prova da presente pesquisa.

A Figura 19 apresenta o aspecto final de um corpo-de-prova moldado de acordo com os procedimentos descritos anteriormente.



Figura 19 – Aspecto do corpo de prova curado e capeado.

A temperatura da água do tanque foi controlada e mantida em $23 \pm 3^\circ\text{C}$. Imediatamente antes do ensaio de compressão simples, os corpos-de-prova foram retirados do tanque e superficialmente secos com auxílio de um tecido absorvente.

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.

3.1.4.4 Sucção Matricial

Como todos os corpos-de-prova do programa de ensaios, no teor de umidade de moldagem, encontram-se na condição não-saturada, logo 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 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 calibração apresentadas por Chandler *et al.* (1992) e adaptadas 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) \leq 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 uma amostra para determinação do teor de umidade.

Dois pedaços de papel filtro, com área de aproximadamente 2 cm², eram colocados na parte superior da amostra sem sobreposição dos mesmos. 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 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 14 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.

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 a calibração, obteve-se a sucção do papel filtro, e a média dos dois valores considerada igual à sucção existente na amostra.

Os resultados de saturação e sucção matricial após a imersão por 24 horas estão na Tabela 9, onde:

S_i = grau de saturação de moldagem;

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

Tabela 9 – Tabela de resultados do ensaio de sucção.

Característica do corpo-de-prova	S_i (%)	S_f (%)	Sucção (kPa)
CP 418 – 1,1 g/cm ³ - 5% Cal – 1 dia – 80°C	40,6	83,9	71,8
CP 434 – 1,1 g/cm ³ - 5% Cal – 3 dias – 80°C	40,8	83,1	61,1
CP 437 – 1,2 g/cm ³ - 10% Cal – 1 dia – 60°C	48,4	86,9	67,8
CP 439 – 1,3 g/cm ³ - 5% Cal – 1 dia – 60°C	58,2	86,1	148,5
CP 419 – 1,1 g/cm ³ - 10% Cal – 14 dias – 23°C	40,3	82,1	39,2
CP 424 – 1,3 g/cm ³ - 10% Cal – 14 dias – 23°C	59,2	85,4	126,2
CP 425 – 1,3 g/cm ³ - 15% Cal – 14 dias – 23°C	59,8	85,9	139,3
CP 381 – 1,1 g/cm ³ - 5% Cal – 1 dia – 40°C	40,7	83,0	36,5
CP 391 – 1,1 g/cm ³ - 10% Cal – 1 dia – 40°C	40,4	83,1	43,8
CP 400 – 1,2 c/cm ³ - 10% Cal – 1 dia – 40°C	48,4	81,4	71,5
CP 403 – 1,2 g/cm ³ - 15% Cal – 1 dia – 40°C	47,8	81,5	74,6
CP 445 – 1,2 g/cm ³ - 5% Cal – 1 dia – 40°C	48,2	81,4	72,0

Na Tabela 9 é possível verificar que saturação inicial (S_i) apresentou variação de 40% até 59% de saturação com uma média de 47,7%, que passou, após a imersão por 24 horas, para uma homogeneização na saturação. Assim, foi possível alcançar uma saturação final (S_f) maior do que 80% para todos os corpos-de-prova ensaiados e a amplitude de máximo e mínimo foi encurtada para 5,5 pontos percentuais.

Sendo assim, o processo de imersão dos corpos-de-prova mostrou-se satisfatório no aumento e uniformização do grau de saturação das amostras, que possibilitou atenuação da interferência da sucção na resistência à compressão simples. Em média a sucção mátrica

representou 7% da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova ensaiados, permitindo assim, ser desconsiderado como uma variável nas análises investigadas. Resultados estes corroborados por outros autores (Foppa, 2005; Lopes Junior, 2007; Dalla Rosa, 2009) que utilizaram a imersão por 24 horas em seus experimentos e concluíram que este método possibilitou uma melhor distribuição dos efeitos da sucção nos diferentes parâmetros de moldagem dos corpos-de-prova.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão abordados os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e as suas análises pertinentes ao presente trabalho. Primeiramente, os resultados serão divididos e analisados conforme a temperatura de cura dos ensaios (23, 40, 60 e 80°C). Para cada temperatura serão analisados os seguintes aspectos: efeito do teor de cal; efeito da porosidade; efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal e efeito do tempo de cura. Ao final, será analisado o efeito da temperatura na cura da mistura cinza-cal compactada e a análise da variância dos resultados.

4.1 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

As Tabelas A1 a A12 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. As Tabelas A1 a A3 apresentam os corpos-de-prova curados a 23°C com cura sem vapor para os tempos de 3, 7 e 14 dias. As Tabelas A4 a A6 apresentam as amostras submetidas a 40°C com período de cura de 1, 3 e 7 dias. Os corpos-de-prova curados a 60°C com período de cura de 1, 3 e 7 dias podem ser encontradas na Tabelas A7 a A9 e os corpos-de-prova curados a 80°C com período de cura de 1, 3 e 7 dias são apresentados nas Tabelas A10 a A12.

4.1.1 Efeito do teor de cal

4.1.1.1 Amostras curadas a 80°C em câmara de vapor

Nas Figuras 20 a 22, é apresentada a variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal para 1, 3 e 7 dias de cura em câmara de vapor a 80°C. Cada reta, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade (18%).

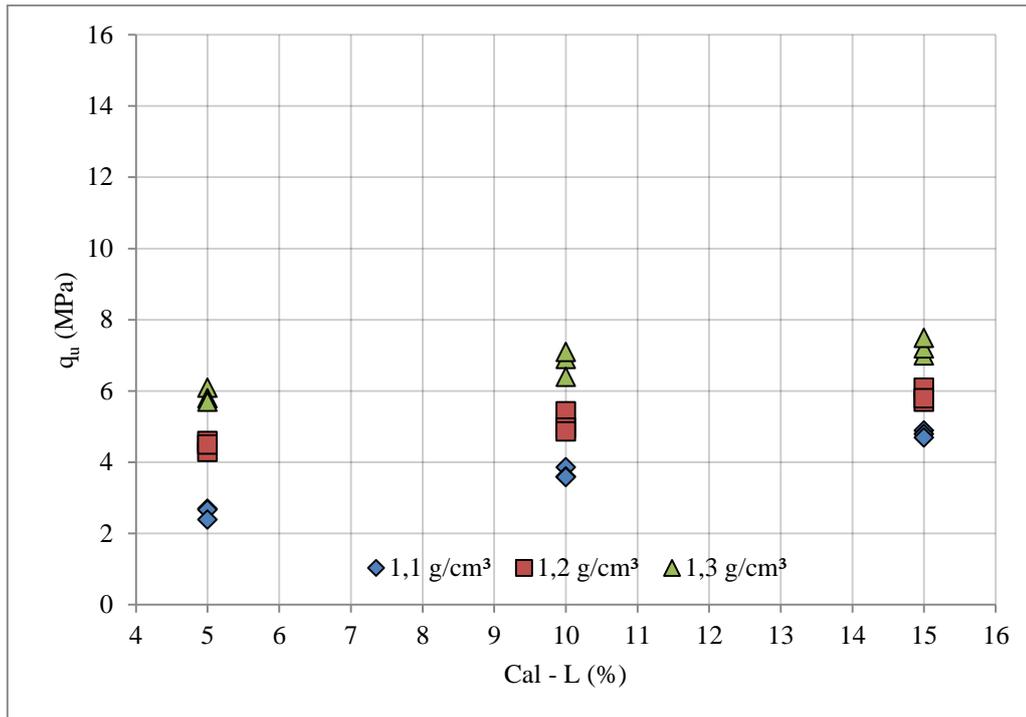


Figura 20 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 80°C ensaiadas com 1 dia de cura em câmara de vapor.

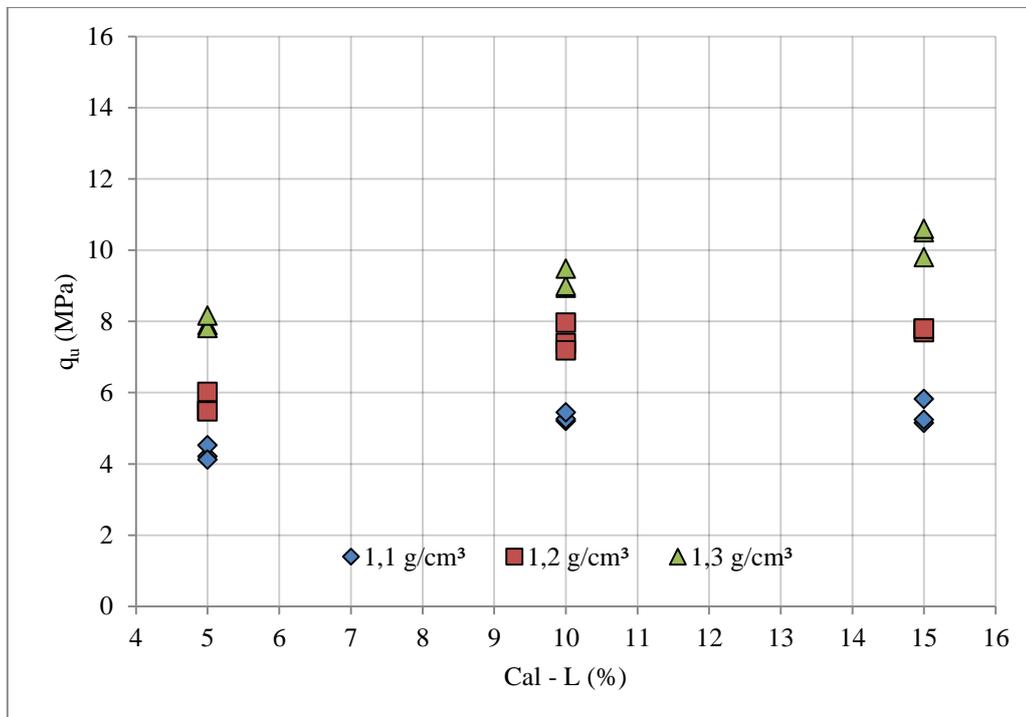


Figura 21 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 80°C ensaiadas com 3 dias de cura em câmara de vapor.

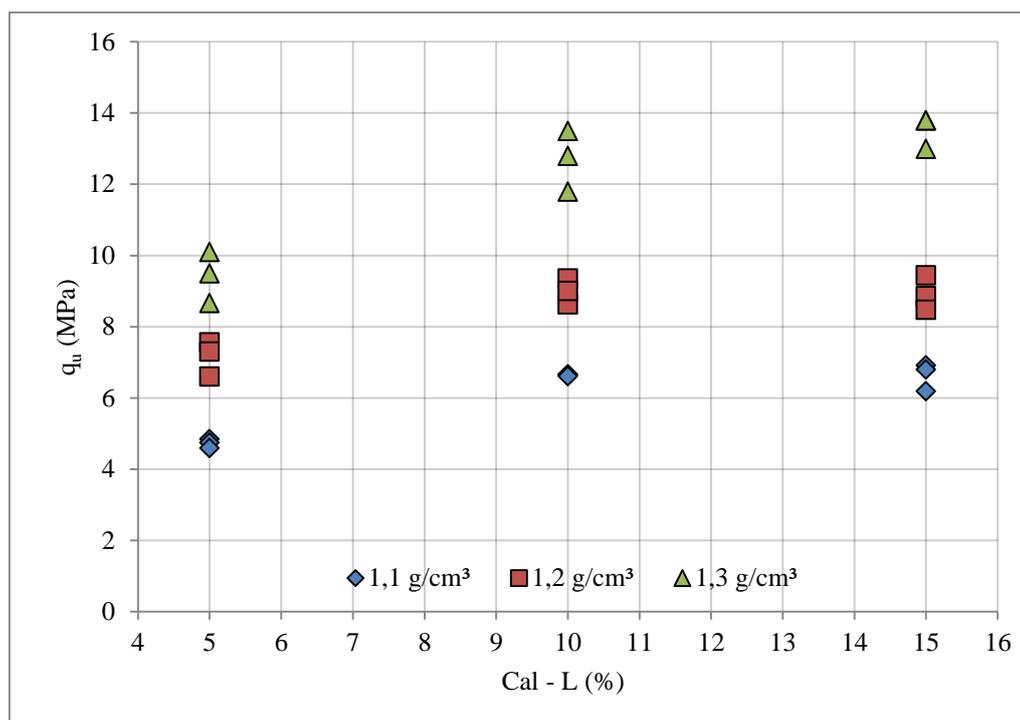


Figura 22 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 80°C ensaiadas com 7 dias de cura em câmara de vapor.

Pode-se observar que o aumento da quantidade de cal exerce ganhos na resistência à compressão simples do material para corpos-de-prova ensaiados a 1, 3 e 7 dias. O aumento da resistência com a adição de cal é um aspecto reportado por grande parte dos trabalhos consultados (Guimarães, 1971; Ingles e Metcalf, 1972; Núñez, 1994; Lovato, 2004, Dalla Rosa, 2009; Lopes Junior, 2007 e 2011).

Entretanto, os ganhos maiores estão entre a porção de 5% para 10% de cal que fica mais evidente em períodos de cura mais longos (Tabela 10), onde a diferença de resistência para os corpos-de-prova de 10% para 15% de cal exercem menor influência na resistência verificada. Isto ocorre devido à saturação de cal na matriz da mistura devido à diminuição da disponibilidade de material amorfo (sílica e alumínio) para as reações pozolânicas nos períodos de cura estabelecidos, este fenômeno fica mais evidente na Figura 15 (Item 3.1.3.1) onde a proporção de 15% de cal está no limite no ganho máximo de resistência para o tempo de cura e temperatura ensaiada. Andrade (1991) verificou que o crescimento da resistência ocorre de forma mais acentuada até o teor de 15%, a partir daí os crescimentos são mais lentos tendendo a tornarem-se constantes.

Horpibulsuk (2012) observou que conforme o aumento de cal na estabilização de um determinado solo com cinza e cal de carbureto existe três zonas que representam o ganho de resistência em função da adição de cal. Para as adições de cal que proporcionam ganhos significativos na resistência é chamada de Zona Ativa, quando a resistência em função de adição de cal proporciona ganhos ínfimos é chamada de Zona Inerte e quando a resistência começa a diminuir com o incremento de cal é chamada de Zona de Deterioração. Na presente pesquisa não foi observado uma zona de deterioração, mas a zona inerte foi atingida para determinados períodos de cura e temperaturas estabelecidas para a variação de 10% de cal para 15% de cal, que obtiveram pequenas ou nulas diferenças na resistência a compressão simples.

Tabela 10- Resistência à compressão simples (RCS) média e ganho de resistência para variação de cal para cura a 80°C.

Tempo de cura	Massa Específica (g/cm ³)	RCS – 5% de Cal (MPa)	Ganho de resistência	RCS – 10% de Cal (MPa)	Ganho de resistência	RCS – 15% de Cal (MPa)
1 dia	1,1	2,59	42%	3,69	30%	4,80
	1,2	4,47	14%	5,09	15%	5,87
	1,3	5,87	16%	6,80	6%	7,23
3 dias	1,1	4,28	24%	5,31	2%	5,40
	1,2	5,66	33%	7,52	3%	7,77
	1,3	7,95	15%	9,14	13%	10,30
7 dias	1,1	4,73	40%	6,65	0%	6,64
	1,2	7,16	26%	9,00	-1%	8,93
	1,3	9,42	35%	12,70	7%	13,53
		Média	27%	Média	8%	

Para a observação do comportamento de ganho de resistência devido a variável cal de carbureto, foi introduzida equação linear para a análise dos resultados (Figuras 23 a 25). Procedimento este, também utilizado por outros autores (Lopes Junior, 2007; Dalla Rosa, 2009; Silvani, 2013).

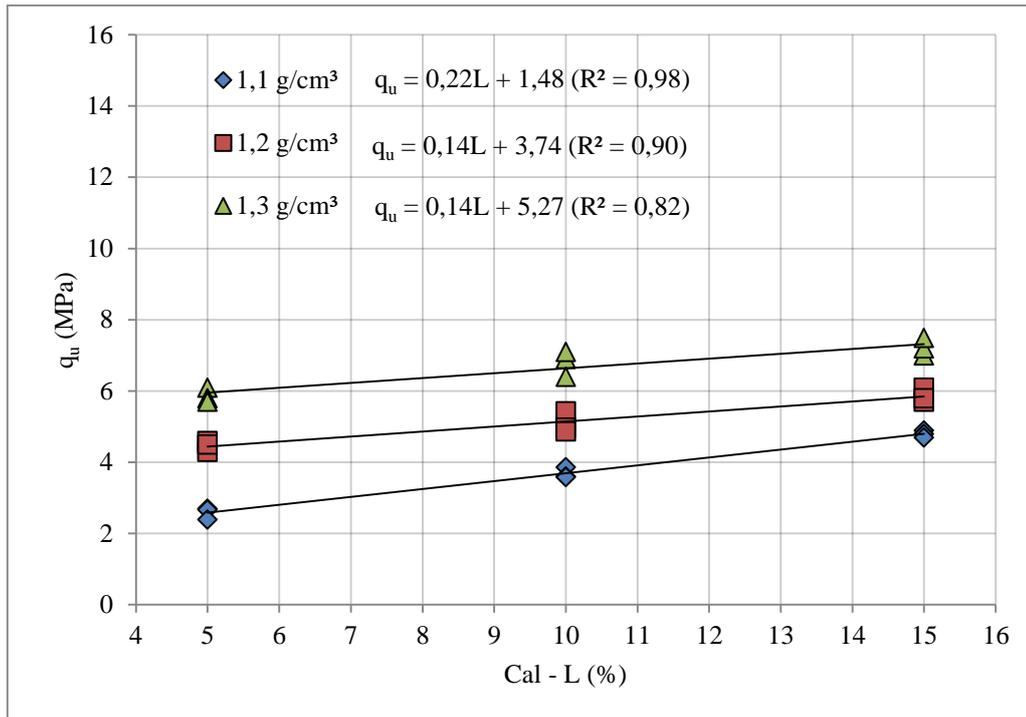


Figura 23- Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 1 dia a 80°C.

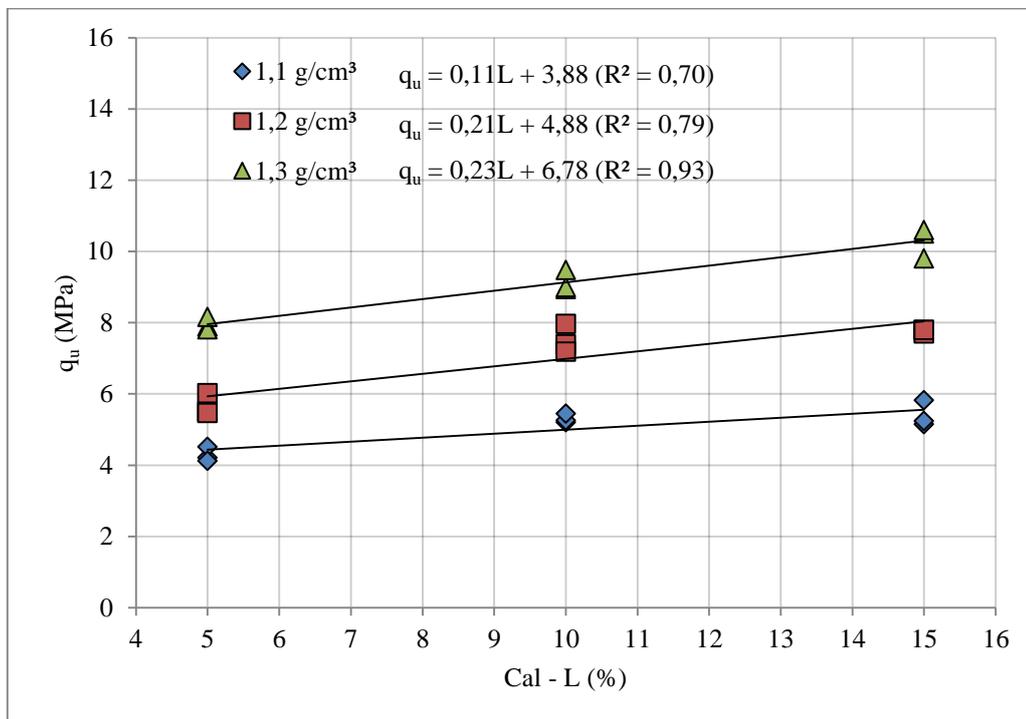


Figura 24 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 3 dias 80°C.

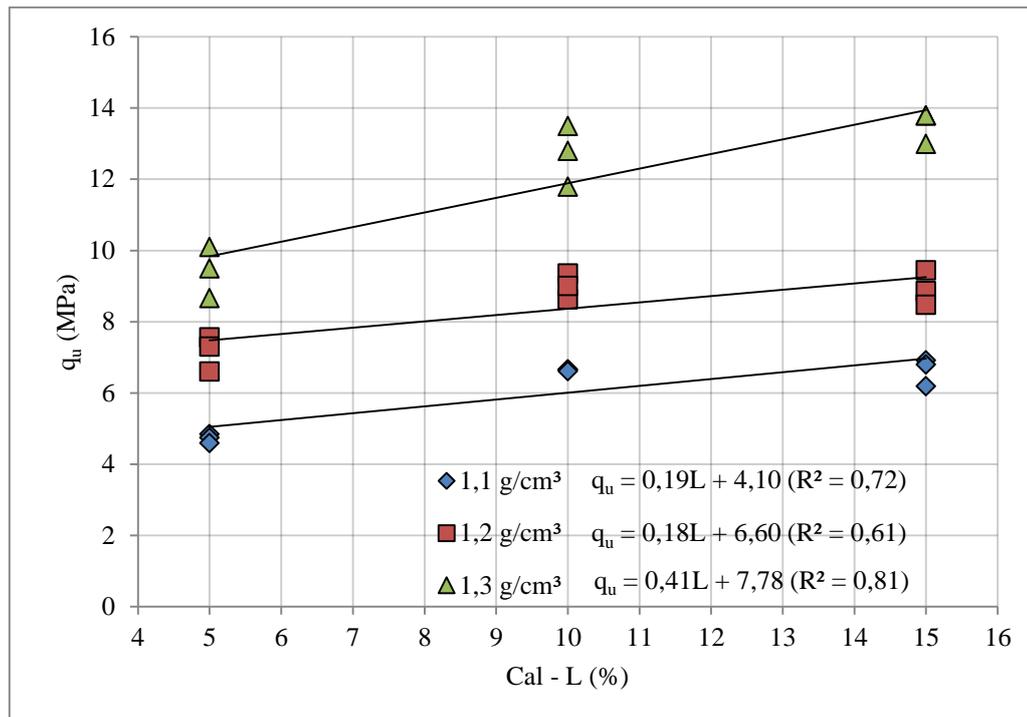


Figura 25 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 7 dias a 80°C.

De maneira geral, através da análise das equações geradas, a taxa de crescimento da resistência à compressão simples devido ao acréscimo de cal (representada pela inclinação da reta) aumenta conforme o aumento do período de cura. Assim, representando a potencialização das reações cimentantes frente à variável tempo. Por exemplo, na Figura 23 a inclinação da reta para amostras com 1,3 g/cm³ para 1 dia de cura é de 0,14L, enquanto que na Figura 25 para as amostras de mesmas características, entretanto para 7 dias de cura, temos o valor do coeficiente de inclinação igual a 0,41L. Portanto, a variável tempo de cura proporciona a geração de maior número de ligantes (conforme o aumento do tempo de cura) que conferem uma maior taxa de crescimento da resistência à compressão.

O mesmo, em geral, também ocorre quando aumenta a massa específica, indicando que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactas, devido ao maior número de contatos entre as partículas. Este fenômeno foi observado para misturas solo-cal também por Clough et al (1981), Núñez (1991), Lopes Junior (2007 e 2011) e Dalla Rosa (2009). As interações entre as variáveis serão abordadas no item 4.2 através de uma análise de variância.

Portanto, o aumento da velocidade das reações pozolânicas gerada pela alta temperatura (80°C) proporcionou um grande consumo de cal para o processo de cimentação o que gerou

altas resistências. Sendo apresentado para os períodos de cura estudados uma média de ganho de 27% no incremento de 5% para 10% de cal e 8% de ganho no aumento de 10% para 15% de cal (Tabela 10).

4.1.1.2 Amostras curadas a 60°C em câmara de vapor

Para as amostras curadas a 60°C em câmara de vapor foi adotado o mesmo procedimento para a verificação da influência da cal na resistência à compressão simples do material estabilizado, os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 25 a 27 e Tabela 11.

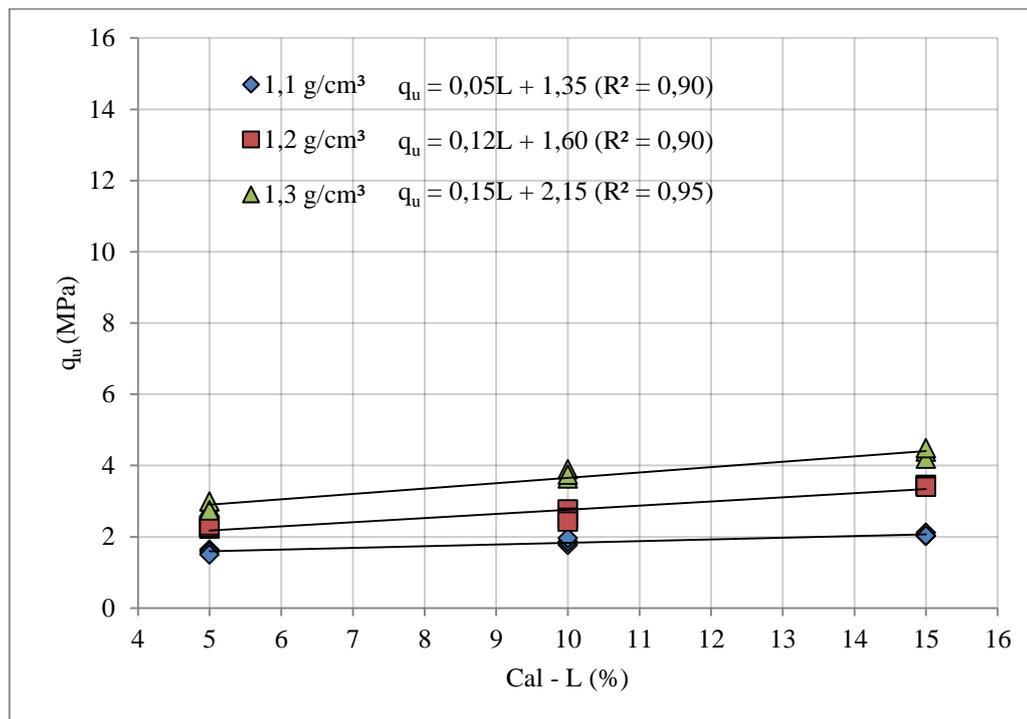


Figura 26 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 1 dia a 60°C.

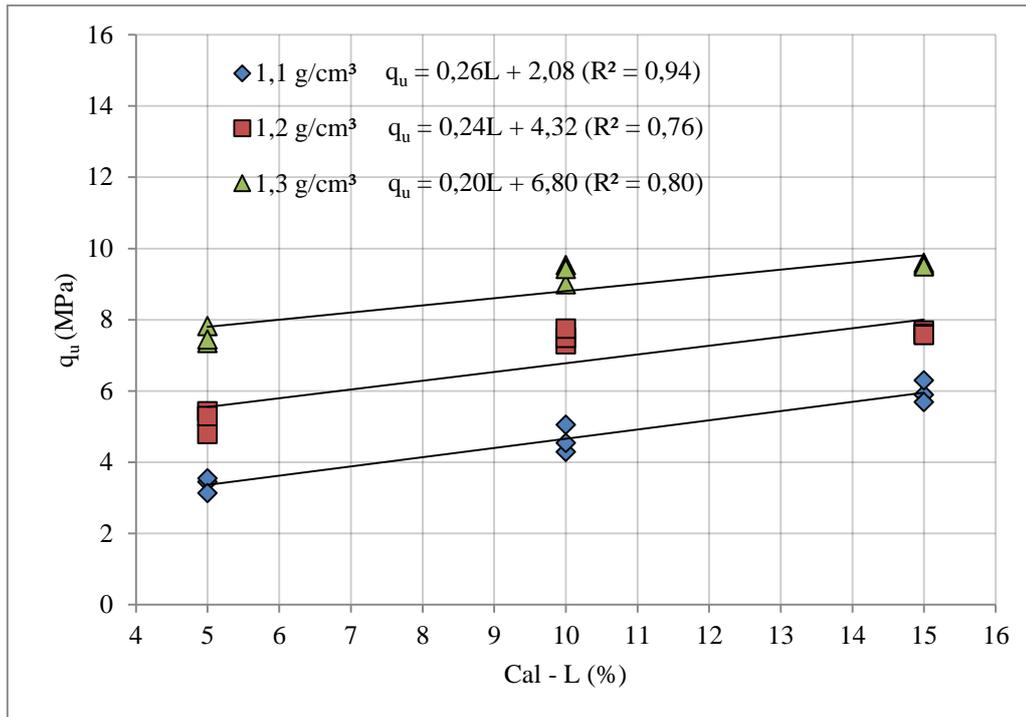


Figura 27 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 3 dias a 60°C.

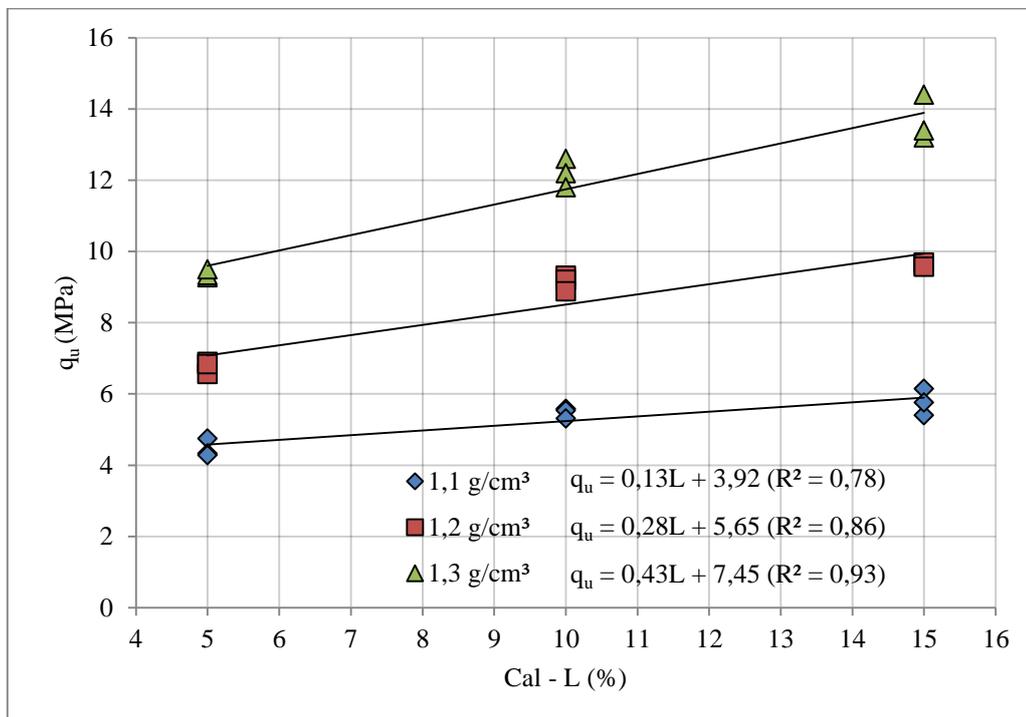


Figura 28 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 7 dias a 60°C.

Tabela 11 – Resistência à compressão simples média e ganho de resistência para variação de cal para cura a 60°C.

Tempo de cura	Massa Específica (g/cm ³)	RCS – 5% de Cal (MPa)	Ganho de resistência	RCS – 10% de Cal (MPa)	Ganho de resistência	RCS – 15% de Cal (MPa)
1 dia	1,1	1,57	18%	1,86	10%	2,05
	1,2	2,27	14%	2,58	33%	3,43
	1,3	2,85	32%	3,76	16%	4,36
3 dias	1,1	3,38	37%	4,64	29%	5,96
	1,2	5,18	45%	7,53	1%	7,63
	1,3	7,54	24%	9,32	2%	9,55
7 dias	1,1	4,45	23%	5,48	5%	5,77
	1,2	6,77	35%	9,13	5%	9,62
	1,3	9,37	30%	12,20	12%	13,67
		Média	29%	Média	13%	

Assim, como observado nos resultados de cura a 80°C, de modo geral, a taxa de crescimento de resistência frente a variável cal de carbureto (L) foi incrementada conforme o aumento do período de cura e massa específica.

Em média o ganho com adição de 5% para 10% de cal foi de 29% na resistência à compressão simples e de 10% para 15% de cal o ganho foi de 13%. Para as amostras curadas a 60°C foi observado ganho maior entre as porcentagens maiores de cal do que as encontradas para 80°C. Podendo estar atribuído ao fato de que a variável teor de cal (L) possui interações com as demais variáveis que podem atenuar ou potencializar a influência da quantidade de cal na resistência à compressão. Com relação à variação da temperatura entre 80°C e 60°C não foi possível visualizar diferenças acentuadas entre as taxas de ganho.

4.1.1.3 Amostras curadas a 40°C em câmara de vapor

Os resultados obtidos para as amostras curadas em vapor a 40°C estão representados nas Figuras 29 a 31 e Tabela 12. Como nos itens anteriores, as retas possuem a mesma massa específica (γ) para uma mesma umidade (18%), onde apenas a porcentagem de cal é variada.

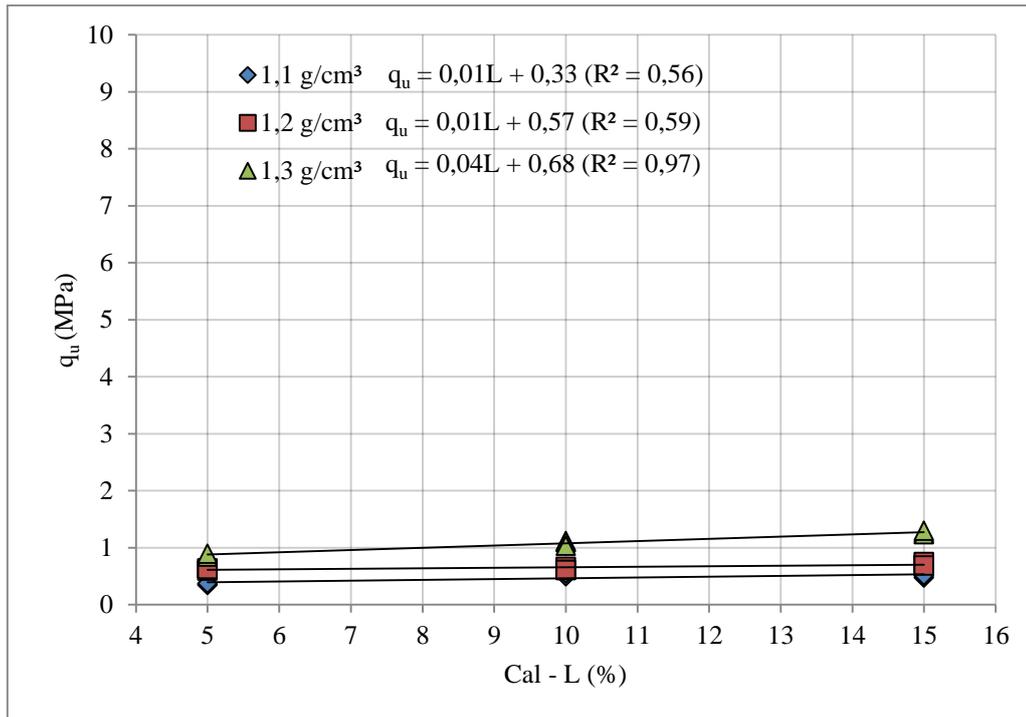


Figura 29 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 1 dia a 40°C.

