

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

**MISTURAS DE CINZA VOLANTE E CAL DE CARBURETO:
COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
SIMPLES FRENTE À MOAGEM DA
CINZA VOLANTE**

Thaís Martins de Paula

Porto Alegre
2016

THAÍS MARTINS DE PAULA

**MISTURAS DE CINZA VOLANTE E CAL DE CARBURETO:
COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
SIMPLES FRENTE À MOAGEM DA
CINZA VOLANTE**

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

Porto Alegre

2016

THAÍS MARTINS DE PAULA

**MISTURAS DE CINZA VOLANTE E CAL DE CARBURETO:
COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
SIMPLES FRENTE À MOAGEM DA
CINZA VOLANTE**

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

Porto Alegre, 30 de março de 2016.

Prof. Nilo Cesar Consoli
Ph. D. Concordia University, Canadá
orientador

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr. Techn. Universidade de Innsbruck,
Áustria
co-orientador

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande (PUC-Rio)
Dr^a. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

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

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

Dedico este trabalho a meus pais, Júlio e Mônica,
que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Não seria possível concluir este trabalho sem a ajuda e suporte de muitas pessoas, que de diversas maneiras me auxiliaram durante essa caminhada. Portanto, meus agradecimentos vão para as seguintes pessoas:

Ao Prof. Nilo Cesar Consoli, orientador deste trabalho, pela dedicação, pelo apoio e pelos ensinamentos transmitidos durante a realização desta pesquisa. Ao Prof. Marcelo Maia Rocha, co-orientador deste trabalho, pela disponibilidade e apoio.

Aos mestrandos Marina Bortolotto, Bruna Hoch, Jéssica Flesch, Larissa Montagner, Francisco Pereira e Adrian Siacara por terem ajudado imensamente na realização dos ensaios de laboratório, agradeço pela disponibilidade e dedicação. Ao doutorando Rodrigo Saldanha pela paciência, disponibilidade e apoio durante a realização desta pesquisa. Ao bolsista André Rivoire pela ajuda na moagem da cinza volante.

Ao Prof. Lucas Festugato e ao doutorando Alejandro Quiñonez, que auxiliaram no esclarecimento de dúvidas quanto a realização de ensaios e análises de resultados, obrigada pela disponibilidade, atenção e palavras de incentivo.

Aos meus colegas de mestrado, Marina Corte, Eduardo Pasche e Guilherme Venson, que trilharam esta caminhada junto comigo e ajudaram das mais diversas maneiras durante esta jornada, muitas vezes tempestuosa, mas muito enriquecedora. Foi um privilégio conviver com vocês nestes últimos dois anos e me sinto honrada de tê-los como amigos.

À minha amiga Muriel Froener, companheira de viagens e estudos, pelas palavras de apoio e por sempre me animar competindo comigo. Aos meus amigos Luiza Messinger, Ricardo Joenck e Guilherme Heck, por me manterem sã durante o último ano.

Agradeço à minha família que esteve constantemente ao meu lado durante toda essa caminhada. Faço um agradecimento especial aos meus pais, que me ensinaram a importância do estudo desde muito cedo e continuam a me apoiar nesta incessante busca pelo conhecimento.

A CIENTEC pela disponibilização de suas instalações para a realização de diversos ensaios, especialmente ao pesquisador e doutorando Eduardo Mallmann que auxiliou com a realização

de ensaios e ideias sobre a pesquisa. Também ao estagiário Isac, pela ajuda na moldagem dos corpos de prova.

Aos funcionários da Escola de Engenharia da UFRGS pelo apoio nas atividades realizadas, em especial a João Diniz pela colaboração nos ensaios de laboratório, aos professores, funcionários e bolsistas do LACER e às funcionárias da secretaria do PPGEC.

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

À Braskem pela disponibilização da cinza volante utilizada e à White Martins pela disponibilização da 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 obrigada!

A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso.

John Ruskin

RESUMO

DE PAULA, T. M. Misturas de Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples frente à Moagem da Cinza. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O emprego de resíduos da indústria como materiais alternativos na Engenharia vem sendo tópico recorrente em pesquisas de desenvolvimento de novos materiais, devido a uma maior consciência da opinião pública quanto ao impacto ambiental oriundo da produção industrial. Buscando colaborar com esta discussão, esta pesquisa procurou inserir dois resíduos (cinza volante e cal de carbureto), gerados na região metropolitana de Porto Alegre, como alternativa de solução em Engenharia. Analisando-se a microestrutura da cinza volante, observa-se que ela é formada por esferas ocas e plerosferas (esferas ocas preenchidas por esferas menores). Foi estudado o ganho de resistência da mistura promovido pela moagem da cinza volante em um moinho de bolas cerâmicas, visando uma potencialização da reatividade do material. A fim de possibilitar a utilização destes resíduos, é necessário um estudo do seu comportamento mecânico decorrente da cimentação proporcionada pela mistura e compactação destes materiais. A presente pesquisa busca fornecer subsídios para que seja possível determinar o seu comportamento, através do uso da relação porosidade (η)/teor volumétrico de cal (L_V) obtidas a partir da identificação e quantificação das variáveis mais importantes no controle da resistência da mistura dos dois resíduos, com e sem o processo de moagem da cinza, levando a formulação de equações para previsão da resistência à compressão simples do material cimentado para cinza volante com diferentes tempos de moagem e 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 7 dias, com umidade de 18% para os tempos de moagem 0, 2 e 6h nas temperaturas 23 e 40°C, e 0 e 6h a 60°C. Os resultados apontam que o aumento do teor de cal gerou ganhos de resistência para as maiores temperaturas de cura; a diminuição da porosidade proporcionou um ganho de resistência para todas as combinações; o aumento da temperatura foi importante no ganho de resistência entre 23°C e 40°C; a moagem da cinza por 2h promoveu ganhos significativos de resistência em relação à não moída, porém, para 6h de moagem os ganhos não foram significativos para as temperaturas de cura de 23°C e 60°C. A relação η/L_V , ajustada por um expoente [$\eta/(L_V)^{0,07}$], mostrou-se adequada na formulação de equações na previsão da resistência do material cimentado para todas as temperaturas e tempos de moagem estudados. Além disso, a existência de relações únicas e distintas no controle da resistência à compressão simples em função da porosidade, teor volumétrico de cal, temperatura de cura e tempo de moagem, 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 suas interações.

Palavras-chave: cinza volante, moagem, cal de carbureto, resistência à compressão simples, relação porosidade/teor volumétrico de cal, temperatura de cura.

ABSTRACT

DE PAULA, T. M. Misturas de Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples frente à Moagem da Cinza. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The use of industry by-products as alternative materials in Engineering has been a recurring topic of research in development of new materials, mainly, due to a larger public conscience regarding the environmental impact of industrial production of waste. Aiming to contribute on this discussion, this research sought to introduce two by-products (fly ash and carbide lime), produced on the metropolitan area of Porto Alegre, as an alternative Engineering solution. Analyzing the microstructure of the fly ash, it is observed that it is composed by void spheres and plerospheres (void spheres filed with smaller ones). Having that in mind, it was studied the admix strength gain promoted by the grinding of de fly ash on a ceramic ball mill, aiming an enhancement of the reactivity of the material. In order to enable the use of these by-products, it is necessary the study of its mechanical behavior due to the cementation provided by the mixture and compaction of these materials. The current research seeks to provide subsidies in order to determine its behavior, through the use of the ratio porosity (η)/volumetric lime content (L_V), obtained from the identification and quantification of the most important variables on the control of the strength of the admixes of both by-products, with or without the process of fly ash grinding. This means, the formulation of equations for the simple compressive strength forecast of the cemented material for the fly ash with different grinding times and accelerated curing temperature. In order to do so, it were realized simple compression tests with 5, 10 and 15% of lime, with a specific dry unit weight of 11, 12 and 13 kN/m^3 , cured for 7 days, with water content of 18% for the grinding times of 0, 2 and 6h to the curing temperatures of 23 and 40°C, and 0 and 6h to 60°C. The results show that, the increase of lime content provided strength gains for the higher temperatures; the decrease of porosity generated strength gain to all the combinations; the increase in curing temperature was important on the strength gain between 23°C and 40°C; the grinding of fly ash for 2h promoted significant strength gains when compared to the not ground samples, however, for 6h of grinding the strength gain wasn't significant for the 23°C and 60°C curing temperatures. The η/L_V ratio, adjusted by an exponent [$\eta/(L_V)^{0,07}$], presented itself adequate for the formulation of the equations for the forecast of the strength gain of the cemented material to all the studied temperatures and grinding times. Besides that, the existence of unique and distinct relationships on the control of the simple compression strength depending on the porosity, volumetric lime content, curing temperature and grinding time, have been shown useful for the dosage formulation. The results were submitted to variance analysis, which demonstrated that all the factors chosen on the experiment were significant, as all their interactions.

Key-words: fly ash, grinding, carbide lime, porosity/volumetric lime content ratio, compressive strength and curing temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Microscopia eletrônica de cinzas volantes americanas (FISCHER <i>et al.</i> , 1976)....	41
Figura 2 – Efeito da temperatura na solubilidade da sílica (ILER, 1955 apud MALLMANN, 1996).....	44
Figura 3 – Solubilidade de sílica amorfa na água com a variação do pH (ALEXANDER <i>et al.</i> , 1954 apud MALLMANN, 1996)	45
Figura 4 – Efeito da variação da área superficial da sílica na adsorção do hidróxido de cálcio (GREENBERG, 1956 apud MALLMANN, 1996)	46
Figura 5 – Produção de silicatos e aluminatos na reação entre solo e cal de carbureto aos 28 dias de cura (adaptado de WANG; HANDY, 1966)	47
Figura 6 – Relação entre adição de cal de carbureto em solo argiloso e resistência à compressão simples aos 28 dias de cura (adaptado de HORPIBULSUK <i>et al.</i> , 2012)	51
Figura 7 – Relação entre ao índice de atividade pozolânica com cal e (a) porcentagem retida na peneira 45 m (b) superfície específica (adaptado de RAVINA, 1980).....	52
Figura 8 – Efeito do peso e tamanho das bolas de moagem no aumento da superfície específica com o tempo de moagem da cinza volante (adaptado de BOUZOUBAÂ <i>et al.</i> , 1997).....	54
Figura 9 – Efeito da moagem na distribuição granulométrica da cinza volante de Lingan (adaptado de BOUZOUBAÂ <i>et al.</i> , 1997)	55
Figura 10 – Efeito da moagem na (a) necessidade de água e (b) índice de atividade de resistência aos 7 dias de cura (adaptado de BOUZOUBAÂ <i>et al.</i> , 1997).....	55
Figura 11 – Influência do tempo de cura em q_u para diferentes temperaturas de cura para (a) cinza volante não moída e (b) cinza volante moída 1h (adaptado de PAYÁ <i>et al.</i> , 2000).....	56
Figura 12 – Influência da temperatura de cura em q_u para diferentes teores de adição de cinza volante para 3 dias de cura para (a) cinza volante não moída e (b) cinza volante moída 1h (adaptado de PAYÁ <i>et al.</i> , 2000)	57
Figura 13 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura (DALLA ROSA, 2009)	59
Figura 14 – Volume de vazios/cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples (LARNACH, 1960 apud FOPPA, 2005)	60

Figura 15 – Volume de vazios/cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples ajustada (FOPPA, 2005).....	61
Figura 16 – Volume de vazios/cimento expresso em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples ajustada (FOPPA, 2005).....	62
Figura 17 – Relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e (a) teor volumétrico da cal para amostras com 28 dias de cura e (b) teor volumétrico da cimento para amostras com 7 dias de cura (LOPES JUNIOR, 2007).....	62
Figura 18 – 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 (DALLA ROSA, 2009).....	63
Figura 19 – Mudança na resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_V)^{0,3}$ para todas a temperaturas (SILVANI, 2013).....	64
Figura 20 – Variação da resistência à compressão simples ajustada com a temperatura (SILVANI, 2013).....	64
Figura 21 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 7 dias de cura a temperatura de (a) 40°C e (b) 23°C (SALDANHA, 2014).....	65
Figura 22 – Efeito do tempo de cura nas amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias (DALLA ROSA, 2009).....	66
Figura 23 – Evolução da reação da cal com o tempo de cura para 20°C e 60°C em mistura metacaulim-cal (adaptado de ROJAS e CABRERA, 2002).....	68
Figura 24 – Comportamento global da resistência da mistura cinza volante- cal frente à temperatura de cura (SALDANHA, 2014).....	69
Figura 25 – Cinza volante da Braskem.....	75
Figura 26 – Granulometria da cinza volante.....	75
Figura 27 – Difractometria de Raios-X – Cinza Volante Braskem.....	76
Figura 28 – Cal de carbureto da White Martins Gases Industriais S.A. (a) armazenada (b) após secagem.....	77
Figura 29 – Equipamento para moagem (a) moinho de bolas de cerâmica (b) esferas cerâmicas.....	79
Figura 30 – Processo de moagem (a) acondicionamento das esferas no jarro (b) adição da cinza volante.....	80
Figura 31 – Análise granulométrica para diferentes tempos de moagem de cinza.....	80

Figura 32 – Comparação dos valores de pesos específicos máximos e umidades ótimas através de ensaios de compactação dinâmica entre cinzas volantes provenientes de (a) Celulose Riograndense (Saldanha, 2014) e (b) Braskem	82
Figura 33 – Determinação do teor mínimo de cal através do método ICL	83
Figura 34 – Determinação do teor máximo de cal através da variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal.....	84
Figura 35 – Prensa e molde adaptado para a confecção dos corpos de prova.....	87
Figura 36 – Câmara a vapor utilizada para cura a vapor nas temperaturas de 40°C e 60°C	87
Figura 37 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante não moída curadas a 23°C	92
Figura 38 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante moída 2h curadas a 23°C.....	93
Figura 39 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante moída 6h curadas a 23°C.....	93
Figura 40 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante não moída curadas a 23°C	94
Figura 41 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante moída 2h curadas a 23°C.....	95
Figura 42 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante moída 6h curadas a 23°C.....	95
Figura 43 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante não moída curadas a 40°C	97
Figura 44 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante moída 2h curadas a 40°C.....	97
Figura 45 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante moída 6h curadas a 40°C.....	98
Figura 46 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante não moída curadas a 40°C	99
Figura 47 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante moída 2h curadas a 40°C.....	99
Figura 48 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante moída 6h curadas a 40°C.....	100
Figura 49 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante não moída curadas a 60°C	101

Figura 50 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante moída 6h curadas a 60°C	102
Figura 51 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante não moída curadas a 60°C	103
Figura 52 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante moída 6h curadas a 60°C	103
Figura 53 – Modo de ruptura dos corpos de prova (a) plano de ruptura (b) fragmentação do corpo de prova	104
Figura 54 – Efeito do teor volumétrico de cal sobre a resistência à compressão simples das amostras curadas a 23°C com cura à vapor com cinza (a) não moída (b) moída 2h e (c) moída 6h.....	113
Figura 55 – Efeito do teor volumétrico de cal sobre a resistência à compressão simples das amostras curadas a 40°C com cura à vapor com cinza (a) não moída (b) moída 2h e (c) moída 6h.....	115
Figura 56 – Efeito do teor volumétrico de cal sobre a resistência à compressão simples das amostras curadas a 60°C com cura à vapor com cinza (a) não moída (b) moída 6h	116
Figura 57 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados a 23°C com cinza (a) não moída (b) moída 2h e (c) moída 6h.....	119
Figura 58 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza não moída curados a 23°C.....	120
Figura 59 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza moída 2h curados a 23°C.....	121
Figura 60 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza moída 6h curados a 23°C.....	122
Figura 61 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados a 40°C com cinza (a) não moída (b) moída 2h e (c) moída 6h.....	123
Figura 62 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza não moída curados a 40°C.....	124
Figura 63 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza moída 2h curados a 40°C.....	125
Figura 64 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza moída 6h curados a 40°C.....	126

Figura 65 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados a 60°C com cinza (a) não moída e (b) moída 6h.....	127
Figura 66 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza não moída curados a 60°C.....	128
Figura 67 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza moída 6h curados a 60°C.....	129
Figura 68 – Efeito da variação da temperatura para cinza volante não moída.....	131
Figura 69 – Ajuste da tendência da variação da temperatura para cinza volante não moída .	132
Figura 70 – Efeito da variação da temperatura para cinza volante moída 2h.....	134
Figura 71 – Ajuste da tendência da variação da temperatura para cinza volante moída 2h...	134
Figura 72 – Efeito da variação da temperatura para cinza volante moída 6h.....	136
Figura 73 – Ajuste da tendência da variação da temperatura para cinza volante moída 6h...	137
Figura 74 – Comportamento global da resistência frente à variação da temperatura.....	138
Figura 75 – Efeito da variação da moagem da cinza volante para amostras curadas a 23°C .	140
Figura 76 – Ajuste da tendência da variação do tempo de moagem da cinza volante a 23°C	141
Figura 77 – Efeito da variação da moagem da cinza volante para amostras curadas a 40°C .	143
Figura 78 – Ajuste da tendência da variação do tempo de moagem da cinza volante a 40°C	144
Figura 79 – Efeito da variação da moagem da cinza volante para amostras curadas a 60°C .	145
Figura 80 – Ajuste da tendência da variação do tempo de moagem da cinza volante a 60°C	146
Figura 81 – Comportamento global da resistência frente à variação do tempo de moagem..	147
Figura 82 – Comparação dos resultados das relações $\eta/(L_v)^{0,07}$ entre misturas de cinza volante não moída das empresas Braskem e Celulose Riograndense curadas a 23°C.....	150
Figura 83 – Comparação dos resultados das relações $\eta/(L_v)^{0,07}$ entre misturas de cinza volante não moída das empresas Braskem e Celulose Riograndense curadas a 40°C.....	151
Figura 84 – Comparação dos resultados das relações $\eta/(L_v)^{0,07}$ entre misturas de cinza volante não moída das empresas Braskem e Celulose Riograndense curadas a 60°C.....	152
Figura A1 – Curvas granulométricas para cinza volante moída 2h.....	182
Figura A2 – Curvas granulométricas para cinza volante moída 6h.....	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Termelétricas brasileiras	28
Tabela 2 – Produção de cinzas em termelétrica brasileiras por ano	29
Tabela 3 – Classificação de cinzas volantes segundo ASTM C618.....	38
Tabela 4 – Classificação de materiais pozolânicos segundo a NBR 12563 e características gerais das cinzas volantes sul brasileiras.....	39
Tabela 5 – Concentração em porcentagem dos constituintes maiores e menores de cinzas brasileiras e de algumas estrangeiras.....	40
Tabela 6 – Análise química da cal de carbureto produzida no Estado de São Paulo	43
Tabela 7 – Etapas e ensaios do programa experimental.....	72
Tabela 8 – Ensaios de caracterização realizados e procedimentos empregados	74
Tabela 9 – Análise da cinza volante	76
Tabela 10 – Propriedades da cal de carbureto	77
Tabela 11 – Parâmetros e variáveis estabelecidos.....	78
Tabela 12 – Área superficial específica, massa específica real dos grãos e diâmetro médio das partículas em função do tempo de moagem	81
Tabela 13 – Pontos de moldagem.....	82
Tabela 14 – Resistência à compressão simples (q_u) média e variação de resistência para variação de cal para cura a 23°C	91
Tabela 15 – Resistência à compressão simples (q_u) média e variação de resistência para variação de cal para cura a 40°C	96
Tabela 16 – Resistência à compressão simples (q_u) média e variação de resistência para variação de cal para cura a 60°C	101
Tabela 17 – Tabela de resultados do ensaio de sucção.....	105
Tabela 18 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras curadas a 23°C.....	112
Tabela 19 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras curadas a 40°C.....	114
Tabela 20 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras curadas a 60°C.....	116
Tabela 21 – Comparação das características químicas das cinzas volantes das empresas Braskem e Celulose Riograndense	149

Tabela 22 – Tabela ANOVA para as variáveis independentes estudadas sem cinza volante moída 2h	154
Tabela 23 – Tabela das médias das variáveis analisadas sem cinza volante moída 2h	155
Tabela 24 – Comparação de média para o fator A (teor de cal) sem cinza volante moída 2h	156
Tabela 25 – Comparação de média para o fator B (peso específico) sem cinza volante moída 2h	158
Tabela 26 – Comparação de média para o fator C (tempo de moagem) sem cinza volante moída 2h	159
Tabela 27 – Comparação de média para o fator D (temperatura) sem cinza volante moída 2h	160
Tabela 28 – Tabela ANOVA para as variáveis independentes estudadas sem a temperatura de 60°C	161
Tabela 29 – Tabela das médias das variáveis analisadas sem a temperatura de 60°C	163
Tabela 30 – Comparação de média para o fator A (teor de cal) sem a temperatura de 60°C.	165
Tabela 31 – Comparação de média para o fator B (peso específico) sem a temperatura de 60°C	166
Tabela 32 – Comparação de média para o fator C (tempo de moagem) sem a temperatura de 60°C	167
Tabela 33 – Comparação de média para o fator D (temperatura) sem a temperatura de 60°C	168
Tabela A1 – Diâmetro médio para ciclos de moagem de 2h	182
Tabela A2 – Diâmetro médio para ciclos de moagem de 6h	183
Tabela B1 – Dados gerais copos de prova de cinza volante não moída curada a 23°C	185
Tabela B2 – Dados gerais copos de prova de cinza volante moída 2h curada a 23°C	186
Tabela B3 – Dados gerais copos de prova de cinza volante moída 6h curada a 23°C	187
Tabela B4 – Dados gerais copos de prova de cinza volante não moída curada a 40°C	188
Tabela B5 – Dados gerais copos de prova de cinza volante moída 2h curada a 40°C	189
Tabela B6 – Dados gerais copos de prova de cinza volante moída 6h curada a 40°C	190
Tabela B7 – Dados gerais copos de prova de cinza volante não moída curada a 60°C	191
Tabela B8 – Dados gerais copos de prova de cinza volante moída 6h curada a 60°C	192

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

ANOVA – *Analysis of Variance*

BEN – Balanço Energético Nacional

CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia – RS

CICASOL – Cinza Volante, Cal e Solo

CINCAL – Cinza Volante e Cal

CINPECAL – Cinza Pesada e Cal

CV – Cinza Volante

DAER/RS – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ENVIRONGEO – Laboratório de Resíduos, Novos Materiais e Geotecnia Ambiental

GLD – Graus de Liberdade

IPT/SP – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

IEA – *International Energy Agency*

LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos

LEGG – Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geoambientais

LL – limite de Liquidez

LP – limite de Plasticidade

MME – Ministério de Minas e Energia

MQ – Média Quadrada

NBR – Norma Brasileira

TRB – *Transportation Research Board*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

WWA – *World Coal Association*

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{iv} – Teor volumétrico de cimento (%)

d – tempo de cura (dias)

γ_d – peso específico aparente seco do solo (kN/cm^3)

q_u – resistência à compressão simples (MPa)

L_v – teor volumétrico de cal (ou C_{av}) (%)

η – porosidade (%)

η/L_v – relação porosidade/teor volumétrico de cal

ρ_d – massa específica aparente seca do solo (g/cm^3)

S – grau de saturação (%)

S_f – grau de saturação após 24h de imersão (%)

t – tempo de cura (dias)

t_m – tempo de moagem (horas)

V_v – volume de vazios

ω – teor de umidade (%)

ω_f – teor de umidade após 24h de imersão (%)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	22
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	24
1.2.1 Objetivo principal	24
1.2.2 Objetivos secundários	24
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 CINZAS DE CARVÃO MINERAL E SEU EMPREGO NA ENGENHARIA CIVIL ...	26
2.1.1 O carvão mineral no mundo	26
2.1.2 A produção da cinza de carvão mineral	28
2.1.3 Implicações Ambientais	30
2.1.4 Cinza como subproduto	32
2.2 MISTURAS CINZA – CAL	33
2.2.1 Emprego da cinza no mundo	34
2.2.2 Emprego da cal no mundo	35
2.2.3 Utilização de misturas cinza volante e cal	35
2.3 MATERIAIS UTILIZADOS EM MISTURAS CINZA VOLANTE – CAL.....	37
2.3.1 Cinza Volante	37
2.3.2 Cal de Carbureto	41
2.3.3 Água	43
2.4 ESTABILIZAÇÃO POZOLÂNICA	43
2.5 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE MISTURAS CINZA VOLANTE – CAL.....	49
2.5.1 Efeito da cal	49
2.5.2 Efeito da moagem	51
2.5.3 Efeito da porosidade	57
2.5.4 Efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal	59
2.5.5 Efeito do tempo de cura	65
2.5.6 Efeito da temperatura de cura	66
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	70
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	70

3.2 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO	73
3.2.1 Coleta de amostras.....	73
3.2.2 Preparação das amostras	73
3.2.3 Ensaio de caracterização.....	74
3.3 MATERIAIS DA MISTURA	74
3.3.1 Cinza volante	74
3.3.2 Cal de carbureto.....	77
3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	78
3.4.1 Definição do tempo de moagem.....	78
3.4.2 Definição da porosidade	81
3.4.3 Definição dos teores de cal	82
3.4.4 Definição do tempo e temperatura de cura	84
3.5 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	84
3.5.1 Moldagem e cura dos corpos de prova.....	85
3.5.2 Molde e cura a vapor	86
3.5.3 Ensaio de resistência à compressão simples.....	86
3.5.4 Sucção matricial.....	88
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	90
4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	90
4.1.1 Amostras curadas a 23°C	90
4.1.2 Amostras curadas a 40°C	96
4.1.3 Amostras curadas a 60°C	100
4.1.4 Modo de ruptura dos corpos de prova.....	104
4.2 MEDIDAS DE SUCÇÃO MATRICIAL.....	104
5. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	106
5.1 EFEITO DO TEOR DE CAL.....	106
5.2 EFEITO DA POROSIDADE.....	110
5.2.1 Amostras curadas a 23°C	111
5.2.2 Amostras curadas a 40°C	113
5.2.3 Amostras curadas a 60°C	115
5.3 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL	117
5.3.1 Amostras curadas a 23°C	117

5.3.2 Amostras curadas a 40°C	122
5.3.3 Amostras curadas a 60°C	126
5.4 EFEITO DA TEMPERATURA DE CURA	129
5.4.1 Amostras com cinza volante não moída.....	130
5.4.2 Amostras com cinza volante moída 2h.....	133
5.4.3 Amostras com cinza volante moída 6h.....	135
5.4.4 Efeito da temperatura de cura em função do tempo de moagem.....	137
5.5 EFEITO DO TEMPO DE MOAGEM	139
5.5.1 Amostras curadas a 23°C	139
5.5.2 Amostras curadas a 40°C	142
5.5.3 Amostras curadas a 60°C	144
5.5.4 Efeito do tempo de moagem em função da temperatura de cura.....	146
5.5 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA BIBLIOGRAFIA.....	148
5.6 ANÁLISE DA VARIÂNCIA	152
5.6.1 Análise para o experimento sem cinza volante moída 2h.....	152
5.6.1 Análise para o experimento sem a temperatura de 60°C	161
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	169
6.1 CONCLUSÕES.....	169
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	172
REFERÊNCIAS.....	174
APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA PARA OS CICLOS DE MOAGEM.....	181
APÊNDICE B – DADOS DOS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS À COMPRESSÃO SIMPLES	184

1 INTRODUÇÃO

A introdução deste trabalho apresenta uma visão do problema e relevância desta pesquisa, os objetivos primários e secundários da pesquisa e o seu delineamento.

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

No âmbito industrial e da construção civil, a produção de resíduos é lugar comum. Muitas vezes, sua disposição apresenta-se como um transtorno e um custo de produção, já que, frequentemente estes materiais são poluentes ambientais e requerem uma disposição adequada. Em vista da crescente conscientização mundial no controle da geração de resíduos causadores de danos ambientais, o reaproveitamento destes materiais vem sendo bastante discutido em diversas áreas da Engenharia.

Um dos resíduos mais produzidos no mundo é a cinza proveniente da queima de carvão para geração de energia. Esta fonte supre 40% da demanda de energia elétrica global (IEA, 2015 b). Somente as termelétricas brasileiras produzem 3.350.000 toneladas de cinzas volante por ano e, a grande maioria dessas localizam-se nos Estados de Rio Grande do Sul e Santa Catarina (ROHDE, 2006).

A cinza volante, é considerada pela NBR 10004 como um resíduo sólido não perigoso não inerte (classe II A), contudo, as propriedades pozolânicas deste material tem sido estudadas por diversos pesquisadores (LOPES JUNIOR, 2007; DALLA ROSA, 2009; SILVANI, 2013). Este vem sendo utilizado pela a indústria para as mais variadas aplicações, levando-o a ter um valor comercial e, por isso, ser considerado um subproduto. Entre as suas aplicações pode-se citar: a produção de cimento, concreto e cerâmica; como material estabilizante em aterros e bases de pavimentos; como corretor de solo para a agricultura. No Estado do Rio Grande do Sul, o consumo de cinzas não atinge um terço da produção e é majoritariamente consumido pela indústria produtora de cimento. A grande disponibilidade deste subproduto, que contém elementos-traço como, zinco, cobre, cromo, chumbo, mercúrio e fósforo, faz com que a pesquisa de novas aplicações seja necessária.

Outro resíduo produzido pela indústria é a cal de carbureto, este material é proveniente da produção do gás acetileno. Como este material possui potencial poluidor devido a sua alta alcalinidade, ele é destinado a aterros industriais ou comercializado. Com propriedades químicas muito similares à cal calcífica hidratada, a utilização deste material como agente cimentante tem sido estudada por vários pesquisadores com resultados bastante satisfatórios (CONSOLI *et al.*, 2001; SALDANHA, 2014).

Misturas de cinzas volantes e cales tem sido usadas pela humanidade desde as mais antigas civilizações como ligantes hidráulicos. Porém, o entendimento do processo da reação pozolânica, onde sílicas e aluminas presentes nas cinzas volantes ligam-se aos íons de cálcio ou magnésio das cales na presença de água, gerando géis de diferentes hidratados de cálcio que com o tempo se transformam em cristais, conferindo resistência à mistura, é muito mais recente (MINNICK, 1967; MALEK *et al.*, 2005). A compreensão dessa reação foi vital para o desenvolvimento de pesquisas utilizando estes materiais como estabilizantes de solos, ou na produção de tijolos.

A microestrutura da cinza volante é bastante particular. As partículas do material são compostas por esferas ocas e plerosferas que são, essencialmente, esferas ocas preenchidas por esferas menores. Como as reações pozolânicas acontecem principalmente na superfície deste material, a quebra das pleroesferas proporciona um aumento da superfície específica da cinza e, também um aumento na reatividade do material.

Esta pesquisa procura preencher a lacuna na questão do comportamento quanto ao desenvolvimento de resistência de misturas de uma cinza volante rio-grandense moída com uma cal de carbureto, também produzida no Estado. Visando a utilização destes subprodutos na Engenharia Geotécnica, a estabilização da cinza volante moída pode apresentar-se como uma alternativa de projeto mais sustentável, podendo ser aplicada na proteção de taludes, na construção de base para pavimentos, em aterros sobre solos moles e, também, como camada de suporte para fundações superficiais.

A presente pesquisa busca fornecer subsídios para que seja possível o desenvolvimento de uma dosagem que permita a previsão da resistência e do comportamento mecânico da mistura de forma objetiva e com confiabilidade. Isto é realizado através de relações entre porosidade e teor volumétrico de agente cimentante, desenvolvidas com base na identificação e

quantificação das variáveis mais importantes no controle da resistência de misturas de cinza volante moída e cal de carbureto.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo principal

Este trabalho tem por objetivo principal a avaliação do impacto da moagem de cinza volante no ganho de resistência de misturas de cinza volante com cal de carbureto, curadas a diferentes temperaturas, através de ensaios de resistência à compressão simples.

1.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) determinação dos tempos de moagem para a cinza volante estudada;
- b) avaliação da influência isolada das variáveis deste trabalho (quantidade de cal, porosidade, temperatura de cura e tempo de moagem da cinza) frente a resistência à compressão simples;
- c) avaliação do impacto da interação entre as variáveis estudadas na resistência à compressão simples;
- d) avaliação da utilização do parâmetro porosidade/teor volumétrico agente cimentante na estimativa da resistência à compressão simples das misturas estudadas;
- e) desenvolvimento de equações que definem a resistência à compressão simples das misturas incorporando a moagem da cinza como uma variável;
- f) comparação da evolução da resistência entre a cinza volante estudada (Braskem) e a cinza volante utilizada por Saldanha (2014) (Celulose Riograndense).

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No primeiro capítulo, 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 segundo capítulo, é realizada uma revisão da literatura acerca de aspectos relevantes do tema abordado, proporcionando ao leitor uma visão geral sobre a técnica de materiais artificialmente cimentados e as implicações do processo de moagem da cinza volante.

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

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

No capítulo 5 apresenta uma discussão detalhada dos resultados, levando em conta outros resultados encontrados na literatura.

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

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta tópicos pertinentes à contextualização e compreensão dos principais pontos vistos na pesquisa. Primeiramente, apresenta-se uma visão geral sobre cinzas de carvão mineral e seu emprego na Engenharia Civil. Em seguida, apresentam-se os materiais utilizados em misturas de cinza volante-cal. Terceiramente, contempla-se uma revisão sobre os mecanismos de estabilização pozolânica. E, finalmente, ressaltam-se as principais características comportamentais de misturas cinza volante-cal.

2.1 CINZAS DE CARVÃO MINERAL E SEU EMPREGO NA ENGENHARIA CIVIL

O carvão é composto por uma variedade de rochas orgânicas, sedimentares, sólidas e combustíveis. Estas são formadas através da consolidação de vegetação, encapsulada por outras formações rochosas e alterada por meio da combinação de pressão e calor ao longo de milhares de anos. O carvão é principalmente composto por carbono, mas também contém diversos outros componentes como hidrogênio, oxigênio, enxofre e outras impurezas. No mundo, são utilizadas diversas classificações para o carvão, o que reflete a sua grande variação de idade, composição e propriedades. Os principais parâmetros utilizados nesta classificação são a capacidade calorífica, quantidade de cinza, o teor de umidade e o teor de enxofre (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015 a).

Ao comentar a origem do carvão brasileiro, Rohde (2006) salienta que o material classificado como carvão no Brasil, quando examinado com um maior rigor geológico, seria classificado como um folhelho carbonoso, já que o teor de material inorgânico na rocha chega a ultrapassar 50%. Com isto, o material terá mais inertes - que futuramente, se transformarão em cinzas – do que os carvões norte-americanos ou europeus.

2.1.1 O carvão mineral no mundo

O Ministério de Minas e Energia (MME) (BRASIL, 2007) apresenta a reserva de carvão mineral no mundo como:

O carvão é a mais abundante fonte de energia primária disponível no planeta. Além disso, seu preço, apesar de refletir algum impacto das tendências do custo da energia, influenciadas pela flutuação nos preços internacionais do petróleo, apresenta um grau de volatilidade relativamente baixo.

Embora muitas vezes o carvão seja considerado o combustível do passado, a sua produção de mundial em 2013 foi 2,5 vezes maior do que em 1973, o que expressa a sua relevância atual. A segunda principal fonte de energia mundial é o carvão (29%), perdendo somente para o petróleo com 31% do mercado. Sua contribuição é ainda maior (40%) se for considerado somente a energia consumida para a produção de eletricidade, puxada por países que apresentam grande consumo de carvão, como a China, Índia, Estados Unidos e Austrália que tem respectivamente 57%, 71%, 92% e 90% de seu carvão consumido para a produção de eletricidade (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015 b).

Segundo a *World Coal Association* (WWA)(2014) a produção mundial de carvão foi de 7283 Mt em 2013. E, de acordo com IEA (2014), a demanda de carvão ultrapassará os 9 bilhões de toneladas até 2019.

O Brasil tem uma reserva de carvão estimada em 6630 Mt, o que representa apenas 0,7% da reserva mundial. Porém, a taxa de produção de carvão no País em relação à sua reserva é inferior à 0,05%, o que indica uma grande disponibilidade deste recurso no território nacional (BRITISH PETROLEUM, 2015).