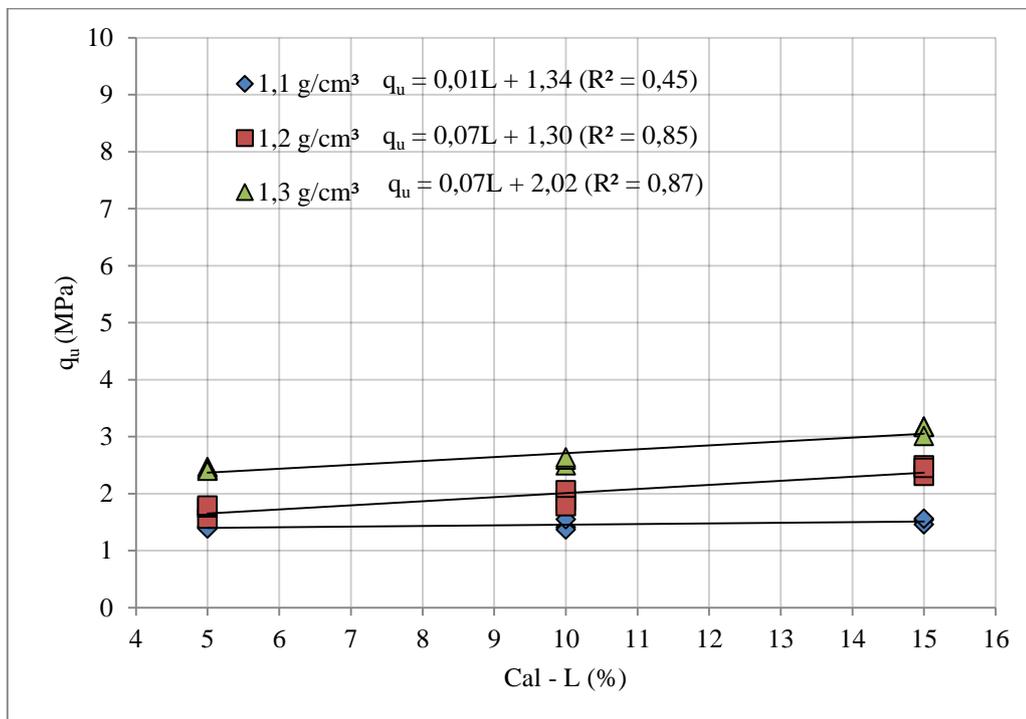


Figura 30 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 3 dias a 40°C

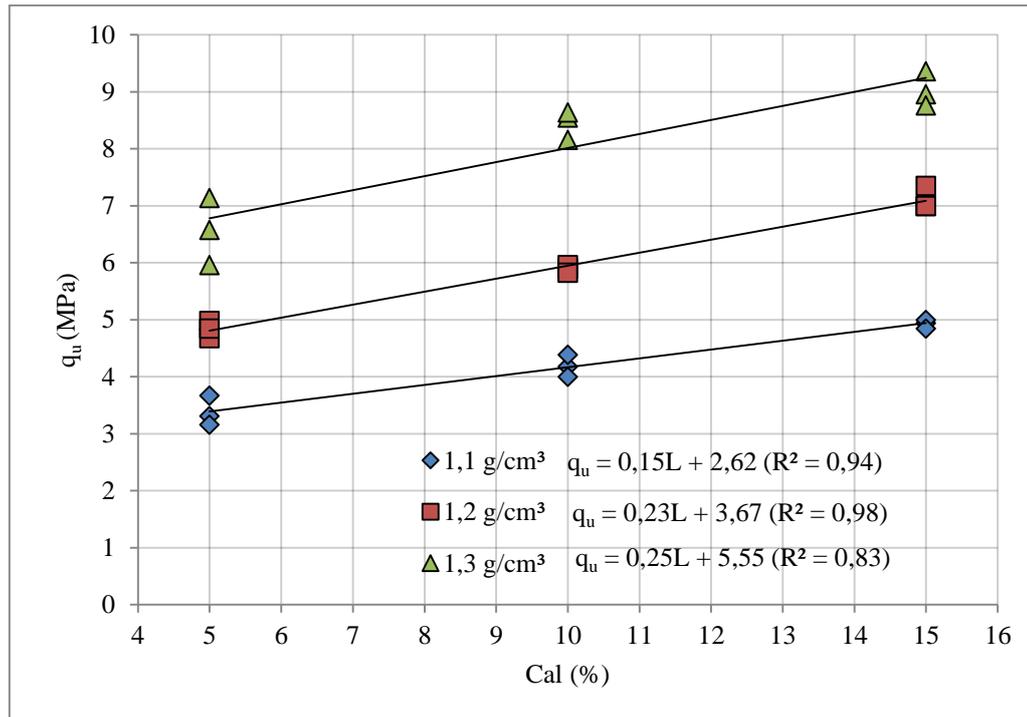


Figura 31 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 7 dias a 40°C.

Tabela 12 – Resistência à compressão simples média e ganho de resistência para variação de cal para cura a 40°C.

Tempo de cura	Massa Específica (g/cm³)	RCS – 5% de Cal (MPa)	Ganho de resistência	RCS – 10% de Cal (MPa)	Ganho de resistência	RCS – 15% de Cal (MPa)
1 dia	1,1	0,36	47%	0,53	-6%	0,50
	1,2	0,62	1%	0,63	13%	0,71
	1,3	0,88	24%	1,09	17%	1,27
3 dias	1,1	1,40	3%	1,44	5%	1,52
	1,2	1,70	12%	1,91	27%	2,42
	1,3	2,43	6%	2,58	21%	3,12
7 dias	1,1	3,38	24%	4,19	18%	4,93
	1,2	4,84	22%	5,90	21%	7,12
	1,3	6,56	29%	8,45	7%	9,03
		Média	19%	Média	14%	

Para temperatura de 40°C foi observado ganho médio de resistência na adição de 10% para 15% de cal mais próxima do ganho obtido de 5% para 10% de cal de modo geral para todos os períodos de cura. Isto difere dos resultados de amostras curadas a 60°C e 80°C, onde para períodos de cura de 3 e 7 dias os ganhos com adição de 15% de cal não foram tão

pronunciados em relação a 10% de cal. Portanto, os efeitos no ganho de resistência frente à variação de 10% para 15% de cal está intimamente correlacionada com a temperatura e tempo de cura.

Para o período de cura de 1 e 3 dias a linearidade apresentou-se praticamente como uma função constante (Figuras 29 e 30). Podendo ser atribuída ao fato de ser um período de cura e temperatura exíguo para o aparecimento de uma cimentação mais resistente na mistura.

Assim como nos itens anteriores, a inclinação da reta que representa a taxa de ganho de resistência apresentou tendência de aumento conforme o incremento do período de cura e massa específica da mistura.

Diferente do encontrado entre 60°C e 80°C, a taxa de ganho, representada pela inclinação da reta, para as amostras curadas a 40°C possuem menor taxa de crescimento em comparação as amostras curadas em maiores temperaturas (60°C e 80°C) para todos os períodos de cura. Por exemplo, as amostras com mesma massa específica aparente (1,2 g/cm³) curadas por 3 dias a 40°C (Figura 30) possuem taxa de ganho de 0,07L, enquanto que curadas a 80°C (Figura 24) apresenta o valor 0,21L. Portanto, a falta de paralelismo entre as retas comparadas representam que a variável temperatura potencializa as reações pozolânicas, assim aumentando a taxa de ganho do efeito da cal na resistência à compressão simples.

4.1.1.4 Amostras curadas a 23°C sem cura a vapor.

As amostras curadas em 23°C sem cura a vapor para o período proposto de 3 dias com a massa específica de 1,1 g/cm³ e 1,2 g/cm³ não resistiram ao processo de imersão por 24h. Das três massas específicas estudadas (1,1 g/cm³, 1,2 g/cm³ e 1,3 g/cm³) apenas as amostras de 1,3 g/cm³ não se desmancharam no processo de imersão. Portanto, para os corpos-de-prova de maior porosidade (menor peso específico) para o período de 3 dias de cura o processo de cimentação não foi possível gerar resistência suficiente para a realização dos ensaios de compressão simples. Os corpos-de-prova que se mantiveram resistentes à imersão se devem ao fato de um maior contato entre a cinza volante e a cal de carbureto nos corpos-de-prova de menor porosidade. Esta maior proximidade entre as partículas proporcionou cimentação suficiente para a realização da imersão e ensaios de compressão simples para o mesmo período de cura dos corpos-de-prova que se dissolveram. Sendo assim, nas figuras subsequentes (Figuras 32 a 34) serão apresentados os resultados obtidos para cura em 23°C para a variação de cal proposta.

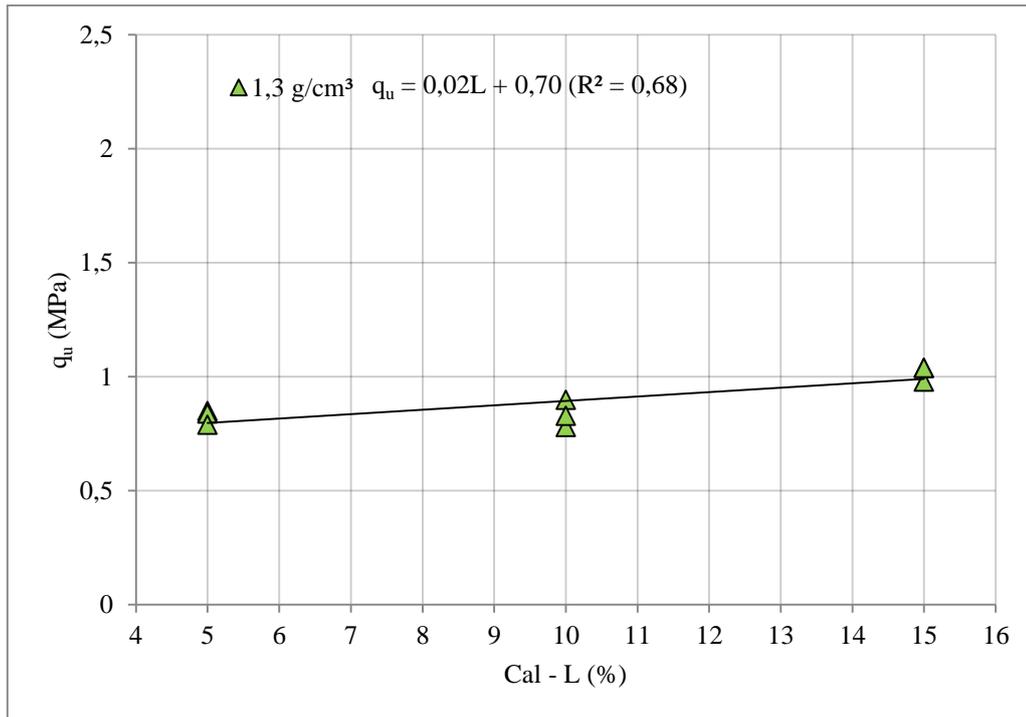


Figura 32 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 3 dias a 23°C.

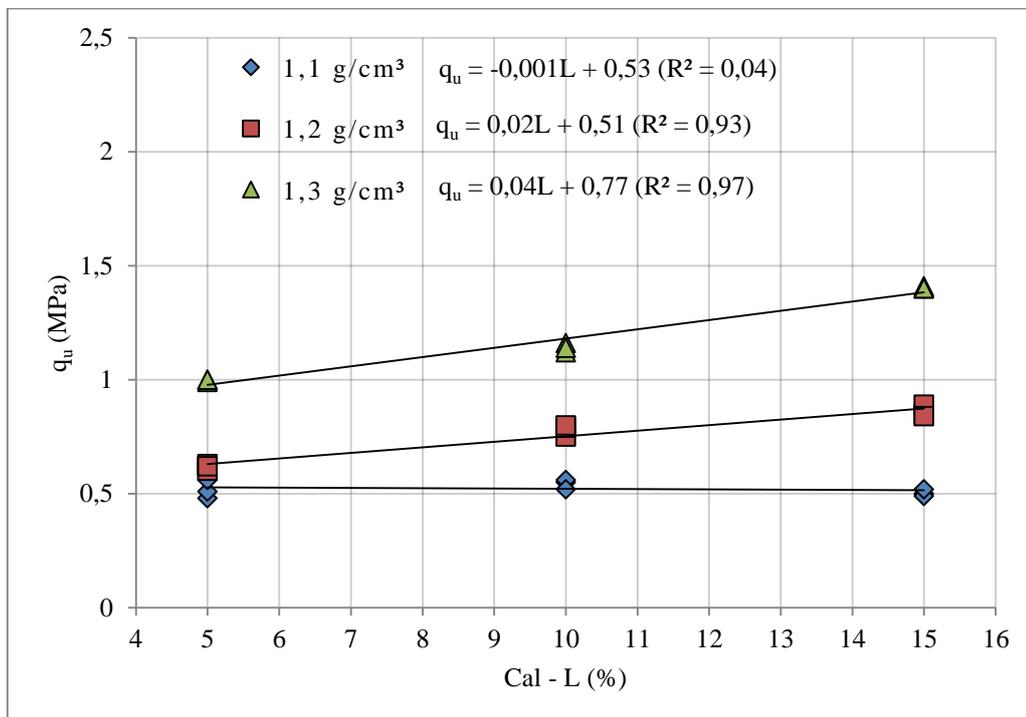


Figura 33 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 7 dias a 23°C.

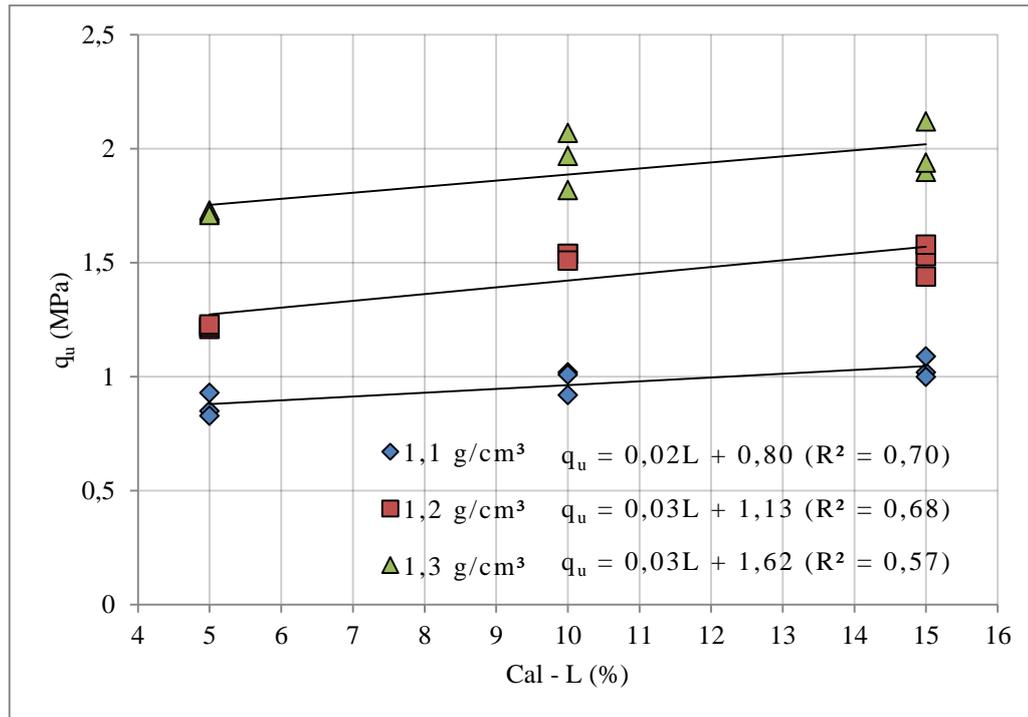


Figura 34 – Ajuste de reta na variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal curados por 14 dias a 23°C.

Na Tabela 13 são apresentados os resultados de ganho de resistência conforme a variação do teor de cal na mistura.

Tabela 13 – Resistência à compressão simples média e ganho de resistência para variação de cal em cura a 23°C.

Tempo de cura	Massa Específica (g/cm³)	RCS – 5% de Cal (MPa)	Ganho de resistência	RCS – 10% de Cal (MPa)	Ganho de resistência	RCS – 15% de Cal (MPa)
3 Dias	1,3	0,83	1%	0,84	22%	1,02
7 Dias	1,1	0,52	5%	0,54	-7%	0,50
	1,2	0,62	26%	0,78	10%	0,86
	1,3	1,00	14%	1,14	23%	1,40
14 Dias	1,1	0,87	13%	0,98	5%	1,04
	1,2	1,22	25%	1,53	-1%	1,52
	1,3	1,72	14%	1,95	2%	1,99
		Média	14%	Média	7%	

Conforme a Tabela 13, verifica-se que a adição de 10% de cal proporcionou maior incremento médio na resistência à compressão simples. Entretanto, entretanto para 15% de cal – assim

como em resultados anteriores – não obteve ganho em todos os períodos de cura, sendo mais pronunciados para curas por sete dias e maiores massas específicas (1,2 e 1,3 g/cm³). Em média o ganho na adição de 5% para 10% de cal foi de 14% no ganho de resistência a compressão simples e de 7% para a variação de 10% para 15% de cal de carbureto

Para todas as temperaturas estudadas, o incremento proporcionado pela adição de 15% de cal, em detrimento a 10% de cal, não foi constante para todos os resultados observados. Portanto, esta porção pode representar o limite de ganho de resistência possível através da adição de cal para os períodos de cura e temperaturas estabelecidos nesta pesquisa.

De modo geral, a média de taxa de ganho de resistência, representada pela inclinação das retas ajustadas aos resultados obtidos para a variação de cal, aumentou conforme o aumento do período de cura e aumento da massa específica das amostras estudadas. Com relação à temperatura foi possível verificar o aumento da taxa de ganho devido ao aumento desta variável, assim como observado para as amostras curadas a 40°C. A falta de paralelismo das retas obtidas na avaliação dos efeitos da cal representa a interação entre as variáveis estudadas.

4.1.2 Efeito da Porosidade

4.1.2.1 Amostras curadas a 80°C em câmara de vapor

Nas Figuras 35 a 37, são apresentadas as variações da resistência à compressão simples em função da porosidade (η) da cinza-cal compactada para corpos-de-prova ensaiados com 1, 3 e 7 dias de cura, respectivamente.

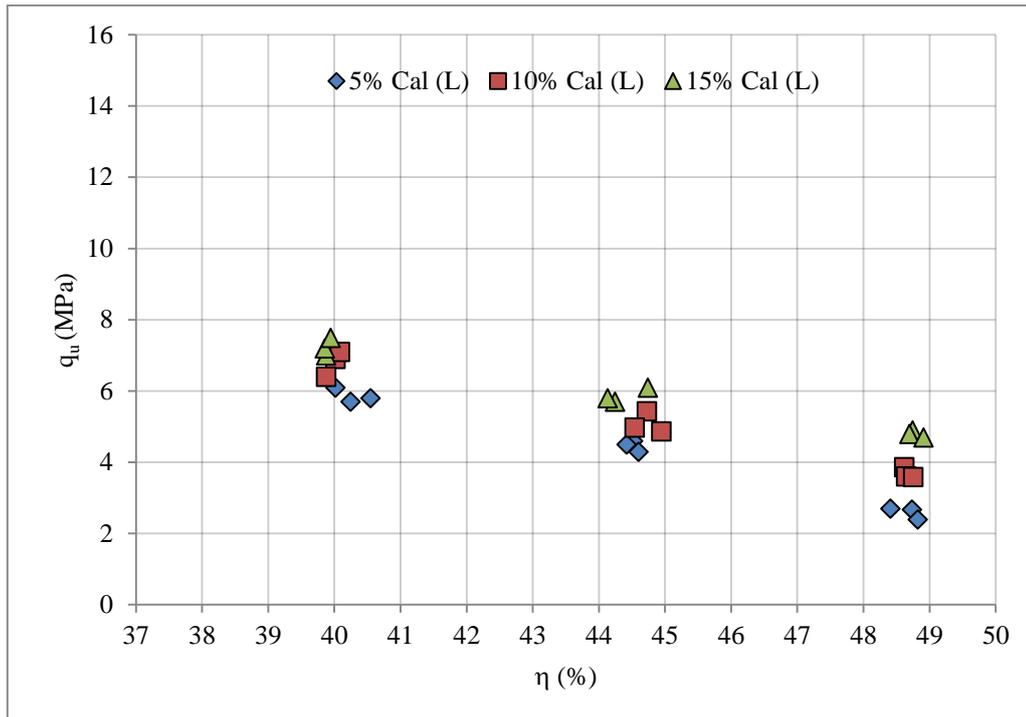


Figura 35 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 1 dia de cura e 80°C.

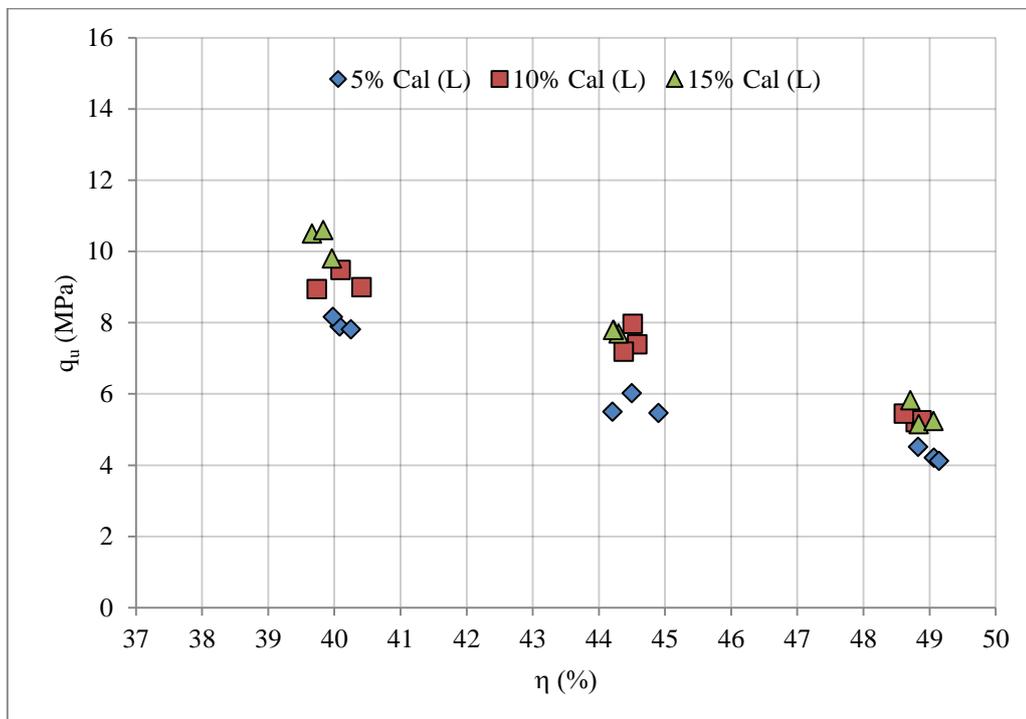


Figura 36 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 3 dias de cura e 80°C.

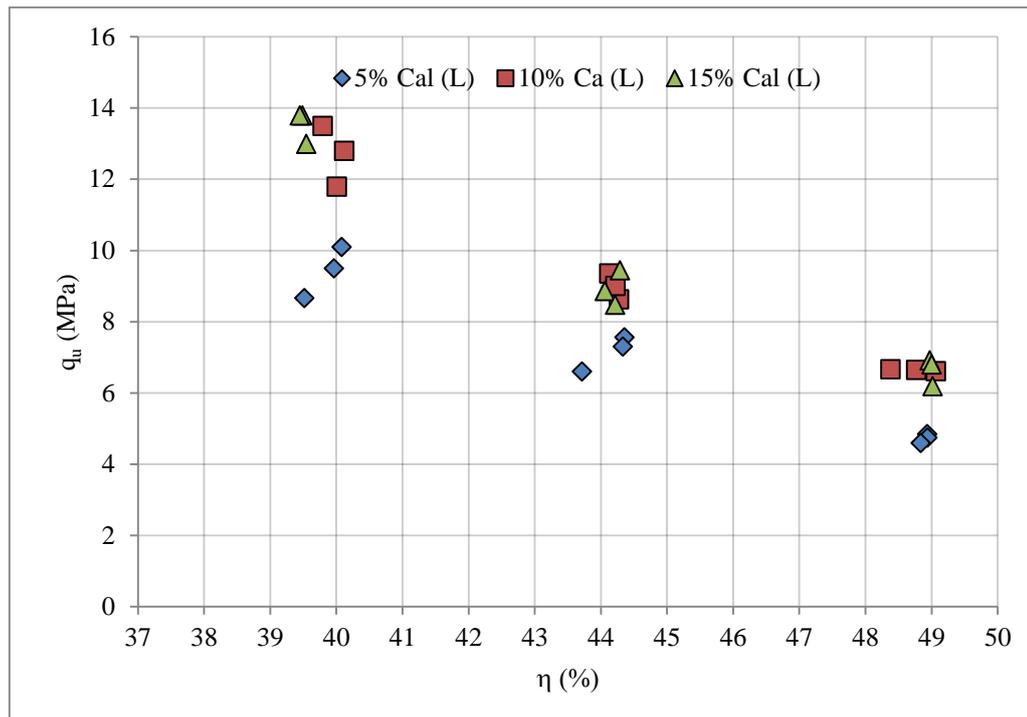


Figura 37 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 7 dias de cura e 80°C.

Observa-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a resistência a compressão simples da mistura cinza-cal. A redução na porosidade do material promove ganhos de resistência. Em média a redução de 9 pontos percentuais na porosidade proporciona o aumento de 1,8, 1,8 e 2,0 vezes na resistência à compressão simples da cinza-cal testado para 1, 3 e 7 dias de cura, respectivamente.

Os resultados obtidos corroboram com estudo realizado por Lopes Junior (2007), que 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. Trabalho realizado por Chang e Woods (1992) para mistura de areia e cimento verificou através de microscopia eletrônica que menores porosidades proporcionavam maior efetividade nas ligações entre as partículas.

Nas Figuras subsequentes (Figuras 38 a 40) são apresentadas retas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade da cinza-cal, por melhor

representarem o comportamento da porosidade frente à resistência à compressão simples para os resultados obtidos no presente trabalho. Trabalhos anteriores observaram um crescimento exponencial para a redução da porosidade, entretanto os mesmos possuíam uma maior número de níveis da variável porosidade (Felt, 1955 apud Foppa, 2005; Foppa, 2005; Consoli *et al.*, 2011; Lopes Junior, 2007).

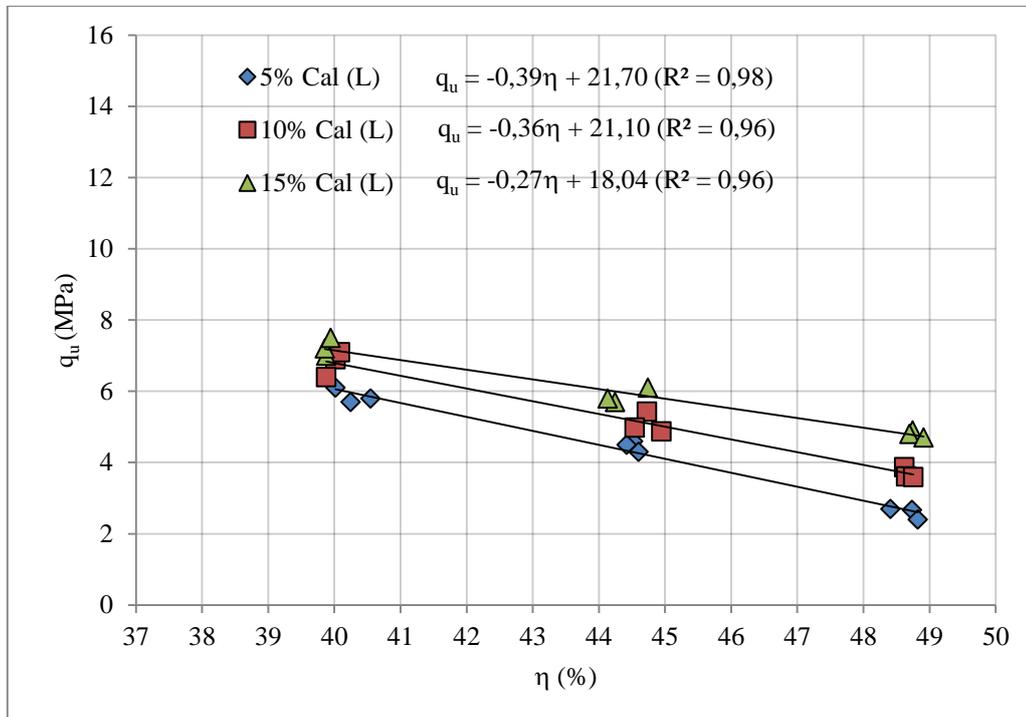


Figura 38 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 1 dia de cura e 80°C.

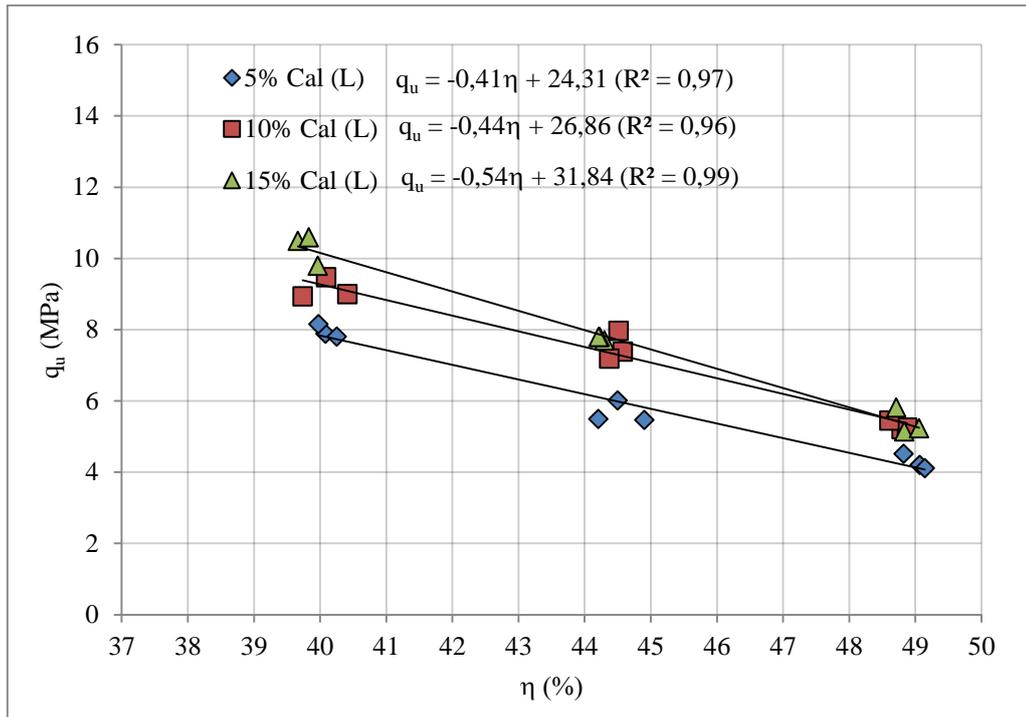


Figura 39 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 3 dias de cura e 80°C.

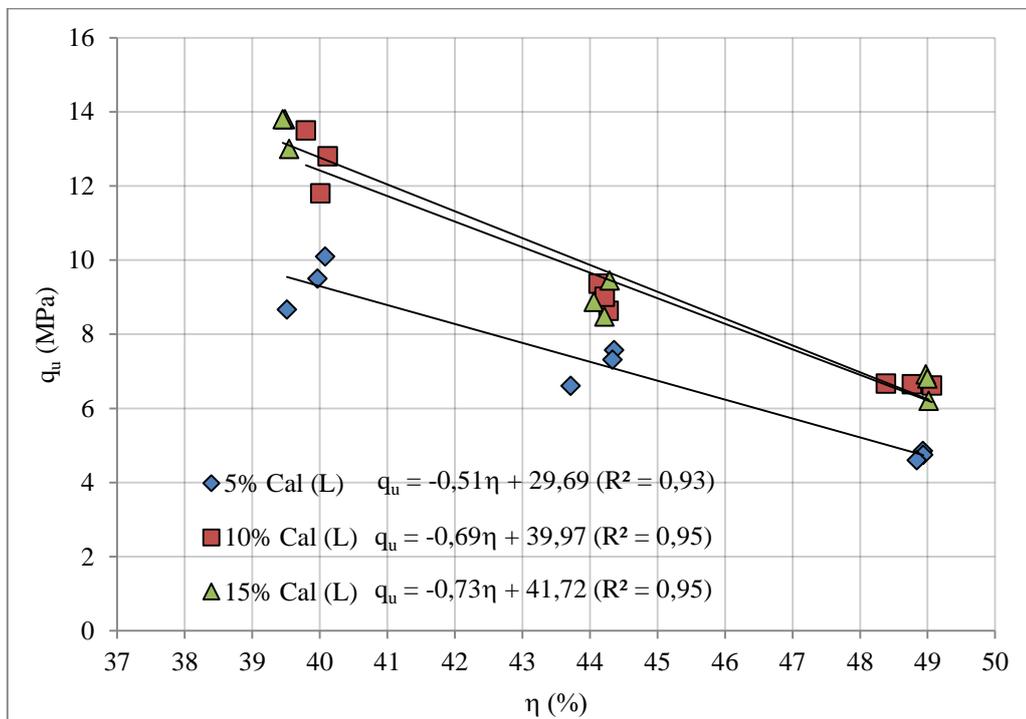


Figura 40 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 7 dias de cura e 80°C.

Assim, de modo geral, é possível verificar que a taxa de ganho, representada pela inclinação da reta, aumenta conforme o aumento da porcentagem de cal, este comportamento ocorre devido a uma maior porção de ligantes cimentantes proporcionada por maiores porcentagem de cal na mistura. O tempo de cura, também, gerou o incremento da taxa de ganho conforme o aumento do período de cura, sendo atribuído ao fato de possibilitar a geração de ligantes mais fortes no processo de cimentação pozolânica.

4.1.2.2 Amostras curadas a 60°C em câmara de vapor

Nas Figuras 41 a 43, são apresentadas as variações da resistência à compressão simples em função da porosidade (η) da cinza-cal compactada para corpos-de-prova ensaiados com 1, 3 e 7 dias de cura, respectivamente.

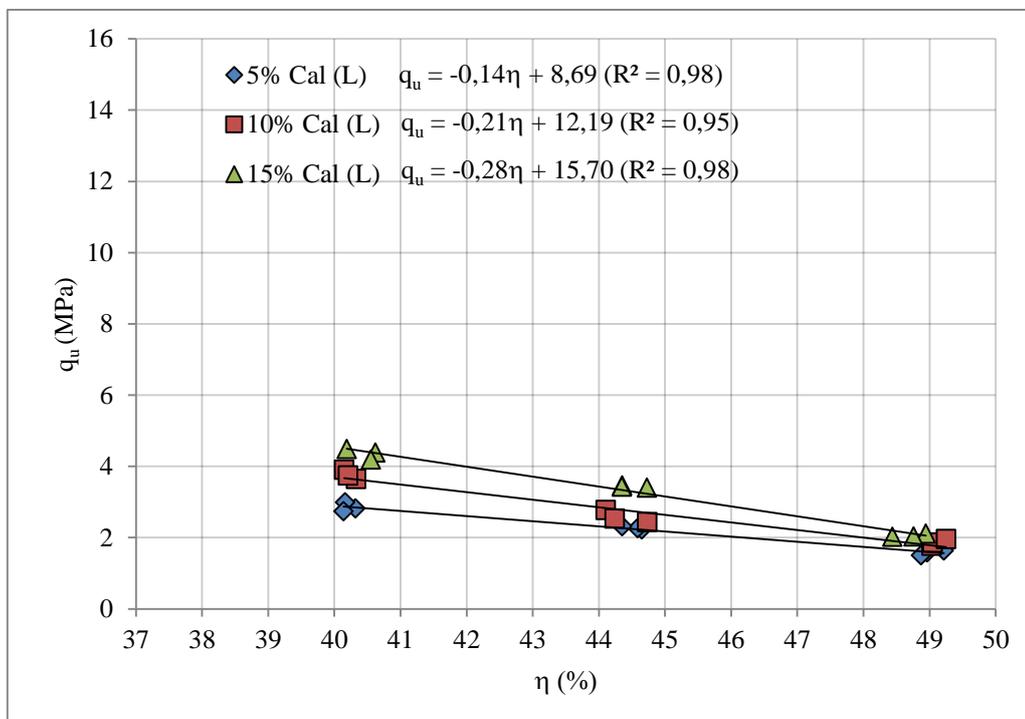


Figura 41- Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 1 dia de cura e 60°C.

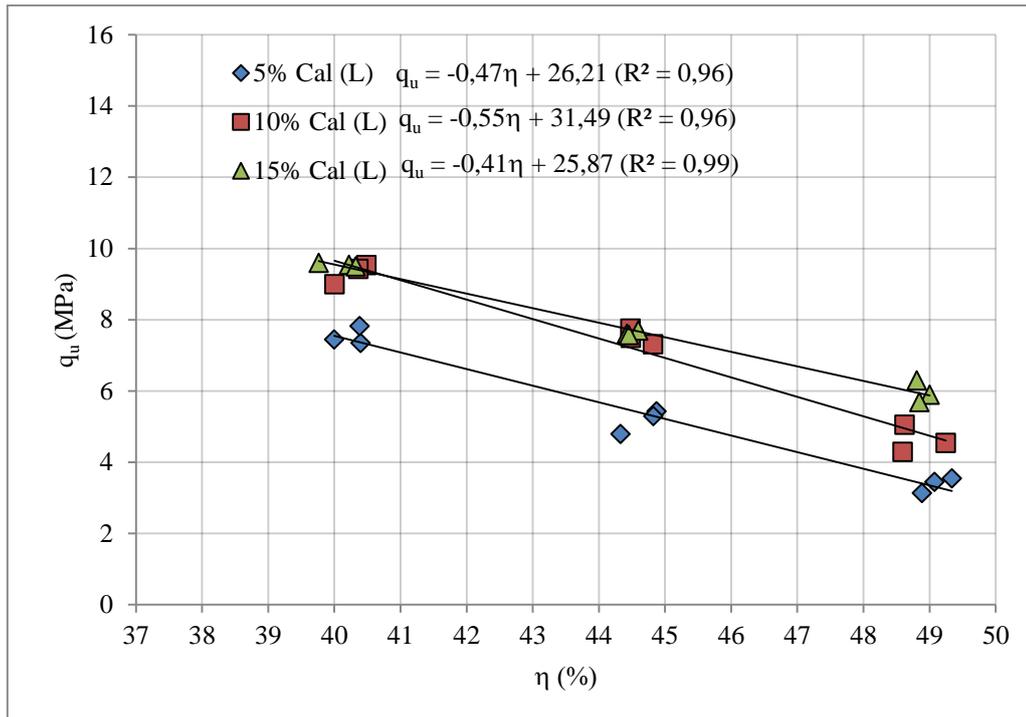


Figura 42 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 3 dias de cura e 60°C.

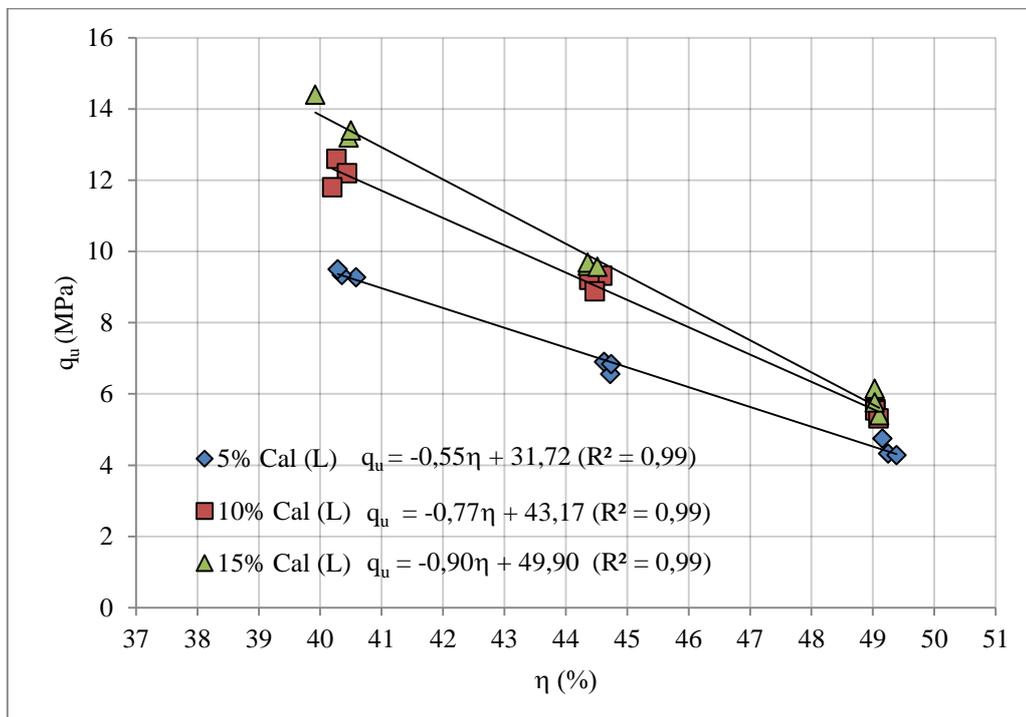


Figura 43 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 7 dias de cura e 60°C.

Assim como para as amostras curadas a 80°C, os resultados obtidos para a cura a 60°C também tiveram comportamento linear para a relação entre porosidade e resistência. Para uma mesma porcentagem de cal a variável porosidade proporcionou ganhos crescentes conforme a diminuição da mesma, em média os ganhos ficaram de 2 vezes, 1,9 vezes e 2,2 vezes para 1, 3 e 7 dias, respectivamente.

O mesmo comportamento de inclinação da reta foi observado para as amostras curadas a 60°C, em que o crescimento da taxa está correlacionado com a porcentagem de cal de carbureto e períodos de cura estudados. A comparação das taxas de ganho para a variação da temperatura entre 60°C e 80°C foi semelhante principalmente no comparativo entre os períodos de 3 e 7 dias de cura (Figura 42 e 43 com Figura 39 e 40). Portanto, o paralelismo entre as retas observadas representam a tendência de estagnação da interação entre a variável temperatura na variável porosidade.

4.1.2.3 Amostras curadas a 40°C em câmara de vapor

Nas Figuras 44 a 46, são apresentadas as variações da resistência à compressão simples em função da porosidade (η) da cinza-cal compactada para corpos-de-prova ensaiados com 1, 3 e 7 dias de cura a 40°C em câmara com aspersão de vapor, respectivamente. **A grandeza (escala) dos gráficos não foi mantida devido a grande variação de resistência para os períodos de 1 a 7 dias.**

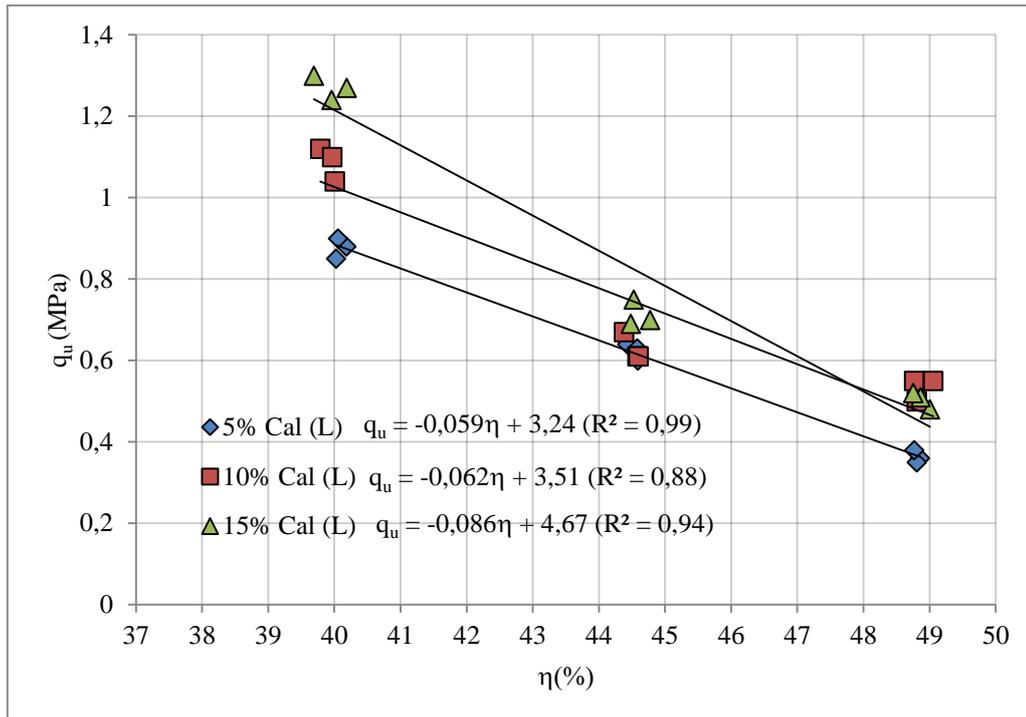


Figura 44 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 1 dia de cura e 40°C.

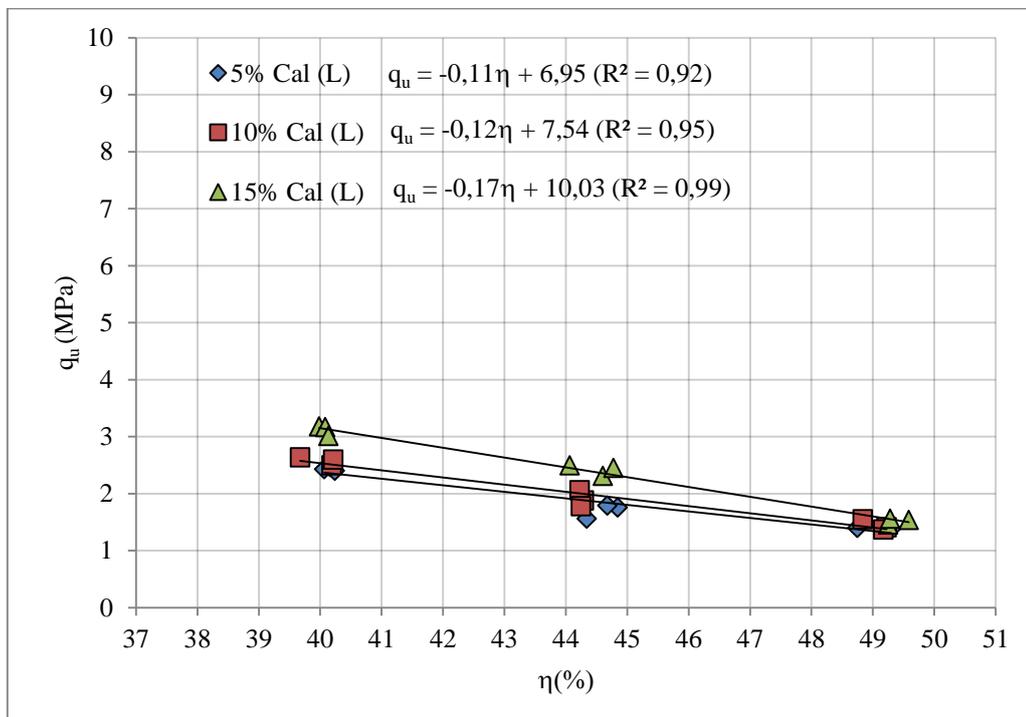


Figura 45 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 3 dias de cura e 40°C.

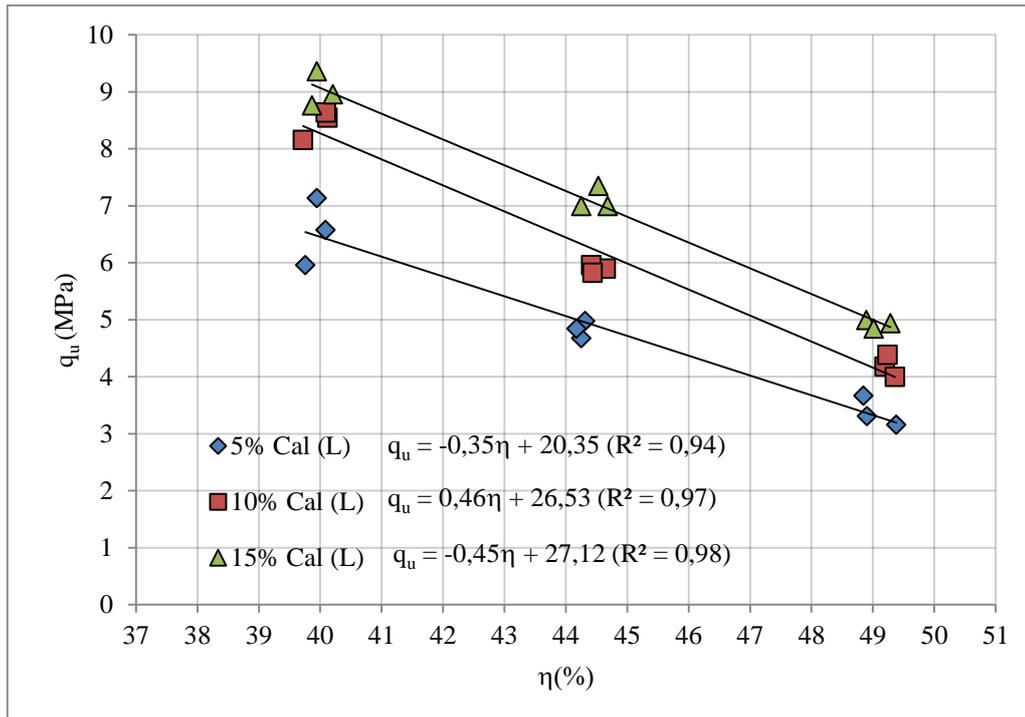


Figura 46 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 7 dias de cura e 40°C.

O padrão de comportamento para a variação da porosidade se mostrou também presente para as amostras curadas a 40°C, sendo possível a determinação de comportamento linear para todos os períodos de cura em porcentagens fixas de cal. Em média os ganhos proporcionados pela diminuição de 9 pontos percentuais na porosidade da mistura foram de 2,3 vezes, 1,9 vezes e 1,9 vezes para os períodos de 1, 3 e 7 dias, respectivamente.

A taxa de crescimento, representada pela inclinação da reta, também apresentou o mesmo comportamento para as temperaturas anteriores, onde o crescimento da mesma está correlacionado com o teor de cal e tempo de cura. Para 40°C a taxa de ganho foi menor do que observado pra 60°C e 80°C, portanto a variável temperatura possui interação com a variável porosidade. A falta de paralelismo entre as retas obtidas representa a interação entre as variáveis estudadas que serão discutidas na análise de variância no (Item 4.2).

4.1.2.4 Amostras curadas a 23°C sem cura a vapor

Para as amostras curadas pelo o período de 3 dias não foi possível a averiguação do efeito completo da porosidade na resistência à compressão devido a não cimentação dos corpos-de-prova com porosidades (η) maiores (44% e 49%). Entretanto, nas amostras de menor porosidade (η=40%) não ocorreu a dissolução em água, portanto o fato de existir cimentação

para amostras curadas por 3 dias com porosidade menores e não para maiores porosidade comprovam a efetividade das reações pozolânicas. Este comportamento ocorre devido ao maior contato entre a cinza volante e a cal de carbureto nas misturas mais compactadas.

Assim, como para temperaturas estudadas com cura em câmara de vapor, os resultados obtidos para a cura em 23°C sem vapor tiveram o mesmo comportamento linear para o ganho de resistência em relação à porosidade da mistura. Portanto, o comportamento da resistência à compressão frente à variação da porosidade foi a mesma para todas as temperaturas estudadas.

Nas Figuras 47 a 49, são apresentadas as variações da resistência à compressão simples em função da porosidade (η) da cinza-cal compactada para corpos-de-prova ensaiados com 7 e 14 dias de cura a 23°C em câmara com temperatura controlada sem vapor, respectivamente. Em média os ganhos proporcionados pela diminuição de 9 pontos percentuais na porosidade da mistura foram de 2,3 vezes e 2 vezes para os períodos de 7 e 14 dias, respectivamente.

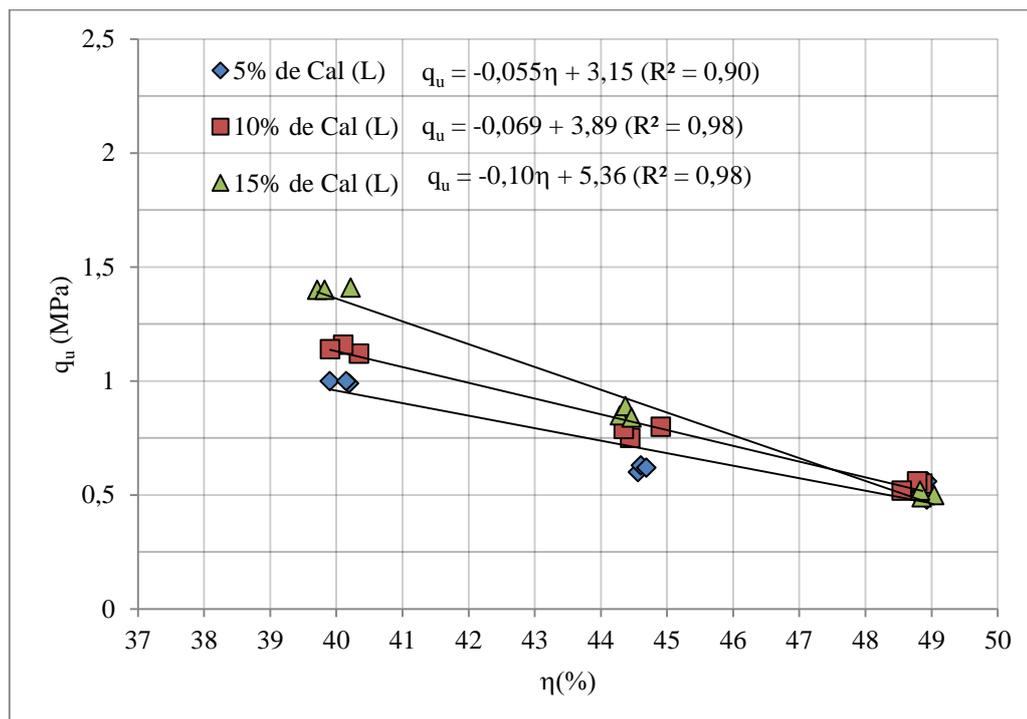


Figura 47 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 7 dias de cura e 23°C

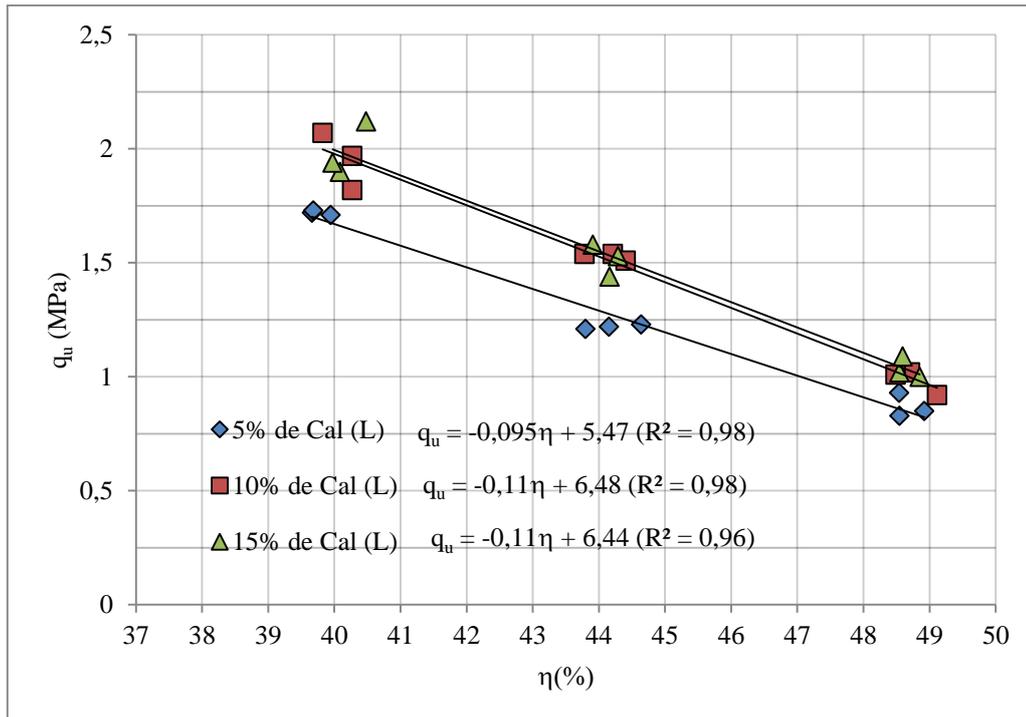


Figura 48 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras ensaiadas com 14 dias de cura e 23°C

A questão da taxa de ganho (inclinação da reta) se fez presente para os resultados das amostras curadas a 23°C, confirmando que o comportamento geral da variável porosidade corresponde ao aumento da resistência conforme a diminuição dos poros. A interação com as variáveis: teor de cal e período de cura, que determinam o incremento na taxa de ganho de resistência a compressão simples da mistura, também foram observadas. Portanto o comportamento para a cura a 23°C sem vapor em relação à cura acelerada em vapor foi semelhante em relação à variação da porosidade.

Em relação ao elemento temperatura, de maneira geral o comportamento da taxa de crescimento foi maior conforme o aumento da temperatura. Isto é, para maiores temperaturas maior o crescimento da resistência devido à aceleração das reações pozolânicas.

4.1.3 Efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal

4.1.3.1 Amostras curadas a 80°C

Nas Figuras 49 a 51 são apresentados os resultados das correlações entre a resistência à compressão simples e a razão da porosidade (η) pelo teor volumétrico de cal (L_v) para as amostra com 1, 3 e 7 dias de cura.

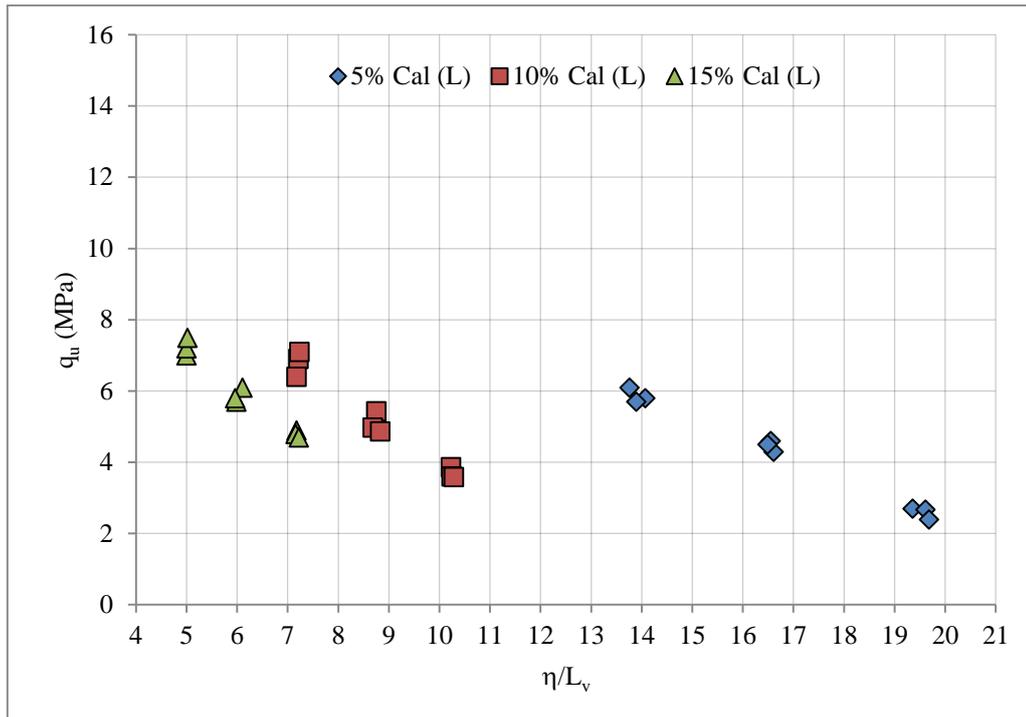


Figura 49 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 1 dia.

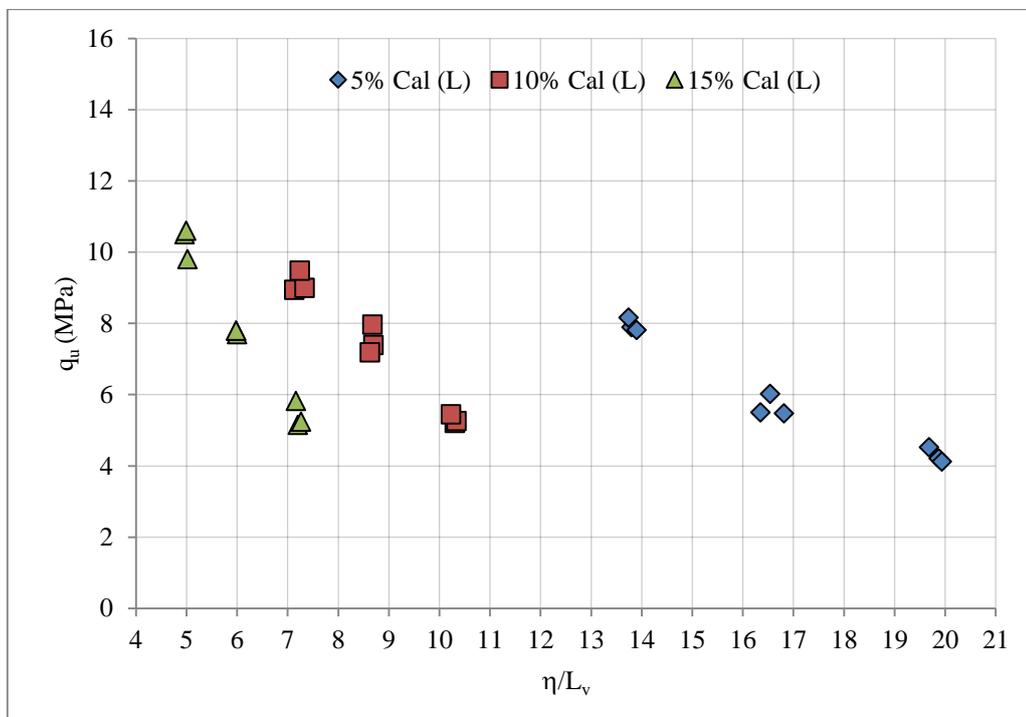


Figura 50 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 3 dias.

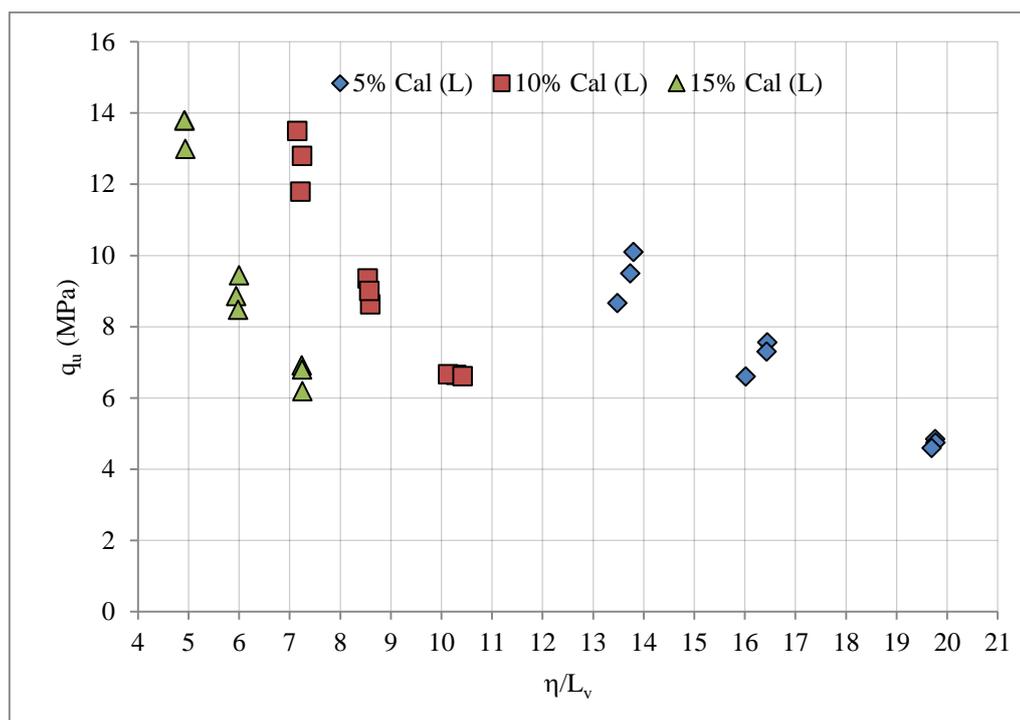


Figura 51 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 7 dias.

Pode-se observar que não existe uma correlação única entre as resistências obtidas e a relação porosidade/teor volumétrico de cal, entretanto o efeito da relação entre porosidade e teor volumétrico de cal pode ser explicado através de uma curva de tendência exponencial. Foppa (2005) verificou que a taxa de variação de resistência entre volume de vazios e a taxa de variação de resistência do inverso do volume de agente cimentante não possuem a mesma grandeza. Sendo assim, o mesmo autor promoveu a utilização de um expoente no volume de agente cimentante gerando uma curva ajustada que pode ser utilizada para a estimativa da resistência à compressão simples para solos artificialmente cimentados.

Lopes Junior (2007) em estudo com solo residual arenito Botucatu com resíduo de britagem e cal como agente cimentante e Dalla Rosa (2009) com o mesmo solo com adição de cinza volante e cal verificaram, assim como Foppa (2005), que a forma de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas é a utilização de um expoente sobre o teor volumétrico de agente cimentante. Foppa (2005), Lopes Junior, Dalla Rosa (2009) e Silvani (2013) encontraram expoentes de correção de 0,28, 0,06, 0,12 e 0,30 respectivamente para o teor volumétrico de agente cimentante. Este expoente varia em função dos materiais empregados na mistura.

Para a cinza volante e cal de carbureto utilizada na presente pesquisa o expoente de melhor ajuste foi o valor 0,11 no teor volumétrico de cal: $\eta/(L_v)^{0,11}$.

O expoente utilizado proporcionou um melhor ajuste entre ganho de resistência proveniente da diminuição da porosidade com o ganho proporcionado pelo teor volumétrico de cal de carbureto adicionado a mistura como mostrado nas figuras abaixo (Figuras 52 a 54).

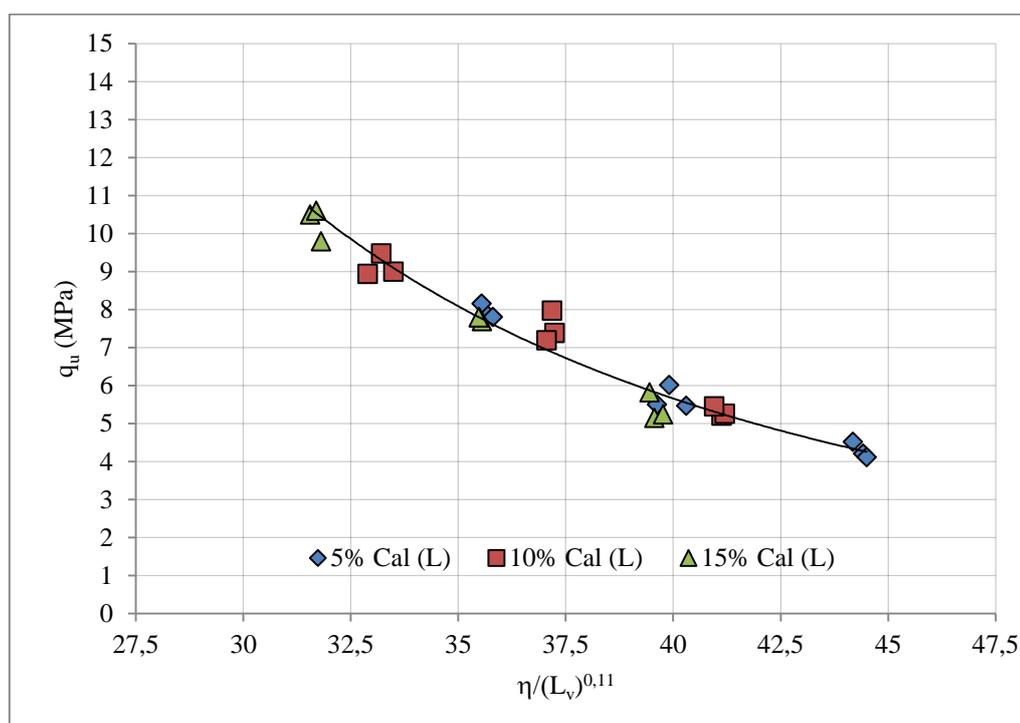


Figura 52 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 1 dia a 80°C.

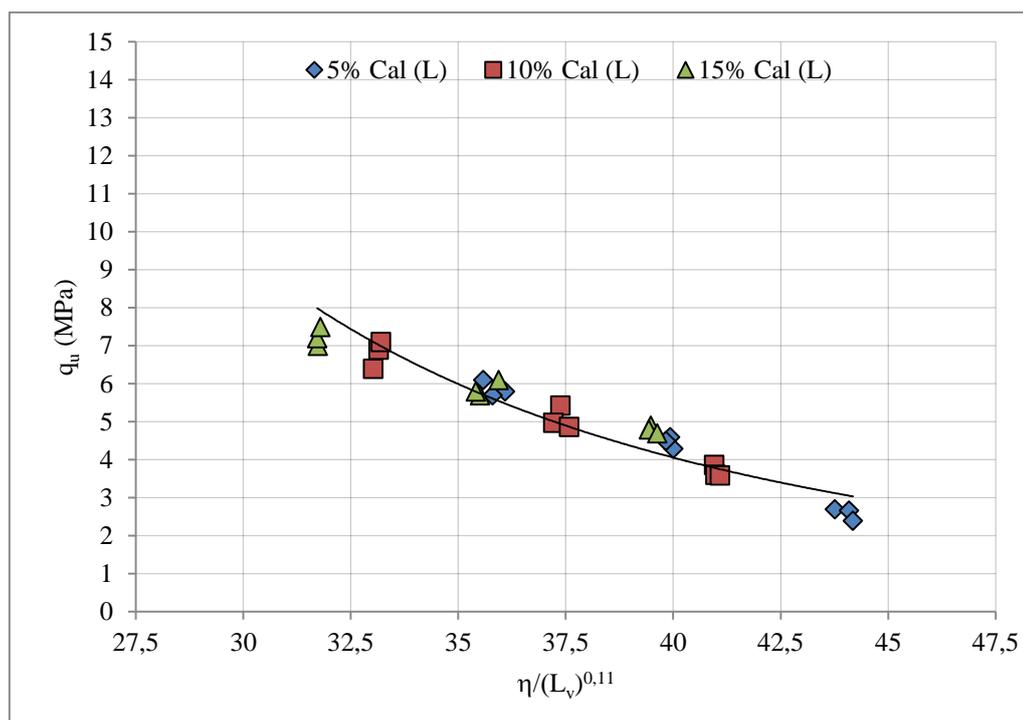


Figura 53 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 3 dias a 80°C.

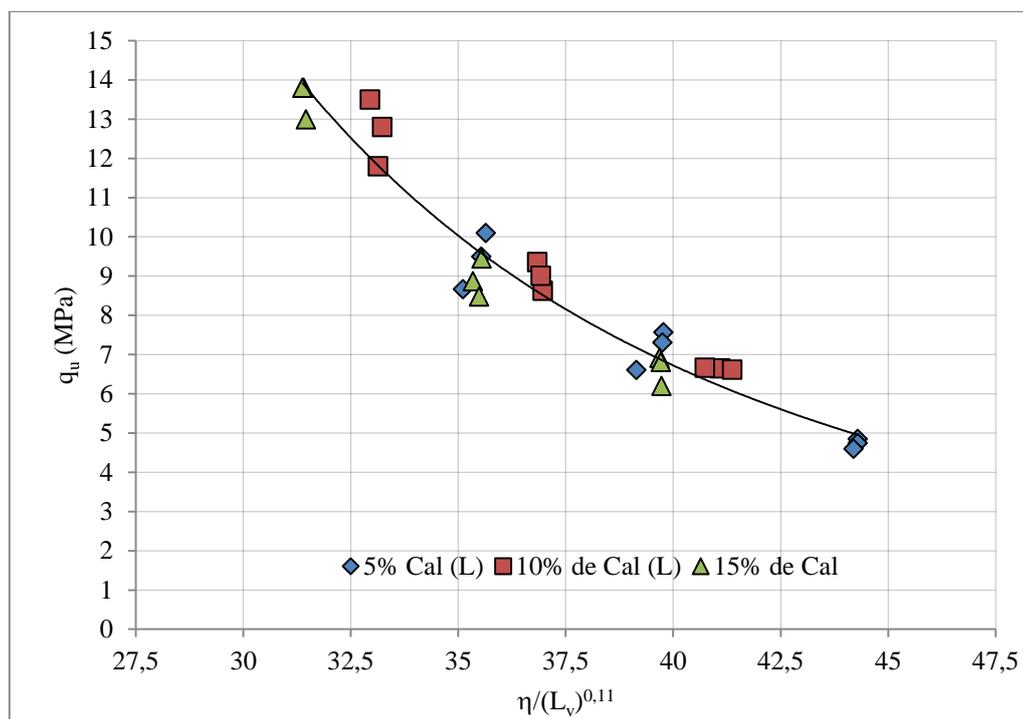


Figura 54 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 7 dias a 80°C.

O expoente de ajuste possibilitou a geração de gráficos (Figuras 55 a 57) em que são mostradas as equações das curvas geradas na relação porosidade/teor volumétrico de cal para

as amostras curadas a 80°C em câmara de vapor. Como para os autores supracitados a melhor curva de ajuste que gerou melhores coeficientes de correlação R^2 foi a curva tipo potência. Para uma melhor análise do comportamento da relação porosidade/ teor volumétrico foi utilizado um mesmo expoente (-2,97) para a curva potência utilizada ($[\eta/(L_v)^{0,11}]^{-2,97}$). Este expoente foi estabelecido de forma que pudesse ser formada equação única para a relação entre porosidade e teor volumétrico de cal com correlação (R^2) entre resultados amostrados e a equação potencial estabelecida ($[\eta/(L_v)^{0,11}]^{-2,97}$) maiores do que 0,9 para todos os períodos e temperaturas estudadas em que apenas o escalar da equação é alterado. As equações colocadas são válidas para a cinza volante e cal de carbureto com características físicas e químicas similares a do presente trabalho.

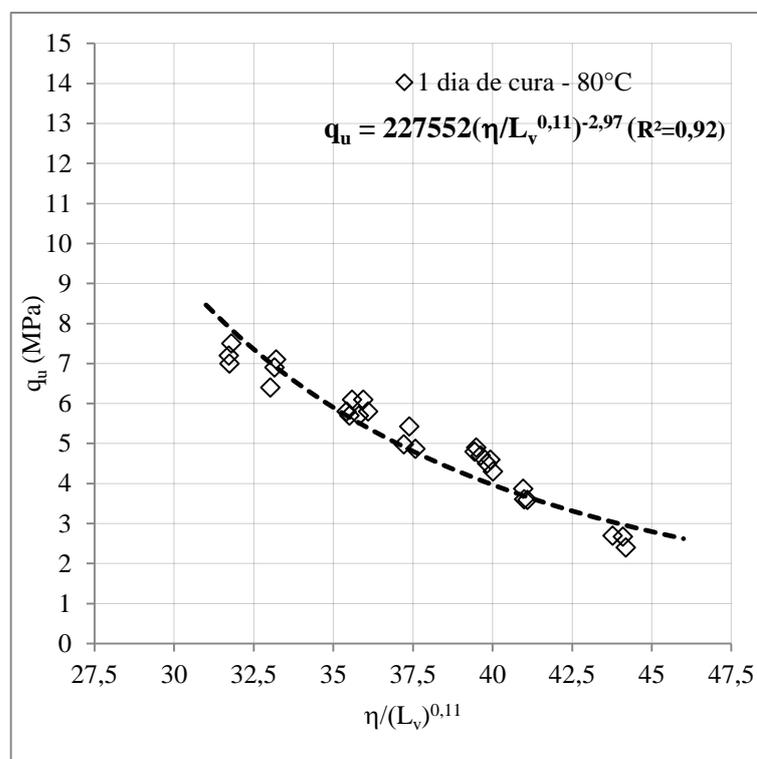


Figura 55- Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 1 dia de cura a 80°C.

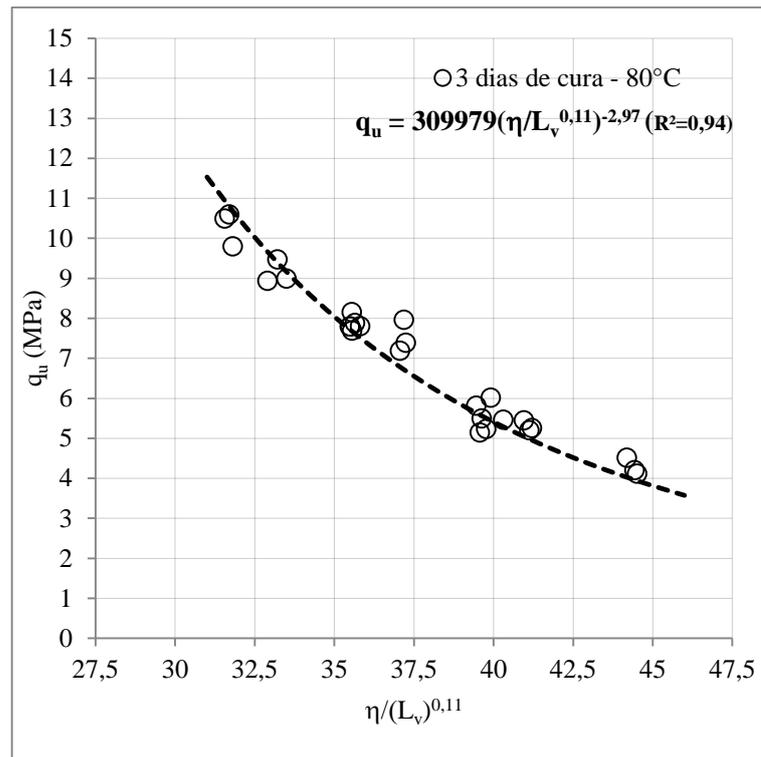


Figura 56- Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 3 dias de cura a 80°C.