A maior parcela das reservas nacionais de carvão estão localizadas na Região Sul do País. Do volume total, 89,25% localizados no Rio Grande do Sul, 10,41% em Santa Catarina, 0,32% no Paraná e 0,02% em São Paulo. Sendo que, 38% da reserva nacional encontra-se na Jazida de Candiota, no Rio Grande do Sul. Contudo, o minério brasileiro possui um alto grau de impureza, não permitindo o seu beneficiamento nem seu transporte, implicando na necessidade de sua utilização na boca da mina (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

O carvão utilizado na geração de eletricidade é o carvão vapor. No Balanço Energético Nacional (BEN) de 2014 divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) foi salientado que a demanda de carvão vapor para a geração de energia elétrica aumentou em 59,1% em 2013 em relação ao ano anterior e, sua fonte é majoritariamente brasileira. A geração de energia elétrica através desta fonte representa 2,6% da matriz energética do País, sendo

Misturas de cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples frente à moagem da cinza volante.

responsável pela geração de 13,95 TWh em 2013 (BRASIL, 2014). A potência instalada total das termelétricas de carvão do Brasil somam 1,9 GW distribuídas em sete termelétricas na Região Sul do País, conforme pode ser observado na Tabela 1 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Tabela 1 – Termelétricas brasileiras

Termelétrica	Potência (kW)	Município
Charqueadas	72000	Charqueadas (RS)
Figueira	160250	Figueira (PR)
Jorge Lacerda I e II	232000	Capivari Baixo (SC)
Jorge Lacerda III	262000	Capivari Baixo (SC)
Jorge Lacerda IV	363000	Capivari Baixo (SC)
Presidente Médici A, B e C	796000	Candiota (RS)
São Jerônimo	20000	São Jerônimo (RS)

(fonte: adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008)

2.1.2 A produção da cinza de carvão mineral

O carvão existente na Região Sul é classificado como um carvão sub-betuminoso, tem um poder calorífico 2600 a 4200 kcal/kg e 42 a 59% de geração de cinzas. Atualmente, a geração de energia elétrica em uma termelétrica de carvão mineral ocorre em 5 etapas principais: extração e transporte de carvão; preparação e queima do carvão; produção de vapor; transformação de calor em energia mecânica; transformação de energia mecânica em energia elétrica (ELETROBRAS CGTEE, 2015; AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008):

Este processo de geração de energia, como já visto anteriormente, gera uma quantidade considerável de resíduo. Segundo Rohde (2006), no processo de combustão é gerado um material chamado de cinza e, esta é qualitativamente e quantitativamente diferente da matéria mineral que a originou. Portanto, seu comportamento também será diferente. As três principais formas de cinzas são apresentadas a seguir:

- a) escórias: são as cinzas geradas na queima de carvão granular em grelhas, que são obtidos em um sistema mais antigo de geração de energia, onde o carvão não é pulverizado, mas britado. Ela é então retirada, após do seu resfriamento

com água, do fundo das fornalhas e, possui uma granulometria grossa com altos teores (10 a 20%) de carbono não queimado;

- b) cinzas de fundo: são cinzas de granulometria mais grossa, portanto mais pesadas, que caem no fundo das fornalhas e são retiradas por um sistema de fluxo de água. Possuem 5 a 10% de teor de carbono;
- c) cinzas volantes: são cinzas de granulometria extremamente fina (100% menor que 0,15 mm), aproximadamente esféricas, extremamente leves e, uma parcela destas, ocas. Atualmente, a grande maioria destas partículas (cerca de 99%) é retida pelo sistema de captação (filtros de tecido, ciclones e precipitadores eletrostáticos), mitigando o grande impacto que era causado pela dispersão deste material na atmosfera.

Para ter-se ideia da quantidade de cinza produzida com o consumo de energia elétrica, a Eletrobras CGTEE (2015) apresenta que, 1kg de carvão gera 1kWh de energia elétrica mais 500g de cinzas. Portanto, 1 kg de carvão mantém um chuveiro elétrico por 30 minutos, 1 lâmpada de 100 W por 10 horas ou 1 ferro elétrico por 2 horas. Na Tabela 2 é possível observar a produção das diferentes cinzas nas usinas termelétricas da Região Sul.

Tabela 2 – Produção de cinzas em termelétrica brasileiras por ano

	Resíduos (t)			Produção de Cinza Volante
	Cinza Volante	Cinza de Fundo	Escória	
Termelétrica				
Presidente Médici A, B e C	1.500.000	375.000	-	80%
São Jerônimo	5.000	-	50.000	9%
Charqueadas	295.058	126.453	-	70%
Jorge Lacerda I, II, III e IV	1.500.000	500.000	-	75%
Figueira	50.000	5.000	-	91%
Indústria Geradora				
Copesul (Braskem)	144.000	54.000	-	73%
Aracruz Celulose	50.400	14.400	-	78%

(fonte: adaptado de ROHDE, 2006)

2.1.3 Implicações Ambientais

Toda a produção de cinza brasileira, que não é reciclada, deve obedecer as normas de classificação de resíduos sólidos NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004 a), onde os resíduos são classificados como resíduos classe I (perigosos), classe II A (não perigosos não inertes) e classe II B (não perigosos inertes), de acordo com as suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Estes então, devem ser dispostos de maneira adequada, de acordo com a sua classe, a fim de evitar danos ambientais.

Para as cinzas originadas da queima de carvão somente duas características são pertinentes: corrosividade e toxicidade. A primeira é obtida através da determinação do extrato lixiviado de resíduos sólidos apresentada pela NBR 10005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004 b). E, a segunda, pela obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, apresentada pela NBR 10006 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004 c).

A necessidade desta avaliação deve-se pela presença de traços de elementos químicos que são potencialmente nocivos para o meio ambiente na cinza. As cinzas são um material altamente heterogêneo, uma vez que, suas características químicas estão ligadas ao tipo de carbono que a originou e, as transformações são dependentes da temperatura de queima. Os principais elementos que formam a cinza são a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3), o óxido de ferro (Fe_2O_3), o óxido de cálcio (CaO) e o carbono (C) (MALLMANN, 1996). Embora a cinza volante seja, basicamente, um silicato ferro-aluminoso amorfo com altos teores de cálcio, magnésio, sódio e potássio, praticamente todos os elementos naturais são encontrados na cinza de carvão em quantidades vestigiais. A quantidade destes elementos-traço é influenciada pela fonte de extração do carvão e, a concentração destes aumenta com a diminuição do tamanho das partículas de cinza volante (ADRIANO *et al.*, 1980). As cinzas brasileiras podem ser classificadas, em sua maioria, como resíduos classe II A, por isso, se não forem recicladas, devem ser dispostas em aterros sanitários (RODHE, 2006).

Davison *et al.* (1974) identificou 25 elementos-traço em cinzas volantes provenientes de usina termelétrica, entre eles, chumbo (Pb), tálio (Tl), antimônio (Sb), cádmio (Cd), selênio (Se), arsênio (As), zinco (Zn), níquel (Ni), manganês (Mn), cromo (Cr), mercúrio (Hg), flúor (F) e enxofre (S). O potencial de toxicidade destes elementos para plantas e animais é avaliado por

Van Hook e Shults¹ apud Adriano *et al.* (1980) que aponta um alto grau de toxicidade para plantas de Cr, Cd, F e Tl e, para animais de Cd, F, Hg, Ni, Sb, Se e Tl. Swaine (2000) salienta que, embora o grande potencial tóxico destes, como elementos-traço, a maior preocupação ambiental é a lixiviação destes elementos para fontes de água subterrâneas ou superficiais. O que pode acarretar sérios problemas de saúde pública como, por exemplo, o ocorrido em Bangladesh, causado por altos níveis de arsênio presente nos poços de água potável.

Ao pesquisar sobre o grau de contaminação de águas subterrâneas na região de Charqueadas (RS), devido à deposição de resíduos do processamento de carvão, Binotto (1997), observou que os resíduos das mineradoras e termelétricas da região não foram dispostos adequadamente, o que acarretou a dispersão de poluentes na região. Encontrando como principais elementos-traço da cinza Ni, Mn e Zn, ao avaliar o impacto causado pelas mesmas, o autor concluiu que, embora a cinza afete em menor proporção o meio ambiente frente aos rejeitos de carvão, ela apresenta altos percentuais de solubilização/lixiviação, o que configura a cinza como material não inerte. Ao estudar misturas de solo argiloso-cinza-cal e solo arenoso cinza-cal, Meliande (2014) também observou, através do ensaio de solubilização, que a cinza volante da termoelétrica Jorge Lacerda é não inerte, sendo classificado como classe II A (não perigosos não inertes).

Na tentativa de reduzir a lixiviação destes elementos-traço, pesquisadores avaliaram o efeito da adição de cimento à cinza volante. Ubbriaco e Calabrese (1998) utilizaram misturas de cimento Portland CP IV com cinza volante em ensaios de lixiviação com pH 5 e verificaram um bom grau de fixação dos metais pesados na matriz cimentada, considerando a estabilização satisfatória. Segundo Mesquita (2008), para que esta estabilização ocorra, devem haver alterações tanto no meio físico (obtendo uma matriz de baixa permeabilidade) quanto no químico (buscando uma alta alcalinidade, permitindo a transformação de metais pesados em compostos insolúveis).

Continuando na linha de pesquisa de estabilização dos elementos-traço encontrados nas cinzas, Izquierdo *et al.* (2009) pesquisaram os efeitos da lixiviação em um novo geopolímero formado por cinza volante, escória, silicato de potássio e água. Este produto assemelha-se a um concreto, tendo as partículas de cinza e escória bem compactadas, com uma homogênea

¹VAN HOOK, R. I.; SHULTS, W. D. Effects of trace contaminants from coal combustion. In: **Proc. Workshop.** US Energy Research and Develop. Admin Washington, DC, 1977. p. 79.

matriz cimentante. Observou-se que as condições alcalinas do polímero inibem a mobilidade dos metais, resultando em uma retenção de vários elementos poluentes. Os altos valores de pH melhoram a mobilidade oxi aniônica, aumentando a liberação de elementos como As e Se, estes elementos não assimilados pela estrutura do geopolímero, mas supostamente ficam encapsulado pela matriz, porém ainda precisam ser mais bem estudados com ensaios de lixiviação específicos. Com isto, o principal mecanismo de imobilização do geopolímero pode ser essencialmente físico ao invés de uma estabilização química.

Nesta pesquisa não é avaliada a lixiviação ou solubilização da mistura, porém conforme visto na revisão, ao ser misturado com o material cimentante (cal de carbureto) acredita-se que os elementos-traço da cinza volante serão contidos.

2.1.4 Cinza como subproduto

Como visto anteriormente, na geração de energia elétrica no Brasil, aproximadamente metade do volume de carvão consumido se transforma em cinza. Rohde (2013) afirma que a cinza deve ser considerada como um segundo produto, obtido conjuntamente com a energia elétrica, em termelétricas. Ressalta-se também que, a cinza é um material alternativo, tem inúmeras aplicações mas, vem sido abordada somente como um resíduo sólido.

Esta visão de cinzas de carvão como um subproduto já está bastante cimentada em diversos Países, graças à influência da legislação e de intenções políticas. A utilização de cinzas de carvão no mundo varia de 20 a 100% (FEUERBORN 2005). Entre os Países que utilizam toda a cinza produzida. A Argentina, por exemplo, gera 45.000 t de cinzas e utiliza toda a sua produção em aterros estruturais, preenchimentos e barragens. Já a Holanda, que tem uma produção de 833.000 t ao ano, a consome principalmente como matéria-prima do cimento e como agregado leve (MANZ, 1997). Na Europa, cerca de 52% da cinza é utilizada na indústria, 36% é utilizada na restauração de minas e, somente 12% não são utilizadas (EUROPEAN COAL COMBUTION PRODUCTS ASSOCIATION, 2010). Nos Estados Unidos 45% da cinza de carvão é reutilizada, os outros 55% são temporariamente estocados ou rejeitados (AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION, 2013).

Segundo Rohde (2006) em 1995, cerca de 34% da cinza produzida no Brasil foi comercializada. O autor aponta diversos benefícios da utilização da cinza de carvão como subproduto. Entre elas estão: diminuição dramática da área de aterros; conservação dos

recursos naturais, gerando um ambiente mais limpo e seguro; redução da emissão de dióxido de carbono; redução significativa do custo final da geração de energia e, impulsão do desenvolvimento econômico.

Ferreira *et al.* (2003), levando em consideração as características físicas e químicas da cinza, suas propriedades técnicas e o seu impacto ambiental, apontam nove aplicações potenciais para a cinza volante divididos em quatro principais áreas, são elas:

- a) materiais de construção: produção de cimento, concreto, cerâmica e vidro;
- b) geotecnia: pavimentação de estradas e aterros;
- c) agricultura: correção do solo;
- d) variados: materiais absorventes e condicionamento de lodos.

Os pontos pertinentes à pesquisa serão abordados no próximo tópico, juntamente com alguns outros pontos considerados pertinentes.

2.2 MISTURAS CINZA – CAL

Misturas de cinza com cal datam do século VII a.C., quando cinza vulcânica foi utilizada visando tornar mais resistente à água as argamassas de cal que revestiam as cisternas da ilha de Santorini, cuja as cinzas possuíam propriedades pozolânicas. Esta denominação originou-se na cidade italiana de Pozzuoli, que tornou-se famosa pelo comércio de materiais do Vesúvio. Os romanos também utilizaram misturas cinza-cal viva para a obtenção de argamassa hidráulica na construção da Via Ápia em 312 a.C. (ANDRADE, 1991).

Misturas de cinza volante com cal têm sido bastante pesquisadas para as mais diversas utilidades na Engenharia Civil. Entre elas estão: estabilização de solos para pavimentos, maciços, fundações superficiais e aterros; desenvolvimento de tijolos e blocos de construção. A seguir são apresentadas breves revisões da utilização de cinza e cal no mundo e uma visão da utilização cinza e cal na Engenharia Civil.

2.2.1 Emprego da cinza no mundo

A técnica de pulverização do carvão como fonte de combustível surgiu por volta de 1910. A adoção desta técnica iniciou a produção de escórias, cinzas de fundo e volantes, a geração foi intensificada com o desenvolvimento tecnológico das décadas de 1920 e 1930, onde foram introduzidas maiores caldeiras, com queima adaptada para carvões com altos teores de matéria mineral. Porém, devido a falta de um sistema de retenção de cinzas volantes, estas eram liberadas na atmosfera junto com os gases da combustão, levando, na década de 1950, ao desenvolvimento de filtros com o fim de mitigar estes impactos ambientais causados. A utilização destes sistemas de contenção induziram um problema logístico de estocagem do, até então, resíduo, tornando a utilização deste material de vital importância (ROHDE, 2006).

O potencial de utilização de cinza de carvão como um material cimentante suplementar é conhecido desde o começo do século XX, embora, a utilização significativa de cinza volante em concreto só tenha ocorrido na metade do mesmo século, alavancados pelas pesquisas realizadas da Universidade da Califórnia, Berkeley pelo professor Davis em 1937 (THOMAS, 2007). O uso de cinza cresceu substancialmente no mundo, sua utilização somente para a produção de materiais cimentantes nos Estados Unidos representa 35% de toda a cinza de carvão reutilizada (AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION, 2013) e na Europa a utilização de cinzas para este fim chega a 55,5% (EUROPEAN COAL COMBUSTION PRODUCTS ASSOCIATION, 2010).

Tratando-se especificamente da cinza volante, aproximadamente 43% do material produzido é utilizado nos Estados Unidos e Europa. Suas principais aplicações são: misturas de cimento, produção concreto, aterros estruturais, base e sub-base de rodovias, estabilização de solos e estabilização de resíduos (AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION, 2013; EUROPEAN COAL COMBUSTION PRODUCTS ASSOCIATION, 2010).

O emprego de cinza no Brasil começou na década de 1960, quando o material foi misturado ao concreto na construção do complexo hidroelétrico de Jupuíá em São Paulo, levando pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT/SP) a estudar a cinza. Este estudo os levou a concluir que as suas propriedades pozolânicas inibem as reações expansivas dos agregados naturais com os álcalis do cimento. A partir desta experiência, a utilização de cinzas em barragens brasileiras foi disseminado, abrindo espaço para a pesquisa de cinzas em misturas de concreto e cimento. Atualmente, no Rio Grande do Sul e Santa

Catarina só são produzidos cimentos pozolânicos, sendo a principal aplicação de cinzas no País (ROHDE, 2006).

2.2.2 Emprego da cal no mundo

A cal é um ligante hidráulico extremamente difundido na Engenharia moderna, porém, há relatos da utilização deste material dentre as grandes civilizações antigas. A respeito da utilização da cal durante a história da humanidade, Andrade (1991) comenta: “A cal tem sido utilizada pela humanidade desde as mais antigas civilizações, tendo participado nas grandes obras que marcaram os períodos históricos, principalmente como ligante dos materiais de construção de suntuosos monumentos. Os romanos, os egípcios, os gregos e os chineses a usaram nas mais variadas aplicações.”. Na mesma pesquisa, também é relatado que argilas estabilizadas com cal foram utilizadas na muralha da China no séc. III a.C.

No final do século XX, cientistas consolidaram os princípios científicos básicos relativos à fabricação da cal virgem e hidratada. Isto possibilitou a evolução do processo industrial do produto, sendo responsável, não só pela evolução da produção, mas também pela ampliação das pesquisas de sua aplicação nas mais diversas áreas da nossa época. Esta evolução foi impulsionada pela Europa, chegando ao Brasil na década de 1950. Atualmente, a produção de cal no País está no mesmo nível da produção mundial (CALTEC, 2015).

2.2.3 Utilização de misturas cinza volante e cal

Thomé (1999) pesquisou a viabilidade técnica da utilização da mistura de cinza pesada da usina termelétrica de Charquedas com cal de carbureto e um solo residual arenoso de arenito Botucatu como camada de suporte para fundações superficiais. O autor comparou a reatividade à cal de carbureto da cinza pesada utilizada com a cinza volante, obtida na mesma termelétrica e, concluiu que cinza pesada não é tão reativa quanto a volante. Além disto, o autor avaliou o ganho de resistência à compressão simples e diametral das misturas através do aumento do teor de material estabilizante, concluindo que a mistura ótima é 50% de solo 50% de cinza e 5% de cal, sendo que, este teor de cal foi considerado ótimo para todas as combinações estudadas. Verificou-se a influência do tempo e da temperatura de cura na no ganho de resistência. Também foi avaliada a durabilidade, o grau de lixiviação e de solubilização das misturas, concluindo que as misturas tem durabilidade adequada, não são

Misturas de cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples frente à moagem da cinza volante.

poluentes e não trazem riscos ao meio ambiente. Com isto, o autor considerou que a utilização destes subprodutos são adequados para a estabilização de solos.

Ao estudar a utilização de cinza volante com cal em um solo residual compactado como material para realização de base de pavimentos, Ceratti² (1979 apud THOMÉ, 1999) verificou que os efeitos da mistura excediam os valores de resistência à compressão simples exigidos pela norma brasileira. Validando assim, a utilização de cinzas volantes provenientes de termelétricas para pavimentação.

A Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC desenvolveu diversos projetos utilizando cinzas provenientes das termelétricas rio-grandenses com adição de cal, entre estes, se destacam pela utilização de cinza volante e cal hidratada os projetos CICASOL e CINCAL. O projeto CICASOL, iniciado em 1981 em parceria com o DAER-RS, pesquisou a viabilidade de misturar-se cinza volante e cal à oito diferentes solos da região para a utilização em base de pavimentos. O projeto desenvolveu um método de dimensionamento de pavimentos semi-rígidos, estabelecendo especificações construtivas e de viabilidade técnica e econômica para o emprego da tecnologia. A pesquisa concluiu, através da construção de diversos trechos experimentais, que o tratamento do solo com cinza volante e cal transforma a cinza em um material rígido, apto a exercer a função de base em rodovias de alto tráfego e cargas (ROHDE, 2006).

Já o projeto CINCAL, de 1992, pesquisou a utilização de cinza volante proveniente da termelétrica de Candiota – RS e cal hidratada na fabricação de tijolos e blocos autoclavados para a construção civil. A reação pozolânica dos resíduos finos sílico-aluminosos da cinza volante com a cal hidratada e água, curados a altas temperaturas gerou um material considerado como uma rocha artificial e, foi considerado um projeto extremamente bem sucedido dando origem ao projeto CIPECAL que estudou a viabilidade substituição da cinza volante por cinza pesada (ROHDE, 2006).

Andrade (1991) estudando o desempenho quanto à resistência, durabilidade, absorção e aderência de tijolos feitos de cinza volante, da usina termelétrica de Charqueadas – RS e cal hidratada. Os ensaios de resistência à compressão simples (q_u) obtiveram valores superiores

²CERATTI, J.A.P. **Efeitos da adição da cal e cinza volante nas propriedades de um solo residual compactado**. Porto Alegre: Escola de Engenharia, 1979. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1979.

aos definidos pela norma brasileira. Nos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem, com exceção dos tijolos com produzidos 5 e 10% de cal aos 7 dias de cura, o material foi aprovado. Quanto à absorção, os valores obtidos chegaram a ser 3 a 4 vezes maiores ao limite máximo estipulado pela norma americana. Mesmo assim, os tijolos podem ser utilizados em áreas internas sem nenhum problema. Finalmente, os valores obtidos no ensaio de aderência que, pela falta de padrões de aceitação no Brasil, foram comparado aos valores de tijolos cerâmicos, apresentaram uma boa ligação entre o tijolo e a argamassa. Assim, concluiu-se que os tijolos de cinza volante e cal são viáveis à utilização na construção de alvenarias, salvo os problemas de absorção apresentados pelo material.

2.3 MATERIAIS UTILIZADOS EM MISTURAS CINZA VOLANTE – CAL

Quando se mistura um material pozolânico com um material cimentante, na presença de água, desenvolvem-se diversas reações, sendo, em sua maioria, bastante complexas. Então, para que haja um melhor entendimento das reações que ocorrem em misturas, é necessário uma visão das características físicas e químicas dos materiais separadamente. Os materiais em questão são cinza volante, cal de carbureto e água. A seguir serão apresentados estudos realizados sobre os materiais que compõem esta mistura.

2.3.1 Cinza Volante

Dalla Rosa (2009) ressalta que, embora a compreensão das reações pozolânicas seja bastante difícil, sabe-se que a cinza volante desenvolve este tipo de reações e, que a mistura da cinza com cal apresenta as mesmas características de misturas solo-cal. Segundo a ASTM C595, material pozolânico é definido como um material silicoso ou silico-aluminoso que, sozinho possui pouca ou nenhuma capacidade de cimentação. Contudo, na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxidos alcalinos e alcalino terrosos à temperatura ambiente, formando, ou ajudando a formar compostos com propriedades cimentantes. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2015).

A ASTM C618 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2012) classifica as cinzas volantes em três grupos, cinza volante de classe N, F e C. As cinzas da classe N são as classificadas como pozolanas naturais. As cinzas de classe F e C consistem basicamente de partículas esféricas, não tendo nenhuma diferença discernível de tamanho ou forma dos grãos.

Porém, cinzas da classe F possuem uma superfície limpa, enquanto, as da classe C possuem depósitos de diversos condensados, como álcalis e sulfatos, aderidos à sua superfície. A diferenciação entre as duas classes ocorre na quantidade de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 da cinza. Outra classificação para as cinzas volantes é a ASTM C593 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2011), que apresenta condições para que a cinza volante seja utilizada em misturas com cal para a estabilização de solos. As exigências das duas normas americanas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação de cinzas volantes segundo ASTM C618

Propriedades		ASTM C618			ASTM C593
		Classe N	Classe F	Classe C	
Químicas					
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	min. %	70	70	50	-
SO_3	máx. %	4	5	5	-
Teor de umidade	máx. %	3	3	3	-
Perda ao fogo	máx. %	10	6	6	-
Físicas					
Material retido na peneira 325	máx. %	34	34	34	-
Material retido na peneira 200	máx. %	-	-	-	30
Material retido na peneira 30	máx. %	-	-	-	2
Atividade pozolânica com cimento	min. %	76	75	75	-
Atividade pozolânica com cal (7 e 21 dias)	MPa	-	-	-	4
Água requerida	máx. %	115	105	105	-

(fonte: adaptado de AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2011; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2012)

No Brasil não existe uma norma formal de classificação de cinzas, somente a NBR12563: Materiais pozolânicos – Requisitos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) que tem uma classificação muito geral quando se trata de cinzas de combustão de carvão.

Segundo Rohde (2006), embora as cinzas volantes sul brasileiras sejam classificadas como classe C, algumas cinzas volantes e de fundo da região podem não enquadrar-se nas exigências da norma. Porém, isto não significa que não tenham propriedades pozolânicas desejadas. Rohde também ressalta que, o fato de não se ter uma norma específica para a utilização de cinzas reforça a noção de que as cinzas no País são tratadas somente como

resíduos sólidos. O que implica na necessidade de uma aprovação específica para o seu emprego com um monitoramento ambiental prolongado, desestimulando o seu uso. A Tabela 4 apresenta as especificações impostas pela NBR 12563, juntamente com os valores médios das cinzas da Região Sul de acordo as pesquisas feitas pela CIENTEC apresentadas por Rohde (2006).

Tabela 4 – Classificação de materiais pozolânicos segundo a NBR 12563 e características gerais das cinzas volantes sul brasileiras

Propriedades		NBR 12563			Cinzas Volantes
		Classe N	Classe C	Classe E	
Químicas					
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	min. %	70	70	50	>90
SO ₃	máx. %	4	5	5	<1,0
Teor de umidade	máx. %	3	3	3	<1,0
Perda ao fogo	máx. %	10	6	6	<1,0
Álcalis disponíveis na Na ₂ O	máx. %	1,5	1,5	1,5	<1,5
Físicas					
Material retido na peneira 45µm	máx. %	20	20	20	<34
Atividade pozolânica com cimento	min. %	90	90	90	>75
Atividade pozolânica com cal	MPa	6	6	6	>6

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014; ROHDE, 2006)

As cinzas volantes tem duas frações principais na sua composição. A primeira sendo a fração vítrea, ou amorfa, com uma natureza silicosa ou silico-aluminosa e, a segunda, uma fração cristalina, contendo quartzo, mulita e hematita (Saldanha, 2014). As proporções destes elementos é extremamente importante para sua caracterização e sua capacidade de reagir pozolanicamente. Na Tabela 5 é possível observar os constituintes mineral das principais cinzas volantes da Região Sul e alguma cinzas do mundo, a nível de comparação.

Em relação à atividade pozolânica das cinzas, Mallmann (1996) apresenta que a atividade pozolânica do material depende do tipo de cinza, que está diretamente ligada ao potencial de suas propriedades cimentantes. Contudo, o crescimento da atividade pozolânica depende também de outros quatro fatores. São eles:

- a) superfície específica: seu aumento leva à aceleração das reações pozolânicas;

- b) percentagem de sílica e alumina: reagem com o hidróxido de cal livre;
- c) percentagem de estruturas amorfas: seu aumento implica na aceleração da solubilidade da sílica;
- d) percentagem de carbono orgânico.

Tabela 5 – Concentração em percentagem dos constituintes maiores e menores de cinzas brasileiras e de algumas estrangeiras

Constituintes	Copesul (Braskem)	Charqueadas	Pres. Médici (Candiota)	EUA	Inglaterra
SiO ₂	64,40	62,20	65,70	44,11	46,16
Al ₂ O ₃	18,20	26,00	20,30	20,81	26,99
Fe ₂ O ₃	6,50	2,90	4,6	17,49	10,44
TiO ₂	0,80	1,10	0,69	-	-
CaO	2,15	1,26	0,37	4,75	3,06
MgO	0,88	0,35	0,46	1,12	1,96
K ₂ O	1,41	1,41	1,12	1,97	3,26
Na ₂ O	0,34	0,18	0,10	0,73	0,90
SO ₃	-	-	0,1-0,7	1,19	1,59
C	0,14	1,09	0,05	-	-
S	0,09	<0,05	<0,05	-	-

(fonte: adaptado de ROHDE, 2006)

Ao analisar-se a microestrutura das cinzas volantes provenientes da queima de carvão, através de microscopia eletrônica (Figura 1 – Microscopia eletrônica de cinzas volantes americanas (FISCHER *et al.*, 1976) observou-se que a estrutura do material era composta por partículas esféricas (Figura 1 A). Porém, notou-se que a presença de cenosferas era muito comum. Realizando-se uma avaliação mais cuidadosa destas cenosferas, constatou-se que algumas das maiores cenosferas continham outras cenosferas dentro e, estas continham outras esferas de aproximadamente 1 µm (Figura 1 B, D, E e F). Como estas esferas não são vazias, sugeriu-se que fosse adotado o termo “plerosfera” (plero – do grego e significa cheio) para estas esferas ocas, porém preenchidas por outras esferas. Também, foi observado que cristais se formavam na superfície das maiores esferas e na superfície das esferas menores contidas nas maiores (Figura 1 B e C). O mecanismo de formação destas plerosferas não é conhecido com certeza,

porém, pode ocorrer devido ao processo de ebulição que ocorre na zona de combustão em altas temperaturas. Contudo, a natureza esférica das plerosferas sugere que pressão e tensão superficial são as forças predominantes atuando nas partículas (FISCHER *et al.*, 1976).

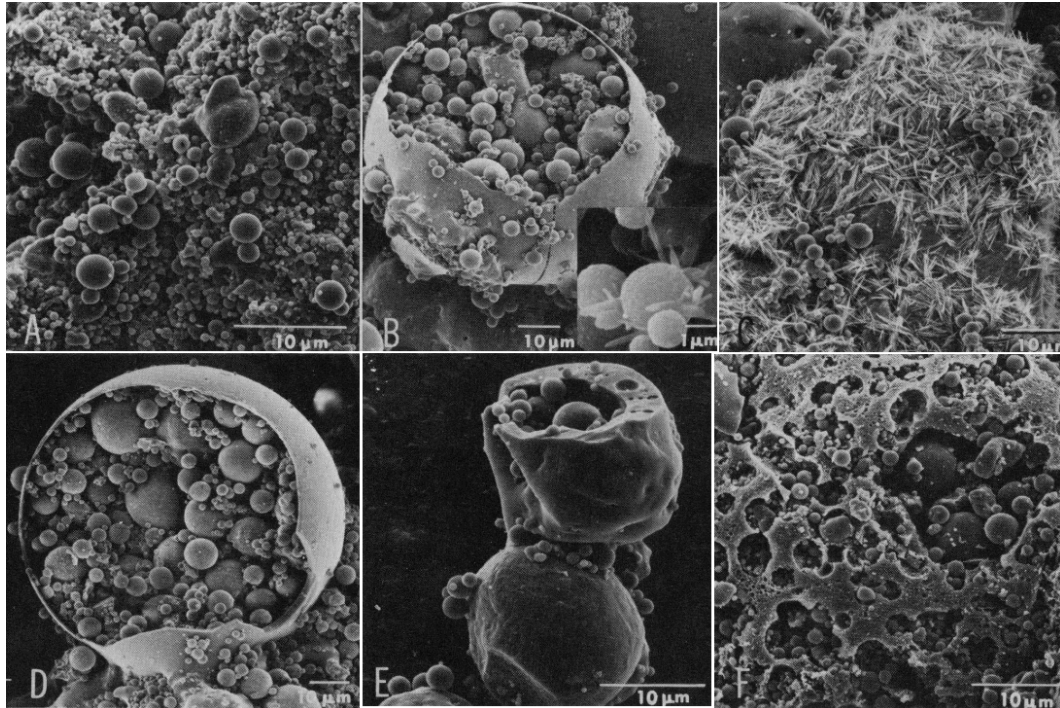
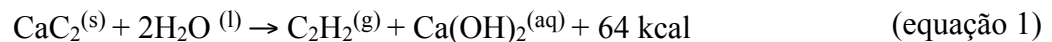


Figura 1 – Microscopia eletrônica de cinzas volantes americanas (FISCHER *et al.*, 1976)

2.3.2 Cal de Carbureto

O acetileno— gás utilizado em diversas áreas da indústria como em solda, corte e revestimento de peças metálicas – é produzido através da reação de carbureto de cálcio com água. O subproduto dessa reação é o hidróxido de cálcio (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE GASES, 2015).

Ramasamy *et al.* (2002) apresentam a reação responsável pela produção de acetileno na equação 1, onde, observa-se que além de hidróxido de cálcio, também obtém-se 64 kcal de calor por mol de carbureto. Para que a reação ocorra e para dissipar o calor gerado, é necessário 1 litro de água para cada quilo de carbureto de cálcio. Também é apontado que há uma catalisação da hidrólise quando duas impurezas, sílica e alumina, apresentam-se em uma concentração maior que 2,5%.



Onde:

CaC_2 = carbureto de cálcio;

H_2O = água;

C_2H_2 = acetileno;

Ca(OH)_2 = hidróxido de cálcio.

Hidróxido de cálcio também é conhecido como cal de carbureto. Para se produzir 100 m³/h de acetileno, em um dia gera-se 10 a 12 toneladas de cal de carbureto. A cal produzida tem uma cor acinzentada e apresenta-se em uma forma pastosa, com 60 a 70% do material em fase líquida (cada 1 m³ de pasta possui 4,5 kg de hidróxido de cálcio). Cerca de 80% dos produtores do gás armazenam a cal em reservatórios externos formando lagoas de sedimentação (RAMASAMY *et al.*, 2002).

Ao avaliar a utilização de cal de carbureto do estado de Iowa nos Estados Unidos na estabilização de solos, Wang e Handy (1966) relatam que, quimicamente, a cal de carbureto se compara com as cales hidratadas calcíticas comerciais. Os autores também ressaltam que as características de redução da plasticidade do solo, aumento da resistência e os mecanismos de estabilização de solos apresentados pela cal de carbureto parecem idênticos aos obtidos por cales calcíticas.

Cardoso *et al.* (2009) compararam, através da análise química, termogravimétrica e difração de raios-x, a cal de carbureto produzida pela empresa White Martins no Estado de São Paulo com a cal hidratada comumente utilizada na construção civil no Brasil. Baseados nos resultados de caracterização, os pesquisadores concluíram que, apesar da cal de carbureto ter uma estrutura mais fechada, resultando em uma menor superfície específica e uma menor retenção de água que a cal hidratada comercial, ela tem o potencial de ser utilizada na construção civil, tanto como o principal aglomerante quanto como adição em misturas de argamassas. Porém, alguns ajustes devem ser feitos na utilização deste subproduto, pois, observou-se a tendência da cal de carbureto de aglomerar muito rapidamente após 90 minutos da sua mistura com água, ao contrário do aumento gradual de resistência apresentado pela cal hidratada. Além do potencial problema estético causado pelo surgimento de corpos cinza-

claros com o endurecimento da cal de carbureto. A análise química realizada pelos pesquisadores encontra-se na Tabela 6.

Thomé (1999) ao pesquisar os efeitos da cal de carbureto em misturas solo-cinza-cal, aponta que, a cal de carbureto da mesma empresa, porém produzida no Rio Grande do Sul, apresenta maior pureza que a cal dolomítica comumente comercializada no Estado.

Tabela 6 – Análise química da cal de carbureto produzida no Estado de São Paulo

Componente	Cal Hidratada (%)	Cal de Carbureto (%)
CaO	70,90	71,20
MgO	0,31	0,06
FeO ₃ + Al ₂ O ₃	0,68	0,68
SO ₃	0,16	0,12
CO ₂	5,29	4,54
Umidade	0,39	0,49
Perda ao fogo	26,90	26,40

(fonte: adaptado de CARDOSO *et al.*, 2009)

2.3.3 Água

Inglês e Metcalf (1972) apontam que, para estabilização de solos é considerado que a utilização de água potável é satisfatória para obterem-se os resultados desejados. Outros autores afirmam que a utilização de água potável em misturas de cinza e cal também é satisfatória para a obtenção dos resultados desejados (ANDRADE, 1999; SALDANHA, 2014).

2.4 ESTABILIZAÇÃO POZOLÂNICA

Reações pozolânicas ocorrem na presença de umidade, onde, a fase amorfa (vítrea) da cinza volante reage com a cal, em temperaturas normais, formando um composto que possui propriedades cimentantes. Esta reação entre a cal e a cinza volante produz silicatos hidratados de cálcio (C-S-H), responsáveis pelo desenvolvimento da resistência de misturas cinza volante-cal (BASUMAJUMDAR *et al.*, 2005; MASSAZZA, 1998).

A adição de água gera o fenômeno conhecido como hidrólise, onde, a molécula de cal hidratada é quebrada em íons de cálcio (ou de magnésio se for cal dolomítica) e hidroxilas conforme a equação 2. Essa reação gera rapidamente um aumento do pH da mistura, chegando a aproximadamente 12,5 à 20°C (QIAN *et al.*, 2001).