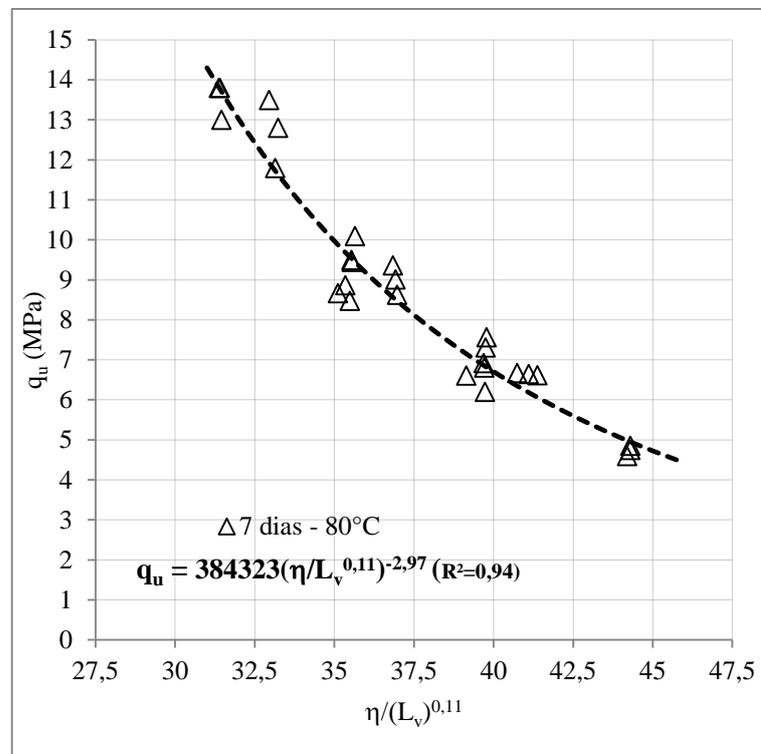


Figura 57- Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 7 dias de cura a 80°C.

Pode-se observar uma admissível correlação entre a porosidade/teor volumétrico de cal de carbureto ajustados $[\eta/(L_v)^{0,11}]$ e a resistência à compressão simples da mistura de cinza-cal estudada. Esta relação possibilitou a geração de equação única (Eq.15, 16 e 17) para a determinação da resistência das amostras curadas a 80°C, em que apenas o escalar da equação diferenciou os resultados observados para os diferentes períodos de cura. Portanto, definindo uma dosagem com determinada porosidade e determinado teor de cal é possível prever a resistência à compressão para a mistura entre cinza volante e cal de carbureto curada por 1, 3 e 7 dias a 80°C

As equações abaixo estão ordenadas para os períodos de cura de 1, 3 e 7 dias para 80°C, respectivamente:

$$q_u = 2,27 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \quad \text{Eq.(15)}$$

$$q_u = 3,10 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \quad \text{Eq.(16)}$$

$$q_u = 3,84 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \quad \text{Eq.(17)}$$

4.1.3.2 Amostras curadas a 60°C

Os resultados obtidos para as amostras curadas a 60°C em câmara de vapor também possibilitaram a averiguação de uma melhor distribuição da relação η/L_v (Figura 58 a 60) quando utilizado o coeficiente 0,11 como expoente para o teor volumétrico de cal (Figuras 61 a 63).

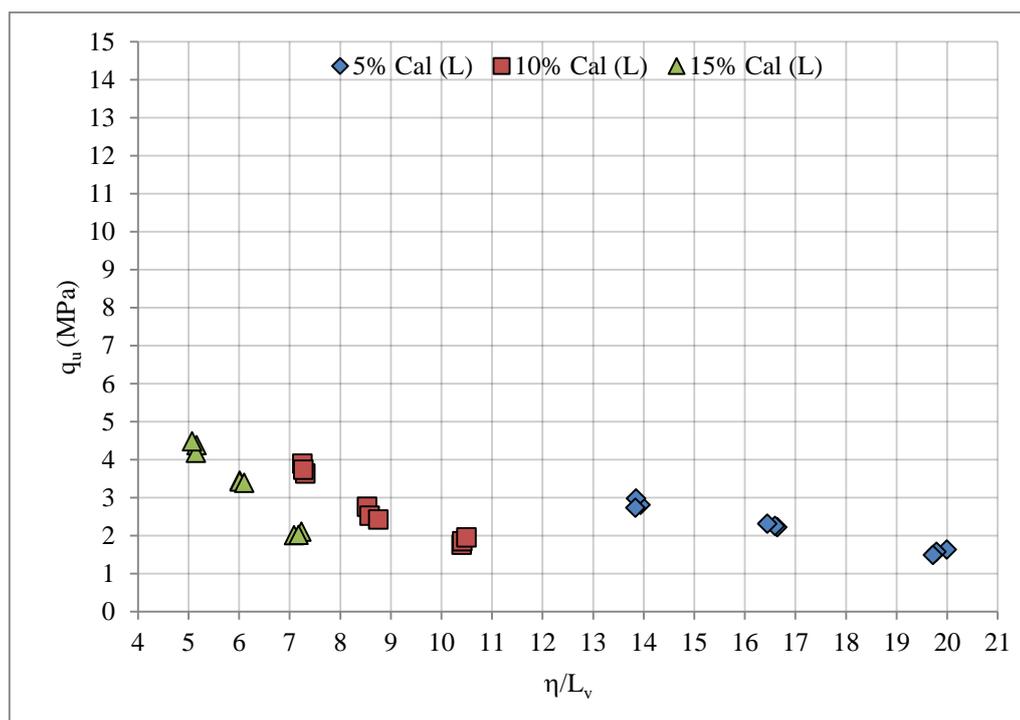


Figura 58 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 1 dia – 60°C.

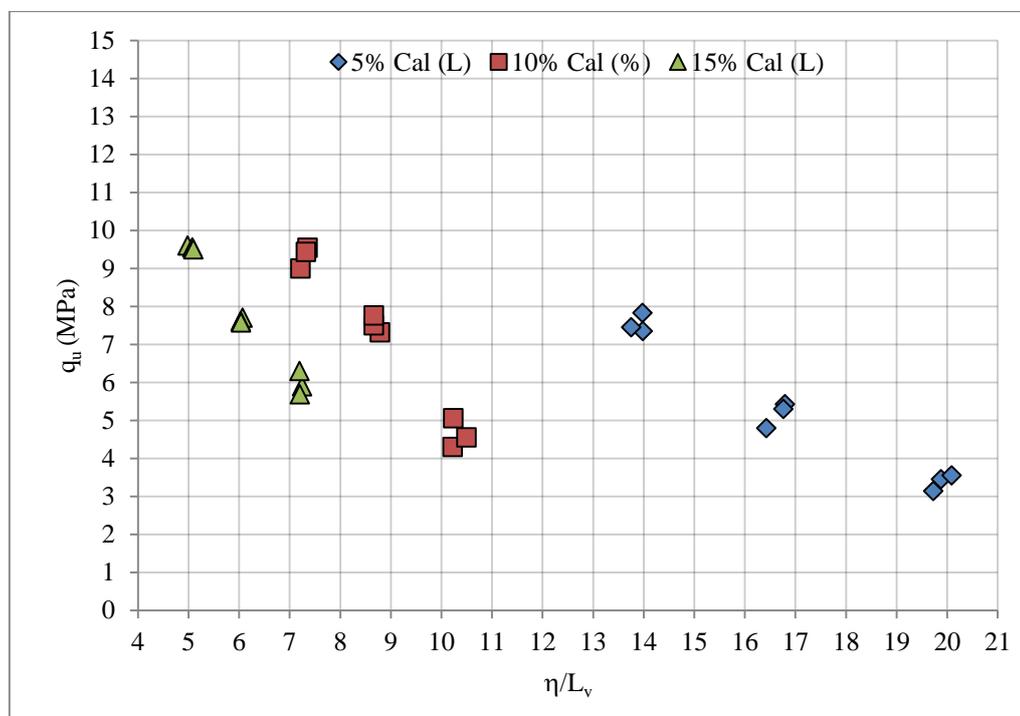


Figura 59 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 3 dias – 60°C.

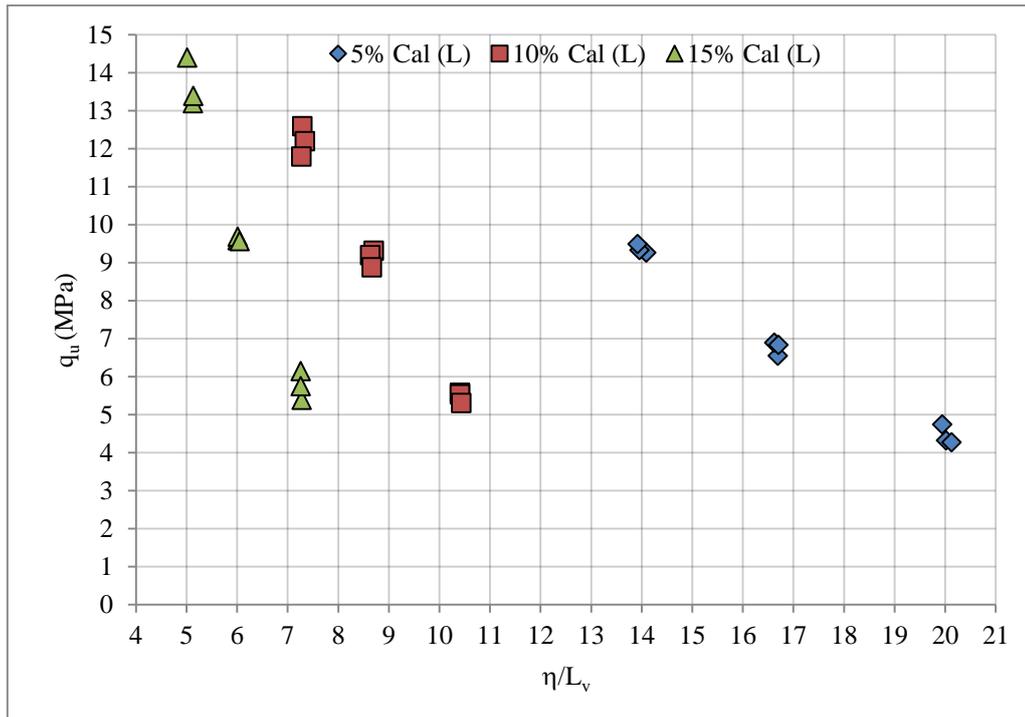


Figura 60 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 7 dias – 60°C.

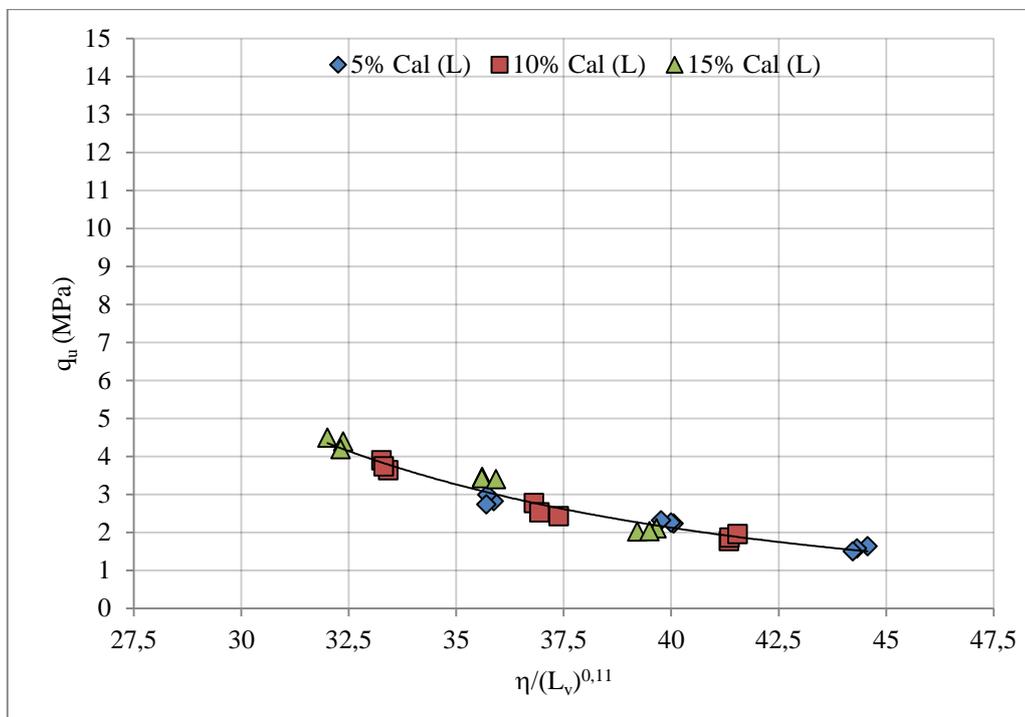


Figura 61 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 1 dia a 60°C.

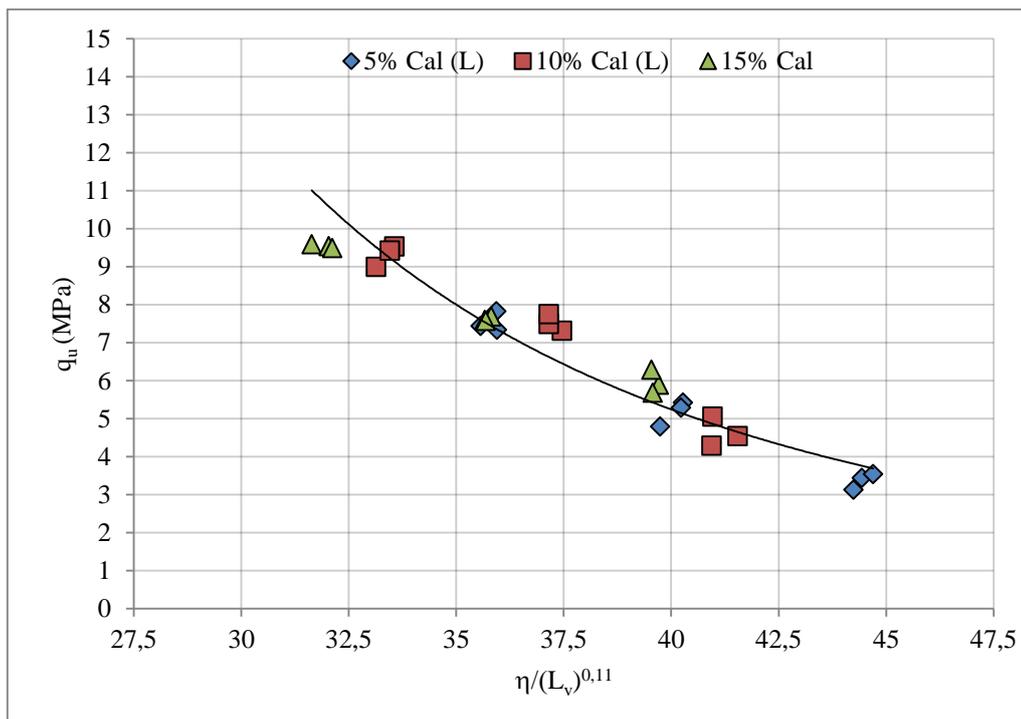


Figura 62 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 3 dias a 60°C.

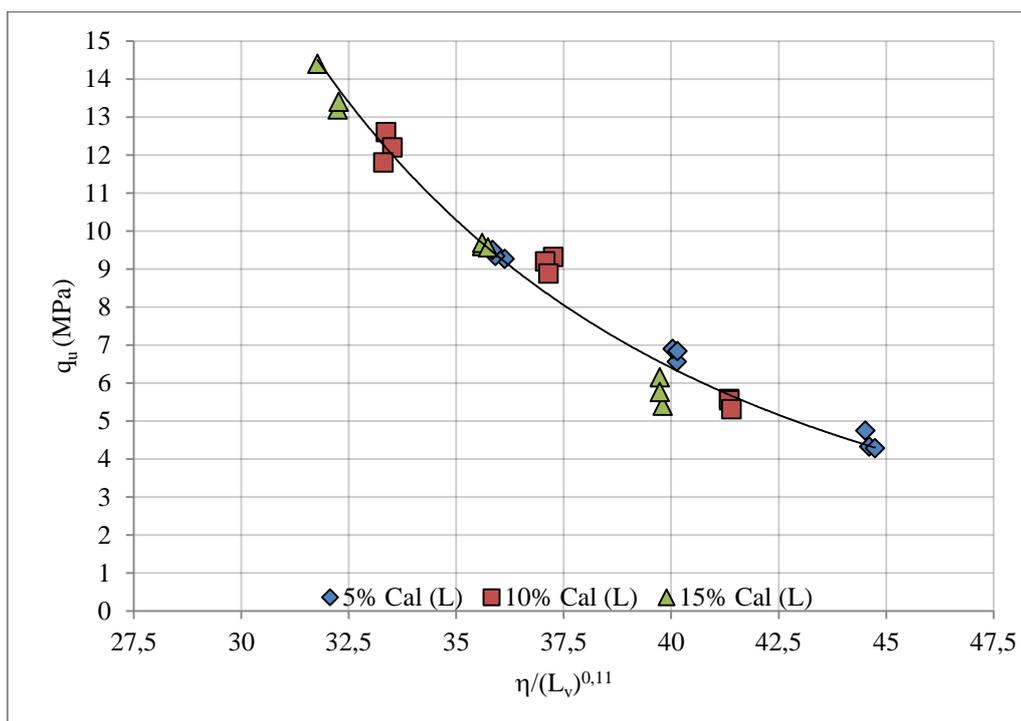


Figura 63 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 7 dias a 60°C.

Através desta adequação foi possível a determinação de equação única de comportamento da mistura de cinza e cal de carbureto na estimativa de resistência a compressão simples. Onde

apenas a grandeza das equações foi alterada conforme o aumento dos períodos de cura, representados nos gráficos abaixo (Figuras 64 a 66).

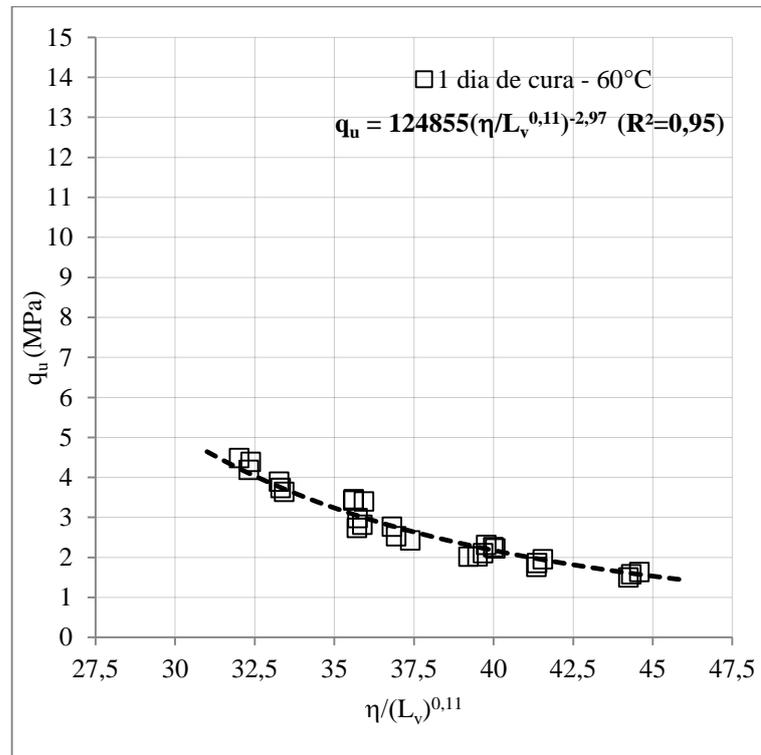


Figura 64 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 1 dias de cura a 60°C.

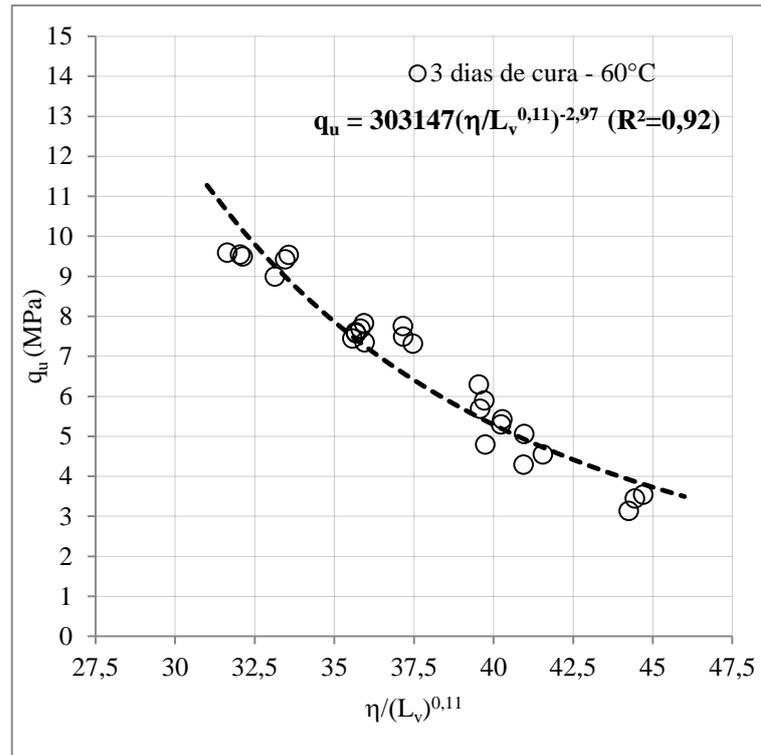


Figura 65- Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 3 dias de cura a 60°C.

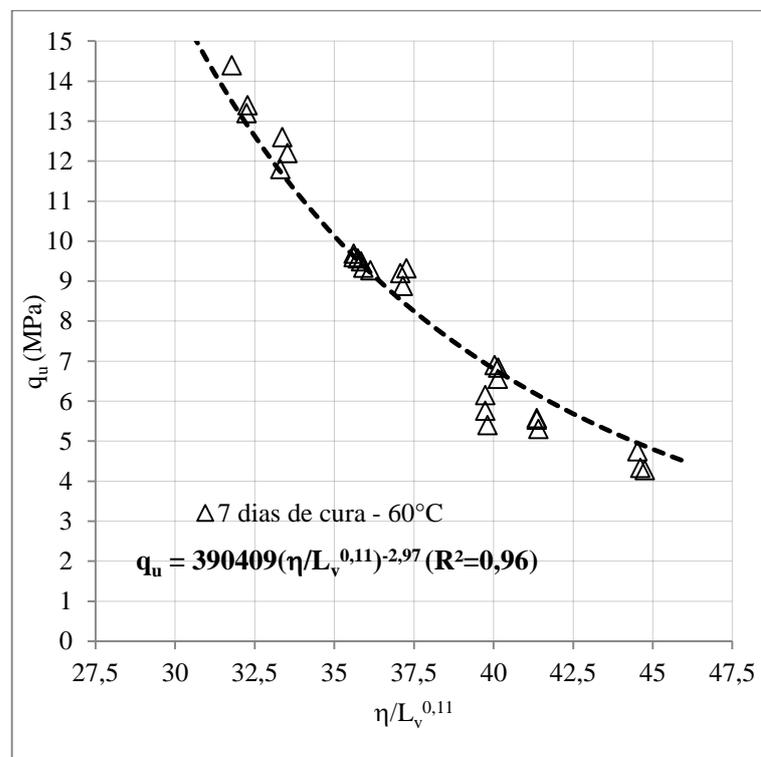


Figura 66- Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 7 dias de cura a 60°C.

Com o ajuste proposto de 0,11 ($L_v^{0,11}$), assim como para amostras curadas a 80°C, pode-se observar uma razoável correlação entre as variáveis porosidade/teor volumétrico de cal de carbureto ajustados $[\eta/(L_v)^{0,11}]$ e a resistência à compressão simples da cinza-cal curados em câmara de vapor nos períodos de 1, 3 e 7 dias. Um mesmo expoente (-2,97) para a curva tipo potência foi mantido, assim como para as amostras curadas a 80°C, para todos os períodos de cura.

Esta relação possibilitou a geração de equação única (Eq. 18, 19 e 20) para a determinação da resistência das amostras curadas a 60°C, em que apenas o escalar da equação diferenciou os resultados observados para os diferentes períodos de cura.

As equações abaixo estão ordenadas para os períodos de cura de 1, 3 e 7 dias para 60°C, respectivamente:

$$q_u = 1,25 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \quad \text{Eq.(18)}$$

$$q_u = 3,03 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \quad \text{Eq.(19)}$$

$$q_u = 3,90 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \quad \text{Eq.(20)}$$

4.1.3.3 Amostras curadas a 40°C

A relação entre as duas variáveis porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_v) para as amostras curadas a 40°C, também não possibilitaram a determinação de tendência que representasse esta relação com a resistência à compressão simples (q_u) da mistura (Figura 67 a 69). Entretanto, com o mesmo fator 0,11 (utilizado para amostras curadas nas outras temperaturas apresentadas) como expoente para o teor volumétrico de cal ($L_v^{0,11}$), foi possível a geração de uma tendência que correlacionasse as duas variáveis (Figuras 70 a 72).

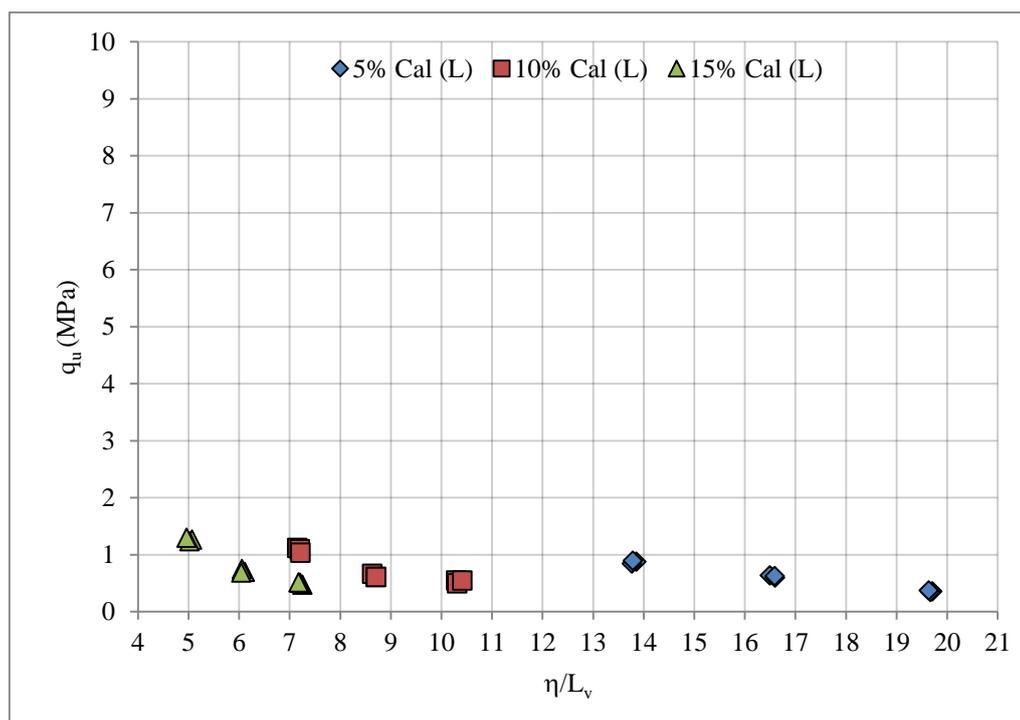


Figura 67 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 1 dia – 40°C.

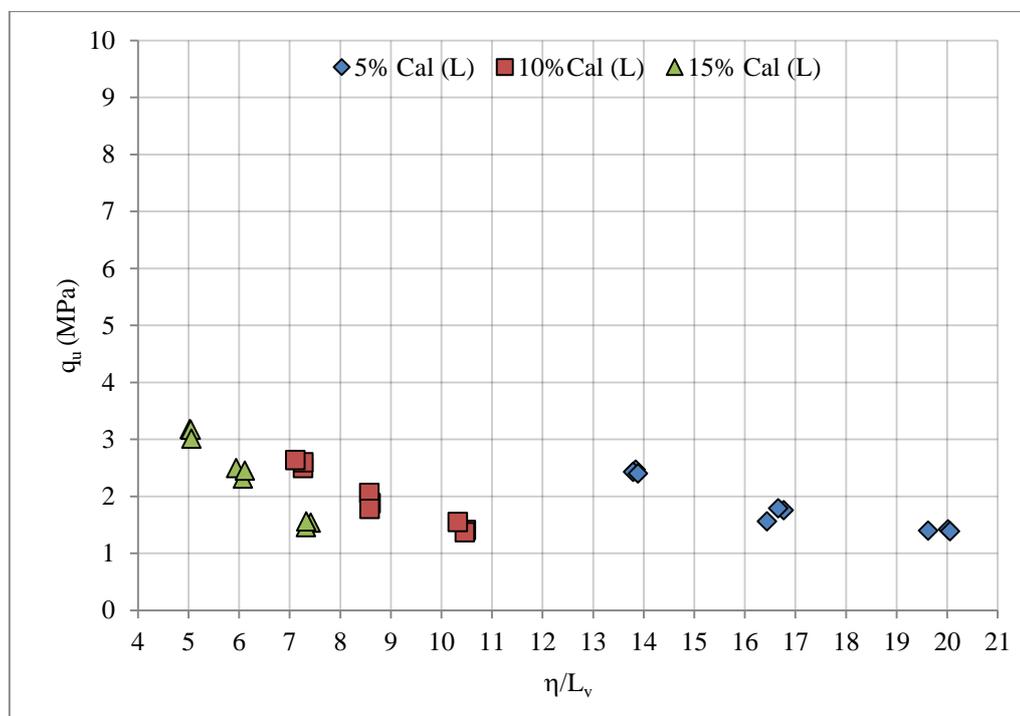


Figura 68 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 3 dias – 40°C.

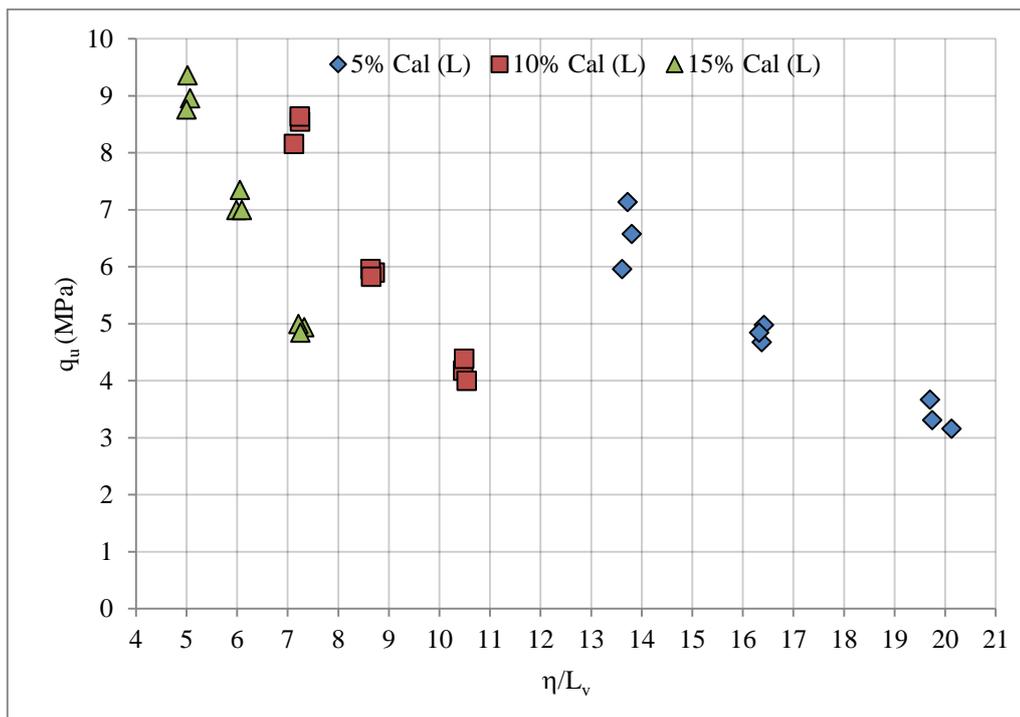


Figura 69 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 7 dias – 40°C.

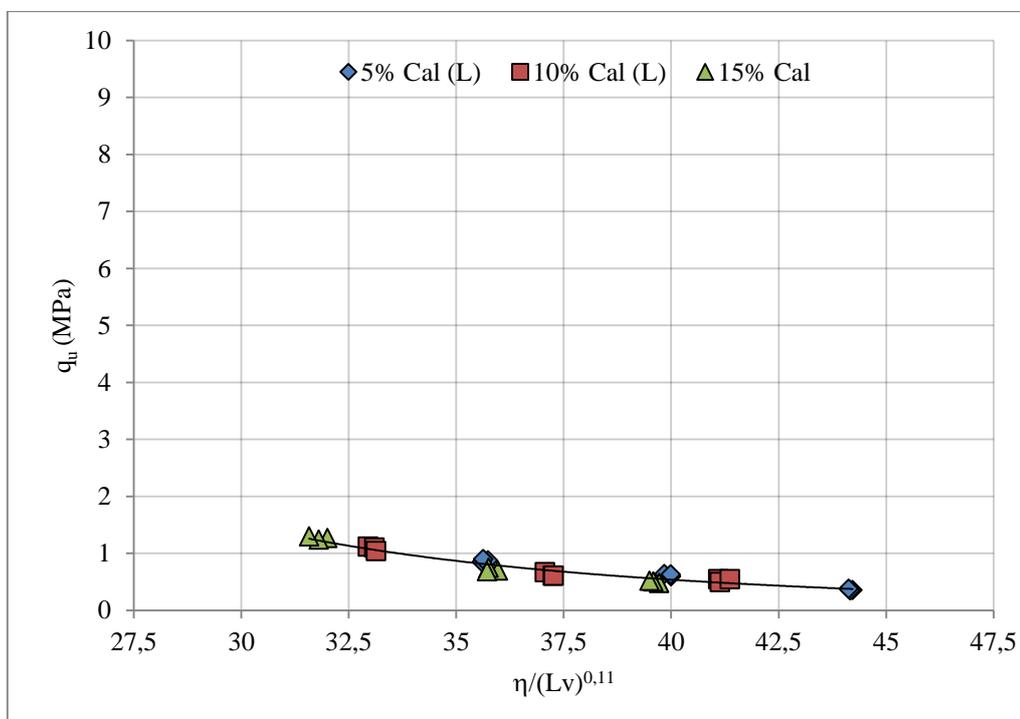


Figura 70 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 1 dia a 40°C.

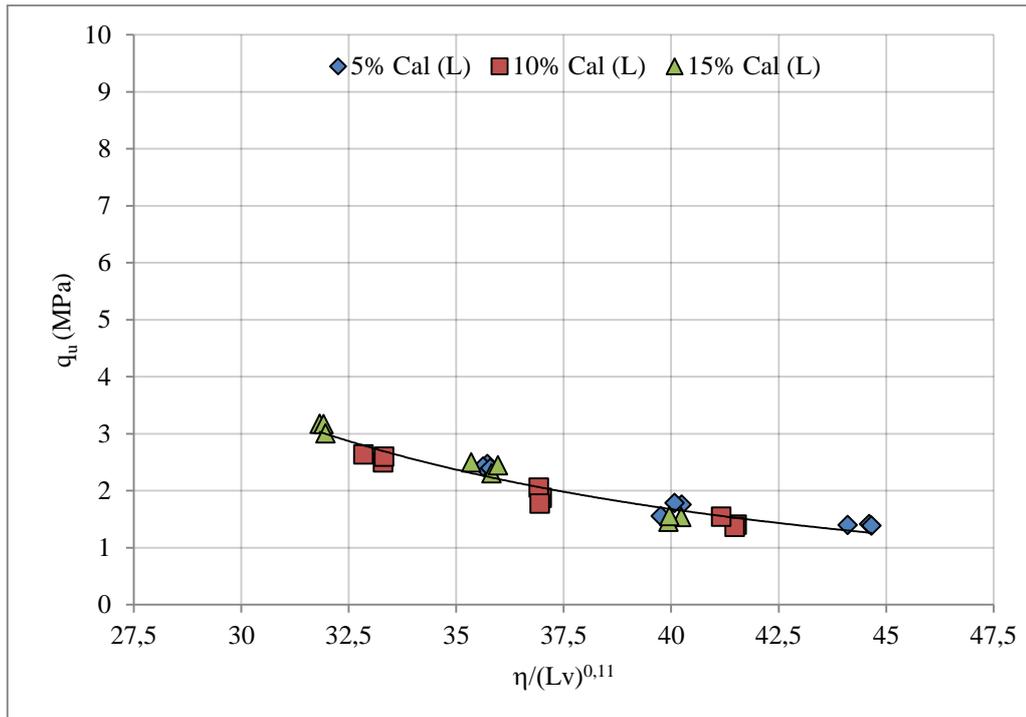


Figura 71 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 3 dias a 40°C.