Além da presença de íons de cálcio na solução, é necessário garantir a solubilidade da sílica e alumina – fase amorfa da pozolana – para que a formação de C-S-H ocorra (MALLMANN, 1996). Existem alguns fatores que afetam esta solubilidade. São eles:

- a) temperatura: ao realizar um estudo sobre a solubilidade da sílica em água, Iler (1955³ apud MALLMANN, 1996) concluiu que a sílica é somente solúvel na sua forma amorfa em temperaturas ambientes. Também observou-se que, há uma relação linear entre a solubilidade da sílica amorfa e a temperatura do sistema. Esta relação pode ser observada na Figura 2;

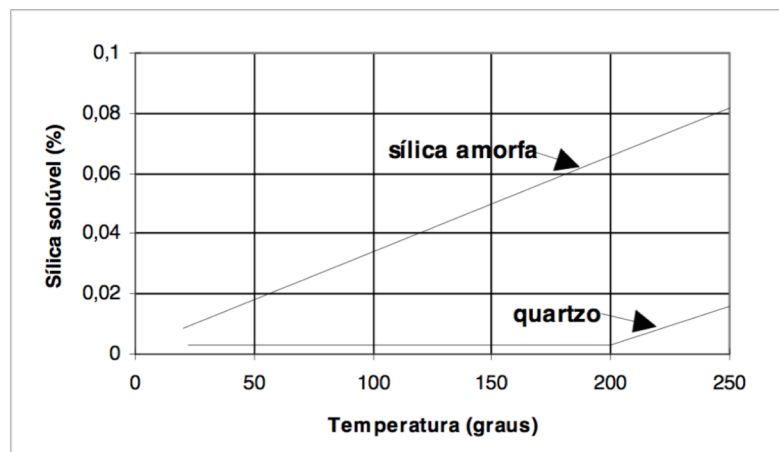


Figura 2 – Efeito da temperatura na solubilidade da sílica (ILER, 1955 apud MALLMANN, 1996)

- b) pH da mistura: ao estudar o impacto do pH da mistura de sílica amorfa na sua solubilidade Alexander *et al.* (1954), concluíram que o pH tem pouco impacto na solubilidade da sílica até atingir o valor de 9. Após este valor, os autores

³ILER, R. K. **The Colloid Chemistry of silica and silicates**. Cornell University Press, 1954.

desenvolveram uma equação teórica para calcular a solubilidade de sílica amorfa para valores de pH maiores de 11, como pode ser visto na Figura 3. Greenberg (1956) afirma que o pH claramente tem um efeito na hidrólise das ligações da sílica com os íons de cálcio. Apresentando também, evidências de que os íon de hidrogênio do grupo SiOH podem ser substituídos por íons de cálcio em soluções com pH maiores de 5 e menores de 13;

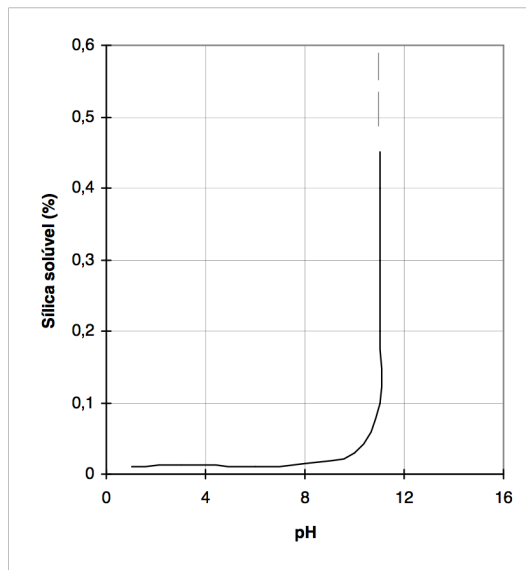


Figura 3 – Solubilidade de sílica amorfa na água com a variação do pH (ALEXANDER *et al.*, 1954 apud MALLMANN, 1996)

- c) superfície específica: Greenberg (1956) observou que na interação da sílica com o cálcio há um aumento linear da quantidade de cálcio adsorvido com o aumento da superfície específica da sílica. Tal relação pode ser observada na Figura 4.

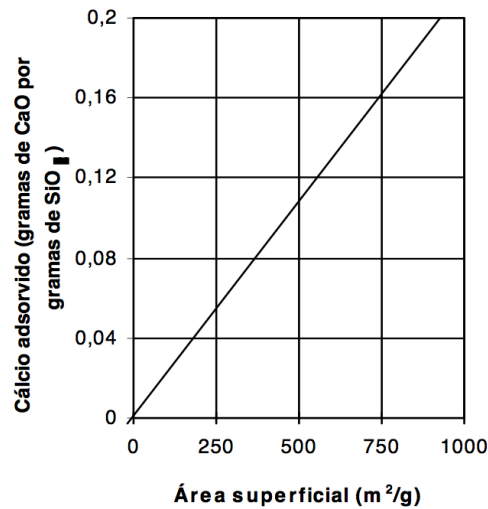


Figura 4 – Efeito da variação da área superficial da sílica na adsorção do hidróxido de cálcio (GREENBERG, 1956 apud MALLMANN, 1996)

Com a quebra da molécula de hidróxido de cálcio, há a adsorção de íons de Ca^{++} da solução pela superfície das partículas de cinza volante negativamente carregadas. Imediatamente após, as hidroxilas (OH^-) da solução atacam os óxidos de alumínio (Al_2O_3) e silício (SiO_2) na fase vítrea da cinza volante, resultando na quebra das ligações Al-O e Si-O. Este fenômeno gera uma elevada concentração de íons SiO_3^{-2} e AlO_2^- (MALEK *et al.*, 2005). Estas reações podem ser observadas, para pH maior que 12, nas equações 3 e 4 (BROUWERS e VAN EIJK, 2003).



A quebra destas ligações leva os íons de sílica ou alumina a ligarem-se aos íons de cálcio, formando, primeiramente, géis de silicato hidratado de cálcio. Primeiramente, estes géis ainda são fracos, mas lentamente, cristalizam-se em C-S-H bem definidos. Os íons de alumínio promovem a formação de aluminato hidratado de cálcio (C-A-H), que, com o tempo se converterá em hidrogranada (C_3AH_6) e kaolinita (C_3ASH_4) – sendo: C = CaO; S = SiO_2 ; A = Al_2O_3 e H = H_2O (MALEK *et al.*, 2005).

Ao pesquisar a viabilidade de estabilizar-se solos do Estado de Iowa no Estados Unidos com cal e cinza volante, Mateos (1961), ressalta que, embora o principal material cimentante formado por pozolanas seja o silicato hidratado de cálcio, materiais pozolânicos possuem outros materiais, como compostos envolvendo ferro, alumina e outros álcalis, que também são capazes de formar produtos cimentantes.

Wang e Handy (1966) avaliaram a quantidade de C-S-H e C-A-H produzidos nas reações de misturas de solo com cal de carbureto com 28 dias de cura em temperatura ambiente, concluindo que, primeiramente, o C-S-H é o principal responsável pelo ganho de resistência da mistura de solo com cal de carbureto. Este comportamento pode ser observado na Figura 5.

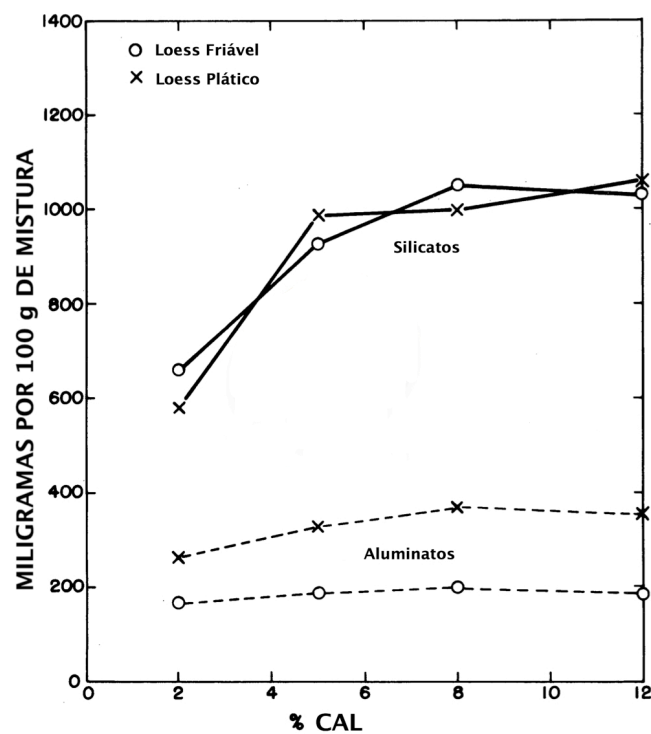
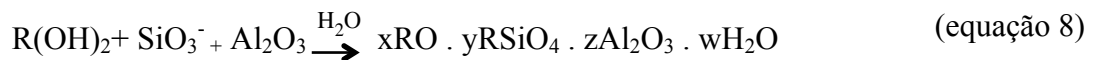
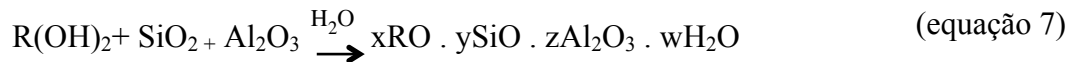
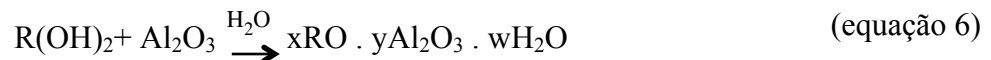
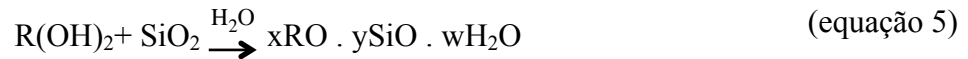


Figura 5 – Produção de silicatos e aluminatos na reação entre solo e cal de carbureto aos 28 dias de cura (adaptado de WANG; HANDY, 1966)

Minnick (1967), ao estudar as reações entre diversas cales hidratadas e cinzas volantes, apresentou algumas possíveis reações entre estes materiais. Tais reações podem ser observadas nas equações 5, 6, 7 e 8. Onde, R representa, alternativamente, os íons Ca^{+2} ou Mg^{+2} , ou, ainda, uma possível combinação entre eles. O autor sugere ainda que os principais

compostos provenientes da reações destes materiais seriam: tobermorita (silicato hidratado de cálcio) e etringita (sulfato hidratado de cálcio e alumínio).



Minnick (1967) concluiu que a granulometria dos materiais tem um grande efeito no ganho de resistência da mistura. Quanto mais finos os materiais reagentes – hidróxido de cálcio, óxido de magnésio, sílica amorfa, entre outros – apresentarem, mais reações ocorrem, resultando em uma melhor cimentação. Tendo isto em mente e, visto que o peso molecular do óxido de magnésio é inferior ao hidróxido de cálcio, mais reações devem ocorrer com o primeiro material. Assim sendo, pode-se classificar os tipos de cal quimicamente em uma ordem decrescente. Esta classificação é apresentada a seguir do mais reativo ao menos reativo:

- a) cal dolomítica monohidratada: $Ca(OH)_2 \cdot MgO$;
- b) cal calcítica: $Ca(OH)_2$;
- c) cal dolomítica dihidratada: $Ca(OH)_2 \cdot Mg(OH)_2$.

Um problema enfrentado pela utilização de cal de carbureto é a possibilidade de carbonatação do material, já que este fica armazenado ao ar livre por algum tempo. No processo de carbonatação, dióxido de carbono (CO_2) reage com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$),

formando carbonato de cálcio (CaCO_3). O carbonato de cálcio é um cimento fraco, o que implica no consumo de hidróxido de cálcio em uma reação pouco eficiente. Tornando esta reação indesejável (HARTY e THOMPSON, 1973).

2.5 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE MISTURAS CINZA VOLANTE – CAL

Foram analisadas as características comportamentais listadas a seguir:

- a) cal;
- b) moagem;
- c) porosidade;
- d) relação porosidade/teor volumétrico de cal;
- e) tempo de cura;
- f) temperatura de cura.

A seguir apresentam-se estudos que ilustram o comportamento dos pontos citados.

2.5.1 Efeito da cal

As misturas de cinza volante com cal apresentam um ganho de resistência devido a reações pozolânicas que formam silicatos e aluminatos hidratados de cálcio. Estas reações pozolânicas dependem tanto da quantidade de sílica e alumina em fase amorfa da cinza volante, quanto da quantidade de hidróxido de cálcio presente na cal. Andrade (1991) afirma em seu trabalho que, como a cinza volante entra em uma proporção muito maior nestas misturas, qualquer adição de cal provocará um aumento das reações, levando a um aumento na resistência da mistura.

Dalla Rosa (2009), chegou a uma conclusão similar ao avaliar o ganho de resistência de mistura de solo com cinza volante de cal dolomítica. A autora concluiu que a resistência à compressão simples aumenta com o aumento na proporção de cinza volante (12,5 e 25%) adicionada e, que para uma mesma proporção de cinza, o aumento da proporção de cal (3, 5, 7 e 9%) apresenta ganhos de resistência lineares da mistura. Reafirmando assim, a noção de que

o aumento do teor de cal acarreta um aumento na resistência em misturas que a reação pozolânica é a principal fonte de estabilização da estrutura.

Contudo, este ganho de resistência pela adição de cal atinge um limite máximo, pois, as reações pozolânicas dependem do balanço entre a disponibilidade de silicatos e aluminatos e de hidróxido de cálcio. Uma vez que todos os materiais pozolânicos reagirem com a cal, o aumento do teor de cal leva, não ao ganho, mas à redução da resistência da mistura, já que, uma parcela da cal adicionada não terá material pozolânico disponível para reagir. Esta tendência foi observada pelos pesquisadores Horpibulsuk *et al.* (2012) ao avaliarem a estabilização de um solo argiloso com cinza volante e cal de carbureto. Primeiramente, foi avaliado o ganho de resistência à compressão simples de misturas de solo com cal, onde os autores notaram que o aumento do teor de cal apresenta um pico de resistência, seguido de uma queda da mesma. Esta tendência pode ser observada na Figura 6. Baseados nestes resultados os autores definiram três zonas comportamentais da mistura, sendo elas: zona ativa, zona inerte e zona de deterioração. Então, visando aumentar a disponibilidade de material pozolânico para reagir com a cal, foi adicionado cinza volante à mistura, o que proporcionou o aumento da resistência da mistura.

Consoli *et al.* (2001), estudando a adição de cal de carbureto e cinza volante em uma areia siltosa concluíram que, embora a adição de cal melhore significativamente a resistência e rigidez do solo, a presença de cinza volante é fundamental para melhorar ainda mais o comportamento do material. Essencialmente, tal fato deve-se à ocorrência de um maior número de reações pozolânicas dependentes do tempo.

Ao avaliar o teor máximo de cal de carbureto em misturas de cal e cinza volante provenientes do Rio Grande do Sul, Saldanha (2014) constatou – utilizando misturas com massa específica aparente seca de $1,2 \text{ g/cm}^3$, umidade de 18%, curadas em temperatura de 80°C em câmara de vapor por três dias e, teor de cal variando entre 5%, 10%, 15% e 20% em relação à massa de cinza seco – que o máximo teor de cal de carbureto para esta mistura de cinza volante-cal é de 15%.

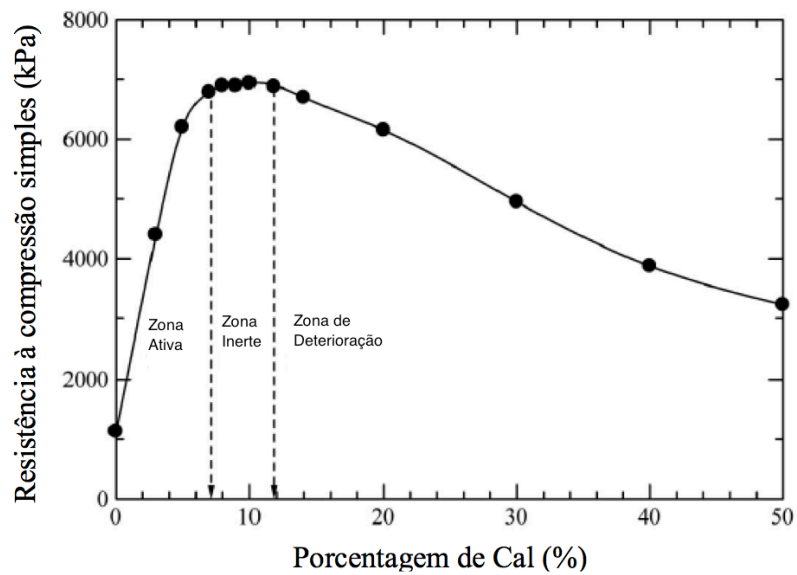


Figura 6 – Relação entre adição de cal de carbureto em solo argiloso e resistência à compressão simples aos 28 dias de cura (adaptado de HORPIBULSUK *et al.*, 2012)

Para que as reações pozolânicas aconteçam é necessário que o pH da solução seja básico. Para garantir esta condição, Rogers e Roff (1997) propuseram um método, conhecido como ICL (*Initial Consumption of Lime*). Este método consiste em medir o pH de misturas, aumentando o seu teor de cal. O teor mínimo de cal para que as reações pozolânicas ocorram é definido como o teor a partir do qual o pH da mistura estabilize. Este método tem sido utilizado por diversos pesquisadores (THOMÉ, 1999; DALLA ROSA, 2009; SALDANHA, 2014). Saldanha (2014) determinou o teor mínimo de cal de carbureto para mistura de cinza volante e cal como sendo 4%, porém, o autor utilizou 5% como o valor mínimo para garantir um ambiente favorável para ocorrência de reações.

2.5.2 Efeito da moagem

Ravina (1980), estudando o efeito da pequena granulometria de cinzas volantes na sua atividade pozolânica, observou uma relação linear entre a superfície específica da cinza volante (de uma fonte de carvão de uma única termelétrica) e a sua atividade pozolânica (Figura 7 b). Enquanto, a reação entre a porcentagem retida pela peneira 45 μm é somente linear na parte intermediária e, não-linear quando a quantidade retida era muito alta ou baixa (Figura 7 a).

Menores partículas de cinza correspondem a uma maior superfície específica, o que conduz a um maior número de pontos de contato entre os elementos reativos da mistura, gerando uma maior resistência. Contudo, o controle da finura do material pela superfície só deve ser utilizado em materiais oriundos da mesma fonte, já que, materiais de outras procedências apresentam diferentes propriedades (massa específica, distribuição e morfologia das partículas e teor de carbono) que afetam o desenvolvimento das reações pozolânicas. Portanto, além da superfície específica deve-se também utilizar granulometria e porcentagem de material passante para correlacionar-se a atividade pozolânica do material (ANDRADE, 1991).

A disponibilidade de moinhos de alta energia, econômicos, altamente produtivos e eficientes, tem sido um importante fator na consideração de aplicação da ativação mecânica de materiais em larga escala pela indústria metalúrgica e da construção. A indução de reatividade através de moagem mecânica de cinzas de fundo e volantes tem sido utilizada com sucesso no desenvolvimento de misturas de cimento e materiais geopolímeros de alta resistência (KUMAR *et al.*, 2010).

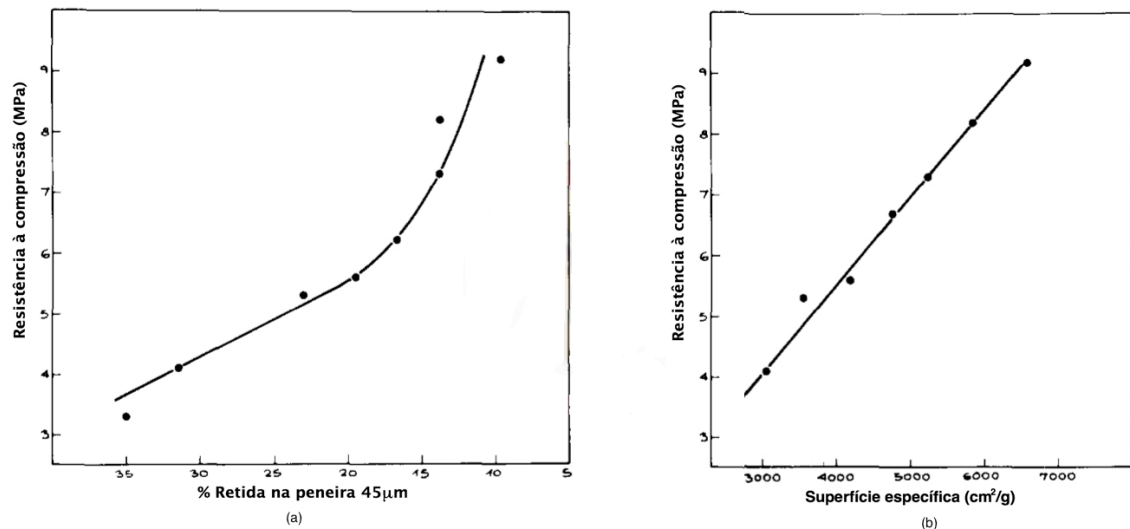


Figura 7 – Relação entre ao índice de atividade pozolânica com cal e
 (a) porcentagem retida na peneira 45 m
 (b) superfície específica (adaptado de RAVINA, 1980)

A caracterização da fase amorfa dos materiais ativados pozolânicamente, tanto através de moagem por atrito quanto por vibração, é de extrema importância. Uma sutil diferença na natureza da fase amorfa, em materiais com distribuição granulométrica similares, submetidos

à ativação mecânica, pode acarretar grandes diferenças de resistência em cimentos e geopolímeros (KUMAR *et al.*, 2010).

O processo de geopolimerização consiste na transformação de minerais aluminossilicatos em outros minerais, sob a influência de um ambiente altamente alcalino, formando ligações poliméricas Si-O-Al-O. Conforme apresentado na equação 9 (DAVIDOVITS, 1991; KUMAR *et al.*, 2007; IZQUIERDO *et al.*, 2009). Ou seja, a reação entre cinza volante e cal é considerada uma geopolimerização.



Onde:

M = cátion como K^+ , Na^+ ou Ca^{++} ;

n = grau de policondensação;

z = 1, 2 ou 3.

Ao moer cinza volante em um moinho de laboratório por 20 minutos, reduzindo o diâmetro médio das partículas de 30 μm para menos de 10 μm , Payá *et al.* (1995), observou que as partículas de cinza moídas apresentaram um maior peso específico, provavelmente, devido à quebra das plerosferas presentes na cinza original. O aumento da superfície específica deve modificar a taxa de reação com a cal, podendo produzir um melhoramento no desenvolvimento de resistência, tanto a curto, quanto a longo prazo. Também, concluiu-se que, as amostras moídas apresentaram uma maior reatividade com água e uma maior capacidade de neutralização ácida.

Bouzoubaâ *et al.* (1997) ao estudar o efeito físico da moagem de três diferentes cinzas volantes americanas avaliou diversos aspectos do processo de moagem com moinho de bolas, como: relação entre a superfície específica e o tempo de moagem para diferentes tamanhos e pesos das bolas do moinho; o efeito do tempo de moagem para os parâmetros de gravidade específica, superfície específica, tamanho da partícula média e quantidade de água necessária; morfologia da cinza volante moída.

Na relação entre a superfície específica e o tempo de moagem para diferentes tamanhos e o pesos das bolas do moinho, utilizando um moinho de 420 mm de largura e 500 mm de diâmetro, não ultrapassando 45% do volume total preenchido pelas bola e cinza e, 10 kg de solo por moagem, os autores concluíram que a maior superfície específica foi obtida para 40 kg de bolas grandes. Esta relação pode ser observada na Figura 8 (BOUZOUBAÂ *et al.*, 1997).

Quanto ao efeito dos tempos de moagem estudados (0h, 2h, 4h, 6h, 8h e 10h) para os parâmetros de gravidade específica, superfície específica, tamanho da partícula média e quantidade de água necessária. Os pesquisadores concluíram que, embora a quantidade de finos e a gravidade específica diminua com o tempo de moagem, o aumento é insignificante após duas horas. Tal conclusão é corroborada pela análise da distribuição granulométrica em função do tempo de moagem apresentada na Figura 9 (BOUZOUBAÂ *et al.*, 1997).

A morfologia da cinza volante mudou devido aos tempos de moagem estudados (0h, 2h, 4h e 10h). A maioria das plerosferas e partículas grandes e irregulares foram quebradas depois de duas horas, porém, o número de partículas esféricas reduziu com o aumento da moagem. O índice de ganho de resistência aumentou com a moagem. Contudo, aparentemente, após quatro horas de moagem a água necessária para que as reações ocorram aumentou, levando, ao não aumento do índice ou até mesmo na diminuição do mesmo (Figura 10) (BOUZOUBAÂ *et al.*, 1997).

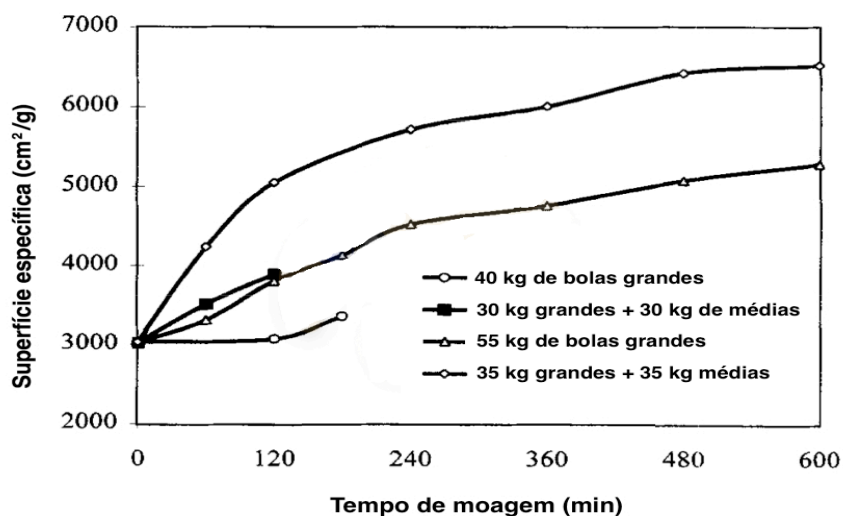


Figura 8 – Efeito do peso e tamanho das bolas de moagem no aumento da superfície específica com o tempo de moagem da cinza volante (adaptado de BOUZOUBAÂ *et al.*, 1997)

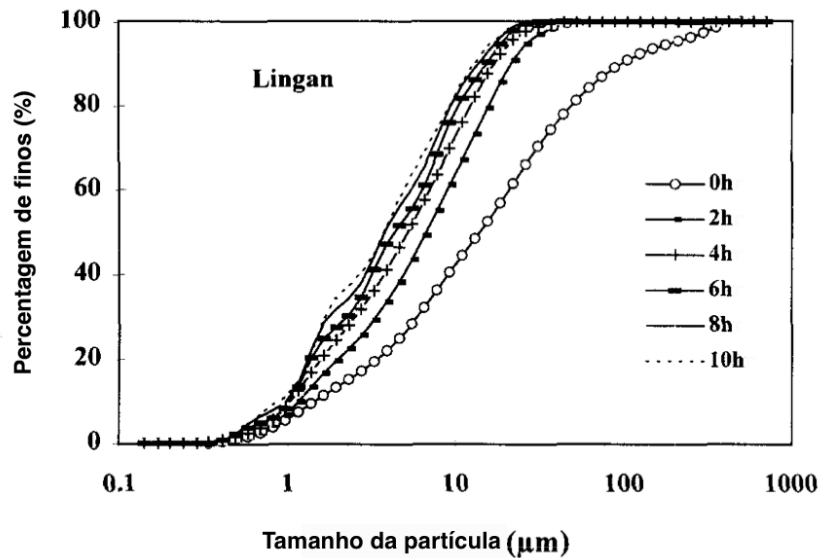


Figura 9 – Efeito da moagem na distribuição granulométrica da cinza volante de Lingan (adaptado de BOUZOUBAÂ *et al.*, 1997)

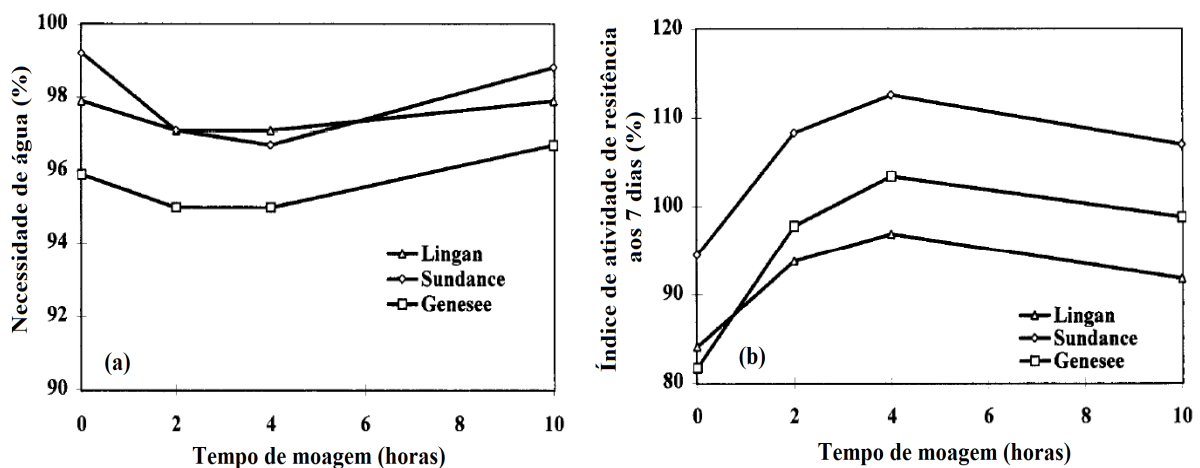


Figura 10 – Efeito da moagem na (a) necessidade de água e (b) índice de atividade de resistência aos 7 dias de cura (adaptado de BOUZOUBAÂ *et al.*, 1997)

Payá *et al.* (2000) estudaram o efeito da adição de diferentes porcentagens de cinza volante não moída e moída por 1h em misturas de argamassa de cimento, curadas em diferentes temperaturas de cura (20, 40, 60 e 80°C) para diferentes tempos de cura (3, 7, 14 e 28 dias). Na Figura 11, os autores apresentam a influência da resistência à compressão simples (q_u) em função do logaritmo do tempo de cura para as diferentes temperatura de cura, para amostras com 30% de cinza volante (CV) tanto para CV não moída quanto pra a CV por 1h para. Através desta figura, os autores concluíram que pode ser observado um importante aumento

de resistência com o aumento do tempo de cura para as temperaturas de 20°C e 40°C, enquanto o aumento de resistência foi menos importante pra as temperaturas de cura de 60°C e 80°C.

Assim, observou-se que que q_u aumentou com o aumento da temperatura de cura para 3 dias de cura, já para os demais tempos de cura, a temperatura de 40°C apresentou maiores resistências do que para as demais. Os autores também notaram que a moagem da cinza proporcionou um aumento de q_u . E, que para os dados de 40°C e 60°C, as linhas de tendência se interceptaram um pouco antes para a cinza moída. Isto sugere que o aumento da temperatura de cura promove um aumento da atividade pozolânica das cinzas volantes, porém, somente até um certo ponto. Ou autores sugerem que isto ocorre porque, para maiores temperaturas, um maior valor de q_u é obtido para tempos de cura muito pequenos, e, por isto, o aumento de resistência é limitado, principalmente para as cinzas volante mais reativas (PAYÁ *et al.*, 2000).

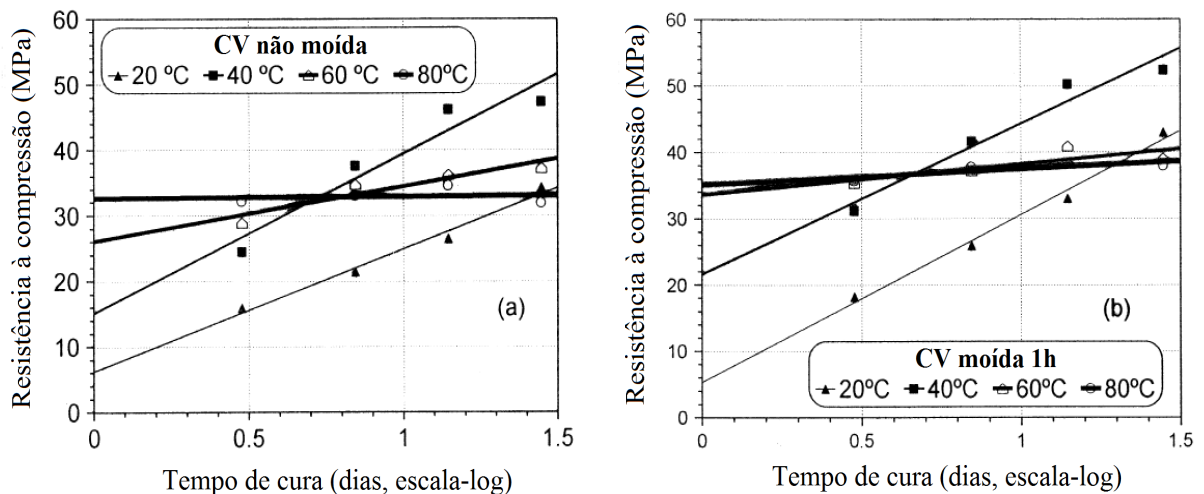


Figura 11 – Influência do tempo de cura em q_u para diferentes temperaturas de cura para (a) cinza volante não moída e (b) cinza volante moída 1h (adaptado de PAYÁ *et al.*, 2000)

Payá *et al.* (2000), através do uso da análise de regressão, apresentaram a dependência da resistência à compressão simples com a temperatura de cura, para as diversas porcentagens de adição de cinza volante com 3 dias de cura, para a cinza volante não moída (Figura 12 (a)) e a cinza volante moída 1h (Figura 12 (b)). Os pesquisadores concluíram que os valores de q_u são dependentes do tempo de moagem da cinza volante e dos teores de cinza adicionados à mistura. Assim, os valores máximos de q_u para as argamassas com CV moída 1h foram

maiores e, foram atingidos para valores levemente menores de temperatura do que os com CV não moída. Contudo o valor de q_u diminuiu com o aumento da adição de cinza volante. Mesmo assim, em todos os casos 95% dos valores máximos de q_u foram obtidos para temperaturas entre 50°C e 60°C, sugerindo que o gasto de energia em temperaturas de curas extremas (60°C a 80°C) não proporcionam um aumento de resistência importante.

2.5.3 Efeito da porosidade

Segundo TRB (1987), em misturas de solo com cal, a adição do agente cimentante, que possui um peso específico aparente seco (γ_d) menor que o γ_d do solo, leva à diminuição do γ_d da mistura. Esta diminuição do peso específico aparente seco e, portanto, diminuição da densidade da mistura, leva ao aumento da umidade ótima para a mesma energia de compactação. O mesmo efeito pode ser observado em misturas de cinza volante com cal.

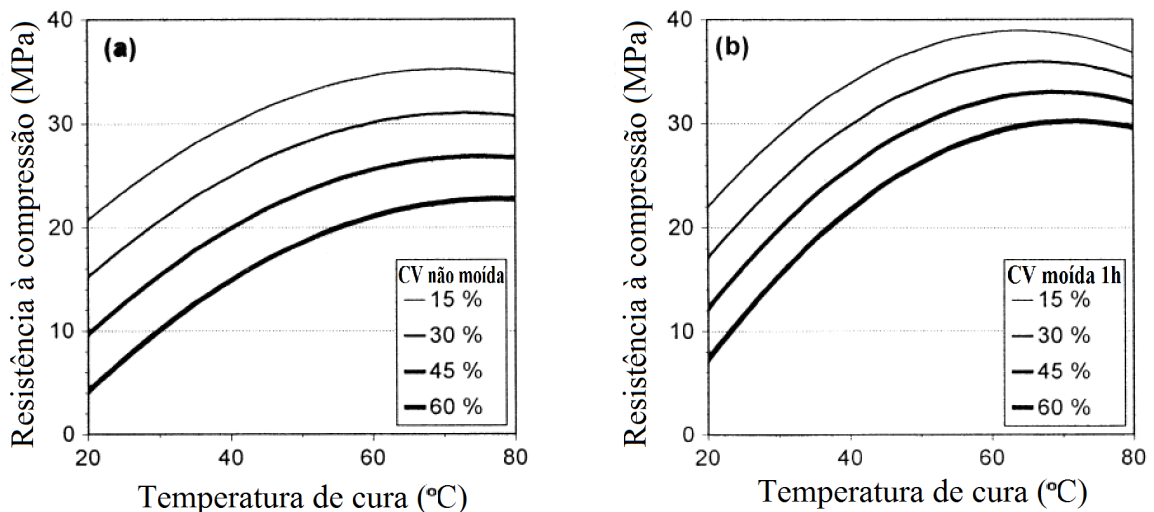


Figura 12 – Influência da temperatura de cura em q_u para diferentes teores de adição de cinza volante para 3 dias de cura para (a) cinza volante não moída e (b) cinza volante moída 1h (adaptado de PAYÁ *et al.*, 2000)

A densidade de compactação da mistura solo-cal é tão importante quanto a quantidade de cal utilizada. Isto deve-se ao fato da resistência aumentar e a permeabilidade da mistura diminuir, com o aumento da densidade até um ponto de umidade ótima, a partir do qual, os valores retrocedem (INGLES e METCALF, 1972). Para as misturas solo-cinza volante-cal estudadas, Consoli *et al.* (2001), salientam que a compactação deve ser realizada cerca de 2% no ramo seco do teor de umidade ótimo obtido no ensaio de Proctor com energia normal.