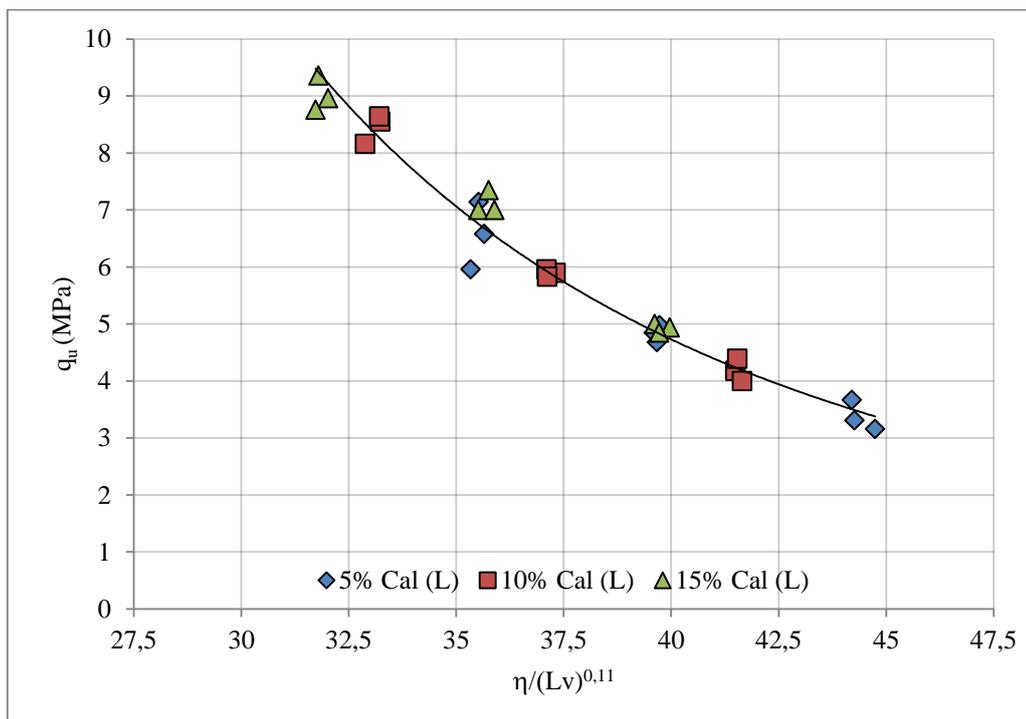


Figura 72 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 7 dias a 40°C.

Portanto, o expoente de 0,11 também foi o melhor ajuste para as amostras curadas a 40°C para os períodos de 1, 3 e 7 dias, que possibilitou o melhor coeficiente de correlação (R^2) entre pontos observados e a curva do tipo potência com expoente de -2,97 (Figuras 73 a 75).

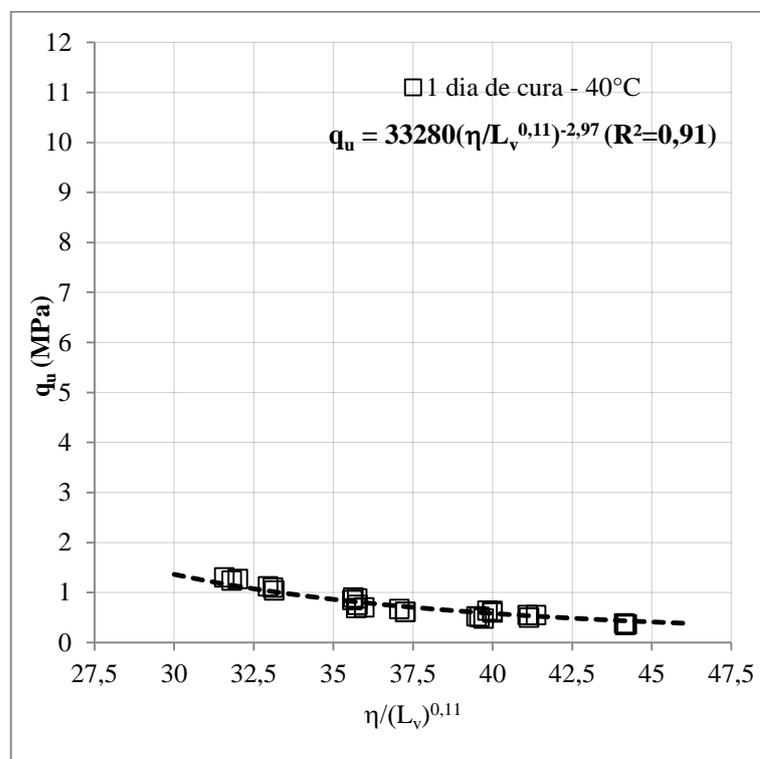


Figura 73 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 1 dia de cura a 40°C.

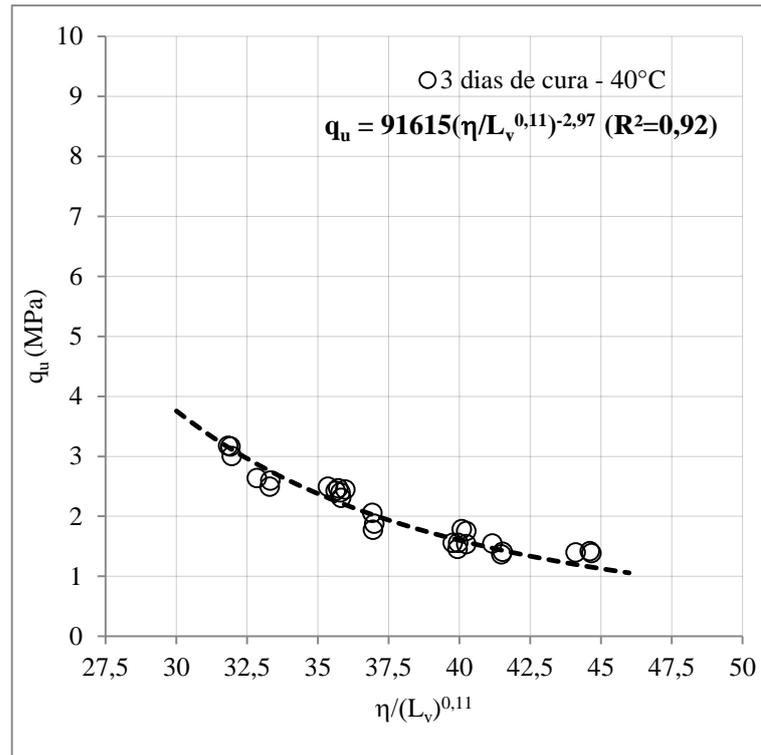


Figura 74 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 3 dias de cura a 40°C.

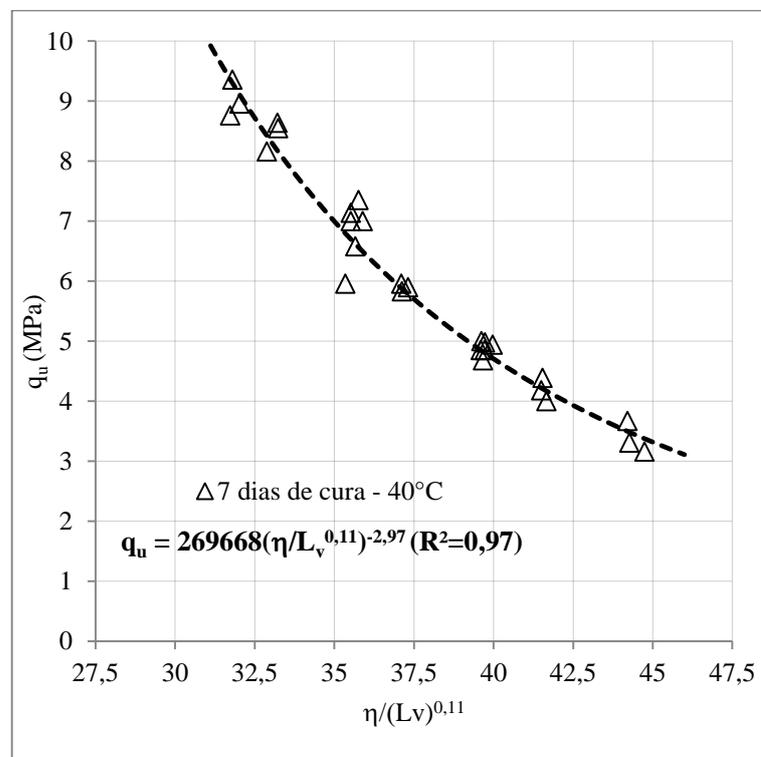


Figura 75 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 7 dias de cura a 40°C.

Pode-se observar uma razoável correlação entre a porosidade/teor volumétrico de cal de carbureto ajustados $[\eta/(L_v)^{0,11}]$ e a resistência à compressão simples da cinza-cal compactada em estudo. Esta relação possibilitou a determinação de equação única (Eq. 21, 22 e 23) para estimar a resistência à compressão simples (q_u) das amostras curadas a 40°C, em que apenas o escalar da equação diferenciou os resultados observados para os diferentes períodos de cura.

As equações abaixo estão ordenadas para os períodos de cura de 1, 3 e 7 dias para 40°C, respectivamente:

$$q_u = 0,33 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \quad \text{Eq.(21)}$$

$$q_u = 0,92 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \quad \text{Eq.(22)}$$

$$q_u = 2,70 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \quad \text{Eq.(23)}$$

4.1.3.4 Amostras curadas a 23°C

As amostras curadas a 23°C sem vapor apresentaram, assim como para as temperaturas vistas anteriormente, a mesma necessidade de um expoente para a correlação entre as variáveis porosidade e teor volumétrico de cal (Figuras 76 a 77). Mesmo sem um processo de aceleração das reações, promovido pelo aumento da temperatura nas amostras anteriores, foi possível a utilização de um mesmo expoente (0,11) na formulação de uma tendência (Figuras 78 a 79). Este ajuste proporcionou a formulação de equação de dosagem para previsão da resistência à compressão simples para amostras curadas a 23°C, que definem o seu comportamento.

A falta de resultado para amostras curadas por 3 dias devido a dissolução em água no processo de imersão (amostras com 1,1 e 1,2 g/cm³) impossibilitou a geração de interação entre porosidade e teor volumétrico de cal para este período. Portanto, a análise foi feita para os períodos de 7 e 14 dias.

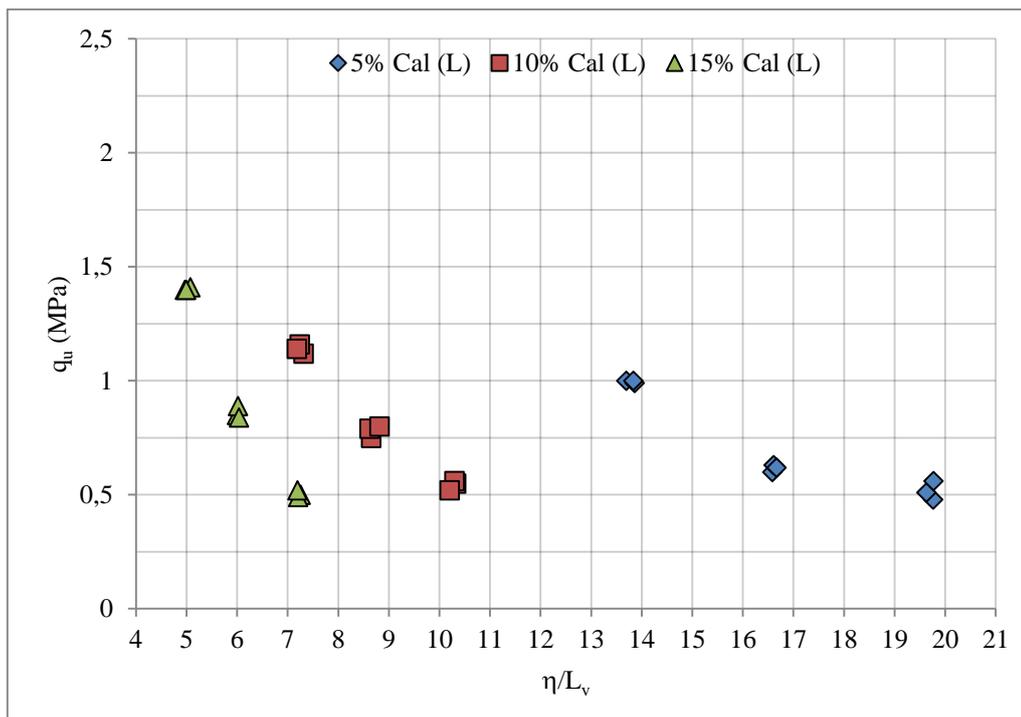


Figura 76 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 7 dias – 23°C.

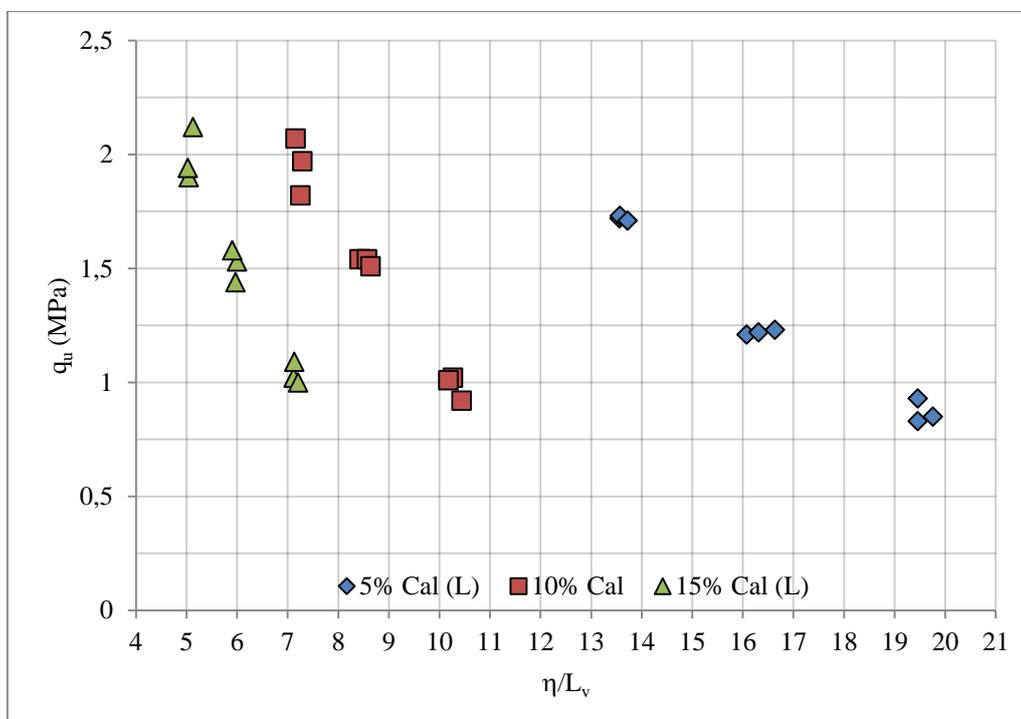


Figura 77 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados por 14 dias – 23°C.

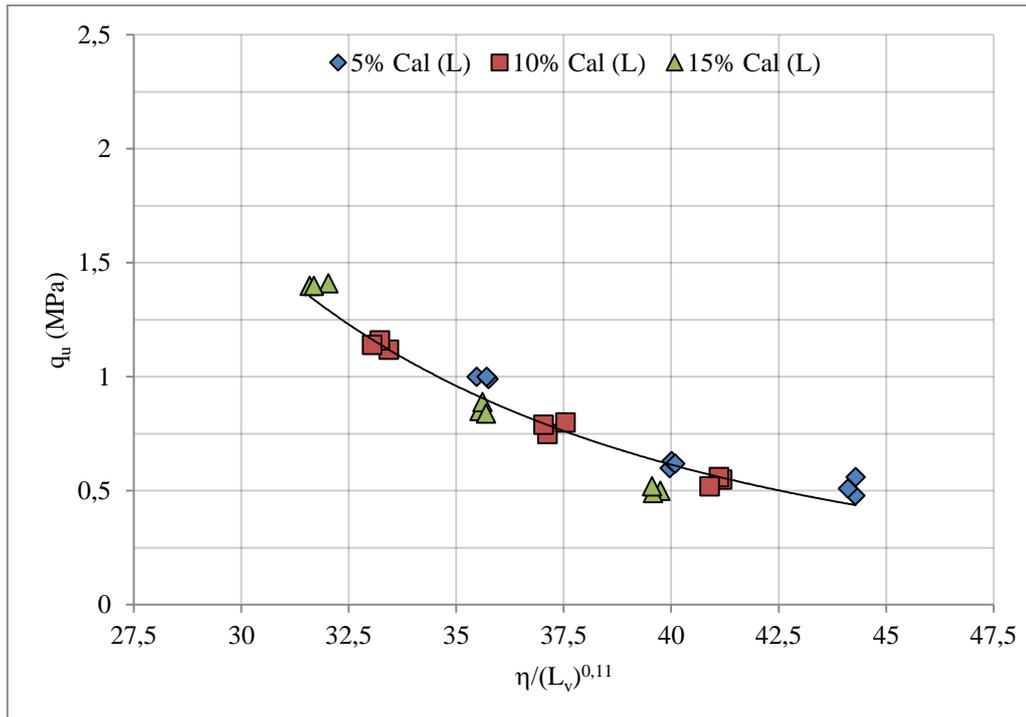


Figura 78 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 7 dias a 23°C

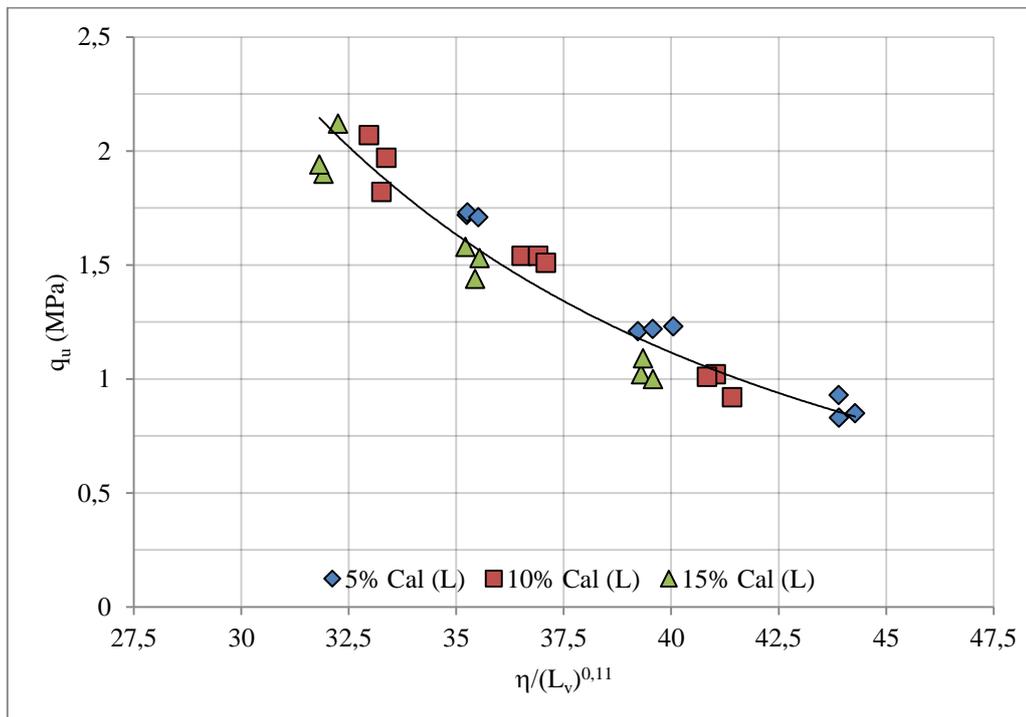


Figura 79 – Efeito de ajuste para amostras curadas por 14 dias a 23°C

Como é possível verificar o expoente de 0,11 também gerou uma bom ajuste para 7 e 14 dias com cura a 23°C. Desta forma, foram geradas equações para a os respectivos períodos de cura apresentados nas Figuras 80 a 81.

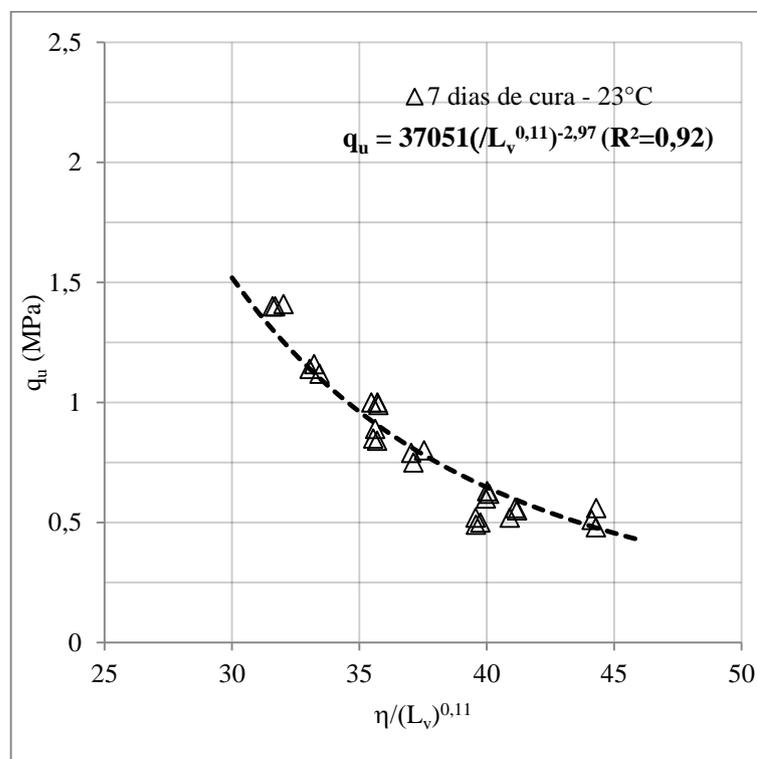


Figura 80 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 7 dias de cura a 23°C.

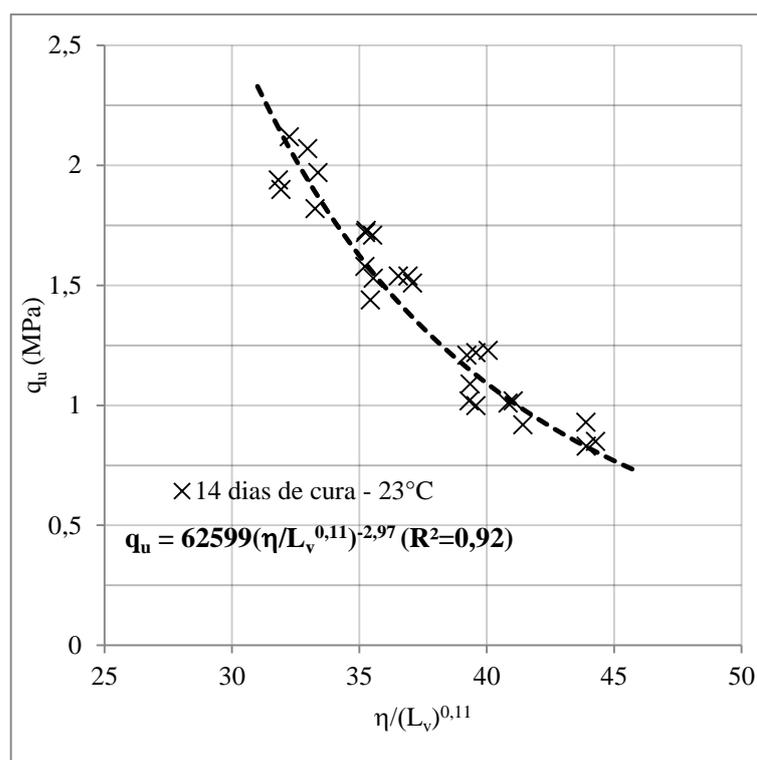


Figura 81 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 14 dias de cura a 23°C.

Assim como para as demais temperaturas estudadas foi possível determinar coeficientes de correlações (R^2) maiores do que 0,9, conferindo aos ajustes, realizados através de uma curva potência de expoente igual a -2,97, a geração de equações que explicam mais de 90% da variabilidade da RCS frente à relação $\eta/L_v^{0,11}$. Portanto, para as amostras curadas sem câmara a vapor em 23°C, assim como para as demais temperaturas de cura em câmara a vapor, foi possível à utilização de um mesmo ajuste para o teor volumétrico de cal ($L_v^{0,11}$) e um mesmo expoente para a curva tipo potência. Isto é, o comportamento entre as relações das variáveis estudadas em cura a 23°C é o mesmo do que para a cura em 40, 60 e 80°C.

Para a cura não acelerada (23°), assim como para a cura em maiores temperaturas, foi possível a determinação de equação única (Eq. 24 e 25) para a representação do comportamento da resistência da compressão simples curados a 23°C nos períodos de 7 e 14 dias.

As equações abaixo estão simplificadas e ordenadas para os períodos de cura de 7 e 14 dias para 23°C, respectivamente:

$$q_u = 0,37 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \quad \text{Eq.(24)}$$

$$q_u = 0,63 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \quad \text{Eq.(25)}$$

4.1.2 Efeito do tempo de cura

4.1.2.1 Efeito do tempo de cura para amostras curadas a 80°C

Na Figura 82 são apresentados os resultados das relações $\eta/(L_v)^{0,11}$ pela resistência à compressão simples das amostras curadas a 80°C e com 1, 3 e 7 dias de cura. Assim como para as outras variáveis (porosidade e cal), já vistas anteriormente, a variável tempo de cura proporciona o aumento da resistência conforme o aumento do tempo de cura para corpos-de-prova curados na temperatura de 80°C. Com a aceleração das reações proporcionada pela alta temperatura resultados máximos de, aproximadamente, 7 MPa foram atingidos em apenas um dia de cura. Quando o tempo de cura foi incrementado para 3 dias os resultados de amostras apresentaram valores máximos próximos a 11 MPa e para 7 dias a resistência à compressão simples chegou a 14 MPa.

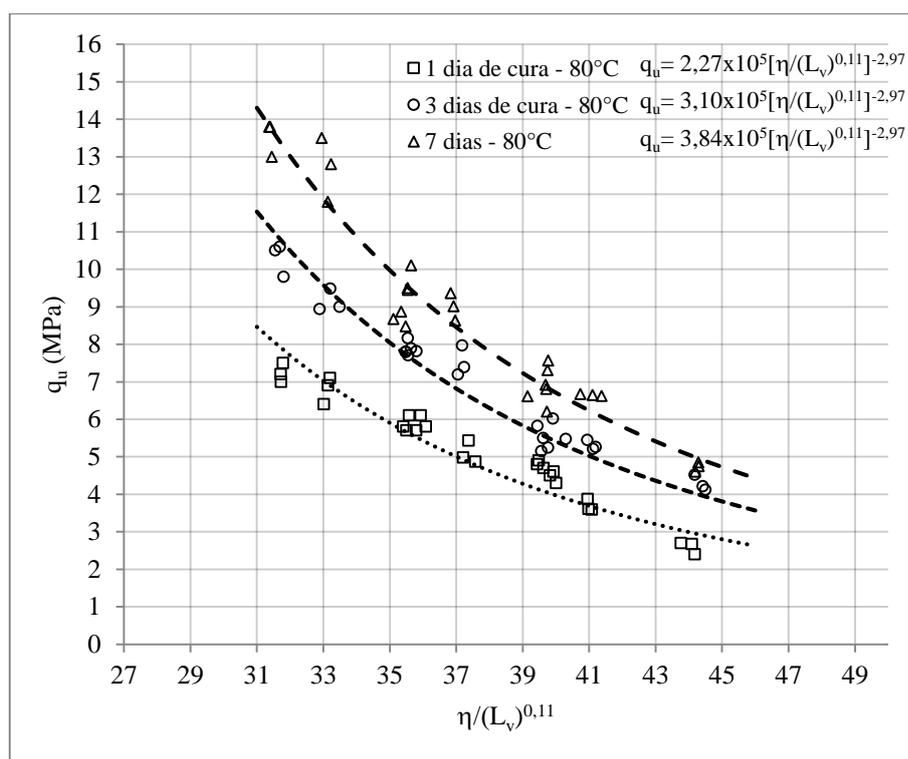


Figura 82 – Efeito do tempo de cura nas amostras curadas a 80°C com 1, 3 e 7 dias.

Como visto anteriormente, foi possível a formulação de uma equação única que representasse a relação entre porosidade e teor volumétrico de cal ($\eta/L_v^{0,11}$) na previsão da resistência à

compressão. Portanto, para a análise do ganho proporcionado pelo tempo de cura e sua influência na resistência do material, foi considerado o escalar das equações, através da normalização $[q_u / (\eta/L_v^{0,11})^{-2,97}]$ geradas para cada período de cura conforme a Figura 83.

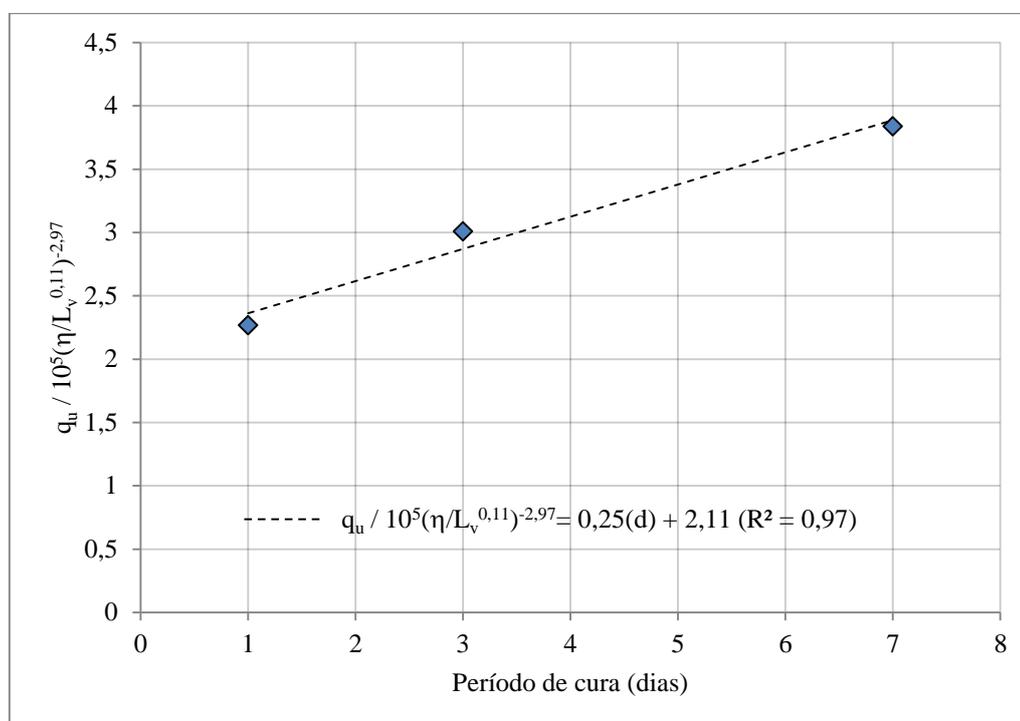


Figura 83 – Ajuste de curva e equação para variação do tempo de cura – 80°C.

É possível verificar que o tempo de cura proporcionou ganhos na resistência à compressão simples. Entre os períodos de 1 a 3 dias o ganho foi de até 33%, entre os período de 3 e 7 dias o ganho foi de 27%. Entretanto, um comparativo entre a Figura 83 e a Figura 87 (que corresponde à normalização para cura a 40°C) verifica-se que a taxa de crescimento da cura a 40°C (0,40d) foi maior do que a taxa de crescimento para 80°C (0,25d). O provável motivo para a diminuição do crescimento de ganho é o fato de que a alta temperatura (80°C) proporcionou altas resistências iniciais e o crescimento da resistência ao longo dos períodos estudados está atenuado. Este fenômeno pode estar atribuído ao fato de que exista uma resistência máxima capaz de ser atingida para esta mistura. Entretanto, esta não foi atingida para os períodos estipulados nesta pesquisa, apenas uma tendência foi verificada.

Através da normalização foi possível determinar o incremento proporcionado pelo tempo de cura e assim a geração de equação única (Eq. 26), válida para períodos maiores que 1 dia até 7 dias de cura, para a determinação de resistência a compressão simples para amostras curadas a

80°C considerando as variáveis: porosidade (η), teor volumétrico de cal (L_v) e tempo de cura (d). Portanto, é possível estimar a resistência à compressão simples da mistura proposta através da dosagem de uma determinada porosidade, para um determinado teor volumétrico de cal e para um determinado período de cura.

$$q_u = [0,25(d) + 2,11] \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \times 10^5 \quad \text{Eq.(26)}$$

4.1.2.2 Efeito do tempo de cura para amostras curadas a 60°C

Os efeitos do tempo de cura, assim como para 80°C, foram determinantes para o crescimento da resistência a compressão simples das amostras curadas a 60°C. A Figura 84 mostra este ganho mais acentuado entre o período de 1 para 3 dias de cura.

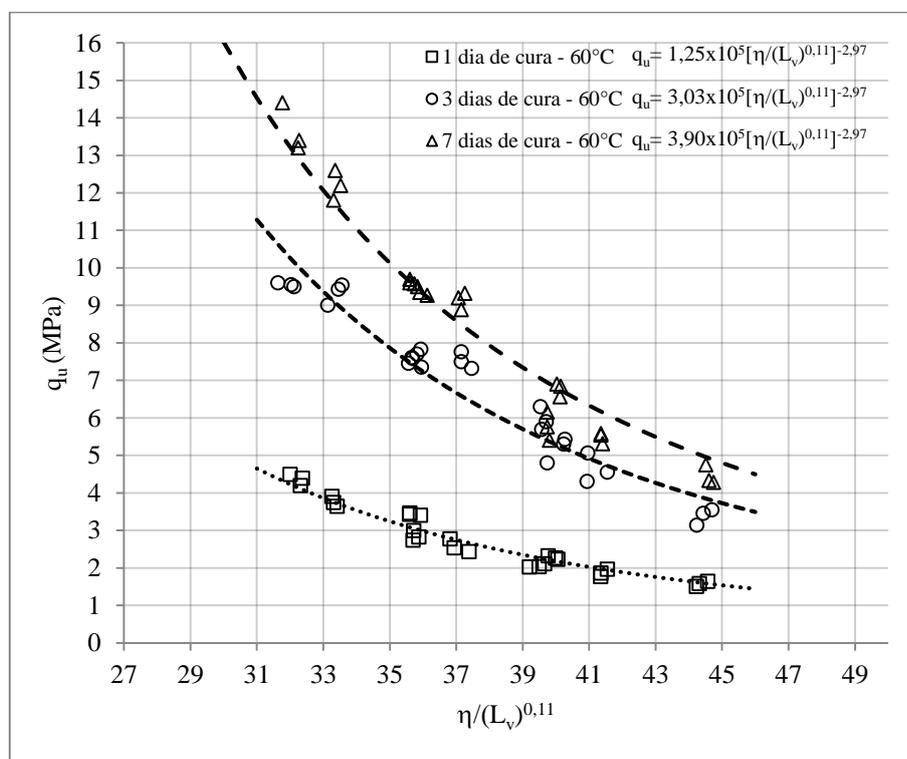


Figura 84 – Efeito do tempo de cura nas amostras curadas a 60°C com 1, 3 e 7 dias.

Na Figura 85 é possível verificar o ganho e comportamento da influência do tempo de cura para as amostras curadas a 60°C, obtido através da normalização da resistência à compressão.

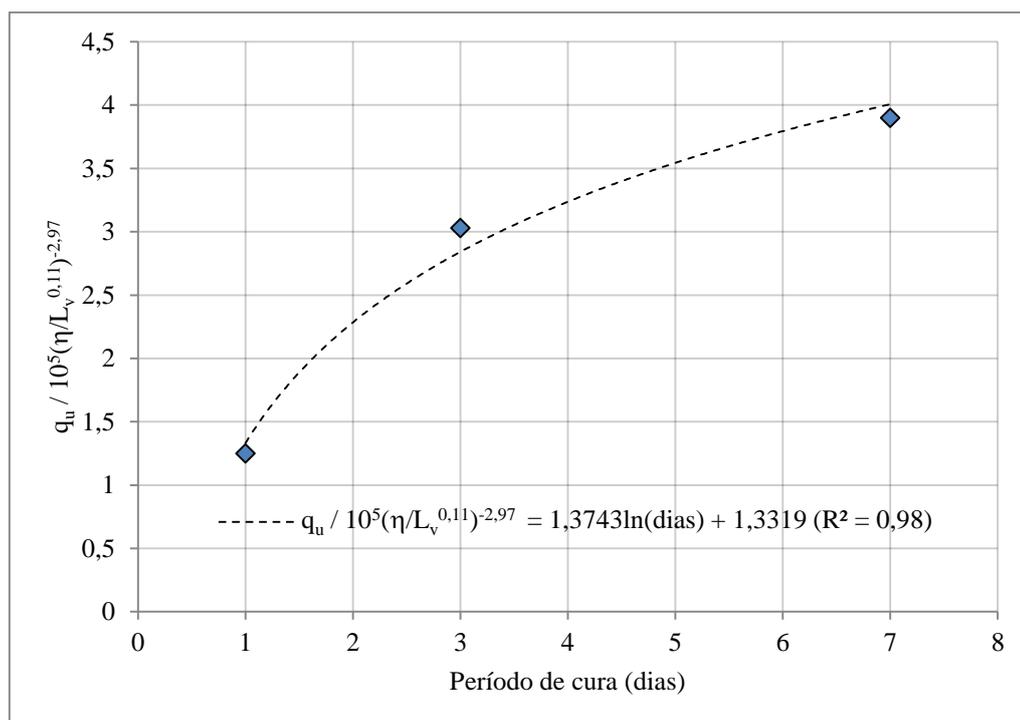


Figura 85 – Ajuste de curva e equação para variação do tempo de cura – 60°C.

A tendência de estabilização de ganho de resistência também se fez presente para as amostras curadas na temperatura de 60°C. Uma curva do tipo logarítmica possibilitou uma adequação do comportamento do tempo de cura para a presente temperatura. Este processo de estabilização pode ser comparado ao cimento convencional, que diferente das reações pozolânicas apresenta reações de cimentação naturalmente aceleradas. Ou seja, normalmente para período curto de cura já possui uma estabilização (menores ganhos) na resistência à compressão simples. No caso das reações pozolânicas a temperatura provoca a aceleração das reações e da mesma forma que ocorre no cimento, foi verificada, em período mais curto de cura, a estabilização da resistência. Para as amostras curadas a 60°C verificou-se uma tendência à estabilização da resistência a compressão simples mais acentuada em relação aos curados por 80°C devido a menores resistências obtidas para o período de 1 dia de cura em 60°C.

A tendência de estabilização de ganho de resistência à compressão simples em relação ao período de cura foi observado no trabalho de Dalla Rosa (2009) – Figura 3, item 2.4.3 – para cura em 23°C em períodos de cura longos (28 dias até 360 dias). No presente trabalho, devido a cura acelerada, a mesma tendência foi observada em um período de cura menor (1 dia até 7

dias) sendo a curva do tipo logarítmica a melhor relação encontrada para representar o comportamento.