Ao avaliar a influência da porosidade (η) em misturas de solo de arenito Botucatu, com diferentes teores de cal (3, 5, 7 e 9%) e 12,5% de cinza volante, Dalla Rosa (2009) verificou que, independentemente do teor de cal e do tempo de cura, a redução da porosidade do material promoveu ganhos de resistência. Também foi observado que, resistência à compressão simples teve um aumento exponencial com a redução da porosidade da mistura compactada. Estes resultados podem ser observados na Figura 13.

Mallmann (1996), analisando os resultados de resistência à compressão simples de misturas solo-cinza-cal dolomítica, observou que a resistência aumentou com o acréscimo de energia de moldagem. Isto aponta que, provavelmente, tal aumento deve-se ao maior número de reações pozolânicas desenvolvidas pela aproximação das partículas com o aumento da energia. Os acréscimos de resistência observados foram de 20 a 40% para os elementos curados na autoclave e de 5 a 25% para os curados com temperatura constante, estes valores relacionam-se a menor e maior energia empregada.

Estudando a viabilidade a utilização de blocos de solo-cinza volante-cal como material de construção, Rushad *et al.* (2011) observaram que, para misturas somente de cinza volante e cal com diferentes proporções dos materiais – 20, 30 e 40% de cal – houve um aumento expressivo da resistência da mistura com o aumento da energia de compactação. Em misturas com 40% de material cimentante, a resistência aumentou de 1 MPa para 4 MPa com uma variação da energia de 10 kPa para 50 kPa.

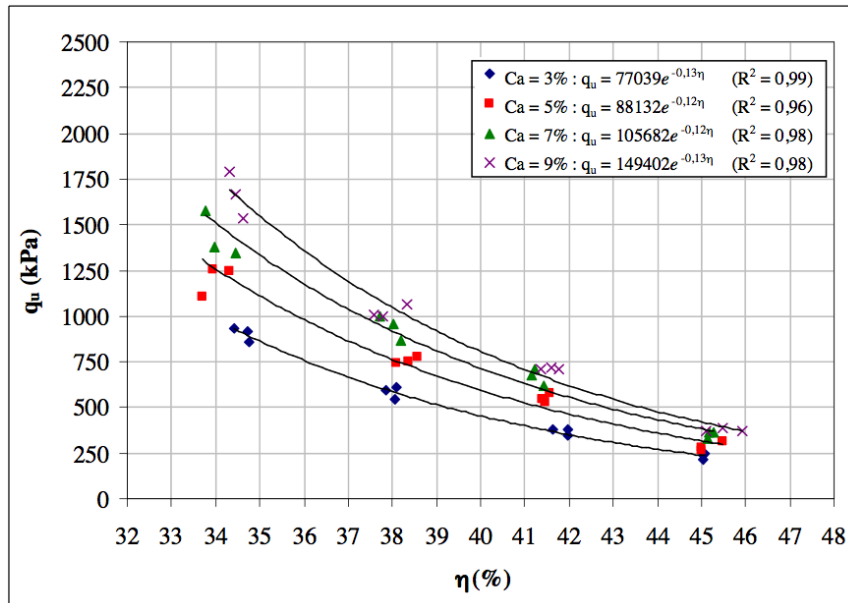


Figura 13 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura (DALLA ROSA, 2009)

2.5.4 Efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal

O conceito de uma correlação entre volume de vazios de um material e o teor volumétrico de agente cimentante adicionado a ele, surge pela necessidade de, como a correlação água/cimento que existe para misturas de concreto, obter-se um método de dosagem para misturas de solo-agente cimentante aplicáveis em campo, onde não é possível garantir o preenchimento de todos os vazios por água. Larnach⁴(1960 apud FOPPA, 2005) apresenta como alternativa, a utilização da expressão apresentada na equação 10, após estudar o comportamento de uma areia argilosa misturada com cimento quanto a resistência à compressão simples (q_u) e à flexão em vigotas. Como pode ser observado na Figura 14, a expressão apresenta um bom ajuste para as amostras de solo-cimento curadas por 7 dias e rompidas à compressão simples.

⁴LARNACH, W. J. Relationship between dry density, voids/cement ratio and strength of soil-cement mixtures. *Civil Engineering and Public Works Reviews*, London, v. 55, n. 648, p. 903-905, 1960.

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

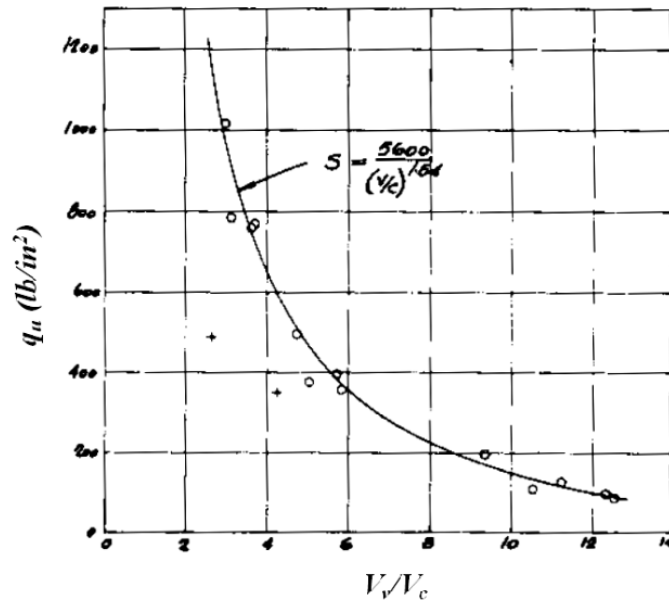


Figura 14 – Volume de vazios/cimento *versus* resistência à compressão simples (LARNACH, 1960 apud FOPPA, 2005)

Foppa (2005), estudando os parâmetros que influenciam na resistência de um solo residual de arenito Botucatu artificialmente cimentados com cimento Portland concluiu que, ainda que a relação vazios/cimento seja uma correlação razoável, ela pressupõe que para uma variação no volume de vazios, uma variação proporcional do volume de cimento já é suficiente para observar essa relação. A fim de melhor compatibilizar as taxas de variação das parcelas, o autor notou que uma potência de valor 0,28 sobre o V_{ci} resulta em um melhor ajuste da relação vazios/cimento (Figura 15). O pesquisador acredita que o expoente 0,28 é função dos materiais utilizados no ensaio.

Foppa (2005) afirma:

[...] a resistência à compressão simples do material em estudo pode ser avaliada, com um excelente grau de precisão, através da relação vazios/cimento ajustada pelo expoente 0,28. Entretanto, uma forma mais elegante de expressar a relação vazios/cimento pode ser feita utilizando, ao invés do volume de vazios, a porosidade do material (n) expressa em porcentagem e, ao invés do volume de cimento, o teor volumétrico de cimento expresso em porcentagem do volume total (C_{iv}). [...] o novo ajuste utilizando essa relação $[n/(C_{iv})^{0,28}]$. Percebe-se que não ocorre alteração na

qualidade do ajuste dos dados, uma vez que as novas variáveis são proporcionais às utilizadas anteriormente.

Esta forma de apresentação da relação porosidade/teor volumétrico de cimento citada acima pode ser observada na Figura 16.

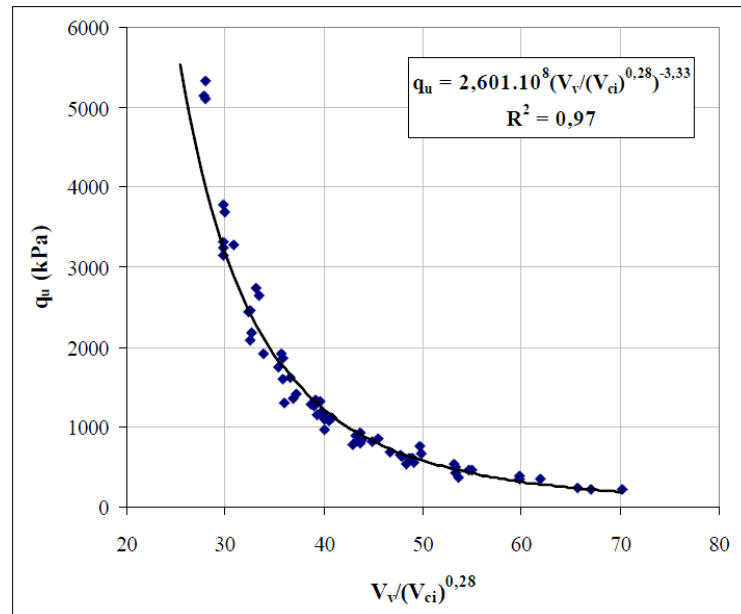


Figura 15 – Volume de vazios/cimento *versus* resistência à compressão simples ajustada (FOPPA, 2005)

Quando utiliza-se cal como material cimentante estudos apontam que a relação se mantém, tanto para misturas com solo quanto para misturas somente compostas por material pozolânico e cal (LOPEZ JUNIOR, 2007, DALLA ROSA, 2009; SALDANHA 2014; SILVANI, 2013).

Estudando a relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/C_{av} ou η/L_v) em um solo arenoso com resíduo de britagem com 3, 5, 7, 9 e 11% de cimento, ou de cal, em relação ao peso de solo seco, Lopes Junior (2007) realizou uma série de ensaios de resistência à compressão simples, variando os teores de umidade, peso específico aparente seco, resíduo e agente cimentante. Os resultados obtidos pelo autor podem ser observados na Figura 17. A primeira figura apresenta os dados referentes às amostras tratadas com cal com 28 dias de cura. A segunda, os resultados dos ensaios para as amostras tratadas com cimento curadas por 7 dias. Verifica-se um bom ajuste dos dados em relação à η/C_{av} quando o teor volumétrico de cal é

ajustado por um fator 0,06 e, à η/C_{iv} quando o teor volumétrico de cal é ajustado por um fator 0,35.

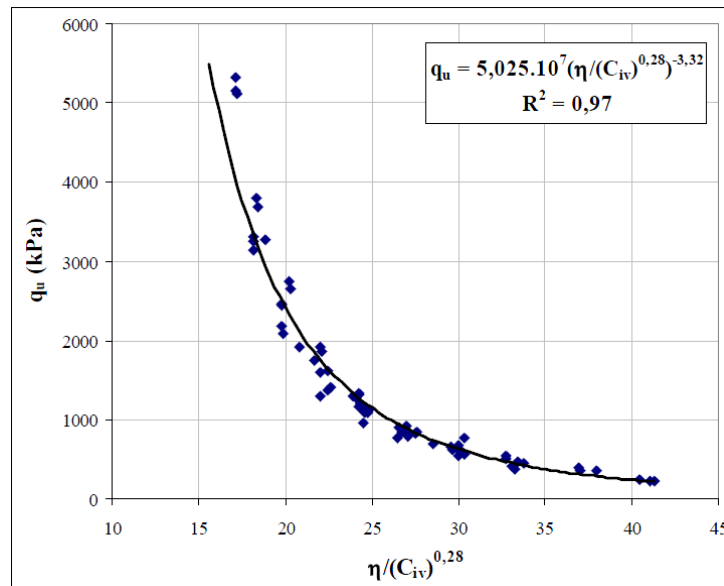


Figura 16 – Volume de vazios/cimento expresso em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento *versus* resistência à compressão simples ajustada (FOPPA, 2005)

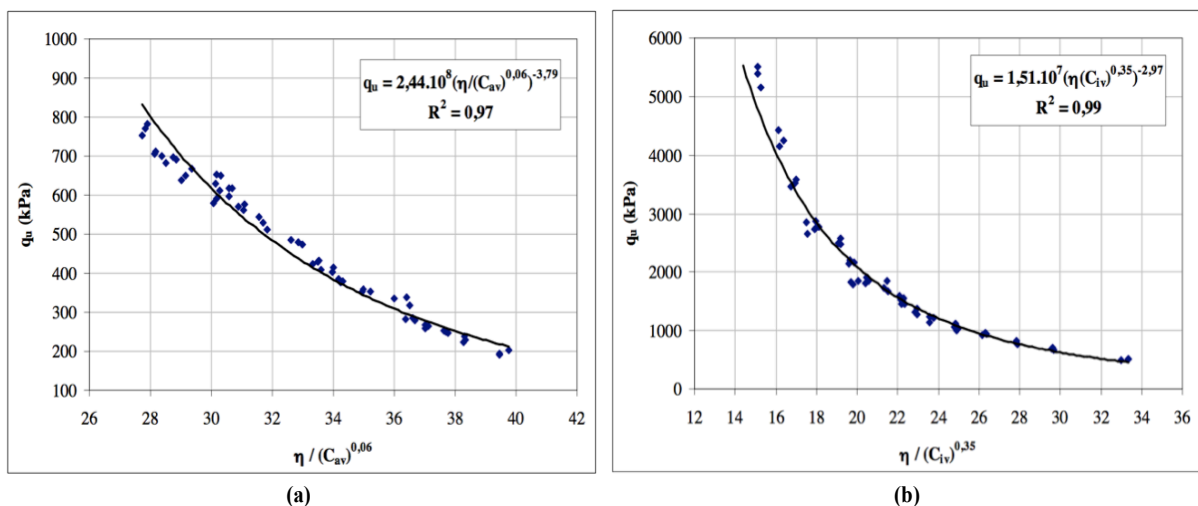


Figura 17 – Relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e (a) teor volumétrico da cal para amostras com 28 dias de cura e (b) teor volumétrico da cimento para amostras com 7 dias de cura (LOPES JUNIOR, 2007)

Dalla Rosa (2009) pesquisou na sua dissertação de mestrado a possibilidade de estabilização de um solo residual arenito Botucatu com adição de 0, 12,5 e 25% de cinza volante, 3, 5, 7 e 9% de cal para 28, 60, 90 dias de tempos de cura. No desenvolvimento do trabalho obteve-se

uma relação vazios/cal expressa em termos da porosidade da mistura compactada e do teor de agente cal volumétrico, ajustado por um expoente igual a 0,12 para todas as amostras estudadas, excluído as amostras sem cinza volante para 28 e 60 dias de cura, que não resistiram à imersão. Os resultados obtidos para 28 dias de cura com 25% de cinza volante estão apresentados na Figura 18.

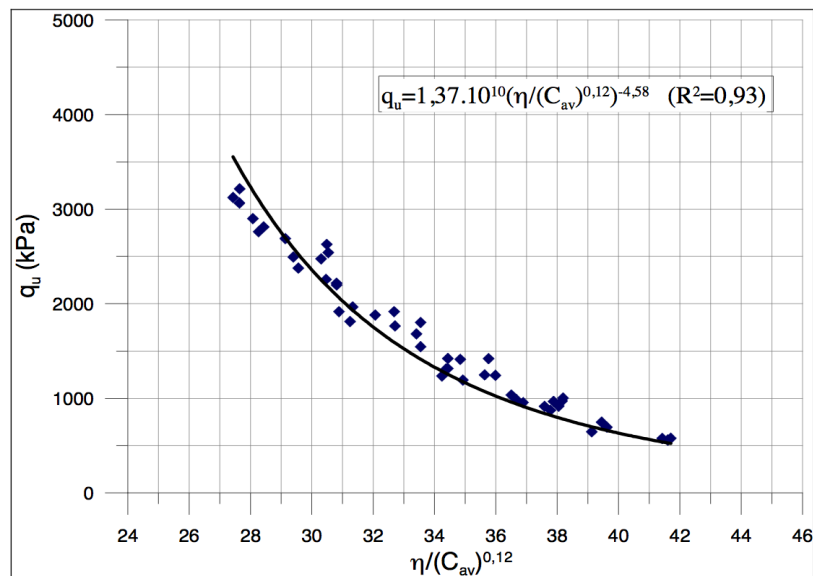


Figura 18 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura (DALLA ROSA, 2009)

Silvani (2013), avaliou a influência do coeficiente $\eta/(L_V)$ na variação de resistência à compressão simples e à tração na compressão diametral de misturas de solo arenoso com 25% de cinza volante e 3, 5 e 7% de cal para diferentes temperaturas (20, 27, 35 e 50°C). A relação $\eta/(L_V)$, ajustada por um coeficiente $[\eta/(L_V)^{0,3}]$, mostrou-se adequada na previsão da resistência à tração e à compressão para todas as temperaturas estudadas (Figura 19). Também foi obtida por Silvani (2013) uma correlação entre porosidade, teor volumétrico de cal, temperatura e resistência à compressão da mistura cimentada, apresentada na Figura 20.

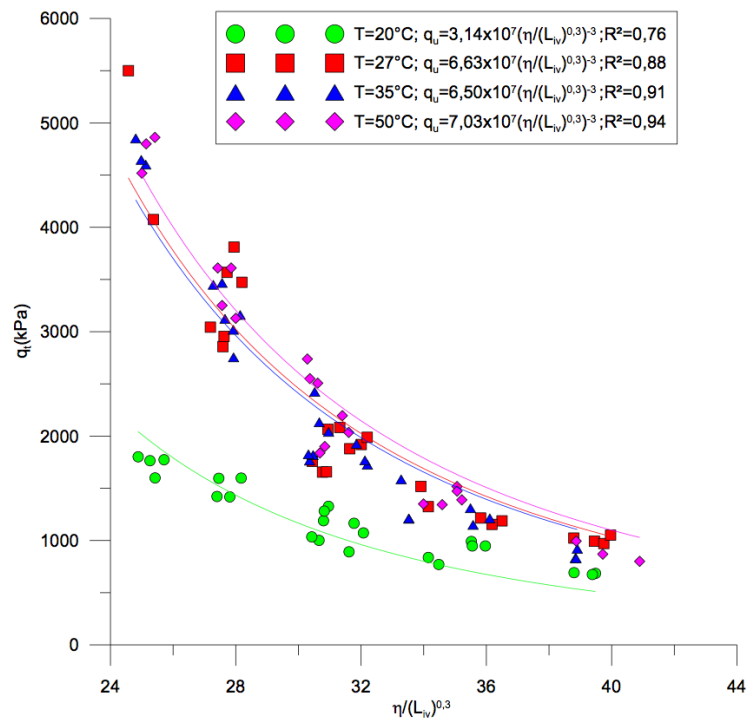


Figura 19 – Mudança na resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_v)^{0,3}$ para todas a temperaturas (SILVANI, 2013)

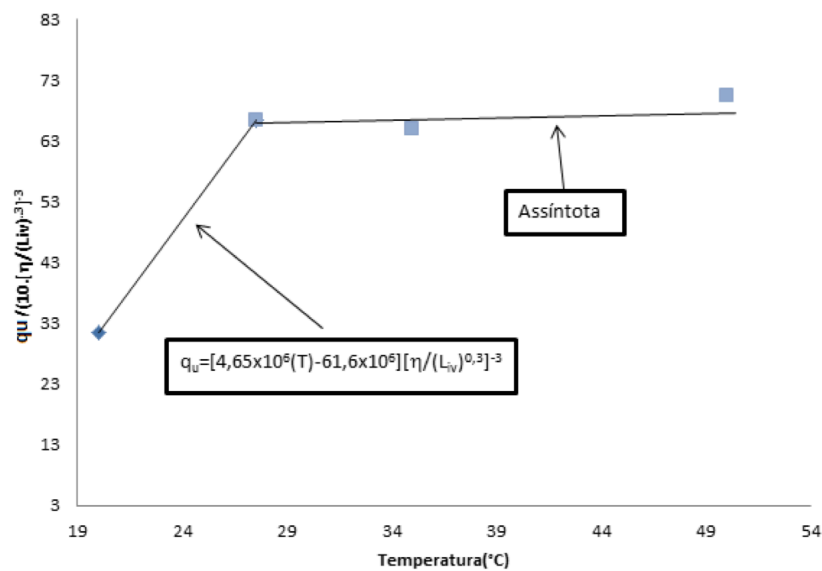


Figura 20 – Variação da resistência à compressão simples ajustada com a temperatura (SILVANI, 2013)

Avaliando o ganho de resistência à compressão simples de misturas de cinza volante com cal de carbureto (5, 10 e 15%) com cura acelerada (1, 3, 7 e 14 dias) para 23, 40, 60 e 80°C,

Saldanha (2014), obteve uma relação entre porosidade e teor volumétrico de cal, ajustado pelo expoente de 0,11. A relação $[\eta/(L_v)^{0,11}]$ manteve-se para todas as combinações estudadas, mostrando ser aplicável para curas aceleradas. Na Figura 21 são apresentadas a correlação entre resistência à compressão simples e $\eta/(L_v)^{0,11}$ para 40°C e 23°C respectivamente, para 7 dias de cura.

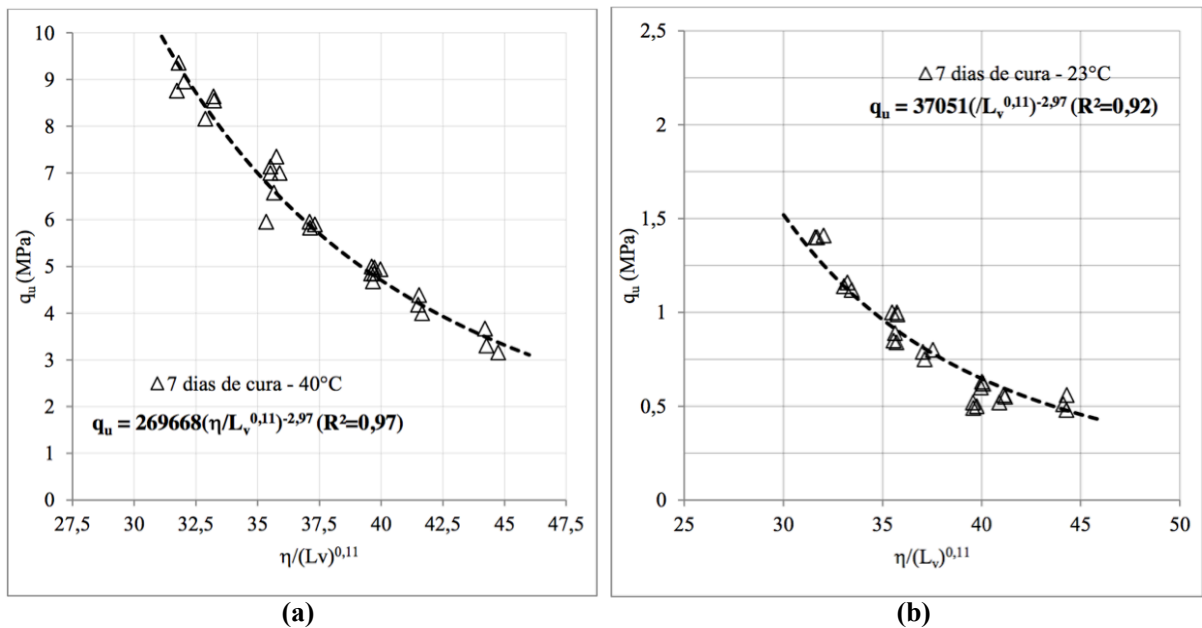


Figura 21 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com 7 dias de cura a temperatura de (a) 40°C e (b) 23°C (SALDANHA, 2014)

2.5.5 Efeito do tempo de cura

Ao estabilizar solo residual de arenito Botucatu com cinza de fundo e cal de carbureto, Thomé (1999), observou que tanto a resistência à tração quanto à compressão crescem com o tempo de cura. O autor constatou que a máxima resistência à compressão simples ocorreu aos 129 dias de cura (6 MPa) e, que aos 28 dias de cura, a resistência atingiu apenas 28% desta máxima. Também observou-se que, embora o pH da mistura diminua com consumo de OH⁻ pelas reações pozolânicas com o tempo de cura, aos 120 dias de cura o pH manteve-se básico o suficiente, aproximadamente 12, para que a solubilização da sílica ainda ocorra.

Dalla Rosa (2009), avaliando o ganho de resistência de misturas de solo com cinza volante e cal para tempos de cura de 28, 60, 90 dias, concluiu que, embora o tempo de cura seja uma variável importante para o desenvolvimento das reações pozolânicas, seu efeito sobre o ganho

de resistência à compressão simples não é constante, podendo ser relacionado à característica das reações pozolânicas com cal se desenvolverem lentamente (Figura 22).

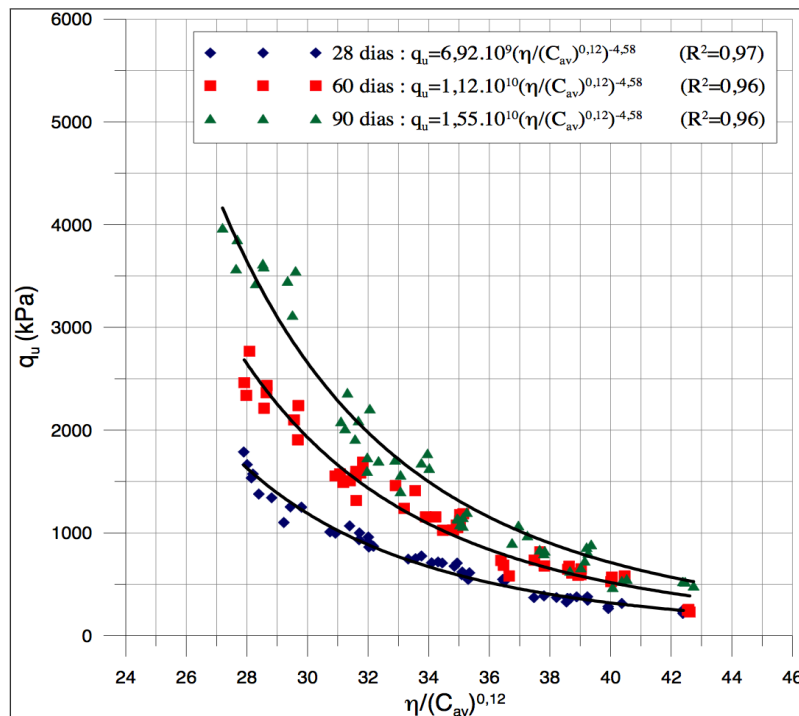


Figura 22 – Efeito do tempo de cura nas amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28, 60 e 90 dias (DALLA ROSA, 2009)

Saldanha (2014), apresentou que, para as misturas de cinza volante com cal de carbureto estudadas, é possível estabelecer uma relação entre a resistência à compressão simples (q_u) e a porosidade/teor volumétrico de cal $[\eta / (L_V)^{0,11}]^{-2,97}$ em função do tempo de cura para todas os tempos de cura testados. Isto possibilitou a avaliação da influência de cada temperatura de cura no ganho de resistência em função do tempo de cura. O desenvolvimento da resistência à compressão simples, frente à variação do tempo de cura, foi linear para as temperaturas de 23°C, 40°C e 80°C. Porém, a 80°C a taxa de crescimento foi menor do que para 40°C. Já para 60°C, a tendência observada foi logarítmica. Esta, representa uma tendência de diminuição nos ganhos de resistência devido à aceleração promovida pelas altas temperaturas, já que, as misturas alcançam altos valores de resistência em um curto período de cura.

2.5.6 Efeito da temperatura de cura

Como as reações pozolânicas são endotérmicas, a taxa de crescimento da resistência de misturas cinza volante-cal será maior quanto mais alta for a temperatura de cura. Assim, o

aumento da temperatura promove um acréscimo da velocidade das reações pozolânicas (SALDANHA, 2014).

Consoli *et al.* (2001) ressalta que, embora os resultados de resistência à compressão simples de misturas solo-cinza volante-cal com temperatura de cura de 22°C sejam satisfatórios aos 90 dias de cura, a sua aplicação fica comprometida, já que, este tempo de cura é considerado inviável para a maioria dos projetos de Engenharia. Contudo, os autores apontam a viabilidade de utilizar-se temperaturas mais elevadas de cura, a fim de diminuir o tempo necessário para atingir a resistência necessária, já que, várias regiões tropicais e subtropicais apresentam temperaturas bastantes altas durante grande parte do ano.

Estudando o desenvolvimento de resistência à compressão simples de misturas de cinza volante com 20, 30, e 40% de cal, compactadas com 50 e 150 MPa de pressão e curadas em diferentes tempos e temperaturas, variando de 8 a 72 horas para 60, 75 e 90°C e 28 dias para 25°C, Marcialis *et al.* (1983), observaram que a temperaturas elevadas aceleram a velocidade das reações pozolânicas, gerando um aumento de resistência mais pronunciado em um menor tempo de cura. As amostras curadas em temperaturas elevadas por 8 dias apresentaram uma resistências maiores que as curadas a 25°C em 28 dias de cura. Contudo, a taxa que aumento de resistência entre as temperaturas de 60°C e 75°C foi maior que a apresentada entre 75°C e 90°C.

Rojas e Cabrera (2002), estudando o efeito da temperatura (20 e 60°C) em misturas de 50% de metaculim e 50% de cal, mediram a taxa de reação da mistura através da realização do ensaio de perda de peso devido à desidroxilação do Ca(OH)_2 e descarbonatação do CaCO_3 . Com este ensaio, os pesquisadores constataram que as misturas curadas a 60°C tiveram a cal consumida rapidamente nas primeiras 120 horas e, entre o quinto e nono dia, a quantidade de cal consumida é, aproximadamente, 65% maior que a das misturas curadas a 20°C. Este comportamento pode ser observado na Figura 23.

Ao avaliar o comportamento mecânico de cinza volante e cinza pesada da Usina de Candiota – RS estabilizadas com cal dolomítica hidratada e com areia do Rio Guaíba em altas temperaturas, Mallmann (1996), utilizando o processo de cura através de autoclave com temperaturas na faixa de 149°C a 188°C e cura em câmara com temperatura constante de 21°C, verificou que a cura por autoclave, com tempo de cura variando entre 4 e 6 horas,

proporcionou aumento de resistência da ordem 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. Com isto, o autor mostra que o fator temperatura tem como finalidade acelerar as reações pozolânicas.

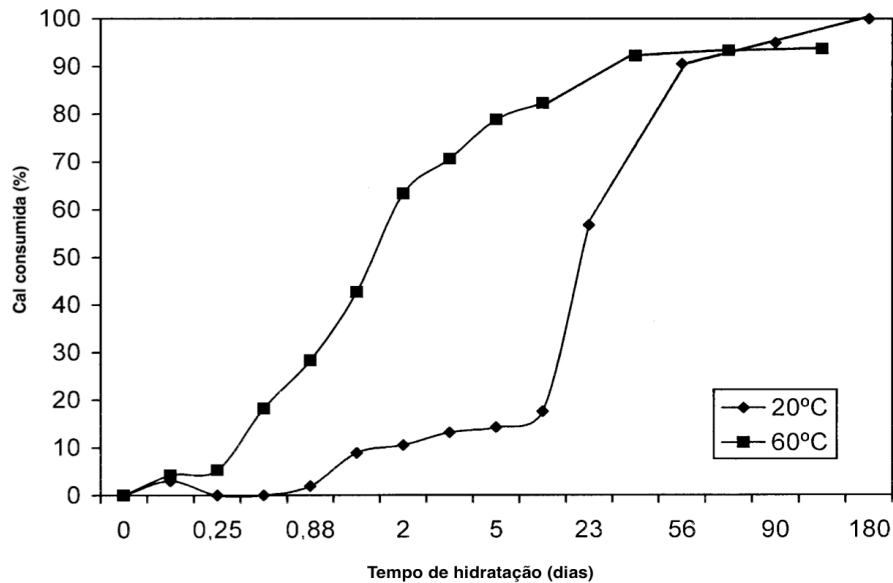


Figura 23 – Evolução da reação da cal com o tempo de cura para 20°C e 60°C em mistura metacaulim-cal (adaptado de ROJAS e CABRERA, 2002)

Realizando 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, Silvani (2013), estudou a influência da temperatura para uma mistura de areia-cinza volante-cal. A pesquisadora concluiu que, ambas as resistências estudadas aumentam linearmente com o aumento da quantidade de cal e, exponencialmente com a redução da porosidade. Ao avaliar a influência da temperatura neste ganho de resistência, foi observado que a resistência à tração por compressão diametral aumentou 1,6 vezes quando a temperatura de cura subiu de 20°C para 27°C, 1,4 vezes quando a temperatura de cura aumentou de 27°C para 35°C, mas, não houve um acréscimo relevante de resistência quando a temperatura variou de 35°C para 50°C. Para os ensaios de resistência à compressão simples, quando a temperatura de cura foi elevada de 20°C para 27°C houve um aumento de aproximadamente 2 vezes na resistência, a partir desta temperatura, não houve grande incremento no ganho de resistência à compressão simples com a elevação da temperatura de cura. Segundo a autora, provavelmente, este comportamento deve-se à extinção das reações entre a cal e a cinza volante.

Ao estudar o efeito da cura com altas temperaturas (22, 40, 60 e 80°C) para 1, 3 e 7 dias de cura de misturas de cinza volante com cal de carbureto, Saldanha (2014), também observou que 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.

Através da normalização da resistência à compressão simples, $q_u / [\eta / (L_v)^{0,11}]^{-2,97}$, Saldanha (2014), constatou que, para o período de cura de 1 dia a taxa de 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. Passado este ponto, ocorreu uma estagnação no ganho de resistência pelo aumento da temperatura de cura. Este fenômeno pode ser observado na Figura 24. Com isto, o pesquisador conclui que existe um limite de capacidade de aceleração das reações pozolânicas através do aumento da temperatura, a partir do qual, a energia disponível é excedente e não altera a cinética das reações pozolânicas. Isto não significa que as reações tenham cessado, pois os dados da pesquisa mostram que o tempo de cura continua proporcionando o aumento da resistência à compressão. O autor considerou que as misturas mais eficientes foram obtidas pela misturas curadas por 3 dias a 60°C.

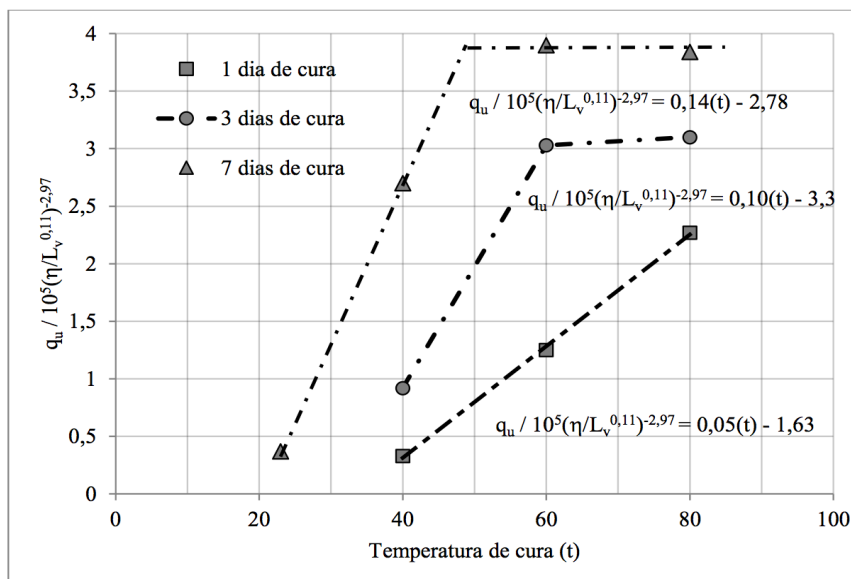


Figura 24 – Comportamento global da resistência da mistura cinza volante- cal frente à temperatura de cura (SALDANHA, 2014)

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa experimental tem dois objetivos fundamentais. O primeiro, consiste em quantificar a influência da moagem da cinza volante, da quantidade de cal, da porosidade da mistura compactada e da temperatura de cura sobre a resistência à compressão simples do material estudado. O segundo, é verificar a validade do uso da relação porosidade/teor volumétrico de cal na estimativa da resistência à compressão simples das misturas cinza volante moída e cal de carbureto realizadas.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental utilizado nesta pesquisa está apoiado em uma metodologia de Projeto de Experimentos, onde conceitos estatísticos são destinados a otimizar o planejamento, a execução e a análise do experimento. O uso de Projeto de Experimentos 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 e TEN CATEN, 2003).