Através da normalização ($[q_u/(\eta/L_v)^{0,11}]^{-2,97}$) foi obtida equação que representa o incremento proporcionado pelo tempo de cura assim como a geração de equação única (Eq. 27), válida para períodos maiores que 1 dia de cura até 7 dias de cura, para a determinação de resistência a compressão simples para amostras curadas a 60°C. Onde foram consideradas as variáveis: porosidade (η), teor volumétrico de cal (L_v) e tempo de cura (d).

$$q_u = [1,37 \ln(d) + 1,33] \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \times 10^5 \quad \text{Eq.(27)}$$

4.1.2.2 Efeito do tempo de cura para amostras curadas a 40°C

Para as amostras curadas a 40°C a tempo de cura também foi variável importante para o aumento da resistência à compressão simples da mistura. A Figura 86 mostra o deslocamento da curva para resistências maiores conforme o aumento do período de cura.

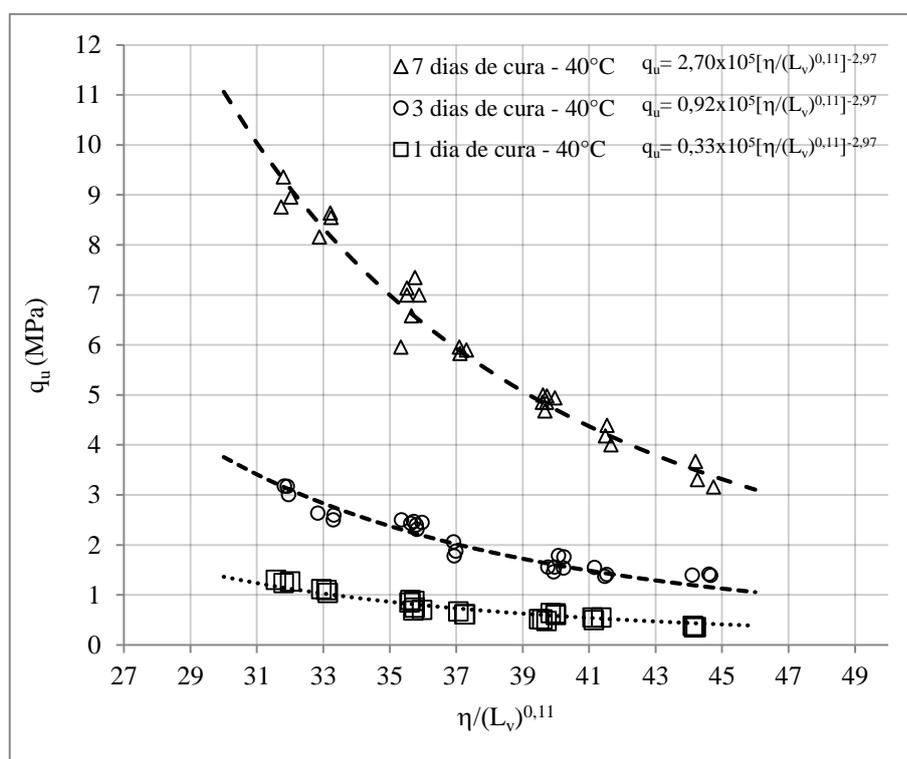


Figura 86 – Efeito do tempo de cura nas amostras curadas a 40°C com 1, 3 e 7 dias.

Para a análise do comportamento do tempo de cura o mesmo procedimento de normalização foi utilizado para se chegar a uma relação única entre as variáveis porosidade (η), com teor volumétrico de cal (L_v), com tempo de cura (d) e com a resistência a compressão simples, que é apresentada na Figura 87. Assim, possibilitando mensurar a influência do período de cura na resistência a compressão simples.

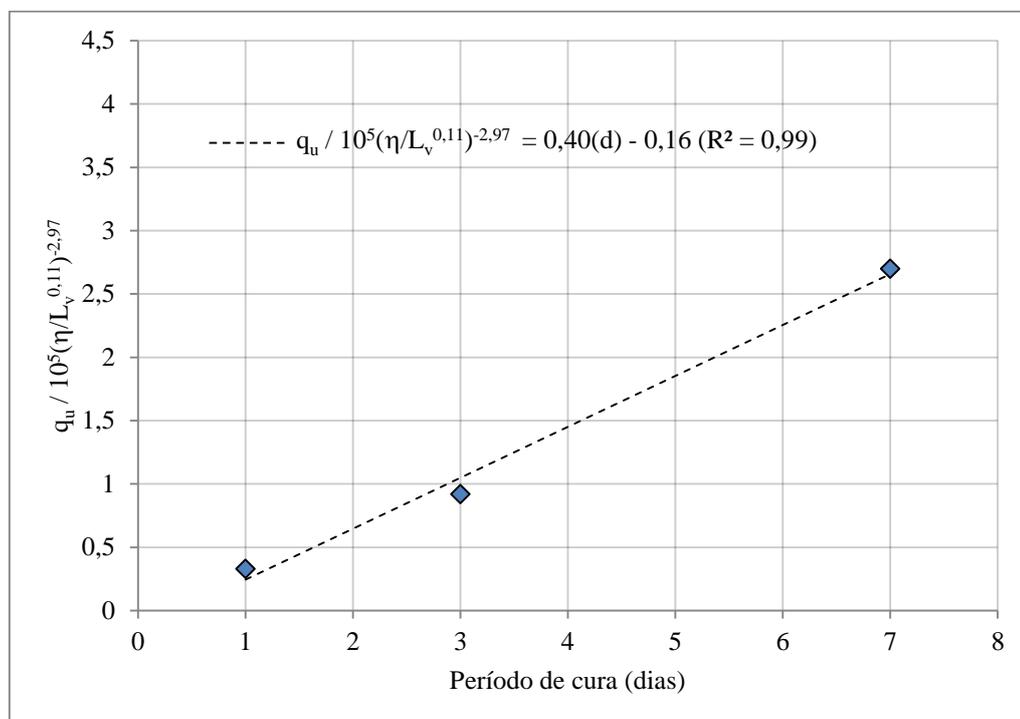


Figura 87 – Ajuste de reta e equação para variação do tempo de cura – 40°C.

Como é possível verificar na Figura 87 a linearidade foi a melhor relação encontrada para a variação de período de cura para 40°C. Diferente para temperaturas mais altas, o processo de aceleração proporcionado por esta temperatura não indicou, para os períodos de cura estudados, uma tendência na estabilização da resistência à compressão simples. Neste caso a reta foi a melhor relação encontrada para representar o comportamento.

Através da normalização foi obtida equação única (Eq. 28), para o incremento proporcionado pelo tempo de cura, válida para períodos maiores que 1 dia de cura até 7 dias de cura, para a previsão de resistência a compressão simples para amostras curadas a 40°C considerando as variáveis: porosidade (η), teor volumétrico de cal (L_v) e tempo de cura (d).

$$q_u = [0,40(d) - 0,16] \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \times 10^5 \quad \text{Eq.(28)}$$

4.1.2.2 Efeito do tempo de cura para amostras curadas a 23°C

Para as amostras curadas em temperatura de 23°C sem vapor os resultados obtidos também comprovaram o aumento de resistência de 7 dias para 14 dias representados na Figura 88.

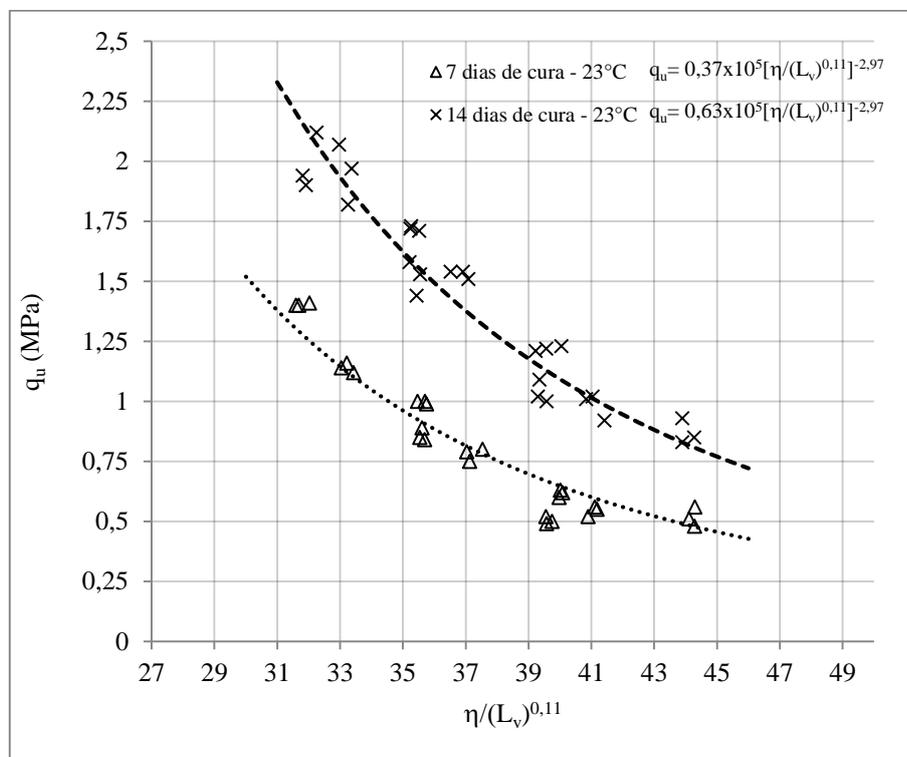


Figura 88 – Efeito do tempo de cura nas amostras curadas a 23°C com 7 e 14 dias.

Com a impossibilidade de uma completa análise para o período de cura de 3 dias, devido a não cimentação para amostras com 1,1g/cm³ e 1,2 g/cm³, a verificação de uma tendência fica comprometida. Entretanto, a formulação de uma equação única pode ser estabelecida para os períodos de cura que apresentaram cimentação (7 e 14 dias). Portanto, na Figura 89 é apresentado o resultado da normalização para as amostras curadas a 23°C.

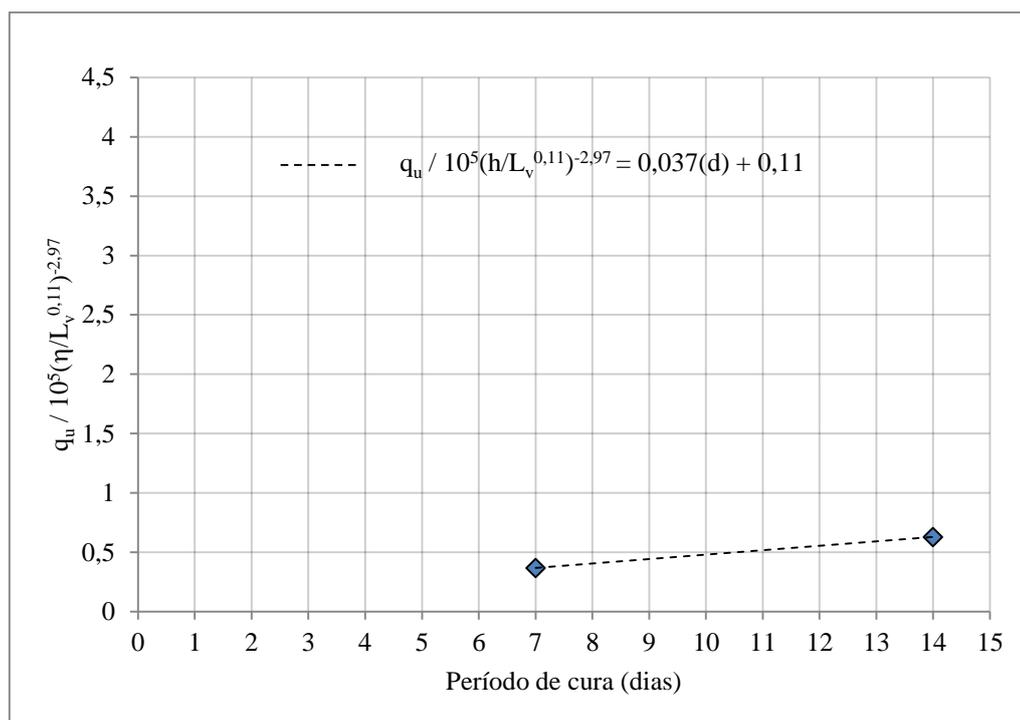


Figura 89 – Ajuste de reta e equação para variação do tempo de cura – 23°C.

Na Figura 89 é possível verificar que a relação entre resistência compressão simples (q_u), porosidade e teor volumétrico de cal ajustados $[(\eta/L_v^{0,11})^{-2,97}]$ gerou equação única (Eq. 29) que representa o incremento proporcionado pelo tempo de cura (válida para períodos maiores que 7 dias de cura até 14 dias de cura) para a determinação de resistência a compressão simples para amostras curadas a 23°C considerando as variáveis: porosidade (η), teor volumétrico de cal (L_v) e tempo de cura (d).

$$q_u = [0,04(d) + 0,11] \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \times 10^5 \quad \text{Eq.(29)}$$

4.1.3 Efeito da Temperatura

A variável temperatura possui grande influência na resistência da mistura cimentada, pois as reações pozolânicas são endotérmicas, isto é, necessitam de calor para o processo químico de cimentação. Portanto, quando fornecido este calor (energia) o ganho de resistência passa a ser mais pronunciado em curtos períodos de cura. Até o presente momento, a variável temperatura manteve-se fixa enquanto variava-se o período de cura, para a análise do efeito da temperatura o inverso será feito, isto é, fixou-se a variável período de cura para a variação da temperatura (23°C, 40°C, 60°C e 80°C).

Os resultados obtidos para um dia de cura (Figura 90) representam as curvas de correlação $\eta/L_v^{0,11}$ com a resistência a compressão simples (q_u) que foram geradas para 1 dia de cura nas diferentes temperaturas estudadas (Eq. 21, 18 e 15 – 40°C, 60°C e 80°C respectivamente).

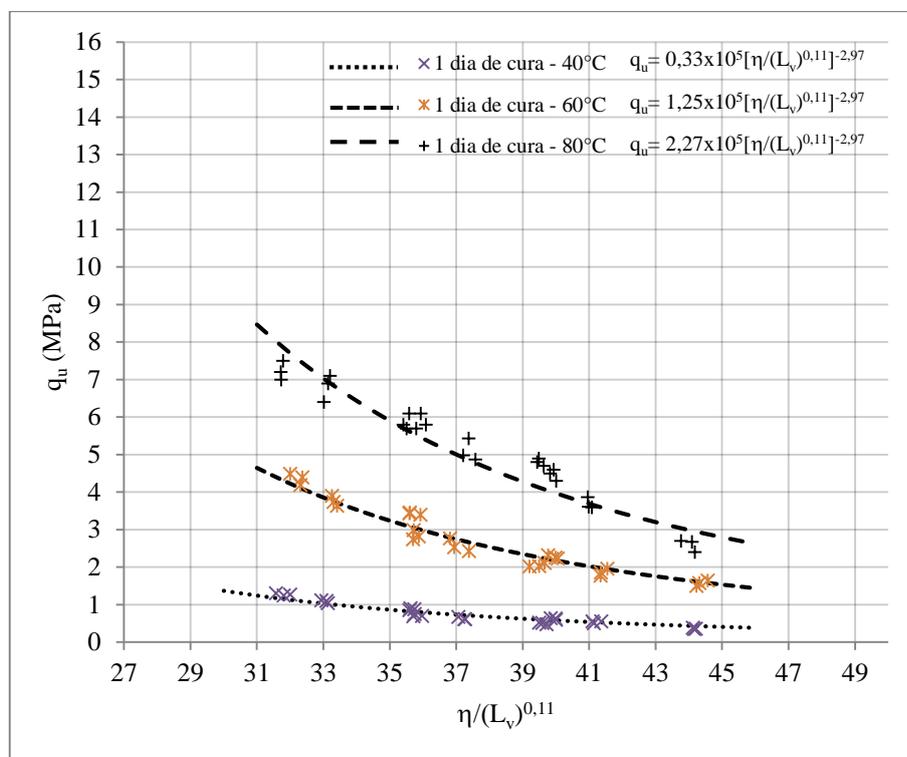


Figura 90 – Efeito da variação da temperatura para 1 dia de cura.

É possível verificar, para o período de 1 dia de cura, que existe ganho de resistência conforme o aumento da temperatura. Assim, como realizado para diferentes períodos de cura, foi possível uma correlação entre porosidade (η), teor volumétrico de cal (L_v) e temperatura (t) através da normalização $[q_u / (\eta / (L_v^{0,11}))^{-2,97}]$ na geração de equação única para a representação de incremento proporcionado pela temperatura na resistência a compressão simples para 1 dia de cura (Figura 91).

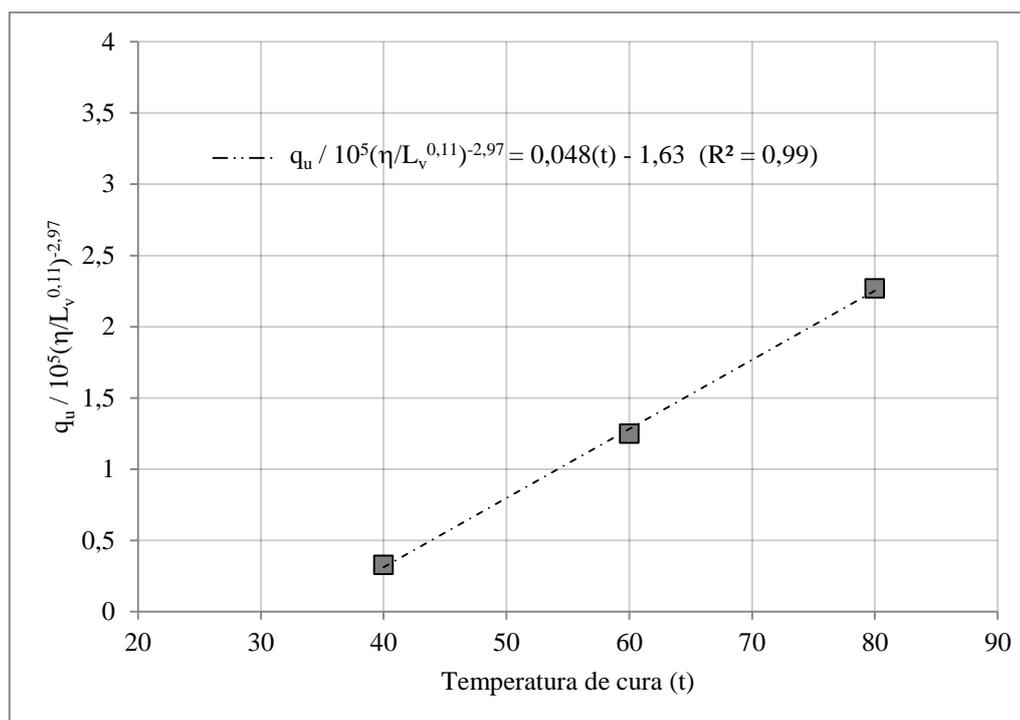


Figura 91 – Ajuste de reta e equação para variação de temperatura – 1 dia de cura.

Assim, verifica-se que o ganho proporcionado para a variação de temperatura proposta (40°C, 60°C e 80°C) apresentou uma linearidade para o período de 1 dia de cura e proporcionou a geração de equação única (Eq. 30) para estimativa de resistência a compressão simples. Neste caso a dosagem pode ser feita através da determinação de porosidade, teor volumétrico de cal e temperatura para 1 dia de cura na estimativa da resistência à compressão simples.

$$q_u = [0,05(t) - 1,63] \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \times 10^5 \quad \text{Eq.(30)}$$

O mesmo procedimento foi adotado para as demais temperaturas, portanto na Figura 92 é possível verificar o comportamento do ganho de resistência para o período de 3 dias de cura, utilizando-se as Equações 16,19 e 22.

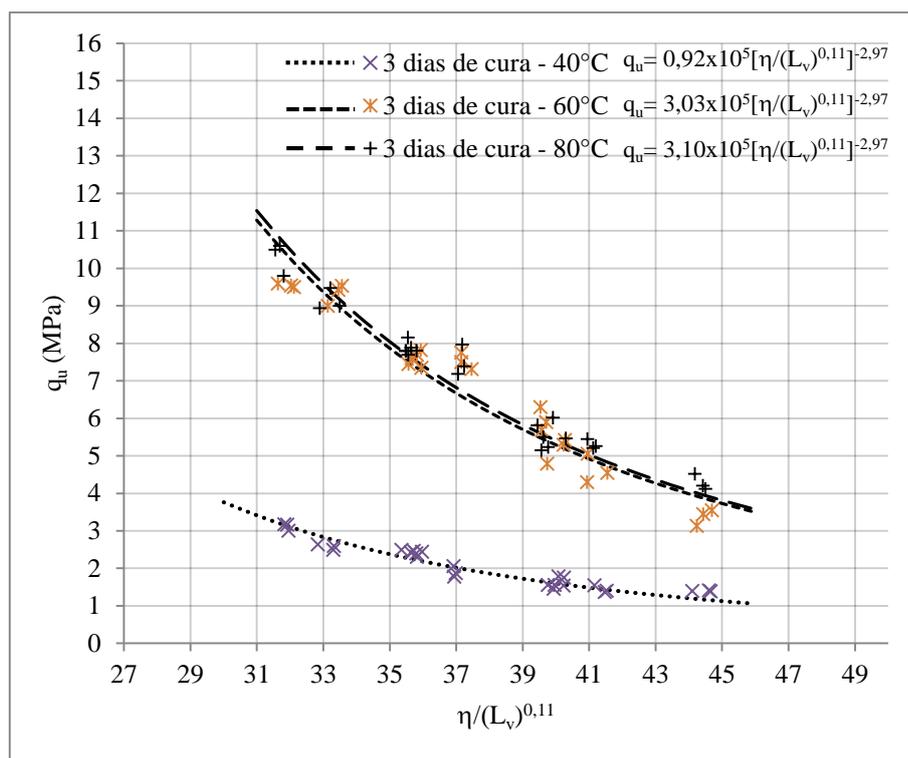


Figura 92– Efeito da variação da temperatura para 3 dias de cura.

Conforme os resultados obtidos para a variação da temperatura para o período de 3 dias de cura é possível ressaltar a existência de sobreposição de curvas da relação porosidade/teor volumétrico de cal para as temperatura de 60°C e 80°C. Onde as resistências obtidas foram semelhantes, entretanto existe diferença em comparação as amostras curadas a 40°C. Este comportamento fica evidenciado na Figura 93.

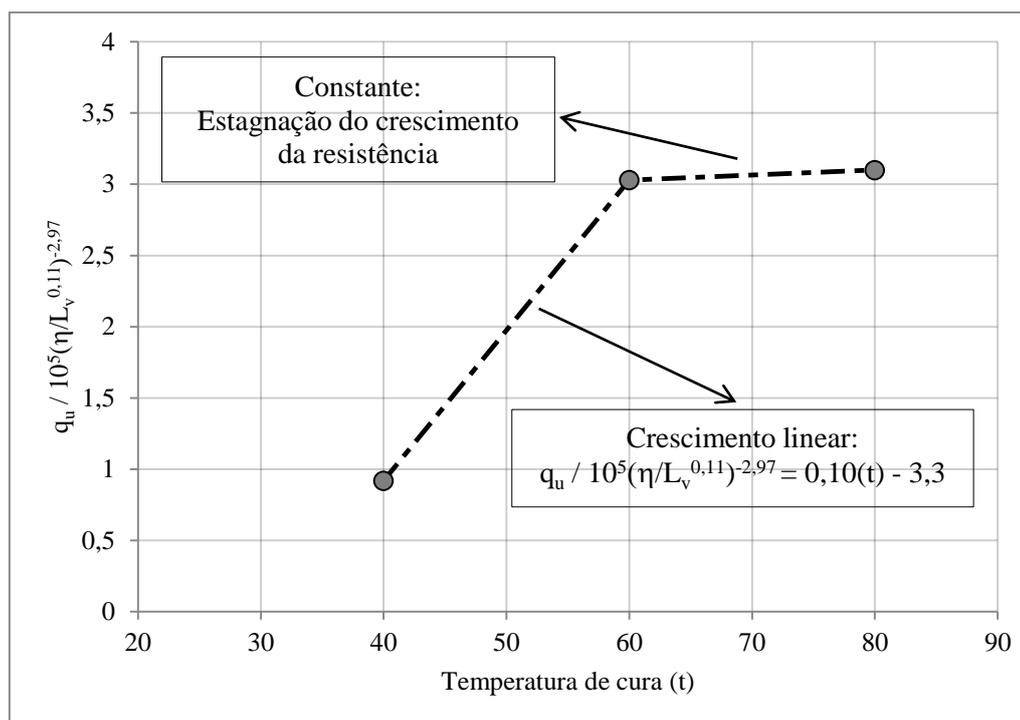


Figura 93 – Ajuste de reta e equação para variação de temperatura – 3 dias de cura.

O ganho médio de 40°C para 60°C e 80°C foi de aproximadamente 3 vezes, entretanto o ganho estabilizou-se de 60°C para 80°C. Portanto, na análise do comportamento da varável temperatura verifica-se que para o período de cura de 3 dias o limite de ganho de resistência através da variação da temperatura foi 60°C. Este comportamento também foi observado por Silvani (2013) que sugeriu procedimento de linearidade para ganhos relevantes entre temperaturas estudadas. Para a presente pesquisa foi possível determinar linearidade de crescimento de resistência para compressão simples entre 40°C a 60°C e a formação de uma reta constante entre 60°C a 80°C, onde o crescimento da resistência à compressão simples manteve-se praticamente a mesma para a cura de 3 dias.

Portanto, considerando ganhos relevantes para variação de temperatura de 40°C a 60°C é possível a determinação de equação única (Eq. 31) para 3 dias de cura (válida para o intervalo de 40°C a 60°C).

$$q_u = [0,1(t) - 3,3] \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-2,97} \times 10^5 \quad \text{Eq.(31)}$$

Para os resultados obtidos com sete dias de cura foi possível a inserção das amostras curadas em 23°C para a análise. Na Figura 94 estão representadas as relações $\eta/L_v^{0,11}$ e as curvas

geradas pelas Equações 17, 20, 23 e 24 para as diferentes temperaturas (80°C, 60°C, 40°C e 23°C, respectivamente) estudadas curadas por 7 dias.

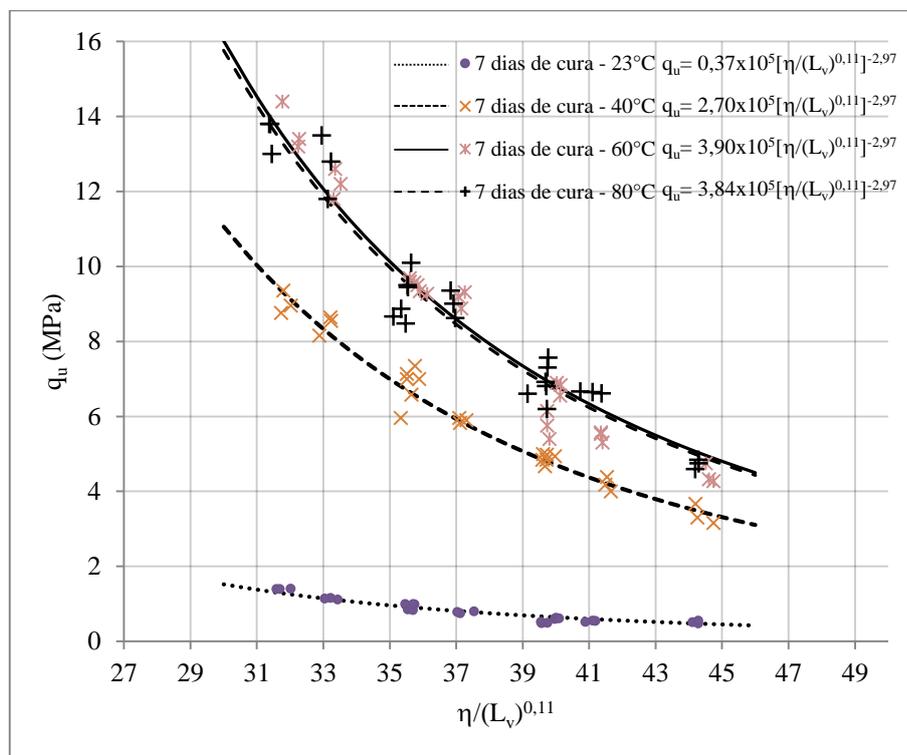


Figura 94 – Efeito da variação da temperatura para 7 dias de cura.

Assim, como observado para amostras curadas por 3 dias, existe a sobreposição dos resultados das amostras curadas a 60°C com os resultados das amostras curadas a 80°C. Para as outras temperaturas o crescimento foi incrementado com o aumento da temperatura, com destaque para o ganho proporcionado com o aumento da temperatura de 23°C para 40°C. Isso gerou aumento de até sete vezes na resistência a compressão simples da mistura. Este comportamento também fica evidenciado na Figura 95.

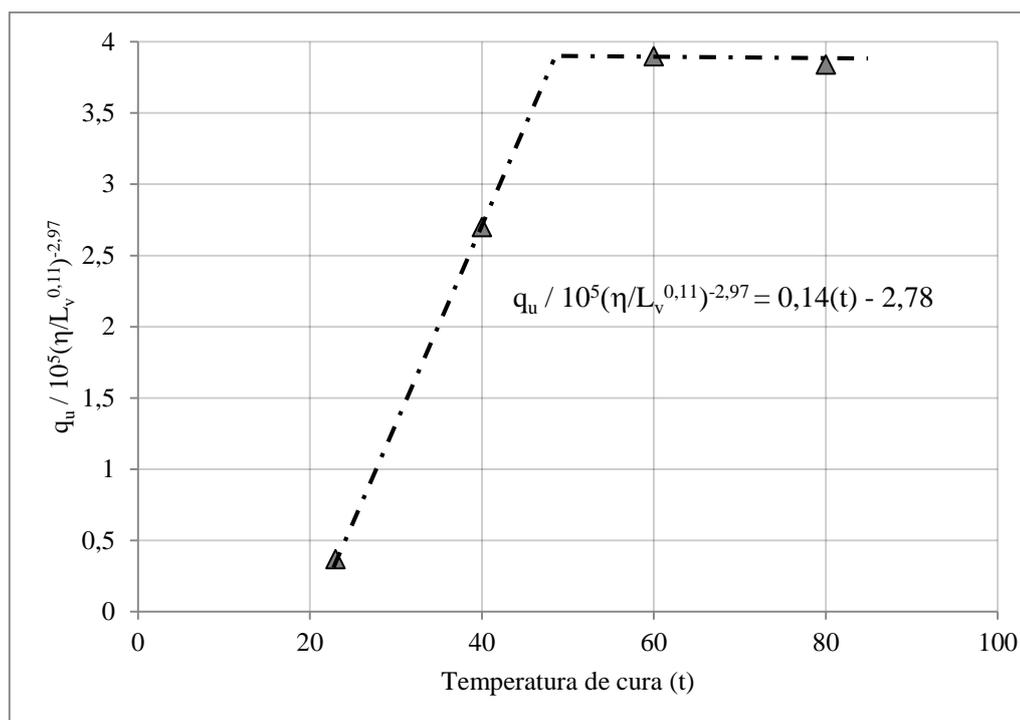


Figura 95 – Ajuste de reta e equação para variação de temperatura – 7 dias de cura.

Portanto, para o período de cura de 7 dias, assim como para 3 dias, apresentou patamar contínuo no gráfico, representando a estabilização da resistência a compressão simples quando a temperatura passou de 60°C para 80°C. Assim, para este período de cura chegou-se ao limite de ganho com alteração na variável temperatura.

Conforme a Figura 95 verifica-se que existe uma tendência de estabilização de ganho de resistência abaixo de 60°C. Aproximadamente 50°C seja o limite de ganho proporcionado pela variação da temperatura para o período de 7 dias de cura.

Sendo assim, considerando ganhos relevantes para variação de temperatura de 23°C a 60°C é possível a determinação de equação única (Eq. 32) para 7 dias de cura (válida para o intervalo de 23°C a 50°C).

$$q_u = [0,14(t) - 2,78] \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}} \right]^{-3} \times 10^5 \quad \text{Eq.(32)}$$

Na Figura 96 é apresentado o comportamento global da variável temperatura para os tempos de cura determinados, considerando as equações únicas geradas para cada período de cura, assim como a visualização das assíntotas.

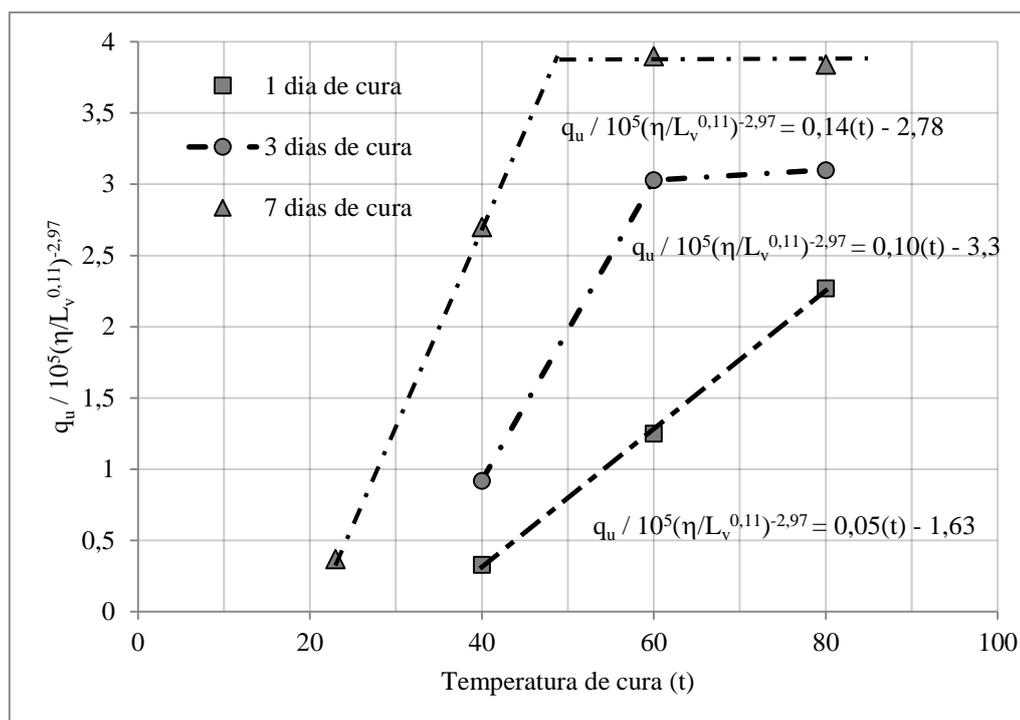


Figura 96 – Comportamento global da resistência frente à variação da temperatura.

De modo geral para o período de um dia de cura não houve a estagnação do ganho de resistência, portanto temperaturas acima de 80°C podem influenciar na resistência. No caso dos resultados obtidos para 3 e 7 dias de cura foi verificada uma estabilização de ganho. Sendo assim, pode-se aferir que existe um limite para o desenvolvimento das reações pozolânicas em função do aumento de temperatura. Ou seja, chega-se a um determinado patamar de temperatura em que não é possível a obtenção de maior resistência, sendo necessário um período de cura maior para o processo de cimentação.

Outra importante questão possível de se analisar na Figura 96 é a taxa de ganho (inclinação da reta) para os diferentes períodos de cura. Onde se verifica que na relação entre porosidade, teor volumétrico de cal e temperatura, o tempo de cura proporciona o incremento da taxa de ganho conforme o aumento do mesmo, mostrando uma completa interação entre as variáveis estudadas.

4.2 ANÁLISE DA VARIÂNCIA

Para melhor julgamento dos efeitos proporcionados pelas variáveis analisadas na resistência a compressão simples será mostrado neste capítulo um estudo de análise da variância dos resultados obtidos.

A análise da variância foi realizada a partir da Tabela ANOVA (Tabela 14) com as 4 variáveis independentes (fatores) controláveis: quantidade cal (A), massa específica aparente seca (B), tempo de cura (C) e temperatura de cura (D), que possibilitou a análise dos fatores controláveis e das interações dos fatores controláveis para um nível de significância de 95%. Onde, 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 a significância de que resultados obtidos ao se modificar o nível do fator controlável correspondente pertençam a uma mesma distribuição, considerando-se então que significância inferiores a 5% indicam que os resultados pertencem a distribuições diferentes, ou seja, a variação do fator controlável provoca alteração significativa nos resultados.

Tabela 14 – Tabela ANOVA para as variáveis independentes estudadas.

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância	
A	120,26	2	60,131	838,4	0,00%	significativo
B	485,64	2	242,820	3385,5	0,00%	significativo
C	966,33	2	483,164	6736,4	0,00%	significativo
D	717,7	2	358,865	5003,4	0,00%	significativo
AB	5,37	4	1,343	18,7	0,00%	significativo
AC	19,57	4	4,892	68,2	0,00%	significativo
AD	13,5	4	3,383	47,2	0,00%	significativo
BC	90,51	4	22,628	315,5	0,00%	significativo
BD	49,82	4	12,454	173,6	0,00%	significativo
CD	89,54	4	22,385	312,1	0,00%	significativo
ABC	6,35	8	0,794	11,1	0,00%	significativo
ABD	1,62	8	0,203	2,8	0,58%	significativo
ACD	4,59	8	0,574	8,0	0,00%	significativo
BCD	6,08	8	0,760	10,6	0,00%	significativo
ABCD	6,12	16	0,382	5,3	0,00%	significativo
Erro	11,69	163	0,072			
Total	2594,76	243				

A = Cal / B = Massa Específica / C = Tempo de cura / D = Temperatura

São verificados, na Tabela Anova, que todas as variáveis estudadas no presente estudo são estatisticamente significativas para a alteração da resistência compressão simples (variável resposta) da mistura. Ainda, na mesma tabela, é possível determinar qual destas variáveis e a interação entre elas proporcionam as maiores alterações na resistência através da coluna “Teste F”. Quanto maior o valor deste item maior será a sua significância.