A fim de atender aos objetivos propostos para a presente pesquisa, as variáveis foram organizadas em dois grupos – variáveis independentes e variáveis dependentes. As variáveis independentes são todos os fatores do experimento que podem causar algum efeito sobre as variáveis dependentes e, são divididas em fatores controláveis, fatores constantes e fatores de ruído, que são apresentados a seguir.

a) fatores controláveis:

- tempo de moagem (t_m): tempo que a cinza volante foi submetida ao processo de moagem, expresso em horas;
- porosidade da mistura cinza-cal: expressa através da porosidade (η);
- teor de cal (L): massa de cal dividida pela massa de cinza seca, expresso em porcentagem;
- temperatura de cura (t): temperatura submetida ao corpo de prova, expressa em graus Celsius.

b) fatores constantes:

- tipo de cinza: cinza volante proveniente da empresa Braskem;

- tempo de cura (d): 7 dias;
 - tipo de agente cimentante: cal carbureto proveniente da empresa White Martins;
 - teor de umidade (ω): massa de água dividida pela massa de material seco (cinza volante + cal), expresso em porcentagem;
 - taxa de deslocamento nos ensaios de compressão simples: 1,14 mm por minuto.
- c) fatores de ruído: equipamentos utilizados, operadores, temperatura e umidade do ambiente. Alguns procedimentos foram adotados para minimizá-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.

As variáveis dependentes são as variáveis de resposta do experimento:

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

A relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_v) é definida como: a porosidade da mistura compactada (η) dividida pelo teor volumétrico de cal (L_v) presentes nas amostras compactadas. Esta é uma variável derivada dos fatores controláveis e será utilizada na análise dos dados. Nesta relação, é adicionado um fator de correção ao teor volumétrico de cal (L_v) através de um expoente, o que possibilita compatibilizar a taxa de variação de L_v com a taxa da variação da porosidade. Este procedimento permite a formulação de equações que definem o comportamento das misturas e, por sua vez, estas podem ser empregadas para definição de dosagem.

Nesta pesquisa, o programa experimental foi dividido em três etapas (Tabela 7). Na primeira etapa, visando a determinação das características físicas e químicas da cinza volante e da cal de carbureto, foram coletadas e preparadas as amostras e então, foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais e o ensaio de compactação da cinza volante.

A segunda etapa, chamada de definição das variáveis controláveis, resultou na definição dos níveis das variáveis analisadas para determinar o tempo ideal de moagem, os teores de cal, as porosidades e as temperaturas utilizados na presente pesquisa.

Já a terceira na etapa, foi executada a moldagem e cura dos corpos de prova e foram realizados os ensaios de compressão simples das misturas estabelecidas de acordo com o programa de ensaios detalhado. O ensaio para a medida da sucção matricial foi realizado após o rompimento dos corpos de prova selecionados. O foco principal é a determinação da alteração de uma variável controlável e a fixação das demais. Isto possibilita a avaliação da influência dos fatores controláveis, de forma independente, bem como sua contribuição na resistência à compressão simples.

Tabela 7 – Etapas e ensaios do programa experimental

Etapas	Material	Tipo de ensaio/procedimento	
Métodos de caracterização e Materiais da mistura	Cinza Volante e Cal de	Coleta e preparação das amostras	
		Cinza Volante	Caracterização
	Análise granulométrica		
	Limite de plasticidade		
	Limite de liquidez		
	Análise química		
	Compactação		
	Cal de Carbureto	Caracterização*	Massa específica real dos grãos
			Análise química
			Perda ao fogo
Óxido de cálcio disponível			
Programa de ensaio de compressão simples	Misturas de cinza volante e cal de carbureto	Definição do tempo de moagem	
		Definição do teor de cal	
		Definição da porosidade	
		Definição da temperatura de cura	
Ensaio de resistência à compressão simples	Misturas de cinza volante e cal de carbureto	Moldagem, compactação, cura e rompimento	
		Sucção matricial	

* dados obtidos de SALDANHA (2014)

3.2 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

Inserido na primeira etapa do programa experimental, neste item são descritos os métodos utilizados para coleta, preparação das amostras e ensaios de caracterização da cinza volante e da cal de carbureto utilizadas na pesquisa.

3.2.1 Coleta de amostras

A cinza volante foi coletada diretamente dos reservatórios dos equipamentos da empresa Braskem, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos, aproximadamente 100 kg. O material, assim que obtido, foi armazenado e transportado em tonéis plásticos adequadamente vedados para o laboratório.

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

3.2.2 Preparação das amostras

As amostras de cinza volante foram preparadas para os ensaios de caracterização, para moagem e a moldagem dos corpos de prova através de procedimentos de secagem ao ar e determinação da umidade higroscópica. Estes processos seguiram os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457/86 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986a).

A cal de carbureto foi obtida da bacia de decantação, a qual possui altos teores de umidade que apresentam-se misturados de forma homogênea com a cal, portanto, foi necessário manter esta mistura em descanso por um dia nos tonéis de coleta, possibilitando a decantação da cal. Após este procedimento, o excesso de água foi retirado através do emprego de mangueira com método do sifão. A cal decantada presente no fundo do tonel ainda apresentava alto teor de umidade, portanto o resíduo foi seco em estufa à temperatura de 60°C durante 24 horas. Após este período, a cal apresentava umidade reduzida, possibilitando o destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica conforme os procedimentos preconizados na NBR 6457/86 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986a).

Misturas de cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples frente à moagem da cinza volante.

3.2.3 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 de plasticidade e determinação do teor de umidade conforme procedimentos e normas da Tabela 8. Estes ensaios foram realizados nos laboratórios do LEGG, LACER e CIENTEC.

Tabela 8 – Ensaios de caracterização realizados e procedimentos empregados

Ensaio de caracterização	Procedimento Utilizado
Determinação do teor de umidade	NBR 6457/86
Análise química elementar	Fluorescência de raios-X
Análise granulométrica	NBR 7181/84 (com defloculante)
Massa específica real dos grãos (cinza)	NBR 6508/84
Análise da estrutura cristalina (cinza)	Difratometria de raios-X
Área superficial específica (cinza)	Método de BET
Massa específica real dos grãos (cal)	NBR NM 23/2001
Perda ao fogo	NBR NM 18/2004
Óxido de cálcio disponível (cal)	NBR 6473/2003
Limite de liquidez (cinza)	NBR 6459/84
Limite plasticidade (cinza)	NBR 7180/84
Ensaio de Compactação (cinza)	NBR 7182/86

3.3 MATERIAIS DA MISTURA

Neste item são descritos os materiais utilizados na presente pesquisa. As características físicas e químicas da cinza volante e cal de carbureto foram obtidas pelos métodos de caracterização apresentados no item anterior (3.2).

3.3.1 Cinza volante

A cinza volante utilizada nesta pesquisa é oriunda da Braskem, empresa fabricante resinas termoplásticas, localizado no município de Triunfo no Estado do Rio Grande do Sul, que possui unidade de geração de vapor através de câmara de combustão de carvão mineral

⁵ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320**: particle size analysis – laser diffraction methods. Geneva, 2009.

(Figura 25). O vapor gerado é utilizado para a movimentação de turbinas na geração de energia elétrica para a fábrica, a parte restante do vapor é utilizado para processos produtivos.



Figura 25 – Cinza volante da Braskem

A seguir são apresentadas algumas propriedades físicas da cinza volante obtida através de ensaios realizados no LEGG, LACER e CIENTEC. Na Figura 26 é apresentada a curva granulométrica da cinza volante. O material foi considerado como, de acordo com as normas citadas anteriormente, não-plástico. De acordo com a classificação unificada, a cinza volante é considerada como silte (ML). A massa específica real dos grãos é de $2,17 \text{ g/cm}^3$. E, o diâmetro médio das partículas de cinza volante é de $18,94 \mu\text{m}$.

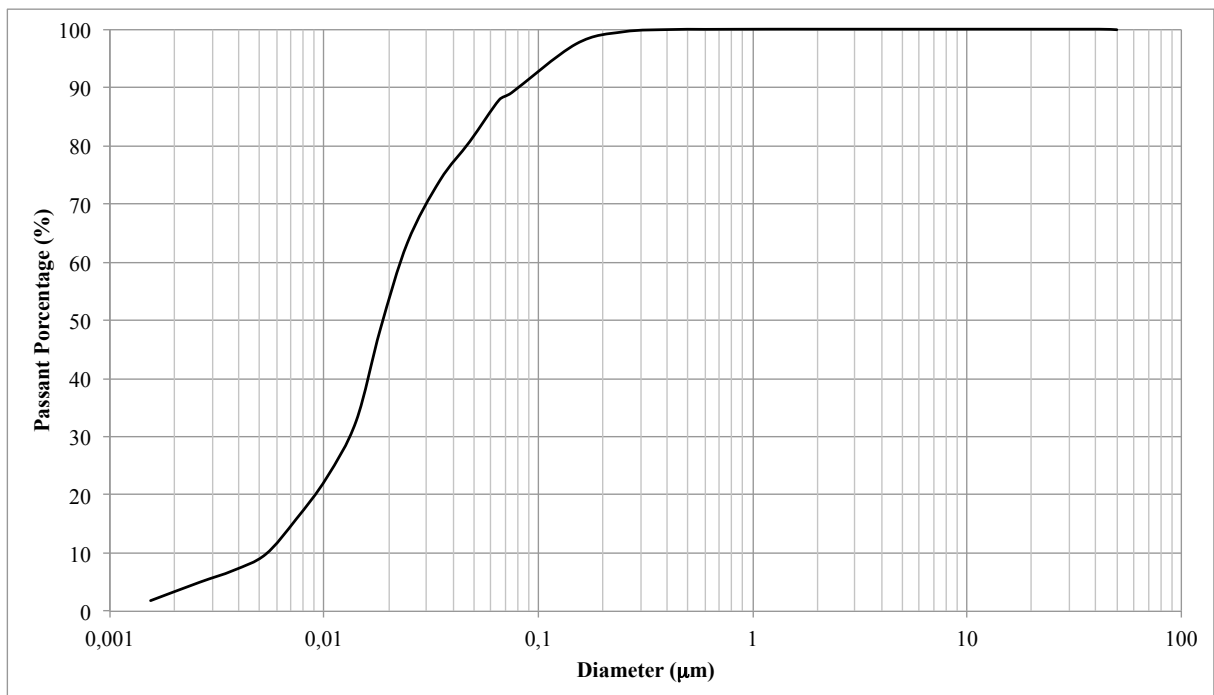


Figura 26 – Granulometria da cinza volante

A Tabela 9 apresenta a composição química da cinza volante gerada pela Braskem. Observa-se que a soma do óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) compõem mais de 90% do total dos óxidos e, que estes são considerados elementos imprescindíveis para a ocorrência das reações pozolânicas.

Tabela 9 – Análise da cinza volante

Características químicas	Valores (%)
SiO_2	66,40
Al_2O_3	18,20
Fe_2O_3	6,50
TiO_2	0,80
CaO	2,15
MgO	0,88
K_2O	1,41
Na_2O	0,34
C	0,14
S	0,09

Com relação à fração de material amorfo, que irá propiciar as reações pozolânicas com a presença da cal, foi realizado o ensaio de difratometria de raios-X no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS (LACER) (Figura 27). Através do método de Rietveld, o ensaio foi analisado pela CIENTEC, concluindo-se que o percentual amorfo (fase vítrea) desta cinza volante é de 69,95% da sua composição.

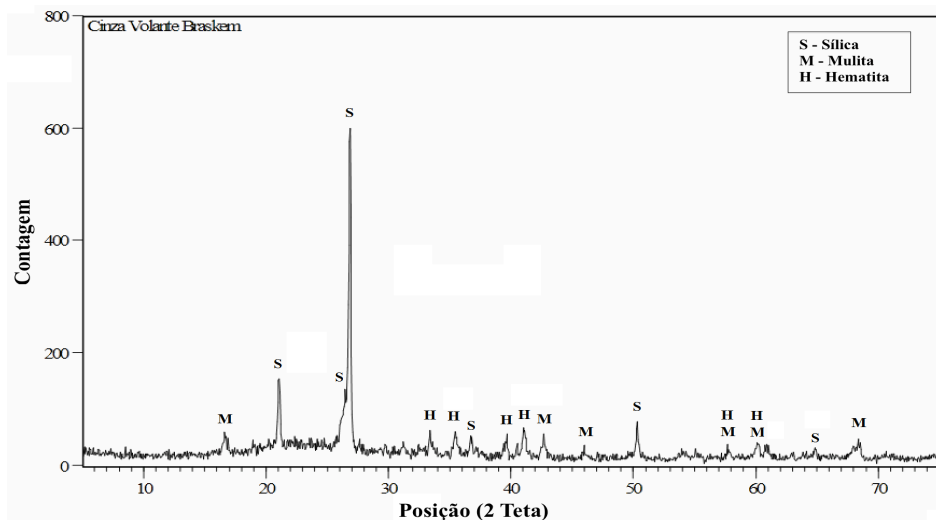


Figura 27 – Difratometria de Raios-X – Cinza Volante Braskem

3.3.2 Cal de carbureto

Neste trabalho foi utilizada a cal de carbureto, um resíduo do processo produtivo do gás acetileno, 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 úmida pela empresa citada. Na Figura 28 é apresentado o material quando coletado e seu aspecto após a secagem.



Figura 28 – Cal de carbureto da White Martins Gases Industriais S.A.
(a) armazenada (b) após secagem

Os valores obtidos pela cal de carbureto utilizada neste trabalho podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 – Propriedades da cal de carbureto

Propriedade	Valores
Óxido de cálcio (CaO)	70,02%
Óxido de magnésio (MgO)	0,3%
Resíduos insolúveis	1,5%
Perda ao fogo	27%
CaO disponível	64,6%
Massa específica real dos grãos	2,12 g/cm ³

(fonte: SALDANHA, 2014)

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. Como exemplo, embora as

porcentagens de óxidos variem por lote, Dalla Rosa (2009) utilizou em sua pesquisa uma cal dolomítica comumente vendida no Estado que possui 44,8% de óxido de cálcio e 27,9% de óxido de magnésio. O óxido de cálcio disponível representa a fração da cal de carbureto capaz de reagir com a cinza volante. Os ensaios de caracterização foram realizados com o material após o processos de secagem.

3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A segunda etapa do programa experimental consiste em estabelecer os valores das variáveis para o presente estudo, sendo estes apresentados nas seções a seguir. Os valores definidos estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros e variáveis estabelecidos

Tempo de Moagem (h)	Peso específico aparente seco (kN/m ³)	Teor de cal (%)	Temperatura de cura (°C)
0h	11 – 12 – 13	5 – 10 – 15	23 – 40 – 60
2h			23 – 40
6h			23 – 40 – 60

3.4.1 Definição do tempo de moagem

A moagem da cinza volante foi realizada em um moinho de bolas cerâmico. O moinho de bolas é um equipamento de cilindro horizontal, preenchido parcialmente com esferas cerâmicas e movido por um motor a uma baixa velocidade. Quando o moinho se move, há um cascadeamento das esferas de cerâmica que atiram-se com o material a ser moído, provocando uma redução da granulometria do material.

O moinho utilizado é da empresa Quimis, com capacidade de 30.000 ml e rotação de 150 rpm e três tamanhos de esferas cerâmicas – 50 mm, 15 mm e 5 mm de diâmetro. O equipamento e as esferas estão apresentados na Figura 29. Foi utilizada a proporção em peso de 3 kg de esferas para 1 kg de material, não ultrapassando 45% do volume da jarra, o que levou a adoção do peso de material a ser moído de 2 kg por vez. A proporção entre peso das esferas

adotado foi de 50% de bolas de 50 mm e 50% dos outros dois diâmetros. Primeiramente, foram pesadas as esferas, estas, foram acondicionadas na jarra, de forma que as esferas menores ocupem os vazios das maiores, otimizando assim o volume ocupado pelas bolas no moinho (Figura 30 a). Em seguida, a cinza volante pesada foi acondicionada na jarra, sobre as esferas (Figura 30 b). Por fim, a jarra foi devidamente vedada e colocada no equipamento para iniciar-se o processo de moagem.

O tempo de moagem foi definido através de dois ensaios, análise granulométrica e área superficial específica. Os ensaios de granulometria da cinza volante realizados nesta etapa da pesquisa foram realizados no LACER da UFRGS, utilizando o equipamento Cilas 1180. A área superficial específica das amostras foram obtidas através do ensaio BET (Braunauer, Emmet e Teller) pelo equipamento Autosorb Quantachrome (modelo Nova 1200), também realizados no LACER.

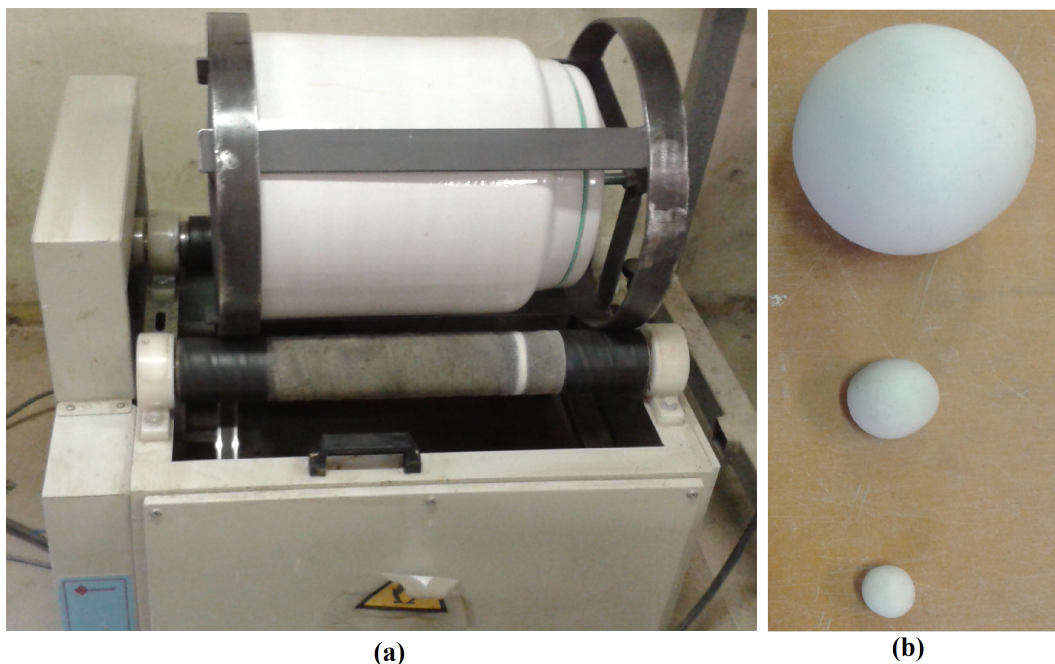


Figura 29 – Equipamento para moagem (a) moinho de bolas de cerâmica (b) esferas cerâmicas

Foram testados quatro tempos de moagem: 1, 2, 3 e 6 horas. O ensaio de massa específica real dos grãos da cinza foi realizado no LEGG seguindo as determinações da NBR 6508/98. A análise granulométrica é apresentada na Figura 31 e os valores obtidos pelo ensaio BET, diâmetro médio da partícula e massa específica real dos grãos encontram-se na Tabela 12.



Figura 30 – Processo de moagem (a) acondicionamento das esferas no jarro (b) adição da cinza volante

Através dos ensaios realizados, estipulou-se que os tempos de moagem a serem analisados seriam 2 e 6 horas. Com 6 horas de moagem, houve mudanças significativas nos dois ensaios, confirmando a quebra do material, o que é desejado pelo trabalho. Já 2h de moagem apresenta-se como um ponto intermediário, o que possibilita a análise da influência da diminuição da granulometria no ganho da resistência.

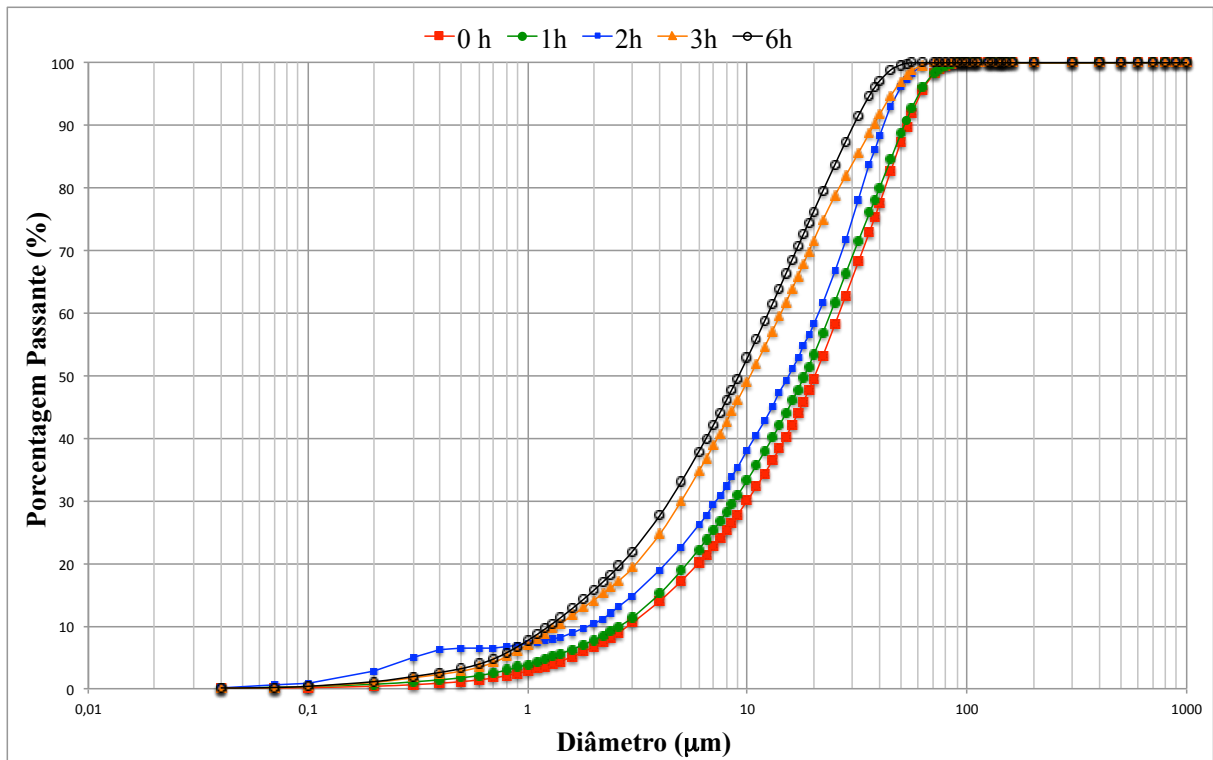


Figura 31 – Análise granulométrica para diferentes tempos de moagem de cinza

Tabela 12 – Área superficial específica, massa específica real dos grãos e diâmetro médio das partículas em função do tempo de moagem

Tempo de moagem (h)	Área superficial específica (m ² /g)	Massa Específica Real dos Grãos (g/cm ³)	Diâmetro Médio (μm)
0	3,28	2,17	18,94
1	4,57	2,20	18,12
2	4,96	2,21	15,65
3	5,29	2,21	10,45
6	5,95	2,27	9,42

Foi realizado o ensaio de granulometria no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) para cada ciclo de moagem da cinza. Os resultados da granulometria encontram-se no apêndice A. Foram realizados 13 ciclos de moagem de 6h e 9 ciclos de moagem de 2h. Aceitou-se os ciclos onde o diâmetro médio ficou dentro de 10% da média dos diâmetros.

3.4.2 Definição da porosidade

Visando a comparação dos resultados desta pesquisa com os resultados obtidos por Saldanha (2014), a determinação dos pesos específicos aparentes secos (γ_d) desta pesquisa foram definidos através do ensaio de compactação estática – Proctor – NBR 7182/86 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986b) realizados pelo autor anteriormente mencionado. A fim de validar a utilização destes γ_d , foi realizado ensaio de compactação dinâmica, tradicional em pesquisas de geotecnia. Este ensaio, comparado ao mesmo realizado a com cinza da Celulose Riograndense, utilizada por Saldanha (2014), aponta uma grande semelhança entre os γ_d máximos e umidades ótimas ($\omega_{ót}$) das cinzas (Figura 32) para todas as energias de compactação avaliadas. Isto indica que os pontos de moldagem adotados por Saldanha (2014), através do ensaio de compactação estática, devem também ser semelhantes para a cinza volante utilizada no presente trabalho. Sendo assim, foram utilizados os mesmos pontos de moldagem utilizados por Saldanha (2014) – R1, R2 e R3 apresentados na Tabela 13 – por serem pesos específicos executáveis na prensa utilizada, além de possibilitarem a comparação dos resultados.

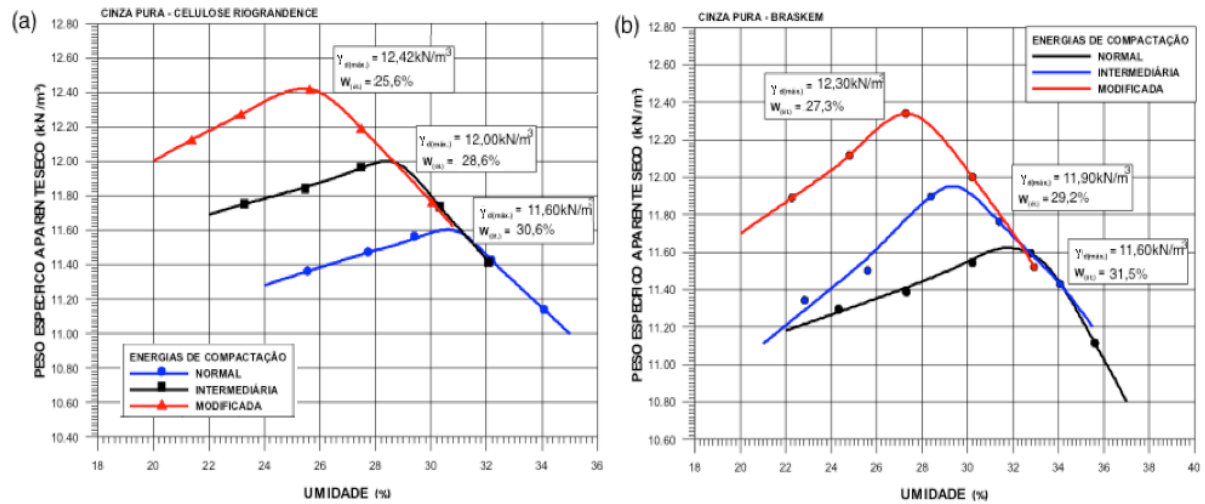


Figura 32 – Comparação dos valores de pesos específicos máximos e umidades ótimas através de ensaios de compactação dinâmica entre cinzas volantes provenientes de (a) Celulose Riograndense (Saldanha, 2014) e (b) Braskem

Assim, foram moldadas 3 diferentes amostras para cada ponto de moldagem definido, com diferentes tempos de moagem (0, 2h e 6 h), diferentes porcentagens de cal e, diferentes temperaturas de cura. Estes são determinados nos itens seguintes.

Tabela 13 – Pontos de moldagem

Ponto	γ_d (kN/m ³)	ω (%)	Porosidade (η)
R1	13,0	18,0	39,8%
R2	12,0	18,0	44,4%
R3	11,0	18,0	49,0%

3.4.3 Definição dos teores de cal

Foram definidos os teores mínimo e máximo de cal de carbureto a fim de proporcionar um ambiente favorável para o desenvolvimento das reações pozolânicas e, assim, otimizar-se os resultados da pesquisa. Os valores estabelecidos são representados através da porcentagem de cal de carbureto em relação à massa seca de cinza volante.

Para determinação do teor mínimo de cal foi utilizado o método ICL (*Initial Consumption of Lime*), citado na revisão bibliográfica. Para a mistura de cinza e cal de carbureto utilizados nesta pesquisa, observou-se que o valor máximo de pH da mistura é de 12,69, acima do valor

mínimo recomendado pela ASTM D 6276 de 12,4. A estabilização do valor máximo do pH acontece a partir dos 3% de cal, conforme pode ser observado na Figura 33, que apresenta o valor de pH para as diferentes proporções de cal da mistura. Assim sendo, visando 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.

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%. Saldanha (2014), que utilizou a mesma cal utilizada neste trabalho e uma cinza volante similar, ao realizar um ensaio de compressão simples na verificação da influência da cal na resistência para a definição das dosagens, também concluiu que o teor máximo de cal para estes materiais deve ser 15%. Sendo assim, foi realizado o ensaio de resistência para 12 kN/m³ com para os teores de cal de 5, 10, 15 e 20% para uma temperatura de cura de 40°C ao 7 dias de cura. Foram realizados três corpos de prova para cada combinação, os valores médios são apresentados na Figura 34. Através deste gráfico, também foi constatado que o teor máximo de cal se dá em 15% para os materiais utilizados nesta pesquisa. Então, os teores de cal adotados nesta pesquisa foram 5, 10 e 15% de cal de carbureto em relação à massa de cinza seca.

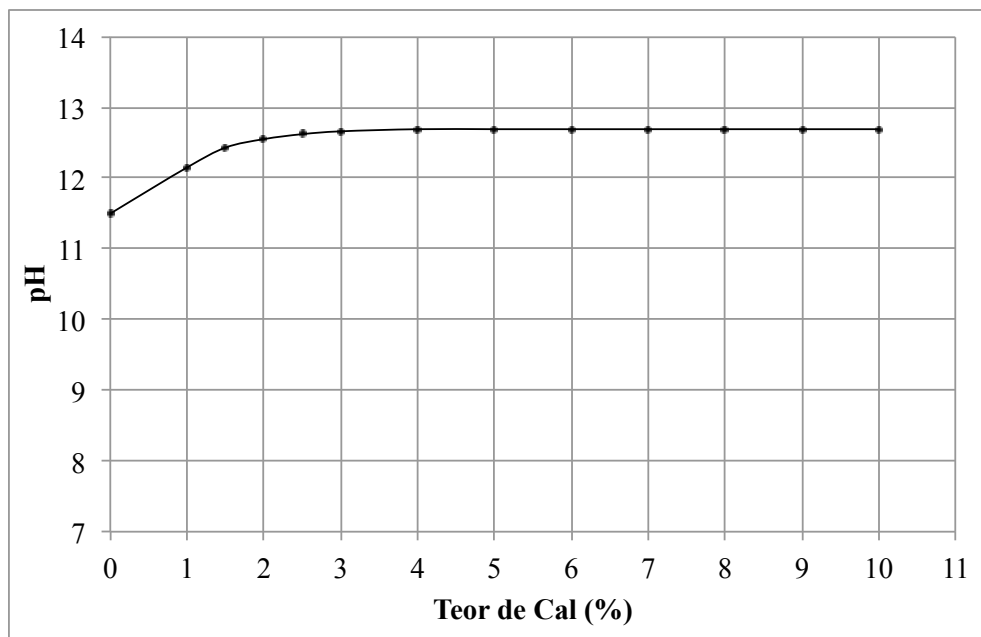


Figura 33 – Determinação do teor mínimo de cal através do método ICL

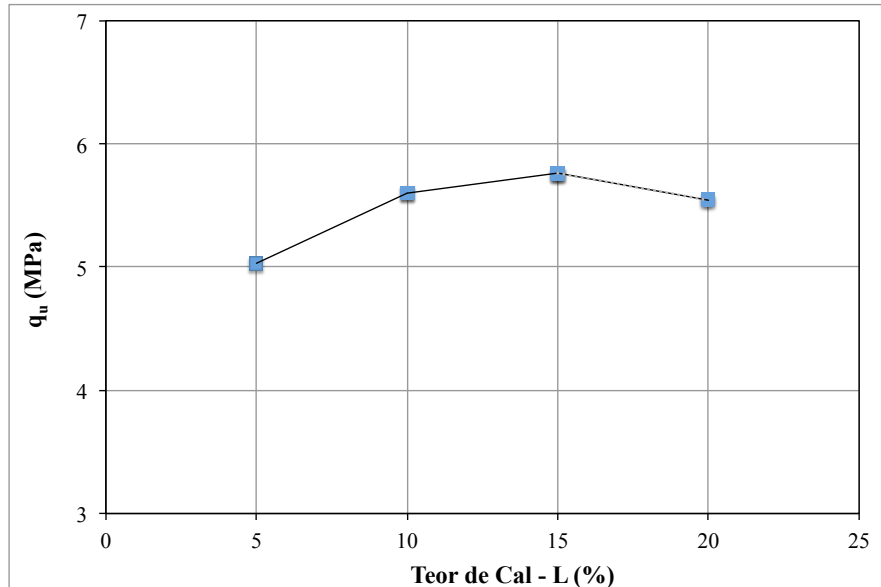


Figura 34 – Determinação do teor máximo de cal através da variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal

3.4.4 Definição do tempo e temperatura de cura

Na cura acelerada, temperaturas mais elevadas proporcionam um aumento da velocidade das reações pozolânicas, assim, necessitando um menor período de cura. Entretanto, quando não ocorre a cura acelerada, o tempo de cura deve ser estendido para que ocorra o processo de cimentação. Sendo assim, baseado nos resultados de Saldanha (2014), utilizou-se nesta pesquisa as temperaturas de 23°C (sem vapor), 40°C (a vapor) e 60°C (a vapor) para 7 dias de cura. O autor tinha concluído que os corpos de prova que apresentaram valores resistências à compressão simples mais eficientes foram os curados a 60°C com 3 dias de cura. Portanto, essa temperatura foi escolhida, juntamente com 40°C, que é considerada praticável para obras de Geotecnia em algumas regiões tropicais (CONSOLI *et al.*, 2001).

3.5 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Com a realização da caracterização e a definição dos teores das variáveis utilizadas no trabalho, foi iniciada a terceira etapa do trabalho, a realização dos ensaios de resistência à compressão simples. Nesta fase do programa experimental, foram realizadas as misturas, moldagem e cura dos corpos de prova para, posteriormente, serem rompidos através do ensaio de compressão simples. Também, nesta etapa, é apresentado como foi realizado o ensaio de sucção, que foi realizado para determinar a homogeneização proporcionada pela imersão dos

corpos de prova por 24 horas. Com os resultados desta etapa, serão realizadas as análises dos resultados.

3.5.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

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

A pesagem dos materiais (cal, cinza volante e água) foi feita com resolução de 0,01 g. Primeiramente, a cinza volante e a cal são misturadas com o auxílio de uma espátula metálica até que a mistura adquirisse coloração uniforme. Em seguida, água é 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. Portanto, a quantidade de cal necessária para cada mistura é calculada em relação à massa de cinza volante utilizada. O teor de umidade é calculado 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. De posse da mistura, dividiu-se o peso total para um corpo de prova em três e, cada parte da mistura foi acondicionada em um recipiente com tampa antes da compactação, a fim de evitar a perda de umidade.

Para a medição da umidade, duas porções pequenas do material foram colocadas em cápsulas e pesadas. Então, as cápsulas foram colocadas em uma estufa a 60°C onde serão secas por 48 h e repesadas. A diferença de peso entre os valores úmidos e secos é igual a umidade da amostra e, a média entre a umidade das duas cápsulas é considerado o teor de umidade do corpo de prova.

Então, a mistura é compactada estaticamente em três camadas em um molde de ferro fundido, devidamente lubrificado de maneira que cada camada atinja o peso específico aparente seco definido, tomando-se o cuidado de escarificar levemente a interface entre cada camada para aumentar a integração entre elas.

Concluído o processo de moldagem, o corpo de prova foi imediatamente extraído do molde, quando sua massa, diâmetro e altura foram devidamente anotados com resolução de 0,01g e 0,1mm respectivamente. Finalmente, os corpos de prova são identificados, ensacados e armazenados por 7 dias. Os corpos de prova curados a temperatura de 23°C ($\pm 3^\circ\text{C}$) foram acondicionados em um ambiente climatizado, já os curados a 40°C e 60°C ($\pm 3^\circ\text{C}$) foram armazenados em uma câmara à vapor.

Os corpos de prova serão aceitos se atenderem as seguintes tolerâncias:

- a) 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;
- b) teor de umidade (ω): valor especificado $\pm 0,5$ pontos percentuais;
- c) dimensões: diâmetro $50 \pm 0,5$ mm e altura 100 ± 1 mm.

3.5.2 Molde e cura a vapor

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado molde de ferro contínuo, sem repartições, com uma polegada de espessura, assim, este pode resistir a maiores forças de compactação. O molde foi adaptado para ser utilizado em prensa automatizada (Figura 35).

Para a cura a vapor de 40°C e 60°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 36 apresenta a câmara da CIENTEC utilizada na presente pesquisa. Já os corpos de prova curados a 23°C foram armazenados em ambiente com temperatura controlada durante todo o período de cura.

3.5.3 Ensaio de resistência à compressão simples

Ensaio de compressão simples são muito utilizados em programas experimentais de pesquisas no meio geotécnico quando deseja-se avaliar a efetividade da estabilização com cal ou observar aspectos relativos à importância de fatores influentes sobre a resistência de solos tratados. Este tipo de ensaio é bastante difundido na literatura por ser um ensaio simples, de rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido, além de se ter uma grande experiência acumulada com este tipo de ensaio na área de concretos.

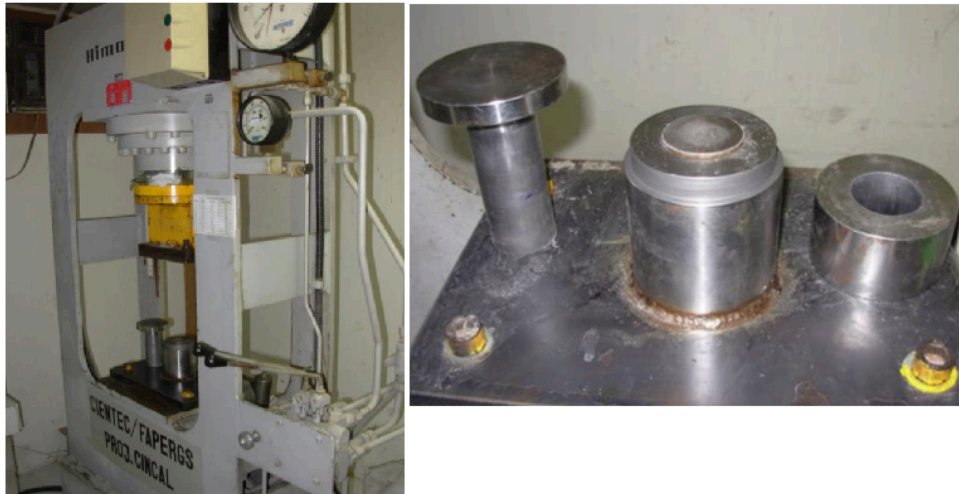


Figura 35 – Prensa e molde adaptado para a confecção dos corpos de prova



Figura 36 – Câmara a vapor utilizada para cura a vapor nas temperaturas de 40°C e 60°C

Para estes ensaios foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 100 kN, com anéis dinamométricos calibrados com capacidade de 10 kN e 50 kN e resolução de 0,005 kN (0,5 kgf) e 0,023 kN (2,3 kgf) respectivamente. A velocidade de deslocamento destes ensaios eram de 1,14 mm por minuto. O procedimento dos ensaios de compressão simples seguiram a norma americana ASTM D 5102/96 (AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS, 1996).

Os corpos de prova, após serem curados, foram submersos em um recipiente com água por um período de 24 horas, visando aproximar a condição de saturação. 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. Procedeu-se então à execução do ensaio e anotou-se a carga máxima atingida pelo corpo de prova.

O critério de aceitação para o ensaio de resistência à compressão simples, foi de que as resistências individuais de três corpos de prova não devem afastar-se mais de 10% da resistência média desse conjunto, pois uma maior variabilidade dos resultados indica falha em algum processo anterior (peso, mistura, moldagem, cura ou imersão). Este critério é utilizado em todas as pesquisas realizadas a partir de ensaios de compressão simples no LEGG. Assim, esta pesquisa também adotou este critério, para poder comparar os resultados obtidos com os resultados de trabalhos realizados anteriormente.

3.5.4 Sucção matricial

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

A sucção medida foi a proveniente das forças capilares existentes no interior da amostra (matricial). 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 Marinho (1995):

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

b) 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), Foppa (2005), Lopes Junior (2007), Dalla Rosa (2009) e Saldanha (2014) e são descritos a seguir. Após a realização do ensaio de compressão simples, com o auxílio de uma espátula, foi obtida uma amostra com o maior fragmento do corpo de prova rompido. Além da amostra para sucção, através de raspagem do corpo de prova ensaiado, retirou-se uma amostra para determinação do teor de umidade. Dois pedaços de papel filtro, com área de aproximadamente 2 cm^2 , foram colocados na parte superior da amostra sem sobreposição dos mesmos. O papel filtro foi 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) foi 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 foram, 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 foram removidos rapidamente da amostra e colocados em recipientes plásticos numerados e com tampa. Essa operação foi realizada dentro de 3 a 5 segundos. O peso dos dois conjuntos (papel filtro úmido + recipiente) foi determinado usando uma balança com resolução de $0,0001 \text{ g}$. Depois de obtido o peso úmido de cada conjunto, os papéis são 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 foi retirado da estufa e rapidamente recolocado no mesmo recipiente utilizado para obtenção do peso úmido. Determinou-se, então o peso seco de cada conjunto. Após a obtenção do peso seco, os papéis filtro são descartados e os recipientes pesados. Através desses dados, o teor de umidade de cada papel filtro é calculado. Com o teor de umidade e a correspondente calibração, obtém-se a sucção do papel filtro e, a média dos dois valores é considerada igual à sucção existente na amostra.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da realização dos ensaios de resistência à compressão simples e de sucção matricial, explanados no item 3.5 do programa experimental realizado nesta pesquisa. Os resultados apresentados neste capítulo estão divididos pela temperatura de cura (23°C, 40°C e 60°C), onde são expostos os resultados da resistência para as amostras de cinza não moída, moída 2h e moída 6h, para 23°C e 40°C, e não moída e moída 6h para 60°C, todos em função dos teores de cal (5, 10 e 15%) e peso específico aparente seco da mistura (11, 12 e 13 kN/m³). Por fim, são apresentados os resultados obtidos pelo ensaio de sucção matricial.

4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

As tabelas B1 a B8 do apêndice B, 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 B1 a B3 apresentam os resultados obtidos para os corpos de prova curados a 23°C com cura sem vapor para os tempos de moagem de 0, 2 e 6 horas. Nas Tabelas B4 a B6 apresentam os dados das amostras submetidas a 40°C para os tempos de moagem de 0, 2 e 6 horas. Já, nas tabelas B7 e B8 são apresentados os valores obtidos pelos corpos de prova curados a 60°C com tempos de moagem de 0 e 6 horas.

4.1.1 Amostras curadas a 23°C

Os resultados apresentados nas figuras 37 a 42 foram elaborados através dos dados apresentados nas tabelas B1 a B3, possibilitando a observação de aspectos importantes do comportamento da resistência à compressão simples (q_u) de misturas cinza-cal realizadas no estudo para 23°C. Ressaltando-se que os resultados apresentados são para um teor de umidade de 18% e tempo de cura de 7 dias, parâmetros que foram mantidos constantes na pesquisa.

Nas figuras 37 a 39 são apresentadas as relações obtidas pela variação de q_u em função do teor de cal utilizado em corpos de prova realizados com cinza volante não moída, moída 2h e 6h. Cada tendência observada possui a mesmo peso específico aparente seco.

Nestas figuras foi possível observar uma tendência de estagnação de q_u entre os diferentes teores de cal para uma mesmo peso específico aparente seco. Para esta temperatura, o tempo de cura de 7 dias não foi suficiente pra que ocorressem as reações pozolânicas entre os aluminatos e silicatos da cinza volante e a cal de carbureto, que são conhecidas como reações lentas. Assim, não foi observado ganhos significativos de resistência com o aumento da quantidade de cal na mistura, mas sim, uma estagnação, ou até mesmo queda, da resistência com o aumento do teor de cal. Os valores médios de resistência por combinação de mistura em função do teor de cal, bem como a taxa de variação de resistência média apresentados pelos dados foram expostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Resistência à compressão simples (q_u) média e variação de resistência para variação de cal para cura a 23°C

Moagem	Peso Específico (kN/m ³)	q_u - 5% de cal (MPa)	Variação de Resistência	q_u - 10% de cal (MPa)	Variação de Resistência	q_u - 15% de cal (MPa)
Não Moída	11	0,88	-15%	0,75	-1%	0,74
	12	1,14	-6%	1,07	6%	1,13
	13	1,52	1%	1,53	21%	1,85
Moída 2h	11	1,71	4%	1,78	5%	1,87
	12	3,09	13%	3,48	-5%	3,30
	13	3,98	1%	4,00	8%	4,33
Moída 6h	11	1,82	-1%	1,80	-6%	1,70
	12	2,59	-7%	2,42	-4%	2,33
	13	3,65	11%	4,05	0%	4,06
		Média	0%	Média	3%	

É possível observar que, embora a variação da resistência não tenha sido constante entre as combinações, independentemente do tempo de moagem da cinza, as amostras curadas a 23°C com γ_d de 13 kN/m³ apresentaram consistentemente um ganho de resistência com aumento do teor de cal. Também é possível observar que, para γ_d de 11 kN/m³ houve um ganho de resistência médio de 42% entre a cinza não moída e a cinza moída por 2h e, um ganho de resistência médio de 59% entre a cinza moída por 2h e por 6h. Para os γ_d de 12 e 13 kN/m³, observa-se um ganho de resistência entre as misturas de cinza não moída e moída por 2h, 84% e 154% respectivamente. Contudo, houve uma queda na resistência entre a cinza moída por 2h e por 6h para estes γ_d de -25% e -4%, respectivamente.

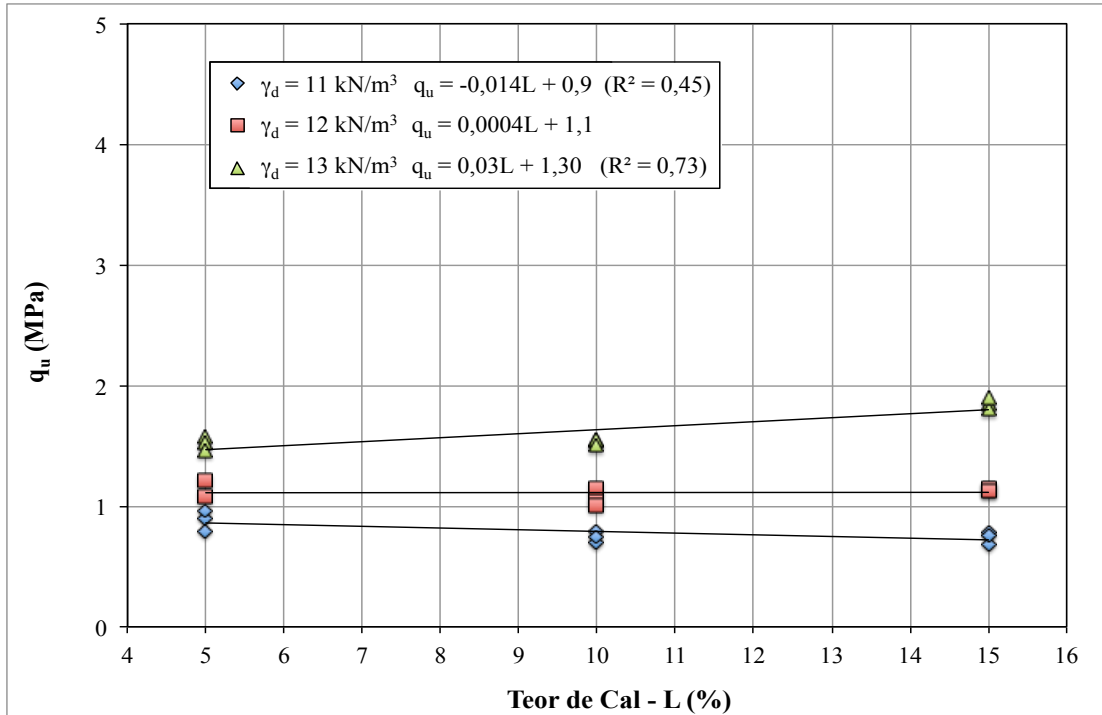


Figura 37 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante não moída curadas a 23°C

Conforme observado nas figuras 37 a 39, o aumento do peso específico aparente seco promove ganhos de resistência, independente da mistura realizada. Como um aumento do peso específico aparente seco implica em uma diminuição na porosidade da mistura, dado que o volume do corpo de prova permaneça constante, nas figuras 40 a 42 são apresentadas as relações obtidas pela variação da resistência à compressão simples em função da porosidade dos corpos de prova realizados com cinza volante não moída, moída 2h e 6h.

Diferentemente do observado nos resultados em função do teor de cal, para a temperatura de cura de 23°C, a porosidade da mistura compactada exerce uma maior influência sobre a resistência à compressão simples do material. Independentemente do teor de cal, a redução da porosidade promove ganhos significativos de resistência. Pode-se observar que as curvas de resistência para os diferentes teores de cal estão muito próximas, o que também indica que o aumento da quantidade de cal adicionada para as misturas curadas a temperatura ambiente não apresentou um impacto significativo na resistência à compressão simples.

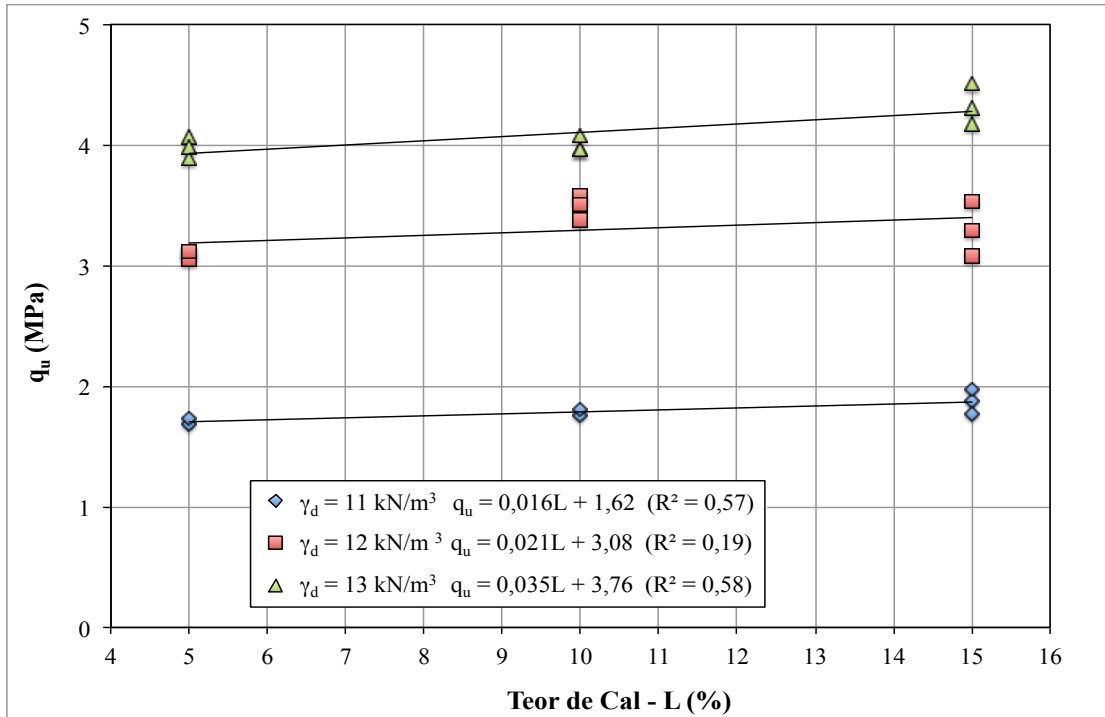


Figura 38 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante moída 2h curadas a 23°C

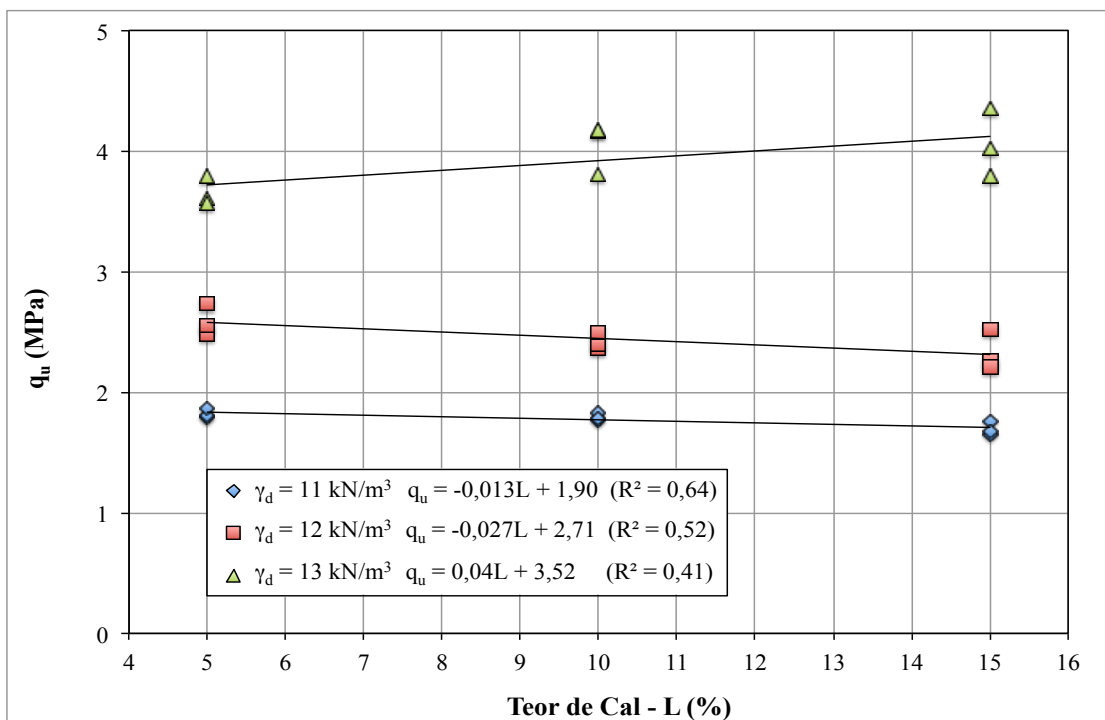


Figura 39 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante moída 6h curadas a 23°C

É possível observar uma relação exponencial entre q_u e a porosidade da mistura, assim sendo, a resistência aumenta exponencialmente com a redução da porosidade. Embora, tal relação não seja o melhor ajuste para os pontos observados pelas misturas com 2h de moagem, manteve-se a mesma tendência dos demais, possibilitando assim uma compatibilização dos resultados. Em média, a redução de 9 pontos percentuais na porosidade do material compactado proporcionou um ganho de 2,1, 2,3 e 2,2 vezes na resistência à compressão simples da mistura cinza-cal para cinza não moída, moída 2h e moída 6h, respectivamente.

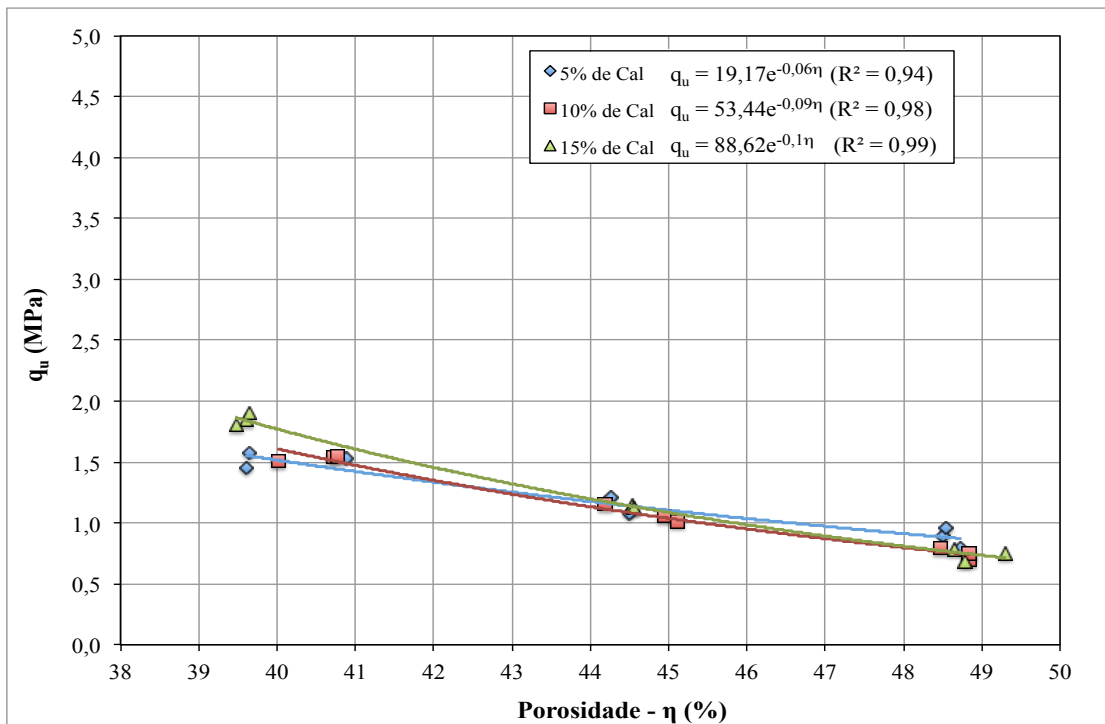


Figura 40 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante não moída curadas a 23°C

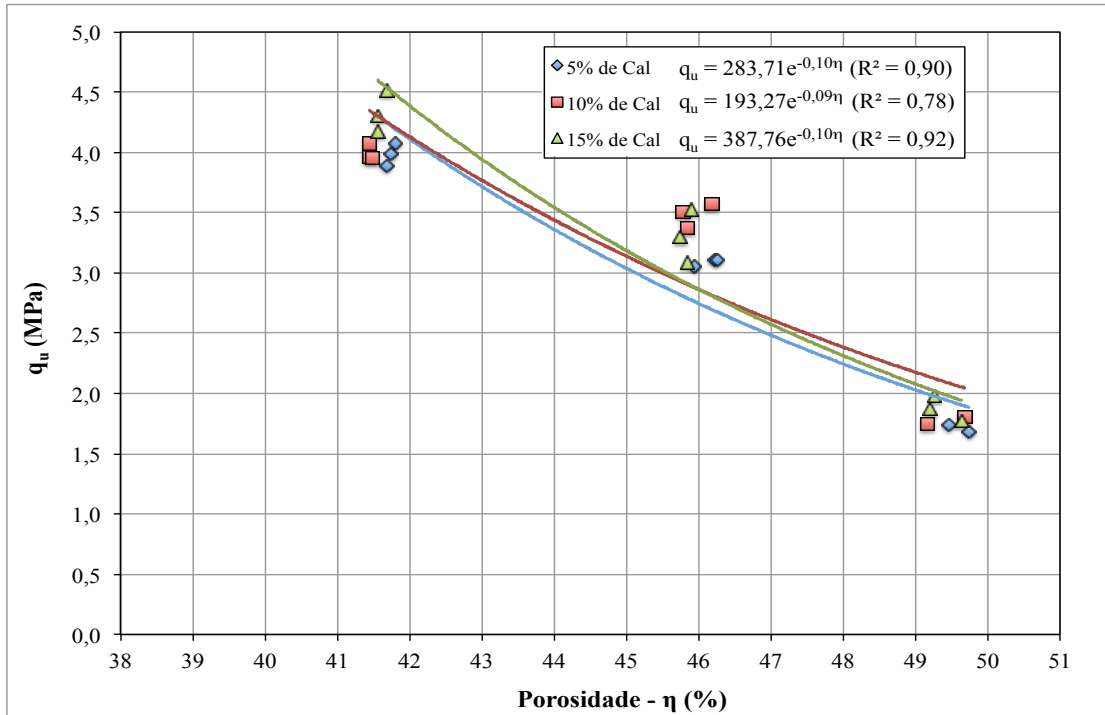


Figura 41 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante moída 2h curadas a 23°C

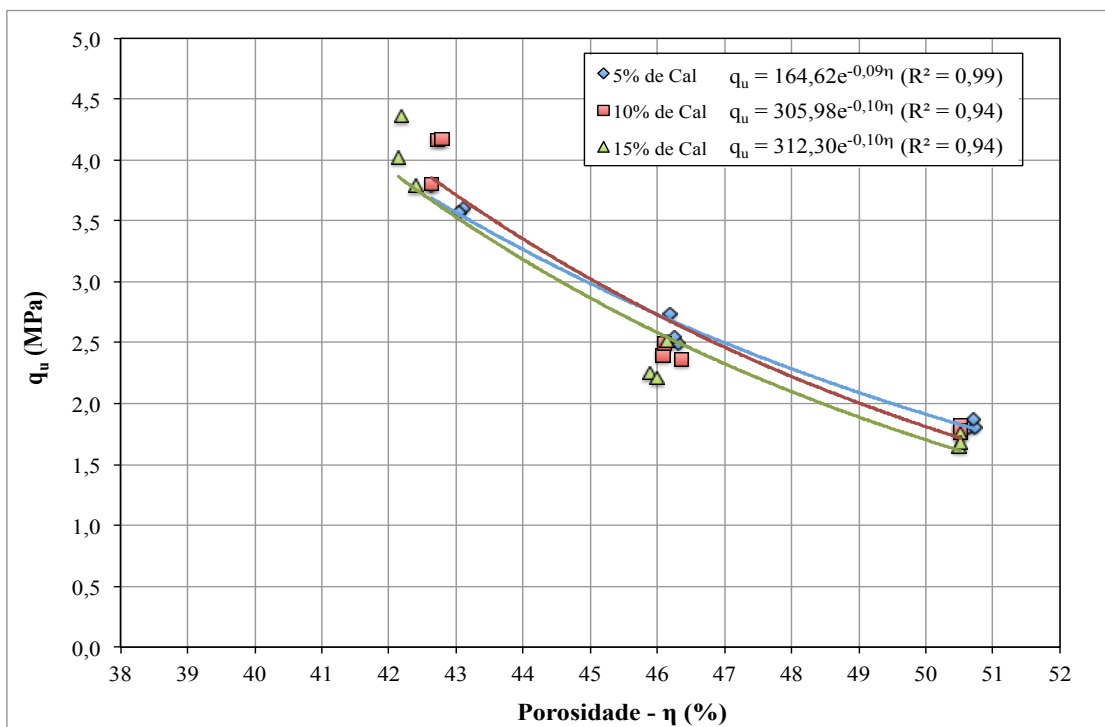


Figura 42 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante moída 6h curadas a 23°C

4.1.2 Amostras curadas a 40°C

São apresentados nas figuras 43 a 48 os resultados elaborados através dos dados apresentados nas tabelas B4 a B6, possibilitando a observação de aspectos importantes do comportamento de misturas cinza-cal realizadas nesta pesquisa para 40°C. É importante ressaltar que os resultados apresentados são para um teor de umidade de 18% e tempo de cura de 7 dias, parâmetros que foram mantidos constantes no trabalho.

Nas figuras 43 a 45 apresentam-se as relações obtidas pela variação da resistência à compressão simples (q_u) frente a variação do teor de cal utilizado nos corpos de prova realizados com cinza volante não moída, moída 2h e 6h.

Nestas figuras foi adotada uma tendência linear entre os diferentes teores de cal para um mesmo peso específico aparente seco, seguido as tendências sugeridas pela bibliografia. Para esta temperatura, o aumento do teor de cal proporcionou um ganho de resistência da mistura para o tempo de cura de 7 dias. Os valores médios de resistência por combinação de mistura em função do teor de cal, bem como a taxa de variação de resistência média apresentados pelos dados são expostos na Tabela 15.

Tabela 15 – Resistência à compressão simples (q_u) média e variação de resistência para variação de cal para cura a 40°C

Moagem	Peso Específico (kN/m ³)	q_u - 5% de cal (MPa)	Variação de Resistência	q_u - 10% de cal (MPa)	Variação de Resistência	q_u - 15% de cal (MPa)
Não Moída	11	3,16	31%	4,14	-2%	4,07
	12	5,03	11%	5,60	3%	5,76
	13	5,53	20%	6,61	4%	6,86
Moída 2h	11	3,71	17%	4,35	19%	5,17
	12	5,33	19%	6,36	2%	6,51
	13	8,19	10%	9,04	10%	9,95
Moída 6h	11	3,97	45%	5,77	8%	6,22
	12	6,12	10%	6,73	16%	7,78
	13	7,75	25%	9,66	10%	10,62
		Média	21%	Média	8%	

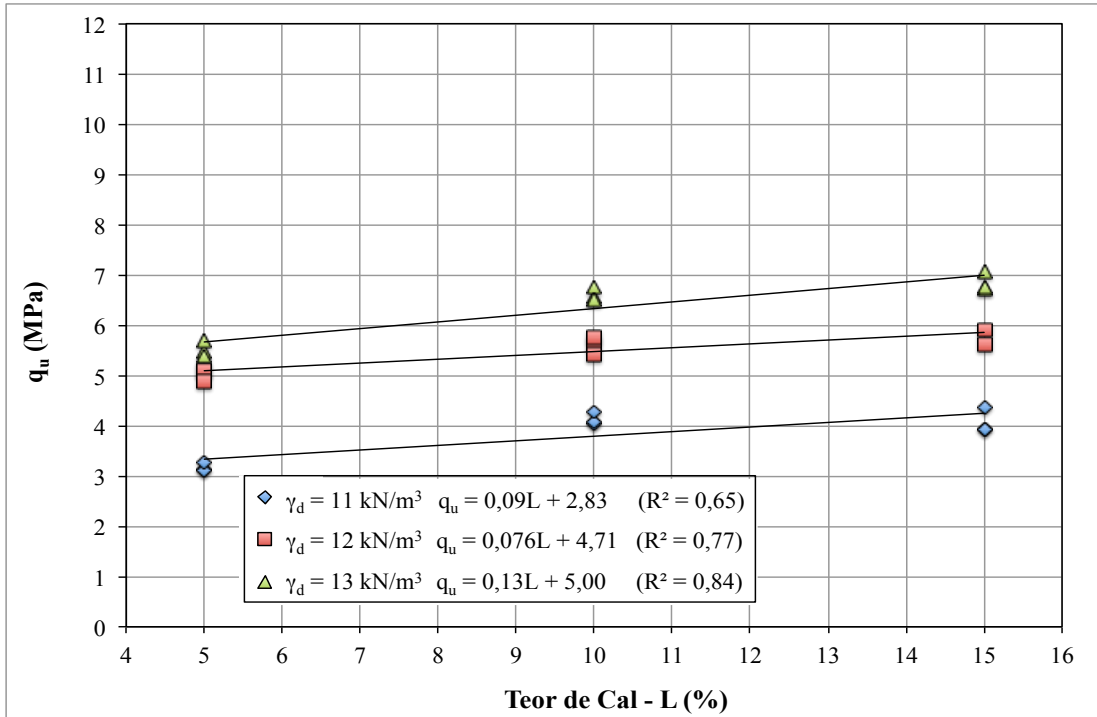


Figura 43 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante não moída curadas a 40°C

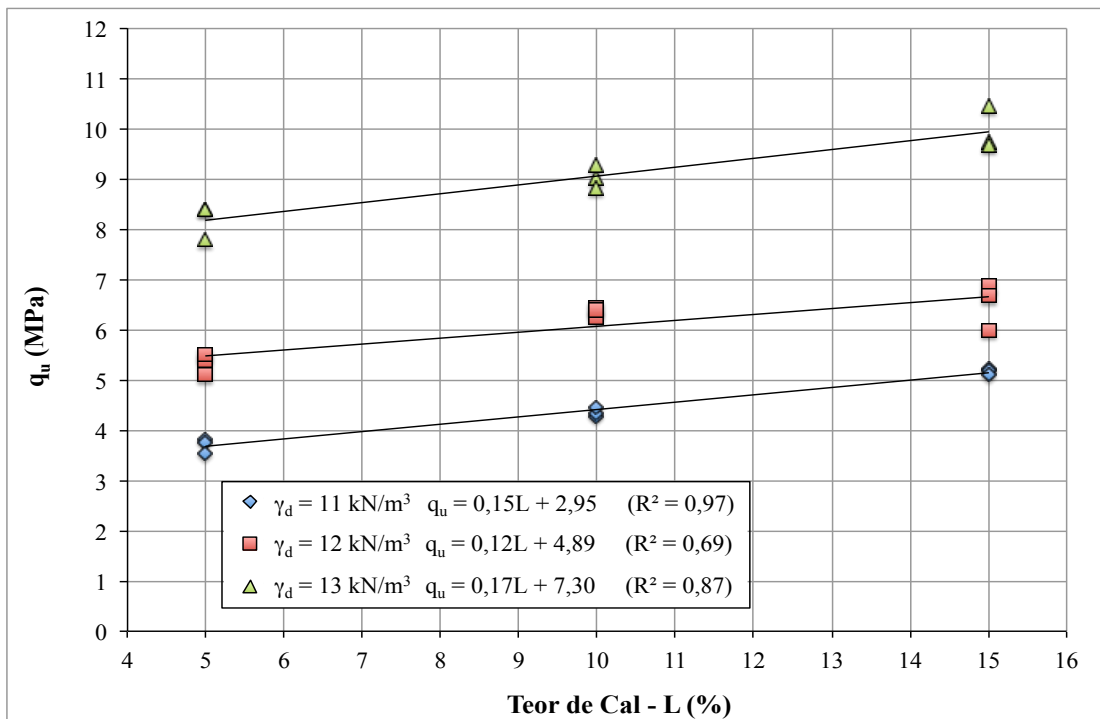


Figura 44 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante moída 2h curadas a 40°C

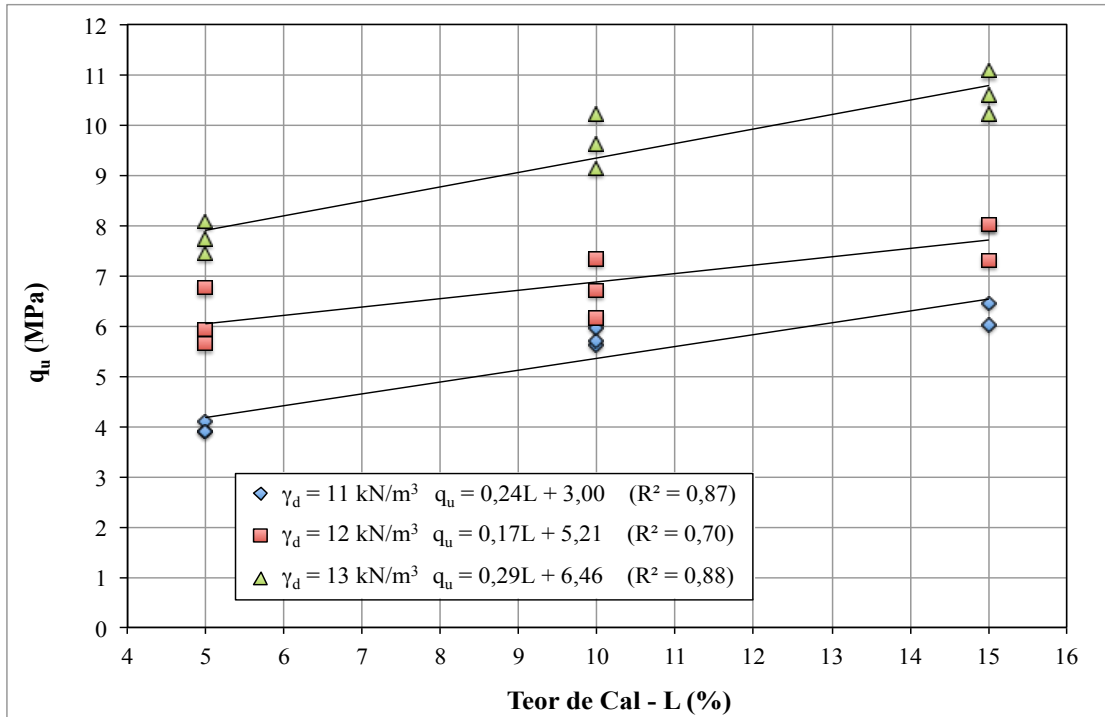


Figura 45 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante moída 6h curadas a 40°C

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a resistência à compressão simples das misturas, independentemente do tempo de moagem da cinza, amostras curadas a 40°C apresentam um ganho de resistência com aumento do teor de cal para todos os pesos específicos aparentes secos. Variando-se o teor de cal de 5 para 15%, a resistência à compressão simples aumentou em média 22%, 28% e 40% para cinza não moída, moída 2h e moída 6h, respectivamente. Também destaca-se que a taxa de crescimento da resistência para a maioria das tendências apresentadas foi maior entre 5 e 10% de cal do que o observado entre 10 e 15%.