Assim, as variáveis de maior capacidade de alteração da variável resistência são em ordem decrescente: Tempo de cura, Temperatura de cura, Porosidade e Teor de cal. Portanto, o tempo de cura possui maior influência na resistência à compressão, sendo o teor de cal a variável de menor capacidade de alteração da resistência.

Com relação à interação de 1° e 2° ordem, foi visto em itens anteriores (4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3) que existe uma influência entre um variável independente sobre outra variável que altera a taxa de ganho, representada pela inclinação da reta. Isto representa a interação entre as variáveis estudadas. Portanto para todas as interações de primeira ordem os resultados foram significantes, assim como para as interações de 2° e 3° ordem. Isto significa, por exemplo, que a interação entre as variáveis Cal (A) e Massa Específica (B) – primeira ordem AB – causa alteração na resistência à compressão podendo uma variável atenuar ou potencializar a outra.

4.2.1 Comparação de Médias

Com os resultados de fatores (massa específica, tempo de cura, temperatura de cura e teor de cal) e interações entre os mesmos serem significativos, a realização de uma comparação de médias se faz necessário para a determinação das diferenças entre os níveis dos fatores. Por exemplo, a variável independente cal possui 3 níveis que são 5%, 10% e 15% de cal que podem apresentar diferenças insignificantes na alteração da resistência a compressão simples em sua média comparada. Sendo assim, foram fixados três fatores e variando um para identificar em que nível de cada fator há diferença entre médias de resistência.

A partir da Tabela 15 pode-se fazer a comparação de médias para cada nível de cada um dos fatores: teor de cal (A), massa específica (B), tempo de cura (C) e temperatura de cura (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 0,61. Portanto, se a diferença entre as médias dos níveis for menor do que o limite de decisão significa que os níveis comparados são iguais. Por

exemplo, a média de resistência à compressão para 3 corpos-de-prova com as mesmas características (1,1 g/cm³, 1 dia de cura, 5% de cal e curado a 80°C) foi de 2,59. Para verificar se o aumento para 10% de cal gerou diferença significativa, compara-se a média das amostras com iguais características ao anterior, entretanto com 10% de cal. Assim, se a subtração entre as média for maior que 0,61 (LD) a diferença é significativa, se for menor são iguais estatisticamente.

Tabela 15- Tabela de médias.

		Temperatura (t) – D										
		80°C			60°C			40°C				
		Cal (L) – A										
		5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%		
Massa Específica (γ)– B	1,1 g/cm ³	Tempo de Cura (d) – C	1	2,59	3,69	4,80	1,57	1,86	2,05	0,36	0,53	0,50
			3	4,28	5,31	5,40	3,38	4,64	5,96	1,40	1,44	1,52
			7	4,73	6,65	6,64	4,45	5,48	5,77	3,38	4,19	4,93
	1,2 g/cm ³	1	4,47	5,09	5,87	2,27	2,58	3,43	0,62	0,63	0,71	
		3	5,66	7,52	7,77	5,18	7,53	7,63	1,70	1,91	2,42	
		7	7,16	9,00	8,93	6,77	9,13	9,62	4,84	5,90	7,12	
	1,3 g/cm ³	1	5,87	6,80	7,23	2,85	3,76	4,36	0,88	1,09	1,27	
		3	7,95	9,14	10,30	7,54	9,32	9,55	2,43	2,58	3,12	
		7	9,42	12,70	13,53	9,37	12,20	13,67	6,56	8,45	9,03	

A = Cal / B = Massa Específica / C = Tempo de cura / D = Temperatura

As Tabelas 16 a 19 apresentam respectivamente a comparação de médias para a variação do fator Cal (A), o fator Massa Específica (B), o fator Tempo de cura (C) e o fator Temperatura (D). Quando a comparação de médias das resistências 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. Isto significa que estas médias não são diferentes e são explicadas pela mesma distribuição. Quando a comparação de médias é diferente, significa que a diferença entre as médias é maior do que poderia ser explicado pela variabilidade residual do próprio experimento. Consequentemente estas são diferentes e não podem ser explicadas pela mesma distribuição.

A escolha dos níveis dos fatores pode ser feita com o objetivo de obter maior resistência com maior economia e menor impacto ambiental. Portanto, um menor uso de cal pode corresponder – mesmo que seja resíduo conforme a demanda do mesmo um valor será

agregado – uma economia na mistura cinza-cal. Na questão ambiental os níveis dos demais fatores (variáveis independentes) sempre demandarão maior ou menor energia, portanto para se atingir uma determinada resistência à compressão simples a menor necessidade de uso de energia (seja para alterar a massa específica, temperatura e período de cura) sempre favorecerá na diminuição do impacto ambiental.

Tabela 16 – Comparação de média para o fator Cal (A).

Níveis do fator Cal (A) variando, B(Massa específica)C(Tempo de cura)D(Temperatura) fixos.							
B=1,1g/cm ³ C=1dia D=80°C	A1-A2	1,10	diferente	B=1,2g/cm ³ C=7dias D=60°C	A1-A2	2,37	diferente
	A1-A3	2,21	diferente		A1-A3	2,85	diferente
	A2-A3	1,11	diferente		A2-A3	0,49	igual
B=1,1 g/cm ³ C=3diasD=80°C	A1-A2	1,02	diferente	B=1,3g/cm ³ C=1diaD=60°C	A1-A2	0,91	diferente
	A1-A3	1,12	diferente		A1-A3	1,51	diferente
	A2-A3	0,10	igual		A2-A3	0,60	igual
B=1,1g/cm ³ C=7dias D=80°C	A1-A2	1,91	diferente	B=1,3g/cm ³ C=3diasD=60°C	A1-A2	1,78	diferente
	A1-A3	1,91	diferente		A1-A3	2,01	diferente
	A2-A3	0,00	igual		A2-A3	0,23	igual
B=1,2g/cm ³ C=1dia D=80°C	A1-A2	0,63	diferente	B=1,3g/cm ³ C=7diasD=60°C	A1-A2	2,83	diferente
	A1-A3	1,40	diferente		A1-A3	4,30	diferente
	A2-A3	0,77	diferente		A2-A3	1,47	diferente
B=1,2g/cm ³ C=3dias D=80°C	A1-A2	1,85	diferente	B=1,1g/cm ³ C=1diaD=40°C	A1-A2	0,17	igual
	A1-A3	2,10	diferente		A1-A3	0,14	igual
	A2-A3	0,25	igual		A2-A3	-0,03	igual
B=1,2g/cm ³ C=7diasD=80°C	A1-A2	1,84	diferente	B=1,1g/cm ³ C=3diasD=40°C	A1-A2	0,04	igual
	A1-A3	1,77	diferente		A1-A3	0,12	igual
	A2-A3	-0,07	igual		A2-A3	0,08	igual
B=1,3g/cm ³ C=1diaD=80°C	A1-A2	0,93	diferente	B=1,1g/cm ³ C=7diasD=40°C	A1-A2	0,81	diferente
	A1-A3	1,37	diferente		A1-A3	1,55	diferente
	A2-A3	0,43	igual		A2-A3	0,74	diferente
B=1,3g/cm ³ C=3dias D=80°C	A1-A2	1,19	diferente	B=1,2g/cm ³ C=1diaD=40°C	A1-A2	0,01	igual
	A1-A3	2,35	diferente		A1-A3	0,09	igual
	A2-A3	1,16	diferente		A2-A3	0,08	igual
B=1,3g/cm ³ C=7diasD=80°C	A1-A2	3,28	diferente	B=1,2g/cm ³ C=3diasD=40°C	A1-A2	0,20	igual
	A1-A3	4,11	diferente		A1-A3	0,72	diferente
	A2-A3	0,83	diferente		A2-A3	0,51	igual
B=1,1g/cm ³ C=1diaD=60°C	A1-A2	0,29	igual	B=1,2g/cm ³ C=7diasD=40°C	A1-A2	1,06	diferente
	A1-A3	0,48	igual		A1-A3	2,28	diferente
	A2-A3	0,19	igual		A2-A3	1,22	diferente
B=1,1g/cm ³ C=3diasD=60°C	A1-A2	1,26	diferente	B=1,3g/cm ³ C=1diaD=40°C	A1-A2	0,21	igual
	A1-A3	2,58	diferente		A1-A3	0,39	igual
	A2-A3	1,33	diferente		A2-A3	0,18	igual
B=1,1g/cm ³ C=7diasD=60°C	A1-A2	1,02	diferente	B=1,3g/cm ³ C=3diasD=40°C	A1-A2	0,15	igual

Níveis do fator Cal (A) variando, B(Massa específica)C(Tempo de cura)D(Temperatura) fixos.							
	A1-A3	1,32	diferente		A1-A3	0,69	diferente
	A2-A3	0,29	igual		A2-A3	0,54	igual
B=1,2g/cm ³ C=1diaD=60°C	A1-A2	0,31	igual	B=1,3g/cm ³ C=7diasD=40°C	A1-A2	1,89	diferente
	A1-A3	1,16	diferente		A1-A3	2,47	diferente
	A2-A3	0,85	diferente		A2-A3	0,58	igual
B=1,2g/cm ³ C=3diasD=60°C	A1-A2	2,35	diferente	Cal (A) – Níveis A1(5%) – A2(10%) – A3(15%) Massa Esp. (B) / Tempo de cura (C) / Temperatura (D)			
	A1-A3	2,45	diferente				
	A2-A3	0,10	igual				

Analisando-se a Tabela 16 percebe-se que, a comparação de médias para cada dois teores de cal (5% para 10%, 10% para 15%, e 5% para 15) indicou que 50 comparações (62%) das combinações estudadas são estatisticamente diferentes. Sendo observado que para os níveis mais altos dos fatores Tempo de cura (C), Massa Específica (B) e Temperatura (D) existe uma maior densidade de comparações de médias diferentes. Entretanto, o valor de níveis mais baixos destas mesmas variáveis verifica-se comparação de médias iguais nos resultados, sendo assim a influência de outras variáveis ou potencializam ou atenuam a capacidade da cal de gerar aumento na resistência.

Para o ganho de resistência no incremento de 10% para 15% de cal (assunto abordado no item 4.1.1) observa-se que 18 das 21 combinações, representando 86%, são estatisticamente iguais para o presente experimento. Isto significa que o ganho de resistência com a adição de 15% de cal em relação a 10% , de modo geral, não proporciona um aumento significativo. Isto ocorre devido à incapacidade da cinza volante em reagir com excesso de cal de carbureto, portanto o excesso de cal livre (Ca⁺⁺) permanece na mistura proporcionando pequeno aumento da resistência ou reduz a mesma quando em grandes quantidades (Suksun Horpibulsuk et al, 2012)

Tabela 17 – Comparação de média para o fator Massa Específica (B).

Níveis do fator Massa Específica (B) variando, A(Cal)C(Tempo de cura)D(Temperatura) fixos.							
A=5% C=1 dia D=80°C	B1-B2	1,88	diferente	A=10% C=7dias D=60°C	B1-B2	3,66	diferente
	B1-B3	3,28	diferente		B1-B3	6,72	diferente
	B2-B3	1,40	diferente		B2-B3	3,07	diferente
A=5% C=3 dias D=80°C	B1-B2	1,38	diferente	A=15% C=1dia D=60°C	B1-B2	1,38	diferente
	B1-B3	3,67	diferente		B1-B3	2,30	diferente
	B2-B3	2,29	diferente		B2-B3	0,93	diferente
A=5% C=7 dias D=80°C	B1-B2	2,43	diferente	A=15% C=3dias D=60°C	B1-B2	1,67	diferente
	B1-B3	4,69	diferente		B1-B3	3,59	diferente
	B2-B3	2,26	diferente		B2-B3	1,92	diferente
A=10% C=1 dia D=80°C	B1-B2	1,40	diferente	A=15% C=7dias D=60°C	B1-B2	3,85	diferente
	B1-B3	3,11	diferente		B1-B3	7,90	diferente
	B2-B3	1,71	diferente		B2-B3	4,05	diferente
A=10% C=3dias D=80°C	B1-B2	2,21	diferente	A=5% C=1dia D=40°C	B1-B2	0,26	igual
	B1-B3	3,83	diferente		B1-B3	0,51	igual
	B2-B3	1,62	diferente		B2-B3	0,25	igual
A=10% C=7dias D=80°C	B1-B2	2,35	diferente	A=5% C=3dias D=40°C	B1-B2	0,30	igual
	B1-B3	6,05	diferente		B1-B3	1,03	diferente
	B2-B3	3,70	diferente		B2-B3	0,73	diferente
A=15% C=1 dia D=80°C	B1-B2	1,07	diferente	A=5% C=7dias D=40°C	B1-B2	1,46	diferente
	B1-B3	2,43	diferente		B1-B3	3,18	diferente
	B2-B3	1,37	diferente		B2-B3	1,72	diferente
A=15% C=3dias D=80°C	B1-B2	2,36	diferente	A=10% C=1dia D=40°C	B1-B2	0,10	igual
	B1-B3	4,90	diferente		B1-B3	0,55	igual
	B2-B3	2,53	diferente		B2-B3	0,46	igual
A=15% C=7dias D=80°C	B1-B2	2,29	diferente	A=10% C=3dias D=40°C	B1-B2	0,46	igual
	B1-B3	6,89	diferente		B1-B3	1,14	diferente
	B2-B3	4,60	diferente		B2-B3	0,67	diferente
A=5% C=1dia D=60°C	B1-B2	0,70	diferente	A=10% C=7dias D=40°C	B1-B2	1,71	diferente
	B1-B3	1,28	diferente		B1-B3	4,26	diferente
	B2-B3	0,58	igual		B2-B3	2,55	diferente
A=5% C=3dias D=60°C	B1-B2	1,80	diferente	A=15% C=1dia D=40°C	B1-B2	0,21	igual
	B1-B3	4,16	diferente		B1-B3	0,77	diferente
	B2-B3	2,37	diferente		B2-B3	0,56	igual
A=5% C=7dias D=60°C	B1-B2	2,31	diferente	A=15% C=3dias D=40°C	B1-B2	0,90	diferente
	B1-B3	4,92	diferente		B1-B3	1,60	diferente
	B2-B3	2,60	diferente		B2-B3	0,70	diferente
A=10% C= 1dia D=60°C	B1-B2	0,71	diferente	A=15% C=7dias D=40°C	B1-B2	2,19	diferente
	B1-B3	1,90	diferente		B1-B3	4,10	diferente
	B2-B3	1,18	diferente		B2-B3	1,91	diferente
A=10% C=3dias D=60°C	B1-B2	2,89	diferente	Massa Esp.(B) :			
	B1-B3	4,69	diferente	Níveis B1(1,1 g/cm ³) – B2(1,2 g/cm ³) – B3(1,3 g/cm ³)			
	B2-B3	1,80	diferente	Cal(A) / Tempo de cura (C) / Temperatura (D)			

Na Tabela 17 observa-se que, diferente do obtido para os níveis de cal, uma grande maioria das comparações de médias são diferentes (86%). Onde para o baixo nível do fator de Temperatura (D=40°C) e Tempo de cura (C=1dia) a igualdade foi estabelecida. O fato de apresentar igualdade perante a análise de médias para amostras de menor temperatura e tempo de cura pode ser atribuído ao período de cura e temperatura exíguos para o surgimento de ligantes mais fortes. Assim, pode-se perceber que todos os níveis dos fatores A, C e D interferem nos níveis do fator C, comprovando as suas interações.

Tabela 18 – Comparação de média para o fator Tempo de cura (C).

Níveis do fator Tempo de cura (C) variando, A(Cal)B(Massa específica)D(Temperatura) fixos							
A=5%B=1,1g/cm ³ D=80°C	C1-C2	1,69	diferente	A=10%B=1,3g/cm ³ D=60°C	C1-C2	5,56	diferente
	C1-C3	2,14	diferente		C1-C3	8,44	diferente
	C2-C3	0,45	igual		C2-C3	2,88	diferente
A=5% B=1,2g/cm ³ D=80°C	C1-C2	1,20	diferente	A=15%B=1,1g/cm ³ D=60°C	C1-C2	3,91	diferente
	C1-C3	2,70	diferente		C1-C3	3,72	diferente
	C2-C3	1,50	diferente		C2-C3	-0,19	igual
A=5%B=1,3g/cm ³ D=80°C	C1-C2	2,09	diferente	A=15%B=1,2g/cm ³ D=60°C	C1-C2	4,20	diferente
	C1-C3	3,56	diferente		C1-C3	6,19	diferente
	C2-C3	1,47	diferente		C2-C3	1,99	diferente
A=10%B=1,1g/cm ³ D=80°C	C1-C2	1,62	diferente	A=15%B=1,3g/cm ³ D=60°C	C1-C2	5,19	diferente
	C1-C3	2,96	diferente		C1-C3	9,31	diferente
	C2-C3	1,34	diferente		C2-C3	4,12	diferente
A=10%B=1,2g/cm ³ D=80°C	C1-C2	2,42	diferente	A=5%B=1,1g/cm ³ D=40°C	C1-C2	1,04	diferente
	C1-C3	3,91	diferente		C1-C3	3,02	diferente
	C2-C3	1,48	diferente		C2-C3	1,98	diferente
A=10%B=1,3g/cm ³ D=80°C	C1-C2	2,34	diferente	A=5%B=1,2g/cm ³ D=40°C	C1-C2	1,08	diferente
	C1-C3	5,90	diferente		C1-C3	4,21	diferente
	C2-C3	3,56	diferente		C2-C3	3,13	diferente
A=15%B=1,1g/cm ³ D=80°C	C1-C2	0,60	igual	A=5%B=1,3g/cm ³ D=40°C	C1-C2	1,56	diferente
	C1-C3	1,84	diferente		C1-C3	5,68	diferente
	C2-C3	1,24	diferente		C2-C3	4,13	diferente
A=15%B=1,2g/cm ³ D=80°C	C1-C2	1,90	diferente	A=10%B=1,1g/cm ³ D=40°C	C1-C2	0,91	diferente
	C1-C3	3,07	diferente		C1-C3	3,66	diferente
	C2-C3	1,17	diferente		C2-C3	2,75	diferente
A=15%B=1,3g/cm ³ D=80°C	C1-C2	3,07	diferente	A=10%B=1,2g/cm ³ D=40°C	C1-C2	1,28	diferente
	C1-C3	6,30	diferente		C1-C3	5,27	diferente
	C2-C3	3,23	diferente		C2-C3	3,99	diferente
A=5%B=1,1g/cm ³ D=60°C	C1-C2	1,81	diferente	A=10%B=1,3g/cm ³ D=40°C	C1-C2	1,49	diferente
	C1-C3	2,88	diferente		C1-C3	7,36	diferente
	C2-C3	1,07	diferente		C2-C3	5,87	diferente
A=5%B=1,2g/cm ³ D=60°C	C1-C2	2,91	diferente	A=15%B=1,1g/cm ³ D=40°C	C1-C2	1,02	diferente
	C1-C3	4,50	diferente		C1-C3	4,43	diferente
	C2-C3	1,59	diferente		C2-C3	3,41	diferente
A=5%B=1,3g/cm ³ D=60°C	C1-C2	4,69	diferente	A=15%B=1,2g/cm ³ D=40°C	C1-C2	1,71	diferente
	C1-C3	6,52	diferente		C1-C3	6,40	diferente
	C2-C3	1,83	diferente		C2-C3	4,70	diferente
A=10%B=1,1g/cm ³ D=60°C	C1-C2	2,77	diferente	A=15%B=1,3g/cm ³ D=40°C	C1-C2	1,85	diferente
	C1-C3	3,61	diferente		C1-C3	7,76	diferente
	C2-C3	0,84	diferente		C2-C3	5,91	diferente
A=10%B=1,2g/cm ³ D=60°C	C1-C2	4,95	diferente	Tempo de cura ©: Níveis C1(1 dia) – C2(3 dias) – C3(7 dias) Cal(A) / Massa Esp. (B) / Temperatura (D)			
	C1-C3	6,56	diferente				
	C2-C3	1,61	diferente				

Na Tabela 18 observa-se que a variação dos níveis do fator tempo de cura (1 dia, 3 dias e 7 dias) obteve resultados em comparações de médias diferentes na grande maioria (96%) dos níveis de combinação dos fatores A, B, e D. Exceto para três combinações: 3 e 7 dias de cura (para L=5%, $\gamma=1,1\text{g/cm}^3$ e $t=80^\circ\text{C}$), e 1 e 3 dias de cura (para L=5%, $\gamma=1,1\text{g/cm}^3$ e $t=80^\circ\text{C}$). Portanto, exceto as combinações apresentadas, é possível concluir que o incremento do período de cura para os níveis estabelecidos fornece diferenças significativas na resistência à compressão.

Tabela 19 – Comparação de média para o fator Temperatura (D).

Níveis do fator Temperatura (D) variando, A(Cal)B(Massa específica)C(Tempo de cura) fixos							
A=5%B=1,1g/cm ³ C=1 dia	D1-D2	1,02	diferente	A=10%B=1,3g/cm ³ C=3dias	D1-D2	-0,18	igual
	D1-D3	2,23	diferente		D1-D3	6,56	diferente
	D2-D3	1,21	diferente		D2-D3	6,74	diferente
A=5%B=1,2g/cm ³ C=1 dia	D1-D2	6,74	diferente	A=15%B=1,1g/cm ³ C=3dias	D1-D2	-0,56	igual
	D1-D3	3,84	diferente		D1-D3	3,88	diferente
	D2-D3	1,65	diferente		D2-D3	4,44	diferente
A=5%B=1,3g/cm ³ C=1 dia	D1-D2	3,02	diferente	A=15%B=1,2g/cm ³ C=3dias	D1-D2	0,14	igual
	D1-D3	4,99	diferente		D1-D3	5,35	diferente
	D2-D3	1,97	diferente		D2-D3	5,21	diferente
A=10%B=1,1g/cm ³ C=1 dia	D1-D2	1,83	diferente	A=15%B=1,3g/cm ³ C=3dias	D1-D2	0,75	diferente
	D1-D3	3,16	diferente		D1-D3	7,18	diferente
	D2-D3	1,33	diferente		D2-D3	6,43	diferente
A=10%B=1,2g/cm ³ C=1 dia	D1-D2	7,67	diferente	A=5%B=1,1g/cm ³ C=7dias	D1-D2	0,28	igual
	D1-D3	4,46	diferente		D1-D3	1,35	diferente
	D2-D3	1,95	diferente		D2-D3	1,07	diferente
A=10%B=1,3g/cm ³ C=1 dia	D1-D2	3,04	diferente	A=5%B=1,2g/cm ³ C=7dias	D1-D2	0,40	igual
	D1-D3	5,71	diferente		D1-D3	2,33	diferente
	D2-D3	2,67	diferente		D2-D3	1,93	diferente
A=15%B=1,1g/cm ³ C=1 dia	D1-D2	2,75	diferente	A=5%B=1,3g/cm ³ C=7dias	D1-D2	0,05	igual
	D1-D3	4,30	diferente		D1-D3	2,86	diferente
	D2-D3	1,55	diferente		D2-D3	2,81	diferente
A=15%B=1,2g/cm ³ C=1 dia	D1-D2	9,30	diferente	A=10%B=1,1g/cm ³ C=7dias	D1-D2	1,17	diferente
	D1-D3	5,15	diferente		D1-D3	2,46	diferente
	D2-D3	2,72	diferente		D2-D3	1,29	diferente
A=15%B=1,3g/cm ³ C=1 dia	D1-D2	2,88	diferente	A=10%B=1,2 g/cm ³ C=7dias	D1-D2	-0,13	igual
	D1-D3	5,96	diferente		D1-D3	3,10	diferente
	D2-D3	3,09	diferente		D2-D3	3,24	diferente
A=5%B=1,1g/cm ³ C=3dias	D1-D2	0,90	diferente	A=10%B=1,3g/cm ³ C=7dias	D1-D2	0,50	igual
	D1-D3	2,88	diferente		D1-D3	4,25	diferente
	D2-D3	1,98	diferente		D2-D3	3,75	diferente

Níveis do fator Temperatura (D) variando, A(Cal)B(Massa específica)C(Tempo de cura) fixos							
A=5%B=1,2g/cm ³ C=3dias	D1-D2	0,49	igual	A=15%B=1,1g/cm ³ C=7dias	D1-D2	0,87	diferente
	D1-D3	3,96	diferente		D1-D3	1,71	diferente
	D2-D3	3,47	diferente		D2-D3	0,84	diferente
A=5%B=1,3g/cm ³ C=3dias	D1-D2	0,41	igual	A=15%B=1,2g/cm ³ C=7dias	D1-D2	-0,69	diferente
	D1-D3	5,52	diferente		D1-D3	1,82	diferente
	D2-D3	5,11	diferente		D2-D3	2,50	diferente
A=10%B=1,1g/cm ³ C=3dias	D1-D2	0,67	diferente	A=15%B=1,3g/cm ³ C=7dias	D1-D2	-0,13	igual
	D1-D3	3,86	diferente		D1-D3	4,51	diferente
	D2-D3	3,19	diferente		D2-D3	4,64	diferente
A=10%B=1,2g/cm ³ C=3dias	D1-D2	-0,01	igual	Temperatura (D):			
	D1-D3	5,61	diferente	Níveis D1 (80°C) – D2 (60°C) – D3 (40°C)			
	D2-D3	5,62	diferente	Cal(A) / Massa Esp. (B) / Tempo de cura (C)			

Verifica-se na Tabela 19 que os níveis do fator Temperatura (D) tiveram comparações de médias diferentes, pois de 81 combinações apenas 13 delas são iguais (16%). Entretanto, é possível verificar igualdade entre médias para quase a totalidade do comparativo entre 80°C (D1) e 60°C (D2) para os períodos de 3 e 7 dias. Em determinadas comparações entre 60 e 80°C (para A=10%B=1,2g/cm³ C=3dias, A=10% B=1,3g/cm³ C=3dias, A=15% B=1,1g/cm³ C=3dias, e A=10% B=1,2 g/cm³ C=7dias) foram encontradas diferenças negativas. Isto significa que médias de amostras curadas a 60°C obtiveram maior resistência, porém não significativas estatisticamente. Entretanto, para um caso (A=15% B=1,2g/cm³ C=7dias) de comparação à média para 60°C foi estatisticamente maior. Este resultado corrobora com a estagnação do crescimento da resistência entre 60°C e 80°C como visto em item anterior (Item 4.1.3).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados, bem como da avaliação da influência das variáveis investigadas (quantidade de cal, quantidade de cinza volante, massa específica aparente seca, tempo de cura e temperatura de cura) sobre a resistência mecânica de uma cinza volante artificialmente cimentada foram estabelecidas, dentro das condições e limites específicos deste estudo, as seguintes conclusões:

a) Quanto à influência da quantidade de cal

Mesmo pequenas adições de cal são suficientes para gerar ganhos de resistência nesses materiais, verificando-se que na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples aumenta conforme a quantidade de cal independentemente da massa específica aparente seca utilizada. Entretanto, o ganho de resistência de 10% para 15% de cal não é tão expressivo quanto de 5% para 10%. Estatisticamente, de forma geral, a adição de 15% de cal em relação a 10% de cal não proporciona ganhos significativos na resistência à compressão simples para a mistura estudada. Mesmo assim, a linearidade pôde ser empregada para representar o comportamento da adição da cal de carbureto frente à variação da resistência a compressão simples. Isto possibilitou identificar o aumento da taxa de crescimento, representada pela inclinação da reta de ajuste, conforme a diminuição da porosidade e aumento do tempo de cura. Indicando que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactas, e atribuídas ao período de cura à possibilidade da formação de mais ligantes, principalmente para o processo acelerado de cura. Com relação ao aumento da temperatura a taxa de ganho, em geral, foi maior conforme o aumento da temperatura devido à aceleração das reações pozolânicas, entretanto entre os resultados das amostras curadas a 60°C e 80°C a taxa de ganho foi semelhante. Isto está associado à estabilização da influência da variável temperatura nas reações químicas entre a cal de carbureto e a cinza volante.

b) Quanto à influência da porosidade

A porosidade tem efeito significativo sobre a resistência à compressão simples, tanto para corpos-de-prova ensaiados a 1, 3, 7 e 14 dias como para as diferentes temperaturas de cura (23°C, 40°C, 60°C e 80°C), aumentando com a diminuição da porosidade independentemente da quantidade de cal utilizada. Entretanto, para o período de cura de 3 dias a 23°C apenas corpos-de-prova com menor porosidade sobreviveram ao processo de imersão. Isto comprova que a maior proximidade entre as partículas de cinza e cal de carbureto proporcionam um maior número de contatos e um maior intertravamento entre as partículas, ocorrendo então, uma cimentação mais efetiva. Assim como na avaliação da influência do teor de cal, a resistência à compressão simples cresceu linearmente com a diminuição das porosidades propostas para o presente estudo.

c) Relação porosidade / teor volumétrico de cal

A relação entre porosidade da mistura compactada (η) e o teor volumétrico da cal (L_v) de carbureto não apresentaram uma correlação capaz de formar uma equação de dosagem razoável para a determinação da resistência a compressão simples devido à falta de proporcionalidade entre as duas variáveis. Entretanto, um melhor ajuste dos dados experimentais foi obtido para a relação entre porosidade/teor volumétrico de cal através de um expoente no teor volumétrico de cal igual a 0,11. Assim, proporcionou a geração de correlação única entre $\eta/(L_v)^{0,11}$ e resistência à compressão simples gerando curvas do tipo potência e equações na previsão do comportamento mecânico das amostras curadas. Para todos os tempos de cura (1, 3, 7 e 14 dias) e temperaturas estudadas (23, 40, 60 e 80°C), com vapor ou sem vapor, foi possível a utilização da mesma relação $\eta/(L_v)^{0,11}$ que mostrou ser aplicável para curas aceleradas.

d) Quanto à influência do tempo de cura

O tempo de cura exerceu influência na resistência à compressão simples da mistura estudada para todas as temperaturas verificadas, possibilitando a formulação de relação

$\frac{q_u}{\left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}}\right]^{-2,97}}$. Esta normalização da resistência à compressão simples equacionou

porosidade, teor volumétrico de cal e tempo de cura para as temperaturas 23°C, 40°C, 60°C e 80°C. Assim, possibilitou verificar a magnitude de ganho de resistência proporcionada pela

influência desta variável e formulação de equação única de dosagem para a determinação da resistência à compressão simples para cada temperatura estudada. O desenvolvimento da resistência à compressão simples frente à variação do tempo de cura foi linear para as temperaturas menores 23°C, 40°C e 80°C. Entretanto para 80°C a taxa de crescimento foi menor do que para 40°C e para 60°C uma curva foi observada representando uma tendência de diminuição nos ganhos de resistência devido à aceleração promovida pelas altas temperaturas que alcançaram altos valores em curto período de cura. Entretanto, não foi observado estagnação no ganho de resistência, assim existe a possibilidade de ganhos maiores de resistência para períodos maiores de cura dos que os pesquisados.

e) Quanto à influência da temperatura

Igualmente como o período de cura, a temperatura influencia na resistência à compressão simples da mistura compactada devido ao processo de aceleração das reações pozolânicas. Portanto, para curtos períodos de cura é possível a utilização da temperatura como acelerador no aumento da resistência a compressão simples. Assim, através da normalização da

resistência à compressão simples, $\frac{q_u}{\left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,11}}\right]^{-2,97}}$, foi constatado que para o período de cura

de 1 dia o crescimento da resistência é linear para todas as temperaturas estudadas. Entretanto, para os períodos mais longos (3 e 7 dias) a linearidade foi observada até, aproximadamente 50°C para 7 dias de cura e 60°C para 3 dias de cura. Após este período ocorreu a estagnação de ganho de resistência pelo aumento da temperatura de cura. Portanto, existe um limite de capacidade de aceleração das reações pozolânicas através do aumento da temperatura, onde para uma determinada energia (calor) disponível excedente não altera a cinética das reações pozolânicas. Entretanto, não significa que as reações tenha cessado, pois os resultados deste trabalho mostram que o tempo de cura continua proporcionando o aumento da resistência à compressão. Este fato ficou evidente devido à constatação do aumento da taxa de crescimento conforme o aumento do período de cura para as retas propostas.

f) Análise de Variância

Para a análise da variância não foram incluídas as amostras curadas a 23°C por falta de plenitude dos dados devido a falta de cimentação dos corpos-de-prova curados por 3 dias. As variáveis independentes analisadas no experimento (quantidade cal, porosidade, tempo de cura e temperatura) são significativas na alteração da resistência à compressão simples. A

ordem de maior influência das variáveis independentes sobre a variável resposta (resistência à compressão simples) foi: Tempo de cura, Temperatura de cura, Porosidade e Teor de cal. Foram consideradas significantes as interações entre as variáveis estudadas, portanto as taxas de ganho observadas nas análises anteriores são respostas da interação entre as variáveis estudadas que podem ou potencializar ou atenuar a influência na variável resistência a compressão simples. 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.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- A verificação do aumento da resistência à compressão simples, para a cinza e cal em estudo, em tempos de cura mais longos para as temperaturas de 40, 60 e 80°C. Assim, determinar a estagnação do ganho de resistência para o período de cura.
- Utilizar outra cinza volante com características diferentes, entretanto para as mesmas variáveis do presente estudo para determinar a influência da cinza na relação porosidade/teor volumétrico de cal.
- A execução de ensaios de resistência à tração e determinação da razão entre tração e compressão.
- Determinar a mineralogia formada no processo de cura acelerada e comparar com a mineralogia formada para curas de períodos longos em 23°C.
- Realizar ensaios de lixiviação para determinar a efetividade da solidificação/estabilização de elementos traços presentes na cinza volante para curas aceleradas.

6 REFERÊNCIAS

ADRIANO, D.C., PAGE, A.L., ELSEEWI, A.A. CHANG, A.C. Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: a review. *Journal of Environmental Quality*. V.9, p. 333-334, 1980.

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

ANDRADE, A. C. Tijolos de cinza volante e cal: estudo do desempenho quanto à resistência, absorção, durabilidade e aderência. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1991.

ANEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de Energia Elétrica do Brasil Disponível em <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap9.pdf>. Acessado em Fevereiro de 2013.

ANTIOHOS, S.; TSIMAS, S. Activation of fly ash cementitious systems in the presence of quicklime. Part I. Compressive strength and pozzolanic reaction rate. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, Issue 5, p.769-779, 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Uso de resíduos de combustão de carvão na indústria brasileira de cimento. São Paulo, 1992, 19p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos Sólidos - classificação. Rio de Janeiro – segunda edição, 71p. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro – segunda edição, 16p. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro – segunda edição, 3p. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653/92: Materiais pozolânicos – Especificações. Rio de Janeiro, 1992

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 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. 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 7175: Cal hidratada para argamassa - Especificação. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9289: Cal hidratada para argamassas – determinação da finura. Rio de Janeiro, 1986b. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. 2001.

BARADAN, B. Fly ash-cement based structural materials. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, V.9, n.4, p.225-228, 1987.

BEN- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – Ministério das Minas e Energia – 2010. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompleatas.aspx> > , consultado em Fevereiro de 2013.

BERRY, E.E.; HEMMINGS, R.T.; ZHANG, M.H.; CORNELIUS, B.J.; GOLDEN, D.M. Hydration in high-volume fly ash concrete binders. ACI Materials Journal, Vol. 91, N°4, p.382-389, 1994.

BINOTTO, R.B. Avaliação do grau de contaminação das águas subterrâneas em áreas de influência de resíduos do processamento do carvão. 1997. 184p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), PPGEM - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BROUWERS, H. J. H.; VAN EIJK, R. J. Chemical reaction of fly ash. 11TH INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT (ICCC). P.791-800. Durban, South Africa, 2003.

BROWN, M. Laying waste: the poisoning of América by toxic chemicals. New York: Washington Square Press, 1981.

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.

CGTEE - COMPANHIA DE GERAÇÃO TÉRMICA DE ENERGIA ENERGIA. Disponível em < <http://www.cgtee.gov.br>>. Acesso em: Janeiro de 2013.

CHANG, T. S.; WOODS, R. D. Effect of particle contact bondon shear modulus. *Journal of Geotechnical Engineering*, v.118 n.8, p.1216–1233, 1992.

CHIES, F.; SILVA, N. I. W.; ZWONOK, O. Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão – CIPECAL. In: ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. Coletânea Habitar - Utilização de resíduos na construção habitacional. Volume 4. Capítulo 7. p. 218 – 239. 2003.

CME – COMISSÃO DE MINAS E ENERGIA. Carvão Mineral, o Combustível do século XXI. Brasília, 2005, pp 26-29 e 132-136.

CONSOLI, N. C., DALLA ROSA, A., AND SALDANHA, R. B. (2011). “Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(4), 432- 40.

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.

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.

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.

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.2009

EGEMEN, E.; YURTERI, C. Regulatory leaching tests for fly-ash: a cae study. *Waste Management Research*, v. 14, p.43-50, 1996.

EPA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Journal, Love Canal Tragedy*, by Edkardt C. Beck, pag. 17. 1979 Disponível em: <[http://heinonline.org/HOL/LandingPage?collection=journals&handle=hein.journals/epajrnl5&div=10&id=&page=.](http://heinonline.org/HOL/LandingPage?collection=journals&handle=hein.journals/epajrnl5&div=10&id=&page=;)>

FELT, E. J. Factors Influencing Physical Properties of Soil-cement Mixtures. *Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association: Bulletin D5*. Authorized Reprint from Bulletin 108 of the Highway Research Board, 1955, 138p.

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.

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.

FRAAY, A.L.A.; BIJEN, J.M.; deHAAN, Y.M. The reaction of fly ash in concrete. A critical examination. *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, Issue 2, p.235-246, 1981.

FU, X.; WANG, Z.; TAO, W.; YANG, C.; HOU, W.; DONG, Y.; WU, X. Studies on blended cement with a large amount of fly ash. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, Issue 7, p.1153-1159. 2002

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J.C., ALMEIDA, R.S.; Remoção de compostos tóxicos de solução aquosa por adsorção com zeólita sintetizada a partir de cinzas de carvão. *Química Nova*, V.27, p.582-585, 2004.

GLASSER, F. P. The pore fluid in Portland cement: its composition and role. 11TH INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT (ICCC). P.19-30. Durban, South Africa, 2003.