Nas figuras 46 a 48 são apresentadas as relações obtidas pela variação da resistência à compressão simples em função da porosidade dos corpos de prova realizados com cinza volante não moída, moída 2h e 6h. Cada curva de tendência apresentada possui o mesmo teor de cal.

Similarmente ao observado pelo acréscimo da quantidade de cal da mistura, a porosidade da mistura compactada proporciona o ganho de resistência à compressão simples do material. Independentemente do teor de cal, a redução da porosidade promove ganhos de resistência.

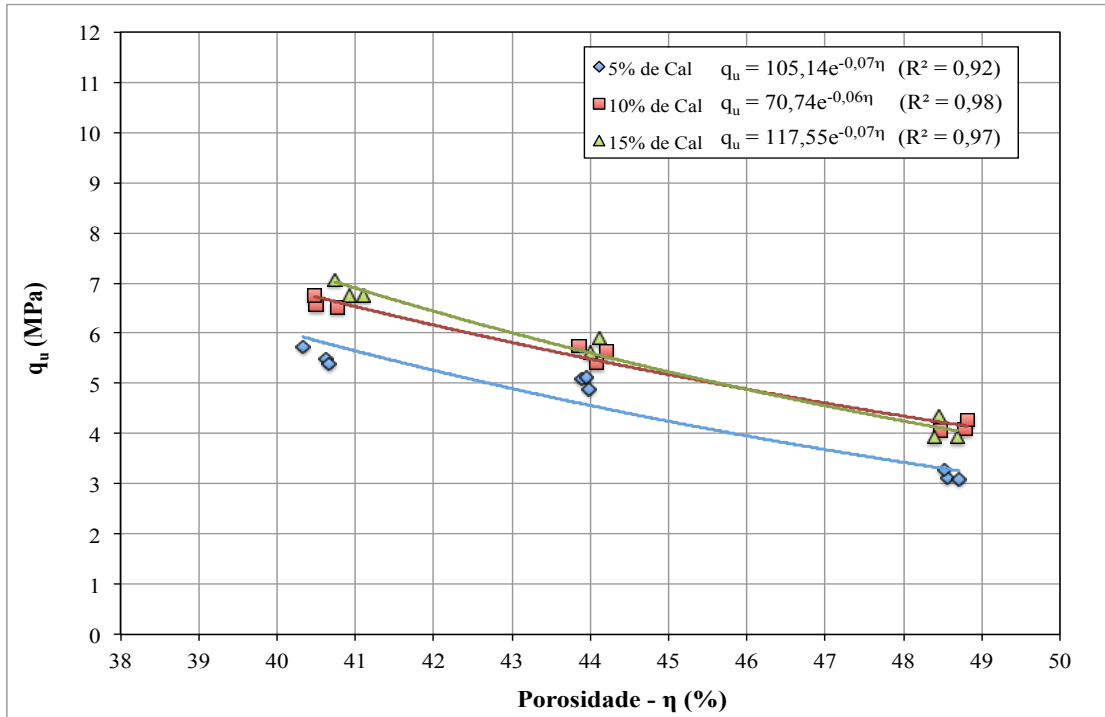


Figura 46 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante não moída curadas a 40°C

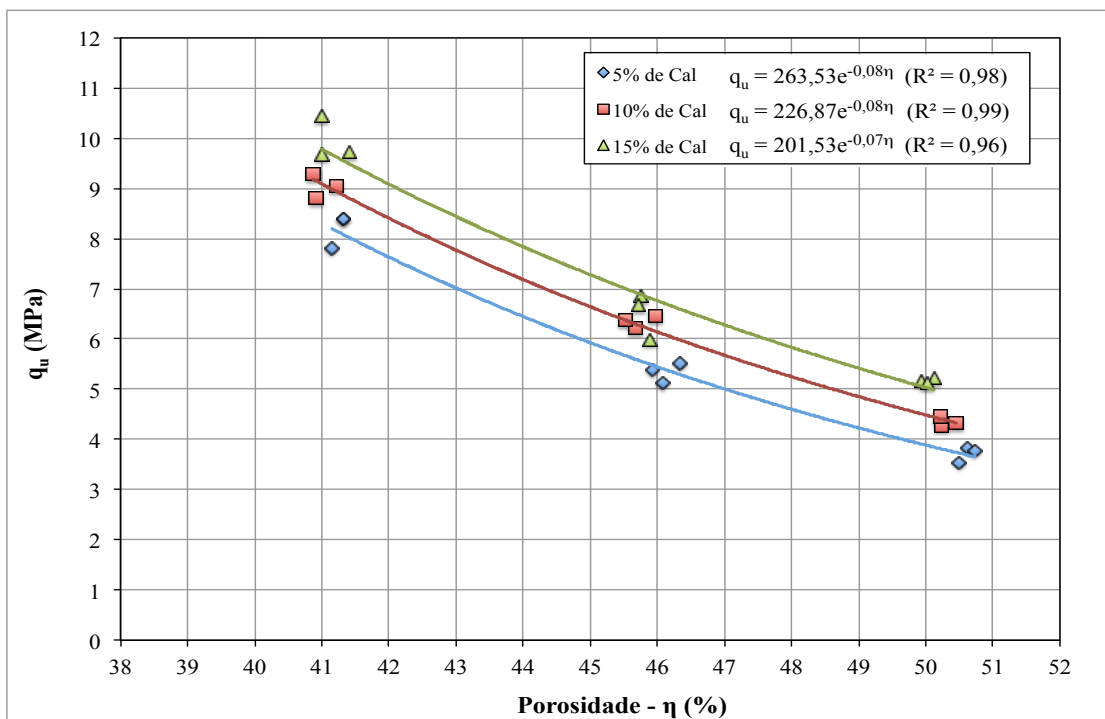


Figura 47 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante moída 2h curadas a 40°C

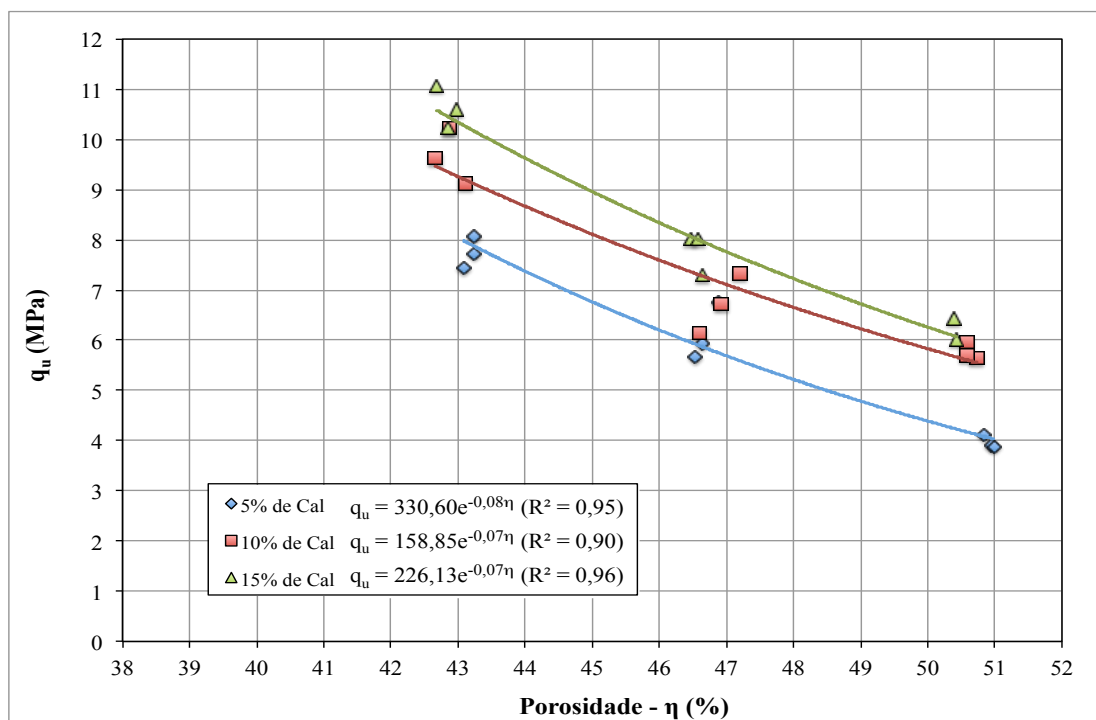


Figura 48 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante moída 6h curadas a 40°C

É possível observar uma relação exponencial entre resistência à compressão simples e a porosidade da mistura, assim sendo, a resistência aumenta exponencialmente com a redução da porosidade. Em média, a redução de 9 pontos percentuais na porosidade do material compactado proporcionou um ganho de 1,7, 2,1 e 1,8 vezes na resistência à compressão simples da mistura cinza-cal para cinza não moída, moída 2h e moída 6h, respectivamente.

4.1.3 Amostras curadas a 60°C

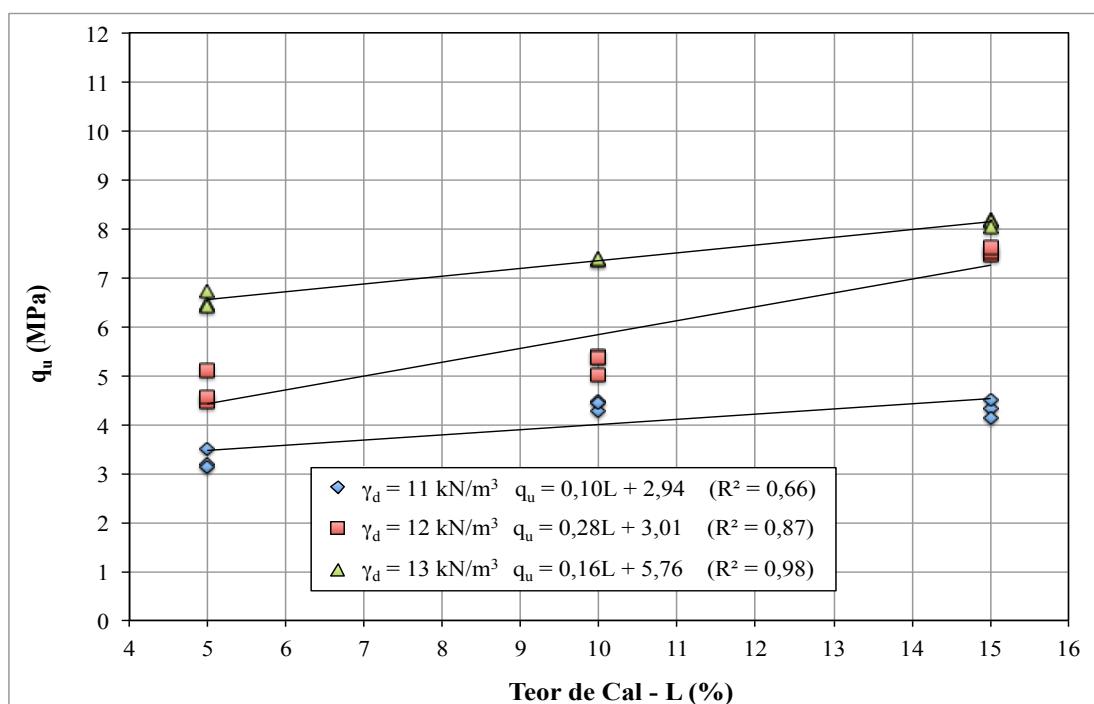
Os resultados elaborados através dos dados apresentados nas tabelas B7 e B8 são apresentados nas figuras 49 a 52, possibilitando a observação de aspectos importantes do comportamento de misturas cinza-cal de carbureto realizadas nesta pesquisa para 60°C. É importante ressaltar que os resultados apresentados são para um teor de umidade de 18% e tempo de cura de 7 dias, parâmetros que foram mantidos constantes.

Nas figuras 49 e 50 apresentam-se as relações obtidas pela variação da resistência à compressão simples (q_u) frente a variação do teor de cal utilizado nos corpos de prova realizados com cinza volante não moída e moída 6h. Cada tendência observada possui o mesmo peso específico aparente seco.

Através destas figuras, adotou-se uma relação linear entre os diferentes teores de cal para uma mesmo peso específico aparente seco. Para a temperatura de 60°C, o aumento do teor de cal gerou um ganho de resistência da mistura para o tempo de cura de 7 dias. Os valores médios de resistência por combinação de mistura em função do teor de cal, bem como a taxa de variação de resistência média entre os teores de cal apresentados pelos dados são expostos na Tabela 16.

Tabela 16 – Resistência à compressão simples (q_u) média e variação de resistência para variação de cal para cura a 60°C

Moagem	Peso Específico (kN/m ³)	q_u - 5% de cal (MPa)	Variação de Resistência	q_u - 10% de cal (MPa)	Variação de Resistência	q_u - 15% de cal (MPa)
Não Moída	11	3,27	35%	4,40	-2%	4,33
	12	4,72	11%	5,26	43%	7,54
	13	6,54	13%	7,38	10%	8,13
Moída 6h	11	4,26	6%	4,50	3%	4,64
	12	4,62	34%	6,21	12%	6,96
	13	6,80	17%	7,98	23%	9,83
		Média	19%	Média	15%	



Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a resistência à compressão simples das misturas, independentemente do tipo de moagem da cinza, amostras curadas a 60°C apresentam um ganho de resistência com aumento do teor de cal para todos os pesos específicos aparentes secos. Variando-se o teor de cal de 5 para 15%, a resistência à compressão simples aumentou em média 39% e 35% para cinza não moída e moída 6h, respectivamente.

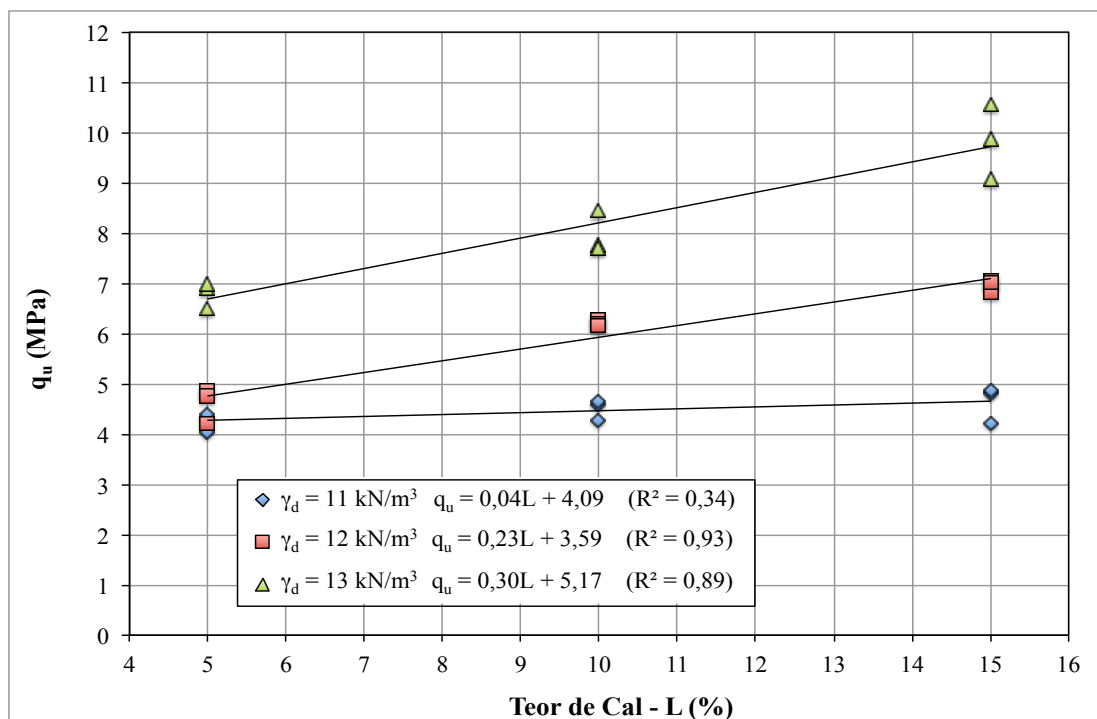


Figura 50 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante moída 6h curadas a 60°C

Nas figuras 51 e 52 são apresentadas as relações obtidas pela variação da resistência à compressão simples em função da porosidade dos corpos de prova realizados com cinza volante não moída e 6h. Cada curva de tendência apresentada possui o mesmo teor de cal.

Bem como o a tendência observada pelo acréscimo da quantidade de cal da mistura, a porosidade da mistura compactada proporciona o ganho de resistência à compressão simples do material. Independentemente do teor de cal, a redução da porosidade promove ganhos significativos de resistência.

É possível observar uma relação exponencial entre resistência à compressão simples e a porosidade da mistura, assim sendo, a resistência aumenta exponencialmente com a redução da porosidade. Em média, a redução de 9 pontos percentuais na porosidade do material

compactado proporcionou um ganho de 1,85 e 1,83 vezes na resistência à compressão simples da mistura cinza-cal para cinza não moída e moída 6h, respectivamente.

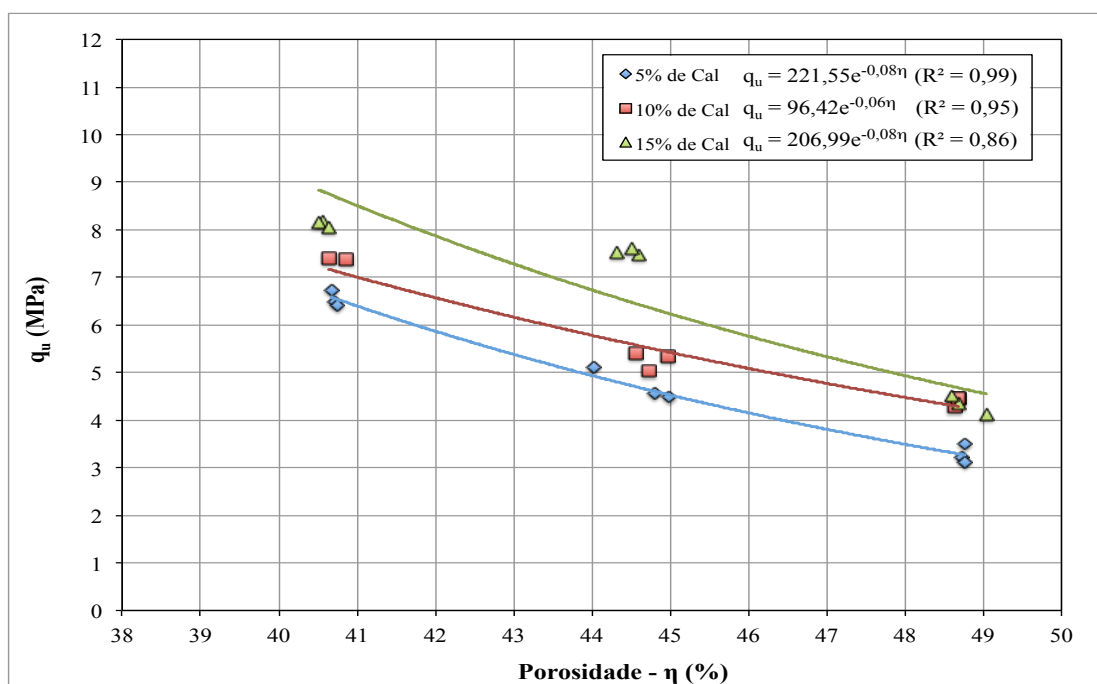


Figura 51 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante não moída curadas a 60°C

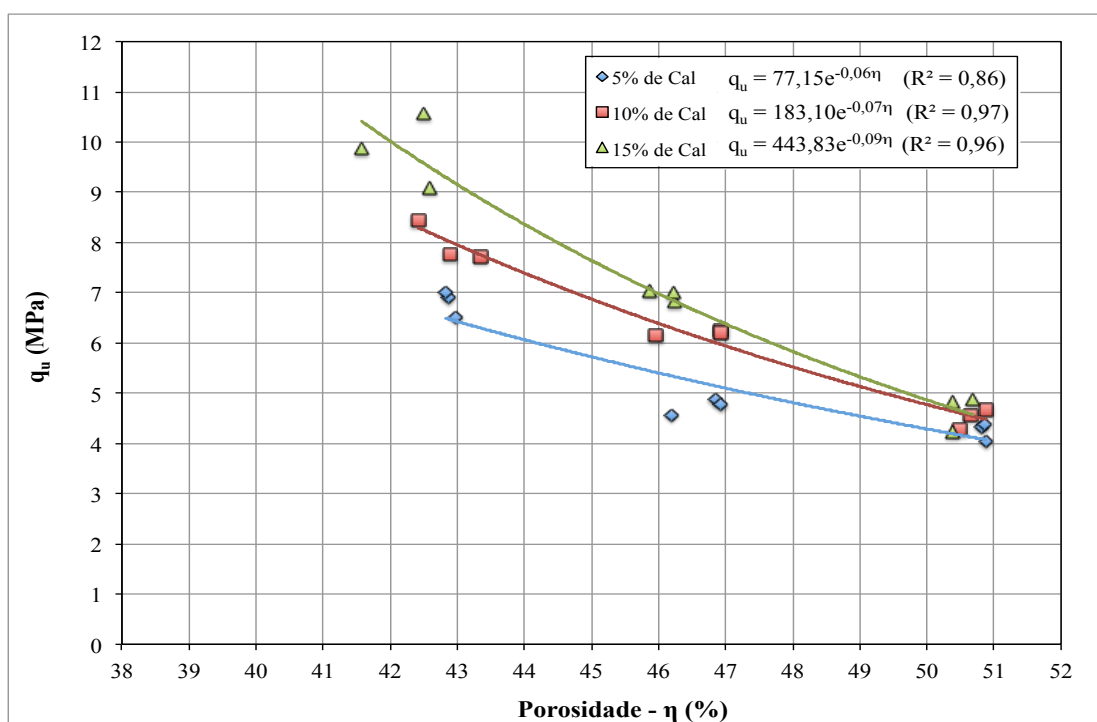


Figura 52 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de cinza volante moída 6h curadas a 60°C

4.1.4 Modo de ruptura dos corpos de prova

O modo de ruptura dos corpos de prova de cinza volante-cal de carbureto submetidos ao ensaio de compressão simples é mostrado na Figura 53. A maioria dos ensaios de compressão simples apresentaram um modo de ruptura frágil, sendo possível observar-se a formação de dois cones, um na parte inferior e outro na parte superior do corpo de prova. A ruptura se tornou mais frágil com o aumento da temperatura de cura e com o aumento do peso específico aparente seco, em alguns casos, o corpo de prova se fragmentou na ruptura. O ângulo entre o plano de atuação da tensão principal e o plano de ruptura foi de aproximadamente 60° , comportamento que também foi verificado por Dalla Rosa (2009) e Silvani (2013).

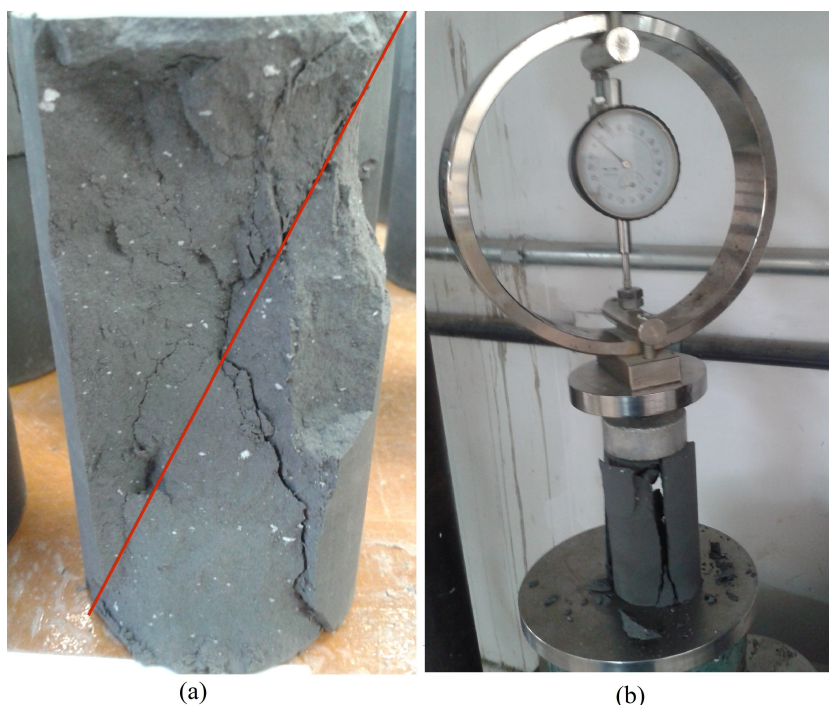


Figura 53 – Modo de ruptura dos corpos de prova (a) plano de ruptura
(b) fragmentação do corpo de prova

4.2 MEDIDAS DE SUCÇÃO MATRICIAL

Foi realizada a medição da sucção matricial de 10 corpos de prova escolhidos aleatoriamente durante a realização dos ensaios de compressão simples. O método adotado para a medição da sucção foi descrito no item 3.5.4 do programa experimental. Na Tabela 17 são apresentados os resultados das medidas de sucção matricial feitas sobre os materiais estudados.

Verificou-se na Tabela 17 que saturação inicial (S) apresentou uma saturação média de 58,39%. Após submeter os corpos de prova a imersão por 24 horas, a fim de obter-se uma homogeneização na saturação, alcançou-se uma saturação final (S_f) maior do que 77% para todos os corpos de prova ensaiados e, a diferença entre os valores de S_f máximo e mínimo diminuiu, chegando a 7,4 pontos percentuais.

Através destes resultados, o processo de imersão dos corpos de prova mostrou-se satisfatório para o aumento e uniformização do grau de saturação das amostras, possibilitando atenuação da interferência da sucção na resistência à compressão simples. Em média, a sucção mátrica representou 2% da resistência à compressão simples dos corpos de prova ensaiados, chegando ao máximo em 3% de q_u . Assim, a sucção pode ser desconsiderada como uma variável nas análises investigadas. Resultados estes corroborados por outros autores (FOPPA, 2005; LOPES JUNIOR, 2007; DALLA ROSA, 2009) que também 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.

Tabela 17 – Tabela de resultados do ensaio de sucção

	ω	ω_f	S	S_f	Sucção (kPa)	q_u (MPa)	$q_u/sucção$ (%)
D1-3-15 - 13 kN/m ³ - 15% Cal - 23°C - CV 2h	18,08	22,78	66,00	83,17	105,72	4,31	2
C1-2-5 - 12 kN/m ³ - 5% Cal - 60°C - CV 0h	17,91	24,80	58,19	80,57	62,87	5,10	1
A2-2-10 - 12 kN/m ³ - 10% Cal - 23°C - CV 6h	18,14	26,53	55,93	81,79	46,08	2,36	2
A2-3-10 - 13 kN/m ³ - 10% Cal - 23°C - CV 6h	18,12	23,22	64,70	82,92	56,97	4,17	1
D2-2-10 - 12 kN/m ³ - 10% Cal - 40°C - CV 2h	17,77	25,96	54,81	80,06	100,23	6,24	2
C2-2-5 - 12 kN/m ³ - 5% Cal - 60°C - CV 6h	18,1	24,73	56,32	76,96	72,68	4,21	2
B1-1-5 - 11 kN/m ³ - 5% Cal - 40°C - CV 0h	17,92	29,39	48,49	79,55	13,68	3,12	0
B2-2-15 - 12 kN/m ³ - 15% Cal - 40°C - CV 6h	18,31	25,35	56,12	77,72	244,72	8,02	3
D2-3-10 - 13 kN/m ³ - 10% Cal - 40°C - CV 2h	18,09	21,58	67,05	80,03	178,41	9,03	2
A1-2-15 - 12 kN/m ³ - 15% Cal - 23°C - CV 0h	17,54	24,08	56,29	77,29	30,42	1,21	3

Onde:

S = grau de saturação de moldagem;

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

ω = teor de umidade de moldagem;

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

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as análises pertinentes quanto aos resultados obtidos pelos ensaios de compressão simples realizados nesta pesquisa, os quais foram apresentados no capítulo 4. Primeiramente, são analisados os seguintes aspectos: efeito do teor de cal; efeito da porosidade; efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal. Então, será analisado o efeito da temperatura de cura da cinza volante na mistura cinza-cal compactada e o efeito da moagem do material. Ao final, é apresentada uma comparação com os resultados na bibliografia e por fim, é realizada a análise da variância dos resultados

5.1 EFEITO DO TEOR DE CAL

Através dos resultados apresentados nas figuras 37, 38 e 39, tem-se que, para as misturas curadas a uma temperatura controlada de 23°C sem cura a vapor por 7 dias com umidade de 18%, a resistência à compressão simples das misturas não cresce com o aumento da quantidade de cal adicionada à mistura. Através da Tabela 14, observa-se que, em média, o incremento de resistência é nulo quando se aumenta o teor de cal de 5% para 10% e de 3%, de 10% para 15%. Isto se dá, muito provavelmente, porque todos os corpos de prova foram curados por 7 dias e, as reações pozolânicas entre os aluminatos e silicatos da cinza volante e a cal de carbureto, que são conhecidas como reações lentas, não tiveram tempo suficiente para proporcionar ganhos significativos de resistência com o aumento da quantidade de cal na mistura para esta temperatura. Tal efeito foi observado por Rojas e Cabrera (2002) para uma mistura de solo-cal, onde a quantidade de cal consumida pelas reações pozolânicas em temperatura ambiente com 7 dias de cura é de, aproximadamente, 15% da cal disponível na mistura, já a 60°C, o valor de cal consumida sobe para aproximadamente 80%.

Contudo, observa-se consistentemente um aumento de resistência com o aumento do peso específico aparente seco da mistura. Em média, o ganho de resistência foi de 120% com o aumento do γ_d de 11 kN/m³ para 13 kN/m³. Este fenômeno pode ocorrer devido à maior proximidade das partículas nos corpos de prova com menor porosidade, o que proporciona uma maior quantidade de pontos de contato entre a cinza volante e a cal de carbureto, gerando uma maior quantidade de pontos de cimentação da mistura. A mesma tendência foi observada por diversos autores, como Clough *et al.* (1981), Núñez (1991), Mallmann (1997), Lopes Junior (2007), Dalla Rosa (2009) e Saldanha (2014).

Em relação à moagem da cinza volante, houve um acréscimo médio de 158% na resistência entre a cinza não moída e a moída por 2h. Já para 6h de moagem, a resistência apresentou uma queda média de 10% em relação à moída 2h. O fenômeno de acréscimo de resistência através da moagem pode ocorrer devido à quebra das plerosferas da cinza volante, o que proporciona um aumento de sílica e alumina disponíveis, levando ao aumento do número de possíveis reações entre a superfície da cinza volante e a cal. Como visto a superfície específica aumentou com o processo de moagem em 51% para a cinza moída 2h e 81% para a cinza moída 6h em relação a não moída, como pode ser observado na Tabela 12. Porém, a queda de resistência entre a cinza moída 2h e a moída 6h pode ter ocorrido por um leve aumento da água necessária para que ocorra o desenvolvimento de resistência da mistura, devido ao aumento de partículas irregulares com o aumento do tempo de moagem, estes fenômenos também foram observados por Bouzoubaâ *et al.* (1997). A queda de resistência entre a cinza moída 2h e a moída 6h pode ter sido exacerbada pelo pouco desenvolvimento de resistência dos géis (formação de cristais) provenientes das reações pozolânicas nesta temperatura e tempo de cura.

Nas figuras 43, 44 e 45, estão apresentados os resultados obtidos pelos corpos de prova curados com temperatura controlada de 40°C com cura a vapor, umidade de 18% e tempo de cura de 7 dias. Através destes gráficos e dos dados apresentados na Tabela 15 observa-se, diferentemente do ocorrido com as misturas curadas a 23°C, o aumento do teor de cal implicou em um ganho de resistência médio de 21% entre 5% e 10% e, de 8% entre 10 e 15%, implicando que, o aumento da temperatura proporcionou uma aceleração no desenvolvimento das reações pozolânicas, conforme mencionado anteriormente. A diminuição do incremento da resistência entre 10 e 15% de cal em relação ao apresentado entre 5 e 10% pode apontar, para esta temperatura e tempo de cura, o começo da zona inerte definida por Horpibulsuk *et al.* (2012).

Similarmente ao observado nos corpos de prova curados a 23°C, a resistência da mistura aumentou com o aumento do peso específico aparente seco. O incremento de resistência foi, em média de 84% com o aumento do γ_d de 11 kN/m³ para 13 kN/m³. Tal resultado corrobora a hipótese apresentada pelos outros autores citados anteriormente, de que o aumento do peso específico aumenta o número de contatos entre a cinza e a cal de carbureto, aumentando assim, os pontos de cimentação da mistura.

Em relação à moagem da cinza volante, houve um acréscimo médio de 23% na resistência entre a cinza não moída e a moída por 2h. Já para 6h de moagem, a resistência apresentou um incremento de 16% em relação à moída 2h. Como já discutido para a temperatura de cura de 23°C, o acréscimo de resistência através da moagem pode acontecer devido ao aumento do número de pontos de contato entre a superfície da cinza volante e a cal, já que, a superfície específica aumentou significativamente com o processo de moagem, e a quebra das plerosferas da cinza volante, proporciona um aumento de sílica e alumina disponíveis na superfície da cinza para interação com a cal de carbureto (este fenômeno será melhor analisado no item 5.5). Porém, diferentemente do apresentado para 23°C, a taxa de crescimento da resistência foi bem menor entre os diferentes tempos de moagem, tal fato pode ser explicado pelo aumento da ocorrência de reações pozolânicas influenciadas pelo aumento da temperatura de cura das misturas, o que proporcionou um ganho de resistência bem mais expressivo que o obtido pela cura à temperatura ambiente, contribuindo com a influência do tempo de moagem na resistência final apresentada.

Nas figuras 49 e 50, estão apresentados os resultados obtidos pelos corpos de prova curados com temperatura controlada de 60°C com cura a vapor, umidade de 18% e tempo de cura de 7 dias. Através destes gráficos e dos dados apresentados na Tabela 16 observa-se, similarmente ao observado com as misturas curadas a 40°C, que o aumento do teor de cal proporcionou uma aumento da resistência das misturas (ganho de resistência médio de 19% entre 5% e 10% e, de 15% entre 10 e 15%), implicando que, o aumento da temperatura proporcionou uma aceleração no desenvolvimento das reações pozolânicas, conforme mencionado anteriormente. Novamente, houve uma diminuição do incremento da resistência entre 10 e 15% de cal em relação ao apresentado entre 5 e 10%, o que indica que, para esta temperatura e tempo de cura, pode-se estar aproximando a zona inerte definida por Horpibulsuk *et al.* (2012).

Similarmente ao observado nos corpos de prova curados a 23°C e 40°C, a resistência da mistura aumentou com o aumento do peso específico aparente seco. O incremento de resistência foi, em média de 84% (mesma que a 40°C) com o aumento do γ_d de 11 kN/m³ para 13 kN/m³. Tal resultado corrobora a hipótese de que tem-se um aumento no número de reações pozolânicas e, que estes por sua vez, podem proporcionar um ganho de resistência da mistura., já que, o aumento do peso específico aumenta o número de contatos entre a cinza e a cal de carbureto.