GOBBO, L. A.; SANT'AGOSTINO, L. M.; D'AGOSTINO, L. Z. XRD – Rietveld quantitative analysis of glass-containing by-products used in the Brazilian cement industry. 12TH INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT. Montreal, Canada, 2007.

HARTY, J.R.; THOMPSON, M.R. Lime reativity of tropical and subtropical soil. *Highway Research Recird*, Washington, n. 442, p.102-112, 1973

HIHEEY, J.E.; KEITER, E.A.; KEITER, R.L. *Inorganic chemistry: principles of structure and reactivity*. 2°.ed. New York/; Harper Collins College Publishers, 1993. 936p.

HOPPE FILHO, JUAREZ. Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, 247 paginas. São Paulo, 2008.

HORPIBULSUK, SUKSUN; PHETCHUAY, CHAYAKRIT. Soil Stabilization by Calcium Carbide Residue and Fly Ash. 2012. *American Society of Civil Engineers*. Vol. 24, No. 2, February 1, 2012.

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

JOSHI RC, LOTHIA RP. Fly ash in concrete: production, properties and uses. In: Advances in concrete technology, vol. 2. Gordon and Breach Science Publishers; 1997.

KIM, A. G. Fluid extraction of metals from coal fly ash: geochemical simulation of natural leaching. 216 f. Tese (Doutorado em Geologia), Department of Geology and Planetary Science, University of Pittsburgh, 2002.

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.

LEVANDOWSKI, J.; KALKREUTH, W. Chemical and petrographical characterization of fee coal, fly ash and bottom ash from the Figueira Power Plant, Paraná, Brasil. International Journal of Coal Geology. 77, p. 269-281, 2009.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

LOVATO, R. S. Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MALEK, R.I.; KHALIL, Z. H.; IMBABY, S.S.; ROY, D.M. The contribution of class-F fly ash to the strength of cementitious mixtures. Cement and Concrete Research, Vol. 35, Issue6, p.1152-1154, 2005.

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.

MANJUNATHA, L.S., SUNIL, B.M. Stabilization/solidification of iron ore mine tailings using cement, lime and fly ash. IJRET:International Journal of Research in Engineering and Technology. Vol.2. Dec-2013.

MARCIALIS A., MASSIDDA L., SANNA U. Low temperature steam curing hydration of lime-fly-ash compacts. CEMENT and CONCRETE RESEARCH. Vol. 13, p.887-894, 1983.

MARINHO, F. A M.; CHANDLER, R.J.. “Discussion : A new instrument for the measurement of soil moisture suction”. Géotechnique 44, n°. 3, pp. 551-556. 1994.

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.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: Lea's chemistry of cement and concrete. Edited by Peter C. Hewlett. Fourth Edition, 1998.

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., AND DAVIDSON, D. T. (1963). “Compaction characteristics of soil-fly ash-lime mixtures.” Hwy. Res. Rec. 29, Highway Research Board, 27–41.

MESQUITA, LIGIA PAULINE. Avaliação da Fixação de Metais Pesados em Matrizes Cimentícias. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

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.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Matriz Energética Nacional 2030. Colaboração. Empresa de Pesquisa Energética . _ Brasília : MME :EPE, 2007. p. 254. Disponível em: www.mme.gov.br/spe/galerias/arquivos/Publicacoes/matriz_energetica_nacional_2030/

MONTANHEIRO, T.J., YAMAMOTO, J.K. KIHARA, Y. Características e propriedades pozolânicas de arenitos opalinos da serra de Itaqueri, SP. Revista do Instituto Geológico. São Paulo, p.13-24, 2002.

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.

NONTANANADH, S.; KAMON, M. Hidration mechanisms of fly-ash stabilized by lime. In: ENVIROMENTAL GEOTECHNICS, 1996, Osaka. Rotterdam: A.A. Balkema, 1996. Vol.2, p.857-862.

NÚÑEZ, W. P. Estabilização Físico-química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PACHECO-TORGAL, F., JALALI, S., 2012. Earth construction: lessons from the past for future eco-efficient construction. Const. Build. Mat. 29, 512e519

PINTO, S.; PREUSSLER, E.S.; GONÇALVES, J.V.S. Método de projeto de pavimentação semi-rígido: aplicação para caso de base pozolânica. Rio de Janeiro: DNER, 1983.

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.

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.

ROHDE, G.M. Epistemologia das ciências ambientais: as cinzas de carvão do baixo Jacuí, RS. Porto Alegre: Departamento de Ecologia, 1995. 225p. Dissertação (Mestrado Ecologia) – Departamento de Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

ROHDE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N. I. W.. Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil. Aspectos técnicos e Ambientais. V.I., CIENTEC, Porto Alegre. 2006.

RUSHAD, TABIN S.; KUMAR, ABHISHEK ; DUGGAL S. K; MEHTA P. K. Experimental Studies on Lime-Soil-Fly Ash Bricks. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERING*. Vol.1, n.4, 2011

SILVA, N. I. W. J. R; CHIES f., ZWONOK O. Uso de Cinzas de Carvão na Construção Civil. I Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Anais. Canela – RS, p. 15-20, 1997.

SILVANI, C. Influência da temperatura na cura da mistura areia- cinza volante-cal. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.2013.

SWAINE, D.J. WHY. Trace elements are important. *Fuel Processing Technology*, v.65-66, p. 21-33, 2000.

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.

TRB - TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Lime Stabilization, reactions, properties, design and construction. Washington: TRB, 1987. 58p. (State of the art report, 5).

UBBRIACO, P.; CALABRESE, D. Solidification and stabilization of cement paste containing fly ash from municipal solid waste. *Thermochimica Acta*, v. 321, p. 143 – 150, 1998.

UNFPA - UNITED NATIONS POPULATION FUND. Delivering in a World of 7 Billion, 2011. Annual Report.

WANG, K.S., WU, H. Environmental-benign utilization of fly ash as low-cost adsorbents. *Journal of Hazardous Materials*, V. B136, p. 482-501, 2006.

WCA (World Coal Association) (2011) Coal Statistics. Available at: <http://www.worldcoal.org/resources/coal-statistics/> (accessed March 2014).

WCED. World Commission on Environment and Development. Our Common Future. Oxford and New York: Oxford University Press, 1987.

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 corpos-de-prova curados por 3 dias - 23°C.

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
515	5	1,30	17,85	0,66	58,08	39,87	2,91	13,68	35,45	0,85
516	5	1,29	18,28	0,67	59,17	40,01	2,91	13,76	35,57	0,84
517	5	1,30	18,23	0,66	59,29	39,89	2,91	13,69	35,47	0,79
178	10	1,29	17,95	0,67	57,52	40,23	5,53	7,28	33,33	0,90
179	10	1,30	17,90	0,66	58,04	39,93	5,55	7,19	33,07	0,78
180	10	1,29	17,57	0,67	56,58	40,10	5,54	7,24	33,22	0,83
512	15	1,30	17,75	0,66	58,23	39,64	8,00	4,95	31,54	0,98
513	15	1,30	18,08	0,66	59,30	39,65	8,00	4,96	31,54	1,04
514	15	1,30	17,88	0,66	58,60	39,66	8,00	4,96	31,56	1,04

Tabela A 2 - Dados gerais corpos-de-prova curados por 7 dias - 23°C.

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
157	5	1,10	17,61	0,96	39,65	48,93	2,48	19,77	44,29	0,48
158	5	1,11	17,52	0,95	39,74	48,76	2,48	19,63	44,11	0,51
159	5	1,10	17,96	0,96	40,45	48,94	2,48	19,77	44,29	0,56
36	10	1,10	17,75	0,96	40,05	48,86	4,73	10,33	41,19	0,55
37	10	1,10	17,80	0,95	40,30	48,78	4,74	10,30	41,11	0,56
38	10	1,11	17,53	0,94	40,06	48,55	4,76	10,20	40,89	0,52
167	15	1,10	18,35	0,96	41,09	49,04	6,76	7,26	39,75	0,50
168	15	1,10	18,12	0,96	40,87	48,85	6,78	7,20	39,58	0,49
427	15	1,10	18,04	0,95	40,74	48,83	6,78	7,20	39,55	0,52
163	5	1,20	18,41	0,80	49,44	44,56	2,69	16,58	39,97	0,60
164	5	1,20	18,17	0,81	48,70	44,61	2,69	16,61	40,01	0,63
165	5	1,19	18,32	0,81	48,93	44,69	2,68	16,67	40,09	0,62
160	10	1,20	17,95	0,80	48,37	44,45	5,14	8,65	37,12	0,75
161	10	1,20	17,64	0,80	47,74	44,35	5,15	8,62	37,03	0,79
429	10	1,19	18,23	0,82	48,24	44,90	5,09	8,81	37,54	0,80
176	15	1,20	17,59	0,79	47,67	44,29	7,39	6,00	35,55	0,85
430	15	1,20	17,96	0,80	48,51	44,37	7,37	6,02	35,61	0,89
184	15	1,20	17,70	0,80	47,63	44,46	7,36	6,04	35,70	0,84
57	5	1,30	17,56	0,66	57,07	39,90	2,91	13,70	35,47	1,00
58	5	1,29	17,56	0,67	56,38	40,19	2,90	13,86	35,75	0,99
59	5	1,29	17,59	0,67	56,58	40,15	2,90	13,84	35,71	1,00
172	10	1,29	18,48	0,68	58,92	40,34	5,52	7,31	33,43	1,12
174	10	1,29	17,94	0,67	57,78	40,10	5,54	7,24	33,22	1,16
215	10	1,30	17,69	0,66	57,44	39,91	5,56	7,18	33,05	1,14
188	15	1,29	17,81	0,67	57,04	40,22	7,93	5,07	32,03	1,41
432	15	1,30	17,91	0,66	58,58	39,71	7,99	4,97	31,59	1,40

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
157	5	1,10	17,61	0,96	39,65	48,93	2,48	19,77	44,29	0,48
158	5	1,11	17,52	0,95	39,74	48,76	2,48	19,63	44,11	0,51
159	5	1,10	17,96	0,96	40,45	48,94	2,48	19,77	44,29	0,56
36	10	1,10	17,75	0,96	40,05	48,86	4,73	10,33	41,19	0,55
37	10	1,10	17,80	0,95	40,30	48,78	4,74	10,30	41,11	0,56
38	10	1,11	17,53	0,94	40,06	48,55	4,76	10,20	40,89	0,52
167	15	1,10	18,35	0,96	41,09	49,04	6,76	7,26	39,75	0,50
168	15	1,10	18,12	0,96	40,87	48,85	6,78	7,20	39,58	0,49
427	15	1,10	18,04	0,95	40,74	48,83	6,78	7,20	39,55	0,52
163	5	1,20	18,41	0,80	49,44	44,56	2,69	16,58	39,97	0,60
164	5	1,20	18,17	0,81	48,70	44,61	2,69	16,61	40,01	0,63
165	5	1,19	18,32	0,81	48,93	44,69	2,68	16,67	40,09	0,62
160	10	1,20	17,95	0,80	48,37	44,45	5,14	8,65	37,12	0,75
161	10	1,20	17,64	0,80	47,74	44,35	5,15	8,62	37,03	0,79
433	15	1,30	17,89	0,66	58,24	39,82	7,98	4,99	31,69	1,40

Tabela A 3- Dados gerais corpos-de-prova curados por 14 dias - 23°C

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
45	5	1,10	18,44	0,96	41,56	48,92	2,48	19,76	44,28	0,85
46	5	1,11	17,81	0,94	40,75	48,54	2,49	19,46	43,90	0,83
47	5	1,11	17,58	0,94	40,23	48,54	2,49	19,46	43,90	0,93
34	10	1,11	17,55	0,95	39,85	48,70	4,74	10,27	41,04	1,02
35	10	1,11	17,52	0,94	40,14	48,49	4,76	10,18	40,84	1,01
419	10	1,10	18,05	0,97	40,33	49,11	4,71	10,44	41,42	0,92
48	15	1,11	17,62	0,94	40,23	48,55	6,82	7,12	39,30	1,02
128	15	1,11	17,59	0,95	40,09	48,60	6,81	7,13	39,35	1,09
129	15	1,10	17,76	0,96	40,07	48,85	6,78	7,20	39,58	1,00
42	5	1,21	17,57	0,78	48,66	43,80	2,72	16,07	39,22	1,21
43	5	1,21	17,77	0,79	48,50	44,15	2,71	16,31	39,57	1,22
44	5	1,19	17,75	0,81	47,50	44,64	2,68	16,63	40,05	1,23
51	10	1,21	17,59	0,78	48,71	43,78	5,20	8,42	36,52	1,54
52	10	1,20	17,55	0,79	47,77	44,21	5,16	8,57	36,91	1,54
53	10	1,20	18,53	0,80	50,02	44,40	5,14	8,64	37,09	1,51
130	15	1,20	18,07	0,80	48,97	44,29	7,39	6,00	35,55	1,53
54	15	1,21	17,81	0,78	49,03	43,91	7,44	5,90	35,21	1,58
132	15	1,20	17,77	0,79	48,40	44,16	7,40	5,97	35,44	1,44
60	5	1,30	17,86	0,66	58,62	39,66	2,92	13,56	35,25	1,72
61	5	1,30	17,92	0,66	58,79	39,68	2,92	13,57	35,26	1,73

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
62	5	1,30	17,77	0,67	57,66	39,95	2,91	13,72	35,52	1,71
39	10	1,30	18,44	0,66	60,08	39,82	5,56	7,16	32,97	2,07
41	10	1,29	18,37	0,67	58,74	40,27	5,52	7,29	33,37	1,97
424	10	1,29	18,40	0,67	59,15	40,15	5,53	7,25	33,26	1,82
190	15	1,29	17,94	0,67	57,79	40,09	7,94	5,05	31,92	1,90
191	15	1,28	17,68	0,68	56,02	40,48	7,89	5,13	32,25	2,12
425	15	1,29	18,48	0,67	59,80	39,97	7,96	5,02	31,82	1,94

Tabela A 4- Dados gerais corpos-de-prova curados por 1 dia - 40°C.

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
381	5	1,10	18,03	0,96	40,73	48,86	2,48	19,71	44,21	0,36
382	5	1,10	17,70	0,95	40,08	48,81	2,48	19,67	44,16	0,35
383	5	1,11	17,88	0,95	40,53	48,77	2,48	19,64	44,13	0,38
390	10	1,10	17,65	0,95	39,99	48,77	4,74	10,29	41,10	0,55
391	10	1,10	17,89	0,95	40,45	48,81	4,73	10,31	41,14	0,50
392	10	1,10	18,38	0,96	41,15	49,06	4,71	10,41	41,37	0,55
393	15	1,10	18,04	0,96	40,45	49,01	6,76	7,25	39,72	0,48
394	15	1,10	17,66	0,96	39,83	48,86	6,78	7,21	39,59	0,51
395	15	1,10	17,61	0,95	39,89	48,76	6,79	7,18	39,49	0,52
396	5	1,20	18,15	0,80	48,98	44,43	2,69	16,49	39,84	0,64
397	5	1,20	18,35	0,80	49,20	44,59	2,69	16,60	40,00	0,60
445	5	1,20	17,95	0,80	48,16	44,58	2,69	16,59	39,99	0,63
399	10	1,20	18,40	0,80	49,72	44,38	5,14	8,63	37,06	0,67
400	10	1,19	18,05	0,80	48,38	44,59	5,12	8,70	37,25	0,61
401	10	1,19	18,01	0,81	48,23	44,60	5,12	8,71	37,27	0,61
402	15	1,19	18,32	0,81	48,70	44,78	7,32	6,12	35,97	0,70
403	15	1,20	17,81	0,80	47,81	44,53	7,35	6,05	35,75	0,75
404	15	1,20	17,81	0,80	47,89	44,48	7,36	6,04	35,71	0,69
405	5	1,29	18,30	0,67	58,80	40,18	2,90	13,86	35,74	0,88
406	5	1,29	18,13	0,67	58,63	40,03	2,91	13,77	35,59	0,85
407	5	1,29	18,09	0,67	58,43	40,06	2,91	13,79	35,62	0,90
408	10	1,30	18,07	0,66	58,95	39,79	5,57	7,15	32,94	1,12
409	10	1,29	18,35	0,67	59,45	39,97	5,55	7,20	33,10	1,10
410	10	1,29	18,17	0,67	58,75	40,01	5,55	7,21	33,13	1,04
411	15	1,29	18,06	0,67	57,93	40,19	7,93	5,07	32,00	1,27
412	15	1,29	17,81	0,67	57,67	39,96	7,96	5,02	31,81	1,24
413	15	1,30	18,04	0,66	59,07	39,69	8,00	4,96	31,58	1,30

Tabela A 5- Dados gerais corpos-de-prova curados por 3 dias - 40°C

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
332	5	1,11	18,33	0,95	41,58	48,75	2,48	19,62	44,11	1,40
333	5	1,10	18,27	0,97	40,62	49,25	2,46	20,02	44,61	1,42
334	5	1,09	18,31	0,97	40,63	49,30	2,46	20,06	44,66	1,39
345	10	1,09	18,43	0,97	40,99	49,23	4,69	10,48	41,53	1,41
346	10	1,10	18,22	0,97	40,61	49,17	4,70	10,46	41,48	1,37
446	10	1,10	18,06	0,95	40,79	48,84	4,73	10,32	41,16	1,55
347	15	1,09	18,75	0,98	41,08	49,59	6,68	7,42	40,23	1,54
348	15	1,09	18,40	0,97	40,86	49,25	6,73	7,32	39,93	1,46
349	15	1,09	18,53	0,97	41,08	49,28	6,72	7,33	39,96	1,56
350	5	1,20	18,22	0,80	49,34	44,34	2,70	16,44	39,76	1,56
351	5	1,19	18,41	0,81	48,87	44,84	2,67	16,77	40,25	1,76
352	5	1,19	18,46	0,81	49,34	44,68	2,68	16,66	40,08	1,79
366	10	1,20	18,08	0,80	49,02	44,30	5,15	8,60	36,99	1,88
367	10	1,20	17,99	0,79	48,92	44,22	5,16	8,57	36,92	2,06
368	10	1,20	17,78	0,79	48,32	44,24	5,16	8,58	36,94	1,78
369	15	1,21	17,67	0,79	48,33	44,06	7,42	5,94	35,35	2,50
370	15	1,19	18,45	0,81	49,37	44,61	7,34	6,07	35,82	2,31
371	15	1,19	18,49	0,81	49,15	44,77	7,32	6,12	35,97	2,45
386	5	1,29	18,38	0,67	59,11	40,16	2,90	13,84	35,72	2,47
373	5	1,29	17,94	0,67	57,90	40,06	2,91	13,79	35,63	2,43
374	5	1,29	18,39	0,67	58,94	40,24	2,90	13,89	35,79	2,40
384	10	1,29	18,26	0,67	58,59	40,19	5,53	7,27	33,30	2,50
385	10	1,29	18,48	0,67	59,26	40,21	5,53	7,27	33,32	2,60
372	10	1,30	17,70	0,66	58,04	39,67	5,58	7,11	32,84	2,64
387	15	1,29	18,30	0,67	59,19	39,98	7,96	5,02	31,82	3,18
388	15	1,29	18,32	0,67	59,00	40,08	7,94	5,05	31,91	3,17
389	15	1,29	18,35	0,67	58,96	40,13	7,94	5,06	31,96	3,01

Tabela A 6- Dados gerais corpos-de-prova curados por 7 dias - 40°C.

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
335	5	1,10	18,59	0,95	42,01	48,85	2,48	19,70	44,20	3,67
336	5	1,10	17,86	0,96	40,27	48,90	2,48	19,74	44,26	3,31
337	5	1,09	18,39	0,98	40,67	49,38	2,45	20,13	44,74	3,16
338	10	1,10	18,39	0,97	40,95	49,19	4,70	10,47	41,49	4,18
339	10	1,09	18,45	0,97	40,80	49,36	4,68	10,54	41,65	4,00
340	10	1,09	18,45	0,97	41,01	49,24	4,69	10,49	41,54	4,39
341	15	1,09	18,50	0,97	41,01	49,29	6,72	7,33	39,97	4,94

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
342	15	1,10	17,98	0,96	40,50	48,89	6,78	7,22	39,61	5,00
343	15	1,10	18,12	0,96	40,63	49,01	6,76	7,25	39,72	4,85
353	5	1,20	18,35	0,80	49,76	44,31	2,70	16,42	39,73	4,98
354	5	1,20	18,04	0,79	49,05	44,25	2,70	16,38	39,67	4,68
355	5	1,20	17,92	0,79	48,89	44,17	2,71	16,32	39,59	4,85
356	10	1,19	18,54	0,81	49,56	44,65	5,12	8,72	37,31	5,90
357	10	1,20	18,17	0,80	49,04	44,42	5,14	8,64	37,10	5,96
358	10	1,20	18,10	0,80	48,81	44,44	5,14	8,65	37,12	5,83
360	15	1,20	17,96	0,79	48,74	44,25	7,39	5,99	35,51	7,00
361	15	1,19	18,25	0,81	48,68	44,68	7,33	6,09	35,89	7,00
362	15	1,20	18,18	0,80	48,81	44,53	7,35	6,06	35,76	7,35
363	5	1,30	18,12	0,67	58,79	39,95	2,91	13,72	35,52	7,14
364	5	1,29	18,34	0,67	59,14	40,09	2,90	13,80	35,65	6,58
365	5	1,30	17,78	0,66	58,13	39,76	2,92	13,62	35,34	5,96
375	10	1,29	18,31	0,67	58,94	40,12	5,54	7,24	33,23	8,55
376	10	1,30	17,78	0,66	58,18	39,72	5,57	7,13	32,88	8,16
377	10	1,29	17,95	0,67	57,84	40,09	5,54	7,24	33,21	8,64
378	15	1,29	17,70	0,67	56,72	40,21	7,93	5,07	32,02	8,96
379	15	1,30	18,15	0,66	58,98	39,87	7,97	5,00	31,73	8,76
380	15	1,29	17,72	0,67	57,41	39,94	7,96	5,02	31,79	9,36

Tabela A 7- Dados gerais corpos-de-prova curados por 1 dia - 60°C.

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
260	5	1,10	18,33	0,97	40,83	49,21	2,46	19,99	44,57	1,64
261	5	1,10	17,86	0,96	40,17	48,97	2,47	19,79	44,32	1,58
262	5	1,10	17,62	0,96	39,79	48,87	2,48	19,72	44,23	1,50
263	10	1,10	17,70	0,96	39,67	49,03	4,71	10,40	41,34	1,77
264	10	1,10	17,69	0,96	39,62	49,05	4,71	10,41	41,36	1,86
265	10	1,09	18,24	0,97	40,53	49,25	4,69	10,49	41,55	1,96
311	15	1,11	17,68	0,94	40,55	48,44	6,84	7,09	39,21	2,02
312	15	1,10	18,11	0,96	40,70	48,95	6,77	7,23	39,66	2,11
313	15	1,10	17,86	0,95	40,44	48,76	6,79	7,18	39,49	2,03
302	5	1,19	18,28	0,81	48,90	44,65	2,68	16,64	40,05	2,23
303	5	1,20	18,27	0,80	49,02	44,59	2,69	16,60	39,99	2,26
304	5	1,20	17,98	0,80	48,68	44,35	2,70	16,44	39,77	2,32
272	10	1,21	17,55	0,79	47,96	44,10	5,17	8,53	36,81	2,77
437	10	1,20	17,82	0,79	48,44	44,24	5,16	8,58	36,94	2,53
438	10	1,19	18,41	0,81	49,05	44,73	5,11	8,75	37,38	2,43

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
275	15	1,20	17,86	0,80	48,27	44,35	7,38	6,01	35,60	3,46
276	15	1,20	17,60	0,80	47,59	44,35	7,38	6,01	35,60	3,43
277	15	1,19	18,12	0,81	48,27	44,72	7,33	6,10	35,92	3,40
324	5	1,29	18,35	0,68	58,63	40,32	2,89	13,94	35,87	2,82
439	5	1,29	18,10	0,67	58,19	40,16	2,90	13,85	35,72	2,99
440	5	1,29	18,03	0,67	58,03	40,14	2,90	13,83	35,70	2,74
326	10	1,29	18,16	0,68	57,94	40,33	5,52	7,31	33,42	3,64
327	10	1,29	18,02	0,67	57,93	40,15	5,53	7,25	33,26	3,90
328	10	1,29	18,19	0,67	58,33	40,21	5,53	7,27	33,31	3,74
329	15	1,28	19,00	0,68	59,84	40,62	7,87	5,16	32,37	4,39
330	15	1,28	18,94	0,68	59,81	40,55	7,88	5,15	32,31	4,19
331	15	1,29	18,58	0,67	59,57	40,19	7,93	5,07	32,00	4,49

Tabela A 8- Dados gerais corpos-de-prova curados por 3 dias - 60°C.

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
227	5	1,10	18,00	0,96	40,29	49,08	2,47	19,88	44,43	3,45
228	5	1,09	18,40	0,97	40,76	49,34	2,46	20,09	44,70	3,55
229	5	1,10	17,51	0,96	39,52	48,88	2,48	19,73	44,24	3,14
230	10	1,11	17,66	0,95	40,27	48,60	4,75	10,22	40,94	4,30
231	10	1,11	18,05	0,95	41,14	48,62	4,75	10,23	40,96	5,06
232	10	1,09	18,21	0,97	40,48	49,25	4,69	10,49	41,54	4,55
293	15	1,10	18,26	0,96	40,95	49,00	6,76	7,25	39,71	5,90
294	15	1,10	18,11	0,95	40,93	48,81	6,79	7,19	39,54	6,30
295	15	1,10	18,02	0,95	40,67	48,85	6,78	7,20	39,57	5,69
257	5	1,20	17,67	0,80	47,88	44,33	2,70	16,42	39,74	4,80
258	5	1,19	18,49	0,81	49,03	44,87	2,67	16,79	40,27	5,43
259	5	1,19	18,02	0,81	47,87	44,83	2,67	16,76	40,23	5,30
296	10	1,19	17,96	0,81	47,69	44,82	5,10	8,78	37,46	7,32
297	10	1,20	18,21	0,80	49,00	44,48	5,13	8,66	37,16	7,50
298	10	1,20	18,13	0,80	48,80	44,48	5,13	8,66	37,15	7,76
317	15	1,19	18,40	0,80	49,27	44,60	7,34	6,07	35,81	7,70
318	15	1,20	18,23	0,80	49,13	44,43	7,37	6,03	35,66	7,61
319	15	1,20	18,26	0,80	49,15	44,45	7,36	6,04	35,69	7,58
308	5	1,29	18,37	0,68	58,50	40,40	2,89	13,98	35,95	7,35
309	5	1,29	18,37	0,68	58,52	40,38	2,89	13,97	35,93	7,83
310	5	1,29	18,27	0,67	59,14	40,00	2,91	13,75	35,57	7,45
305	10	1,29	18,12	0,67	58,61	40,00	5,55	7,21	33,13	9,00
306	10	1,28	18,37	0,68	58,23	40,48	5,50	7,36	33,56	9,54

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
307	10	1,29	18,43	0,68	58,72	40,36	5,51	7,32	33,45	9,43
320	15	1,30	17,28	0,66	56,40	39,76	7,99	4,98	31,64	9,60
321	15	1,29	18,37	0,67	58,83	40,22	7,92	5,08	32,03	9,55
322	15	1,29	18,38	0,68	58,62	40,32	7,91	5,10	32,12	9,50

Tabela A 9- Dados gerais corpos-de-prova curados por 7 dias - 60°C.

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
251	5	1,10	18,13	0,97	40,46	49,16	2,46	19,95	44,51	4,75
252	5	1,10	18,03	0,97	40,10	49,25	2,46	20,02	44,61	4,33
253	5	1,09	18,30	0,98	40,48	49,39	2,45	20,13	44,74	4,28
248	10	1,10	17,79	0,96	39,86	49,04	4,71	10,41	41,35	5,58
249	10	1,10	17,79	0,96	39,86	49,04	4,71	10,41	41,35	5,54
250	10	1,10	17,74	0,96	39,67	49,09	4,71	10,43	41,40	5,31
245	15	1,10	18,08	0,96	40,50	49,03	6,76	7,26	39,73	6,15
246	15	1,10	18,07	0,96	40,36	49,10	6,75	7,28	39,80	5,40
247	15	1,10	18,03	0,96	40,38	49,03	6,76	7,26	39,74	5,76
254	5	1,19	18,29	0,81	48,78	44,72	2,68	16,69	40,13	6,56
255	5	1,20	17,66	0,81	47,30	44,63	2,68	16,63	40,03	6,90
256	5	1,19	17,92	0,81	47,76	44,74	2,68	16,70	40,15	6,84
281	10	1,19	18,27	0,80	48,95	44,59	5,12	8,70	37,26	9,32
282	10	1,20	18,16	0,80	49,06	44,39	5,14	8,63	37,07	9,20
283	10	1,20	18,12	0,80	48,79	44,47	5,13	8,66	37,15	8,88
284	15	1,20	18,05	0,80	48,78	44,35	7,38	6,01	35,60	9,60
285	15	1,20	18,27	0,80	49,37	44,36	7,38	6,01	35,61	9,69
286	15	1,20	18,44	0,80	49,53	44,51	7,36	6,05	35,74	9,57
278	5	1,28	17,63	0,68	55,70	40,59	2,88	14,09	36,13	9,27
279	5	1,29	17,90	0,68	57,08	40,35	2,89	13,96	35,91	9,34
280	5	1,29	17,98	0,67	57,53	40,28	2,89	13,92	35,84	9,50
290	10	1,29	18,20	0,67	58,23	40,26	5,52	7,29	33,36	12,60
291	10	1,28	18,45	0,68	58,59	40,44	5,51	7,34	33,52	12,20
292	10	1,29	18,06	0,67	57,93	40,20	5,53	7,27	33,31	11,80
299	15	1,29	17,94	0,66	58,17	39,92	7,96	5,01	31,77	14,40
300	15	1,28	18,51	0,68	58,67	40,47	7,89	5,13	32,24	13,20
301	15	1,28	18,42	0,68	58,30	40,50	7,89	5,13	32,27	13,40

Tabela A 10- Dados gerais corpos-de-prova curados por 1 dia - 80°C.

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
63	5	1,11	17,82	0,94	40,98	48,41	2,50	19,36	43,76	2,70
64	5	1,11	17,56	0,95	39,87	48,74	2,48	19,61	44,09	2,67
418	5	1,10	17,94	0,95	40,58	48,82	2,48	19,68	44,18	2,40
72	10	1,11	17,52	0,95	39,94	48,62	4,75	10,23	40,96	3,87
73	10	1,11	17,55	0,95	39,94	48,65	4,75	10,24	40,98	3,61
74	10	1,11	17,57	0,95	39,81	48,75	4,74	10,29	41,09	3,59
136	15	1,10	17,64	0,95	39,97	48,75	6,79	7,17	39,48	4,90
137	15	1,11	17,51	0,95	39,76	48,70	6,80	7,16	39,44	4,80
138	15	1,10	17,99	0,96	40,49	48,91	6,77	7,22	39,63	4,70
133	5	1,20	17,97	0,80	48,34	44,52	2,69	16,55	39,93	4,60
134	5	1,20	17,97	0,81	48,18	44,60	2,69	16,61	40,01	4,30
135	5	1,20	17,79	0,80	48,03	44,42	2,69	16,49	39,83	4,50
211	10	1,19	18,17	0,81	48,43	44,73	5,11	8,75	37,38	5,43
212	10	1,20	18,02	0,80	48,37	44,54	5,13	8,69	37,21	4,98
213	10	1,19	18,00	0,82	47,54	44,94	5,09	8,83	37,58	4,87
154	15	1,19	17,79	0,81	47,36	44,74	7,33	6,11	35,94	6,10
155	15	1,20	17,67	0,79	47,99	44,24	7,39	5,99	35,51	5,70
156	15	1,20	17,84	0,79	48,65	44,13	7,41	5,96	35,41	5,80
142	5	1,29	18,15	0,67	58,71	40,02	2,91	13,76	35,58	6,10
143	5	1,28	18,37	0,68	58,14	40,55	2,88	14,07	36,09	5,80
144	5	1,29	17,95	0,67	57,53	40,24	2,90	13,89	35,80	5,70
148	10	1,29	17,72	0,67	57,28	40,02	5,55	7,22	33,14	6,90
149	10	1,29	17,97	0,67	57,93	40,08	5,54	7,24	33,20	7,10
150	10	1,30	17,73	0,66	57,64	39,88	5,56	7,17	33,02	6,40
151	15	1,30	17,75	0,66	57,67	39,87	7,97	5,00	31,73	7,00
152	15	1,30	17,55	0,66	57,08	39,86	7,97	5,00	31,72	7,20
153	15	1,29	17,66	0,67	57,22	39,94	7,96	5,02	31,79	7,50

Tabela A 11- Dados gerais corpos-de-prova curados por 3 dias - 80°C.

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
434	5	1,10	18,21	0,96	40,80	49,07	2,47	19,87	44,42	4,21
435	5	1,10	18,11	0,95	40,97	48,83	2,48	19,68	44,18	4,52
436	5	1,10	18,17	0,97	40,58	49,14	2,47	19,93	44,50	4,12
99	10	1,10	18,09	0,95	40,94	48,80	4,73	10,31	41,12	5,21
100	10	1,10	17,65	0,96	39,80	48,88	4,73	10,34	41,20	5,26
101	10	1,11	17,67	0,95	40,29	48,61	4,75	10,23	40,95	5,45
102	15	1,10	17,63	0,95	39,81	48,84	6,78	7,20	39,56	5,15

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
104	15	1,11	17,63	0,95	39,99	48,71	6,80	7,16	39,45	5,82
222	15	1,10	18,11	0,96	40,52	49,06	6,75	7,26	39,76	5,24
96	5	1,20	17,68	0,79	48,16	44,21	2,70	16,35	39,63	5,50
97	5	1,19	17,98	0,81	47,60	44,90	2,67	16,81	40,30	5,47
98	5	1,20	18,26	0,80	49,15	44,50	2,69	16,54	39,91	6,02
116	10	1,20	18,10	0,80	48,53	44,58	5,12	8,70	37,24	7,39
117	10	1,20	17,67	0,80	47,76	44,37	5,14	8,63	37,06	7,19
118	10	1,20	18,23	0,80	49,00	44,51	5,13	8,68	37,18	7,97
122	15	1,20	18,02	0,80	48,83	44,30	7,38	6,00	35,55	7,70
123	15	1,20	17,64	0,79	47,93	44,23	7,39	5,98	35,49	7,80
124	15	1,20	17,53	0,79	47,67	44,21	7,40	5,98	35,48	7,80
119	5	1,29	17,85	0,67	57,58	40,08	2,90	13,80	35,65	7,89
120	5	1,29	18,06	0,67	57,87	40,25	2,90	13,90	35,81	7,81
121	5	1,30	17,83	0,67	57,77	39,98	2,91	13,74	35,55	8,16
90	10	1,30	17,74	0,66	58,01	39,74	5,57	7,13	32,89	8,94
91	10	1,28	18,49	0,68	58,78	40,41	5,51	7,33	33,49	9,00
92	10	1,29	18,24	0,67	58,77	40,09	5,54	7,24	33,21	9,48
125	15	1,30	17,73	0,66	58,10	39,66	8,00	4,96	31,55	10,50
126	15	1,30	17,58	0,66	57,24	39,83	7,98	4,99	31,70	10,60
127	15	1,29	17,71	0,67	57,34	39,96	7,96	5,02	31,81	9,80

Tabela A 12- Dados gerais corpos-de-prova curados por 7 dias - 80°C.

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
66	5	1,10	18,08	0,96	40,73	48,93	2,48	19,77	44,29	4,85
67	5	1,10	18,00	0,96	40,52	48,94	2,48	19,77	44,29	4,75
68	5	1,10	18,06	0,95	40,82	48,84	2,48	19,69	44,19	4,60
69	10	1,10	17,97	0,95	40,71	48,77	4,74	10,29	41,10	6,65
70	10	1,11	18,12	0,94	41,68	48,38	4,77	10,14	40,74	6,67
71	10	1,10	18,28	0,96	40,93	49,06	4,71	10,42	41,37	6,62
75	15	1,10	17,54	0,96	39,31	49,02	6,76	7,25	39,73	6,20
76	15	1,10	18,14	0,96	40,73	48,97	6,76	7,24	39,69	6,92
77	15	1,10	18,25	0,96	40,94	49,00	6,76	7,25	39,71	6,81
78	5	1,21	17,62	0,78	48,96	43,71	2,73	16,02	39,14	6,61
79	5	1,20	18,03	0,80	48,82	44,36	2,70	16,45	39,77	7,57
80	5	1,20	17,82	0,80	48,28	44,33	2,70	16,43	39,75	7,31
84	10	1,20	17,97	0,79	48,76	44,28	5,15	8,59	36,97	8,63
85	10	1,20	17,60	0,79	48,03	44,13	5,17	8,54	36,84	9,36
86	10	1,20	17,70	0,79	48,14	44,22	5,16	8,57	36,92	9,01

CP	L (%)	γ (g/cm ³)	ω (%)	e	Grau de Saturação (%)	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0,11}$	q _u (MPa)
87	15	1,21	17,78	0,79	48,63	44,06	7,42	5,94	35,34	8,87
88	15	1,20	18,00	0,79	48,79	44,29	7,39	6,00	35,55	9,45
89	15	1,20	18,02	0,79	48,98	44,22	7,40	5,98	35,48	8,48
81	5	1,31	17,57	0,65	58,04	39,52	2,93	13,48	35,11	8,67
111	5	1,30	17,68	0,67	57,32	39,96	2,91	13,73	35,53	9,50
112	5	1,29	18,00	0,67	58,08	40,08	2,90	13,80	35,64	10,10
113	10	1,29	18,06	0,67	58,13	40,12	5,54	7,25	33,23	12,80
114	10	1,30	17,77	0,66	57,97	39,79	5,57	7,15	32,95	13,50
115	10	1,29	18,02	0,67	58,26	40,01	5,55	7,21	33,14	11,80
107	15	1,30	17,57	0,65	58,03	39,49	8,02	4,92	31,40	13,80
106	15	1,30	17,50	0,65	57,88	39,45	8,03	4,91	31,37	13,80
414	15	1,30	18,06	0,65	59,49	39,55	8,01	4,93	31,45	13,00

7