Em relação à moagem da cinza volante, houve um acréscimo médio de 8% na resistência entre a cinza não moída e a moída por 6h. Como já discutido para a temperatura de cura de 23°C e 40°C, o acréscimo de resistência através da moagem pode acontecer devido ao aumento do número de pontos de contato entre a superfície da cinza volante e a cal, já que, a superfície específica aumentou significativamente com o processo de moagem, e a quebra das plerosferas da cinza volante, proporciona um aumento de sílica e alumina disponíveis para interação com a cal de carbureto. Porém, provavelmente, para esta temperatura, o efeito do aumento da necessidade de água devido à quebra excessiva das partículas, parece ter afetado mais o desenvolvimento da resistência da mistura do que para 40°C. A taxa de crescimento da resistência devida à moagem da cinza para 60°C foi 5,2 vezes menor do que os resultados obtidos para 40°C e, 16 vezes menor a obtida com a cura a 23°C. Tal fato também pode ser explicado pelo aumento da ocorrência de reações pozolânicas influenciadas pelo aumento da temperatura de cura das misturas em menor tempo, o que proporcionou um ganho de resistência bem mais expressivo que o obtido pela cura à temperatura ambiente, diminuindo a influência do tempo de moagem na resistência final apresentada.

O aumento da influência da temperatura no desenvolvimento de resistência do material pode ser observado pelo aumento da taxa de crescimento da resistência (inclinação da reta) com o aumento da temperatura. Por exemplo, a inclinação da reta para a cinza moída por 6h com um γ_d de 13 kN/m³ foi de aproximadamente zero (0,04L) para a temperatura de cura de 23°C (Figura 39), para 0,29L para temperatura de 40°C (Figura 45) e, para 0,30L para 60°C (Figura 50). Já para cinza não moída com o mesmo γ_d , as taxas apresentadas foram de aproximadamente zero (0,03L) para a temperatura de cura de 23°C (Figura 39), para 0,13L para temperatura de 40°C (Figura 45) e então, para 0,16L para 60°C (Figura 50). A variação da inclinação da reta aponta a potencialização da resistência das misturas devido ao aumento da temperatura de cura, contudo, esta influência não é tão expressiva entre 40°C e 60°C quanto entre 23°C e 40°C.

Quanto a moagem da cinza volante, pode-se observar aumento da influência deste processo para as diferentes temperaturas de cura, principalmente para os corpos de prova curados a 40°C. A taxa de crescimento da resistência (inclinação da reta) com o aumento da moagem para o maior valor do peso específico aparente seco, 13 kN/m³ foi: para temperatura de 23°C, de 0,03L, 0,035L e 0,04L pra cinza não moída, moída 2h e moída 6h, respectivamente; para

temperatura de 40°C de 0,13L, 0,17L e 0,29L pra cinza não moída, moída 2h e moída 6h, respectivamente e, para temperatura de 60°C de 0,16L e 0,30L pra cinza não moída e moída 6h, respectivamente. A variação da inclinação da reta aponta a potencialização da resistência das misturas devido ao aumento do tempo de moagem, contudo, esta influência não é tão expressiva para 23°C, provavelmente, pelo fato das reações pozolâncias ocorrerem lentamente em temperatura ambiente quando o agente cimentante é a cal. Contudo, apesar desta aparente potencialização da resistência para estes casos, com o aumento do tempo de moagem, vale ressaltar que q_u não apresentou ganhos expressivos de resistência com a moagem da cinza volante para a temperatura de cura de 60°C.

Foi analisado os valores médios de q_u obtidos pelas misturas realizadas na pesquisa – apresentados nas tabelas 14, 15 e 16 – e, estes foram comparados ao valor mínimo de resistência à compressão simples estipulado para misturas solo-cimento pela NBR 12253 (1992) de 2,1 MPa aos 7 dias de cura, já que não há uma norma específica de dosagem de misturas de cinza volante com cal. Observou-se que para as misturas curadas a 23°C, os corpos de prova de cinza não moída, não atingem o valor mínimo estabelecido; para as amostras de cinza moída por 2h e moída por 6h, foram superados os valores de q_u para as misturas com γ_d de 12 e 13 kN/m³. Para os corpos de prova curados a 40°C e 60°C este valor mínimos é facilmente superado para todos os tempos de moagem estudados, chegando a valores médios de 5,2 MPa e 5,97 MPa, respectivamente.

5.2 EFEITO DA POROSIDADE

De acordo com os dados apresentados nas figuras 40, 41, 42, 46, 47, 48, 51, 52, foi possível observar o impacto da porosidade na resistência a compressão simples da mistura cinza-cal para as temperaturas de 23°C e 40°C com os tempos de moagem da cinza de 0h, 2h e 6h e, para a temperatura de 60°C para os tempos de moagem de 0h e 6h. Conforme visto na apresentação de resultados, independentemente da quantidade de cal, tempo de moagem ou temperatura de cura, a redução da porosidade da mistura promoveu ganhos de resistência da mesma. Também verificou-se que a resistência à compressão simples teve um aumento exponencial com a redução da porosidade. Este efeito também foi observado por diversos autores, como Lopes Junior (2007), Dalla Rosa (2009), Silvani (2013) e Saldanha (2014).

Tal efeito de ganho de resistência foi atribuído por Mallmann (1997) e também por Lopes Junior (2007) à existência de um maior número de contatos de entre as partículas da mistura. Este maior número de contatos acarreta: uma cimentação mais efetiva, uma maior capacidade de distribuição de tensões dentro da matriz e, uma maior capacidade de mobilização do atrito para as menores porosidades.

Entretanto, deve-se levar em consideração na análise do efeito da porosidade o aumento do teor volumétrico de cal (volume de cal dividido pelo volume do corpo de prova) para o mesmo teor de cal. Como a dosagem do teor de agente cimentante das misturas estudadas foi realizada em relação à massa de solo seco, o aumento do peso específico aparente seco leva a um aumento teor volumétrico de cal – não só da quantidade de cinza – para o mesmo teor de cal, em outras palavras, com o aumento do peso específico aparente seco há um maior volume de cal por unidade de volume do corpo de prova. Esta tendência foi observada por Foppa (2005) estudando a validade da utilização do índice porosidade/teor volumétrico de cimento em misturas solo-cimento, por Lopes Junior (2007), que avaliou a validade do mesmo índice tanto para misturas com cimento, quanto para cal e, também, por Dalla Rosa (2009), que também avaliou a validade do índice para misturas de solo-cinza-cal. Nos próximos itens foram analisadas a influência do aumento do teor volumétrico de cal, novamente separados em função da temperatura de cura.

5.2.1 Amostras curadas a 23°C

A Figura 54 apresenta a variação da resistência à compressão simples com o aumento do teor volumétrico de cal para as misturas curadas à 23°C para cinza volante moída 0h (Figura 54 a), 2h (Figura 54 b) e 6h (Figura 54 c). Para estas misturas o aumento médio do teor volumétrico de cal foi de 16,2% para a faixa de variação do γ_d de 11 a 13 kN/m³. Com isso, uma parcela do ganho de resistência creditada à redução da porosidade na verdade é devida ao maior volume de cal presente.

Quando se compara a Figura 54 (a), (b) e (c) com as figuras 37, 38, 39, verifica-se que a resistência à compressão simples varia linearmente com o aumento do teor de cal e, que há uma variação da resistência com o aumento de γ_d da mistura em ambos os casos. Sendo assim, as análises feitas considerando o teor de cal em relação ao peso específico aparente seco do solo continuam válidas quando se considera o teor de cal volumétrico.

Uma vez que a maior proximidade das partículas está associada ao aumento do teor volumétrico de cal, avaliar a parcela de resistência gerada em função do aumento do teor volumétrico de cal em relação a porosidade é complexo. Contudo, se for considerada uma variação linear com o teor volumétrico de cal, calculada a partir da média dos coeficientes de L_V apresentados na Figura 54, obtém-se uma taxa média de 0,012 MPa/(%), 0,019 MPa/(%) e 0,001 MPa/(%) para 0h, 2h e 6h de moagem, respectivamente. Com isto, é possível estimar que a resistência gerada pelo aumento do teor de cal volumétrico corresponderia a aproximadamente 0,98%, 0,55% e 0,02% do ganho de resistência obtida pela redução da porosidade da mistura para 0h, 2h e 6h de moagem, respectivamente. Estes cálculos podem ser encontrados na Tabela 18. Portanto, considera-se que esse pequeno percentual, atribuído ao aumento no teor volumétrico de cal, não invalida as análises realizadas até agora.

Tabela 18 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras curadas a 23°C

Moagem	L (%)	ΔL_V (%)	Δq_u (MPa)	$q_{u \text{ min}}$ (MPa)	$q_{u \text{ max}}$ (MPa)	$\Delta q_{u \text{ total}}$ (MPa)	$\Delta q_u / \Delta q_{u \text{ total}}$ (%)
Não Moída	5	0,42	0,0050	0,80	1,57	0,78	0,64
	10	0,76	0,0092	0,70	1,55	0,85	1,07
	15	1,24	0,0149	0,69	1,90	1,21	1,23
Média							0,98
Moída 2h	5	0,39	0,0073	1,69	4,07	2,38	0,31
	10	0,75	0,0142	1,75	4,08	2,32	0,61
	15	1,05	0,0198	1,77	4,51	2,74	0,72
Média							0,55
Moída 6h	5	0,39	0,0003	1,80	3,79	1,99	0,01
	10	0,75	0,0005	1,77	4,17	2,40	0,02
	15	1,14	0,0007	1,65	4,36	2,71	0,03
Média							0,02

Onde:

ΔL_V = variação do teor volumétrico de cal para um mesmo teor de cal na faixa de variação considerada para o γ_d da mistura (de 11 para 13 kN/m³);

Δq_u = $\Delta L_V \times$ taxa de variação linear da resistência com o teor de cal volumétrico para cada tempo de moagem;

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

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

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

5.2.2 Amostras curadas a 40°C

A Figura 55 apresenta a variação da resistência à compressão simples com o aumento do teor volumétrico de cal para as misturas curadas à 40°C para cinza volante moída 0h (Figura 55 a), 2h (Figura 55 b) e 6h (Figura 55 c). Para estas misturas o aumento médio do teor volumétrico de cal foi de 16,5% para a faixa de variação de γ_d de 11 a 13 kN/m³. Com isso, uma parcela do ganho de resistência creditada à redução da porosidade na verdade é devida ao maior volume de cal presente.

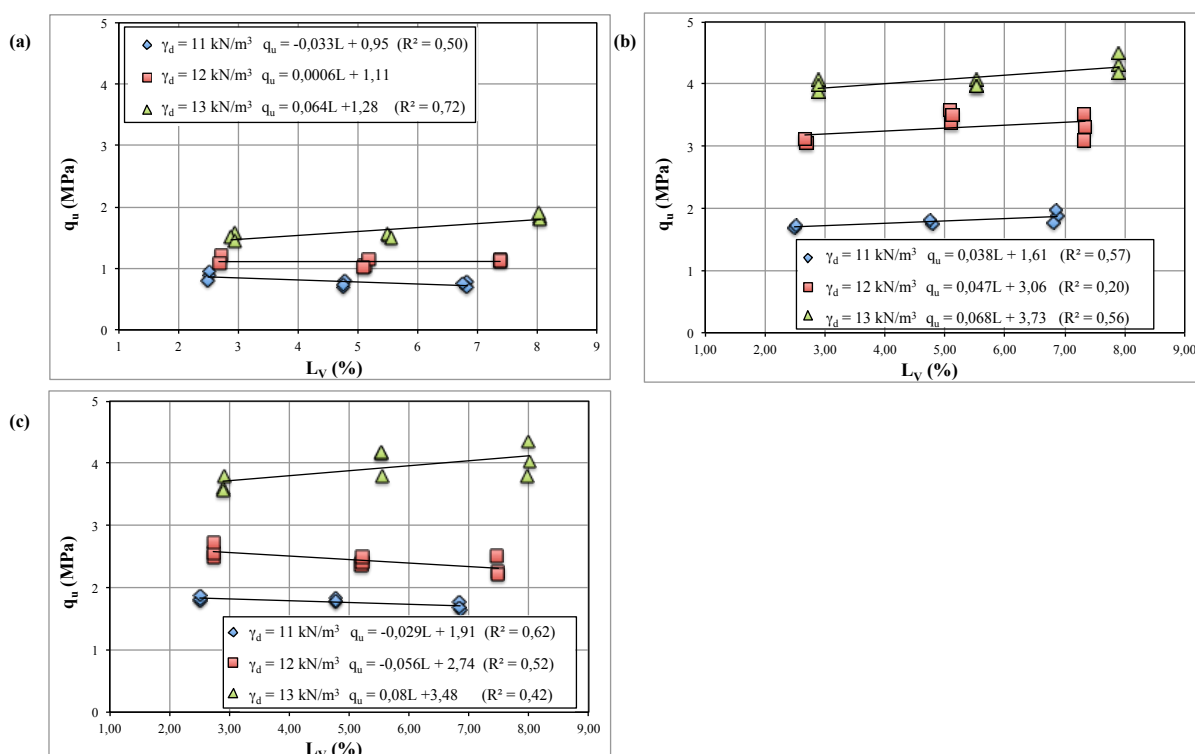


Figura 54 – Efeito do teor volumétrico de cal sobre a resistência à compressão simples das amostras curadas a 23°C com cura à vapor com cinza (a) não moída (b) moída 2h e (c) moída 6h

Quando se compara a Figura 55 (a), (b) e (c) com as figuras 43, 44, 45, verifica-se que a resistência à compressão simples cresce linearmente com o aumento do teor de cal e, que há um crescimento da resistência com o aumento de γ_d da mistura em ambos os casos. Sendo assim, as análises feitas considerando o teor de cal em relação ao peso específico aparente seco do solo continuam válidas quando se considera o teor de cal volumétrico.

Se for considerada uma variação linear com o teor volumétrico de cal, calculada a partir da média dos coeficientes de L_V apresentados na Figura 55, obtém-se uma taxa média de 0,21 MPa/(%), 0,31 MPa/(%) e 0,54 MPa/(%) para 0h, 2h e 6h de moagem, respectivamente. Com isto, é possível estimar que a resistência gerada pelo aumento do teor de cal volumétrico corresponderia a aproximadamente 5,18%, 5,20% e 8,30% do ganho de resistência obtida pela redução da porosidade da mistura para 0h, 2h e 6h de moagem, respectivamente. Estes cálculos podem ser encontrados na Tabela 19. Portanto, considera-se que esse pequeno percentual, atribuído ao aumento no teor volumétrico de cal, não invalida as análises realizadas até agora.

Tabela 19 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras curadas a 40°C

Moagem	L (%)	ΔL_V (%)	Δq_u (MPa)	$q_{u \text{ min}}$ (MPa)	$q_{u \text{ max}}$ (MPa)	$\Delta q_{u \text{ total}}$ (MPa)	$\Delta q_u / \Delta q_{u \text{ total}}$ (%)
Não Moída	5	0,40	0,09	3,10	5,72	2,63	3,10
	10	0,76	0,16	4,06	6,77	2,71	5,75
	15	1,02	0,21	3,94	7,07	3,13	6,68
Média							5,18
Moída 2h	5	0,47	0,15	3,54	8,39	4,86	3,00
	10	0,88	0,28	4,27	9,27	5,00	5,52
	15	1,21	0,38	5,12	10,45	5,33	7,09
Média							5,20
Moída 6h	5	0,04	0,22	3,90	8,08	4,18	5,04
	10	0,75	0,41	5,64	10,23	4,60	8,74
	15	1,05	0,57	6,01	11,07	5,06	11,11
Média							8,30

Onde:

ΔL_V = variação do teor volumétrico de cal para um mesmo teor de cal na faixa de variação considerada para o γ_d da mistura (de 11 para 13 kN/m³);

Δq_u = $\Delta L_V \times$ taxa de variação linear da resistência com o teor de cal volumétrico para cada tempo de moagem;

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

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

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

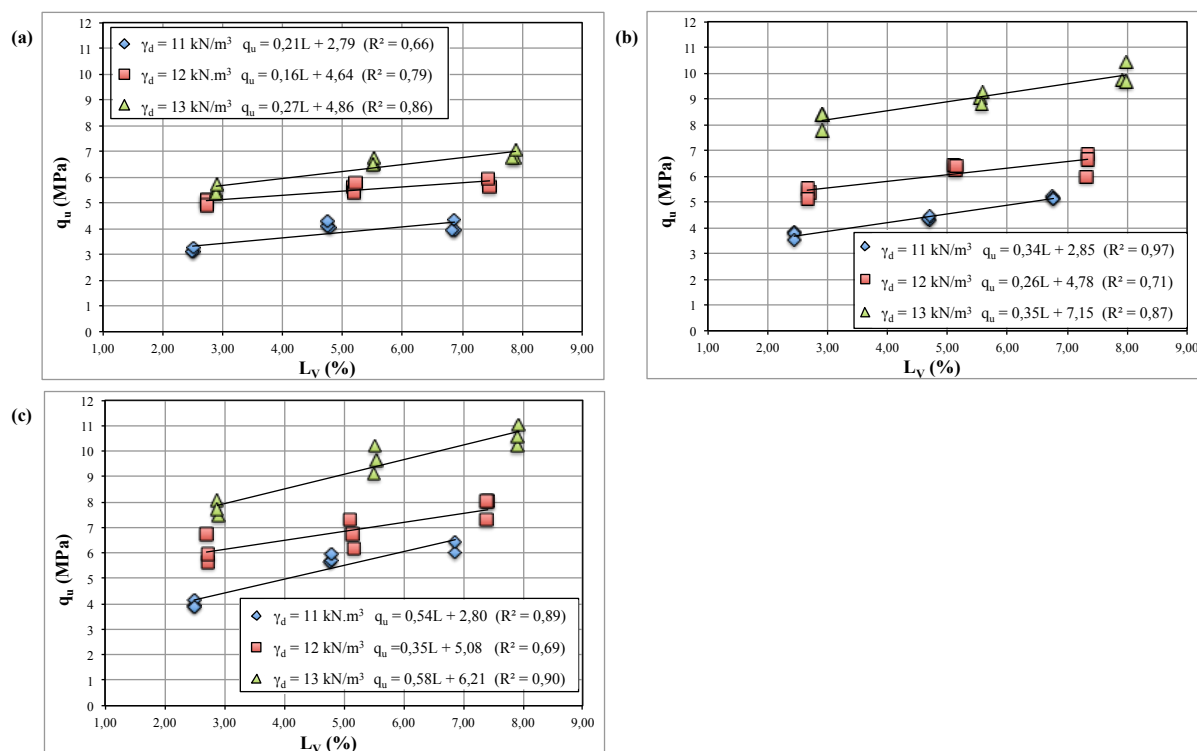


Figura 55 – Efeito do teor volumétrico de cal sobre a resistência à compressão simples das amostras curadas a 40°C com cura à vapor com cinza (a) não moída (b) moída 2h e (c) moída 6h

5.2.3 Amostras curadas a 60°C

A Figura 56 apresenta a variação da resistência à compressão simples com o aumento do teor volumétrico de cal para as misturas curadas à 60°C para cinza volante moída 0h (Figura 56 a) e 6h (Figura 56 b). Para estas misturas o aumento médio do teor volumétrico de cal foi de 16% para a faixa de variação de γ_d de 11 a 13 kN/m³. Com isso, uma parcela do ganho de resistência creditada à redução da porosidade na verdade é devida ao maior volume de cal presente.

Quando se compara a Figura 56 (a), (b) e (c) com as figuras 49 e 50, verifica-se que a resistência à compressão simples cresce linearmente com o aumento do teor de cal e, que há um crescimento da resistência com o aumento de γ_d da mistura em ambos os casos. Sendo assim, as análises feitas considerando o teor de cal em relação ao peso específico aparente seco do solo continuam válidas quando se considera o teor de cal volumétrico.

Se for considerada uma variação linear com o teor volumétrico de cal, calculada a partir da média dos coeficientes de L_V apresentados na Figura 56, obtém-se uma taxa média de 0,39

MPa/(%), 0,40 MPa/(%) para 0h e 6h de moagem, respectivamente. Com isto, é possível estimar que a resistência gerada pelo aumento do teor de cal volumétrico corresponderia a aproximadamente 7,97% e 6,74% do ganho de resistência obtida pela redução da porosidade da mistura para 0h e 6h de moagem, respectivamente. Estes cálculos podem ser encontrados na Tabela 20. Portanto, considera-se que esse pequeno percentual, atribuído ao aumento no teor volumétrico de cal, não invalida as análises realizadas até agora.

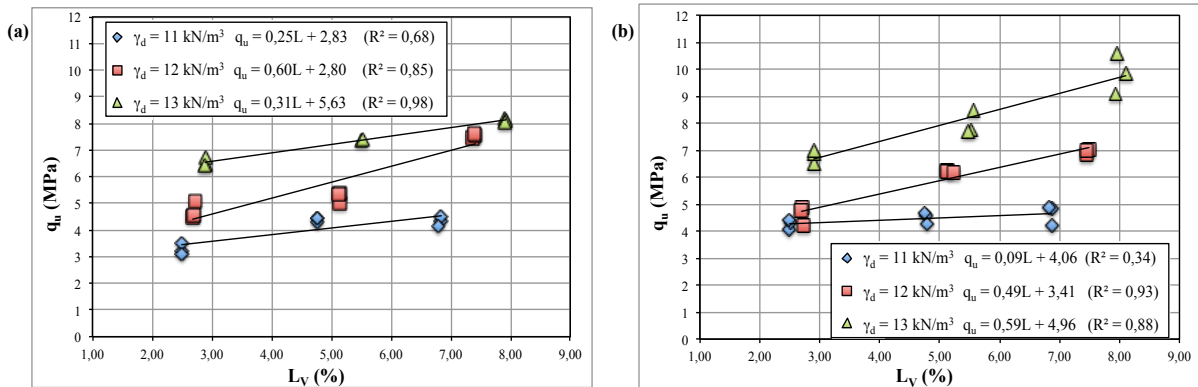


Figura 56 – Efeito do teor volumétrico de cal sobre a resistência à compressão simples das amostras curadas a 60°C com cura à vapor com cinza (a) não moída (b) moída 6h

Tabela 20 – Parcela da resistência gerada pelo aumento do teor volumétrico de cal nas amostras curadas a 60°C

Moagem	L (%)	ΔL_V (%)	Δq_u (MPa)	q_u min (MPa)	q_u max (MPa)	Δq_u total (MPa)	$\Delta q_u / \Delta q_u$ total (%)
Não Moída	5	0,4	0,16	3,12	6,73	3,62	4,23
	10	0,74	0,29	4,28	7,40	3,13	9,18
	15	1,10	0,43	4,14	8,19	4,06	10,5
Média							7,97
Moída 6h	5	0,41	0,17	4,06	7,00	2,95	5,57
	10	0,76	0,31	4,27	8,45	4,18	7,29
	15	1,16	0,47	4,22	10,56	6,35	7,34
Média							6,74

Onde:

ΔL_V = variação do teor volumétrico de cal para um mesmo teor de cal na faixa de variação considerada para o γ_d da mistura (de 11 para 13 kN/m³);

Δq_u = $\Delta L_V \times$ taxa de variação linear da resistência com o teor de cal volumétrico;

Δq_u min = q_u mínimo para a porcentagem de cal definida;

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

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

5.3 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL

A relação porosidade/teor volumétrico de agente cimentante tem sido empregada como um fator de estimativa da variação da resistência para diversos materiais artificialmente cimentados por diversos pesquisadores. Entre eles, destaca-se Foppa (2005), que utilizou esta relação com êxito em misturas solo-cimento, Lopez Junior (2007), com solo-cimento e solo-cal, Dalla Rosa (2009) com solo-ciza-cal e Saldanha (2014) com misturas cinza-cal. Sendo assim, foi avaliada a validade da utilização desta relação para a misturas estudadas nesta pesquisa.

Novamente, a apresentação foi dividida pela temperatura de cura (23°C, 40°C e 60°C), onde são expostas as tendências da relação η/L_v (porosidade/teor volumétrico de cal) para as amostras de cinza moída 2h, para 23°C e 40°C, e não moída e moída 6h para 60°C.

5.3.1 Amostras curadas a 23°C

A correlação entre a resistência à compressão simples e η/L_v obtidas para as misturas de cinza volante (CV) não moída, moída 2h e moída 6h são apresentadas na Figura 57. Como pode ser observado, não há uma única correlação entre q_u e a relação η/L_v , contudo, é possível verificar uma leve tendência exponencial para os diferentes teores de cal.

Tal fenômeno foi observado por Foppa (2005), que verificou que a taxa de variação da porosidade não possui a mesma ordem de grandeza da taxa de variação do teor volumétrico de agente cimentante. Com isto, o autor sugeriu a adoção de um expoente no teor volumétrico de material cimentante, a fim de equalizar tais taxas de variação. A utilização deste expoente deu origem a uma curva ajustada única, que pode então, ser empregada na estimativa da resistência à compressão simples do material artificialmente cimentado.

Seguindo a mesma linha de pesquisa no que diz respeito à utilização da relação porosidade/(teor volumétrico de material cimentante)^{exp}, outros autores (CONSOLI *et al.*, 2011; RIOS *et al.*, 2012) também verificaram que, para se compatibilizar as taxas de variação

Misturas de cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples frente à moagem da cinza volante.

é necessário um ajuste no teor volumétrico do agente cimentante através de um expoente, independentemente do tipo de agente cimentante, tipo de solo, ou material pozolânico. Este expoente varia em função dos materiais empregados na mistura. Os expoentes utilizados por Foppa (2005), Lopes Junior (2007), Dalla Rosa (2009), Consoli *et al.*, (2011), Rios *et al.*, (2012), Saldanha (2014) foram, respectivamente, 0,28, 0,06, 0,12, 0,35, 0,21 e 0,11.

O expoente proporcionou o melhor ajuste da taxa de variação do teor volumétrico da cal em relação a taxa de variação da porosidade da mistura, para a cinza volante e cal de carbureto estudados, foi de 0,07. Portanto, pode ser observada a variação da resistência à compressão simples da mistura em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustada ($\eta/(L_v)^{0,07}$) como uma curva única com uma tendência exponencial. Contemplando os resultados, nota-se um aumento exponencial da resistência com a diminuição de $\eta/(L_v)^{0,07}$.

Fisicamente o expoente de ajuste para o teor volumétrico de cal representa o grau de influência do agente cimentante frente a variação da porosidade na relação entre q_u e η/L_v . Isto implica que, quanto mais alto for o expoente, mais decisivo o teor de agente cimentante é para o ganho de resistência da mistura. Para as misturas com a cinza volante e a cal de carbureto utilizadas nesta pesquisa, o valor do expoente obtido é baixo, indicando que o teor volumétrico de cal utilizado não promove um grande impacto no desenvolvimento de resistência das misturas pesquisadas frente a impacto da variação da porosidade.

Nas figuras 58 a 60, apresentam-se os gráficos da resistência à compressão simples pela relação $\eta/(L_v)^{0,07}$, com as equações obtidas pelas tendências observadas para as amostras curadas a 23°C em ambiente com temperatura controlada. Assim como para os autores citados anteriormente, a curva de ajuste que gerou a melhor coeficiente de determinação (R^2), foi a curva tipo potência. A fim de otimizar a análise comportamental da relação porosidade/teor volumétrico de cal, foi utilizado o mesmo expoente para as curvas de potência apresentadas. O expoente que melhor se adaptou aos resultados foi de -3,40, assim, foi possível estabelecer uma equação única para a relação porosidade/teor volumétrico de cal ($[\eta/(L_v)^{0,07}]^{-3,40}$), onde somente o escalar da equação é alterado, com um R^2 maior que 0,80 para todos os tempos de moagem e temperaturas de cura estudados.

O ajuste da relação $\eta/(L_v)$ pelo expoente 0,07 proporcionou uma correlação admissível na estimativa da resistência à compressão simples a partir da dosagem de misturas cinza volante e cal de carbureto utilizadas nesta pesquisa. Através das correlações apresentadas entre

$[\eta/(L_v)^{0,07}]^{-3,40}$ e a resistência à compressão simples das misturas de cinza volante e cal de carbureto estudadas, foi possível a elaboração de uma única equação para a determinação da resistência das amostras a 23°C, onde somente o escalar da equação foi alterado pela variação do tempo de moagem (equações 11 a 13).

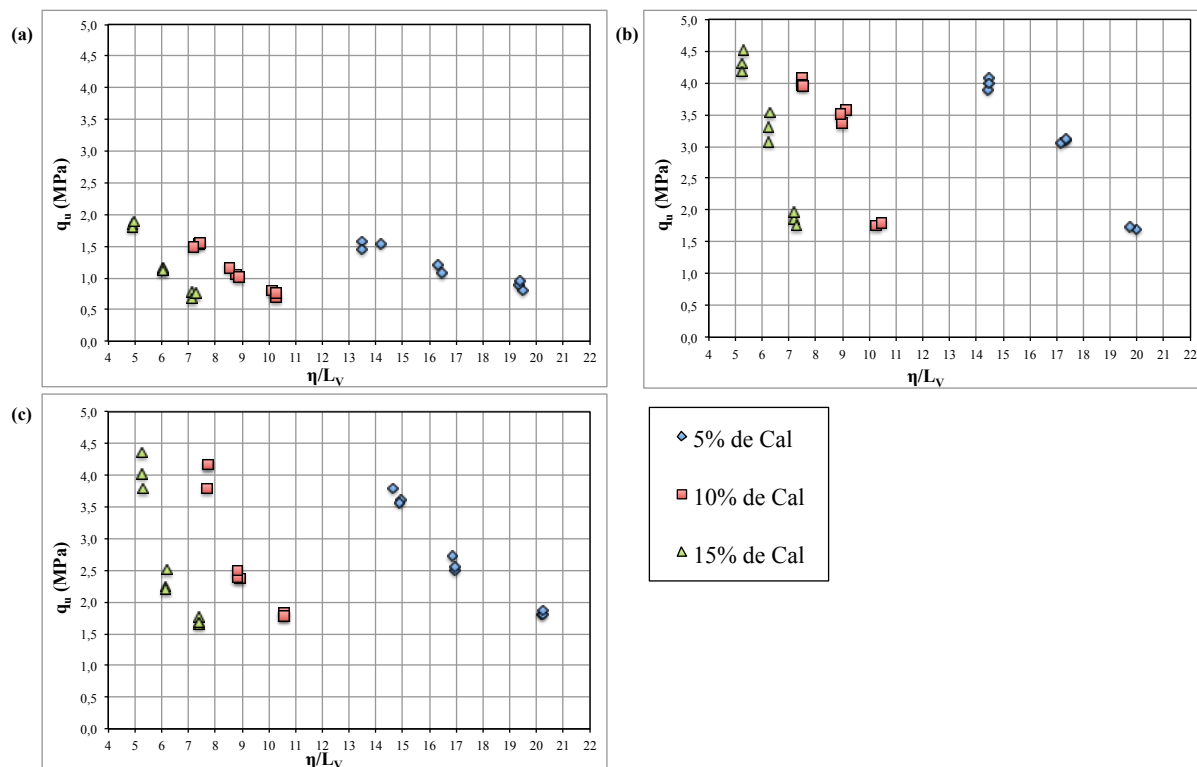


Figura 57 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados a 23°C com cinza (a) não moída (b) moída 2h e (c) moída 6h

Com isto para esta temperatura de cura, a partir da definição de uma dosagem (determinada porosidade e teor volumétrico de cal) da mistura de cinza de volante e cal de carbureto estudadas, é possível prever a resistência à compressão simples para os diferentes tempos de moagem apresentados. Através desta apresentação dos resultados pode-se observar um crescimento da resistência com a diminuição da relação $\eta/(L_v)^{0,07}$. As equações obtidas para cinza não moída, moída 2h e moída 6h para o tempo de cura de 23°C estão apresentadas, nesta ordem, a seguir.

$$q_u = 0,31 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (\text{equação 11})$$

$$q_u = 0,89 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (\text{equação 12})$$

$$q_u = 0,84 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

q_u = resistência à compressão simples (MPa);

η = porosidade (%);

L_v = teor volumétrico de cal (%).

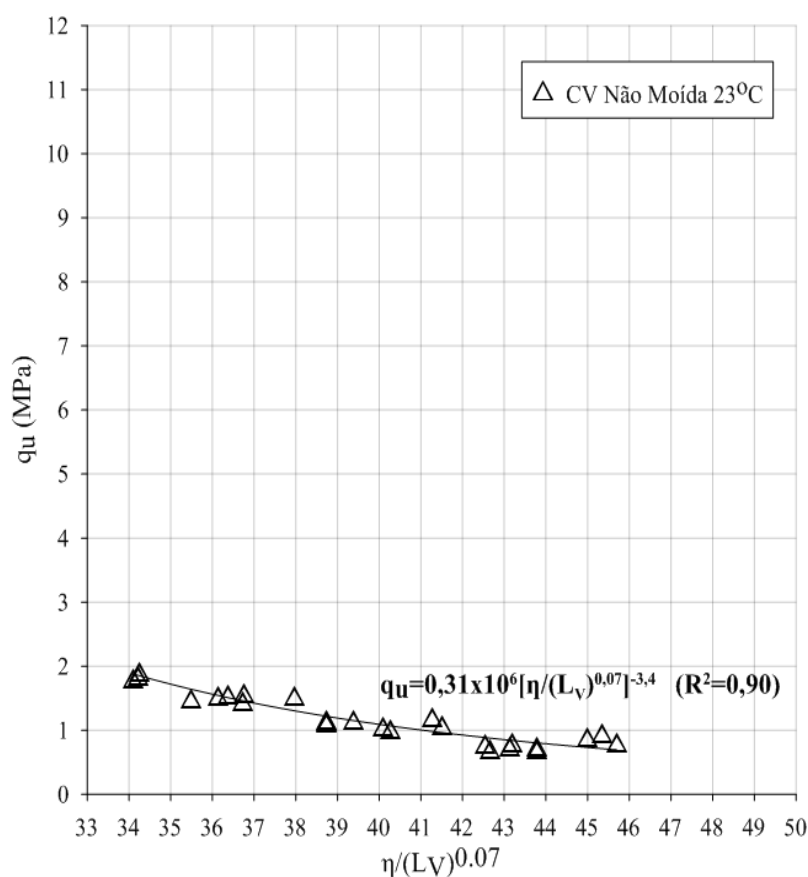


Figura 58 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza não moída curados a 23°C

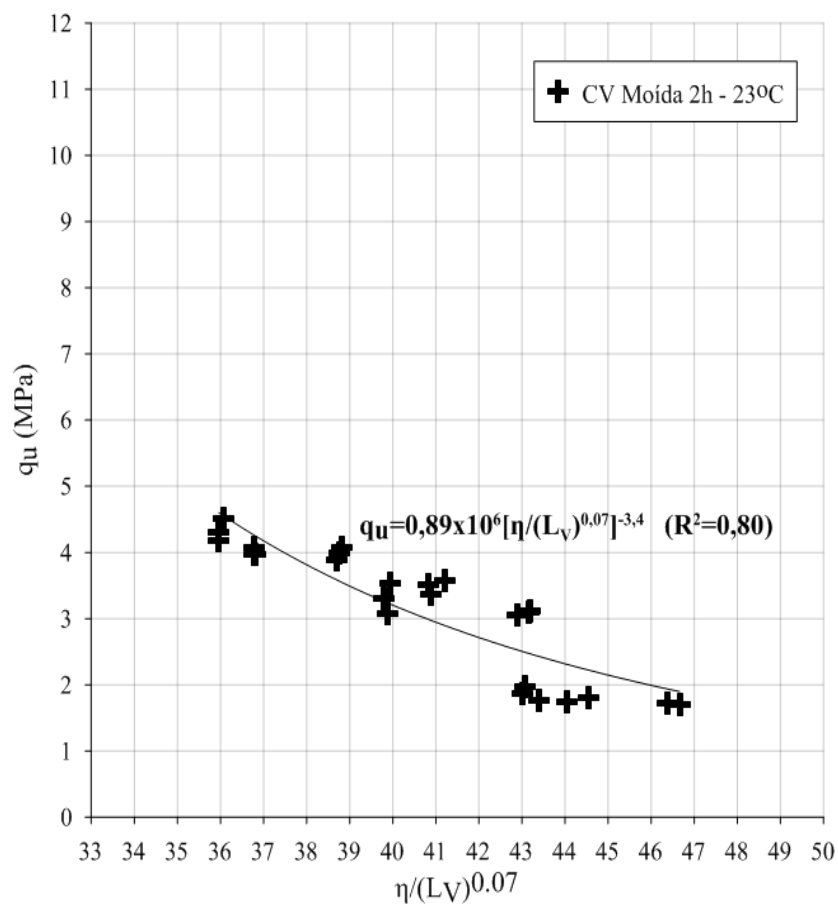


Figura 59 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza moída 2h curados a 23°C

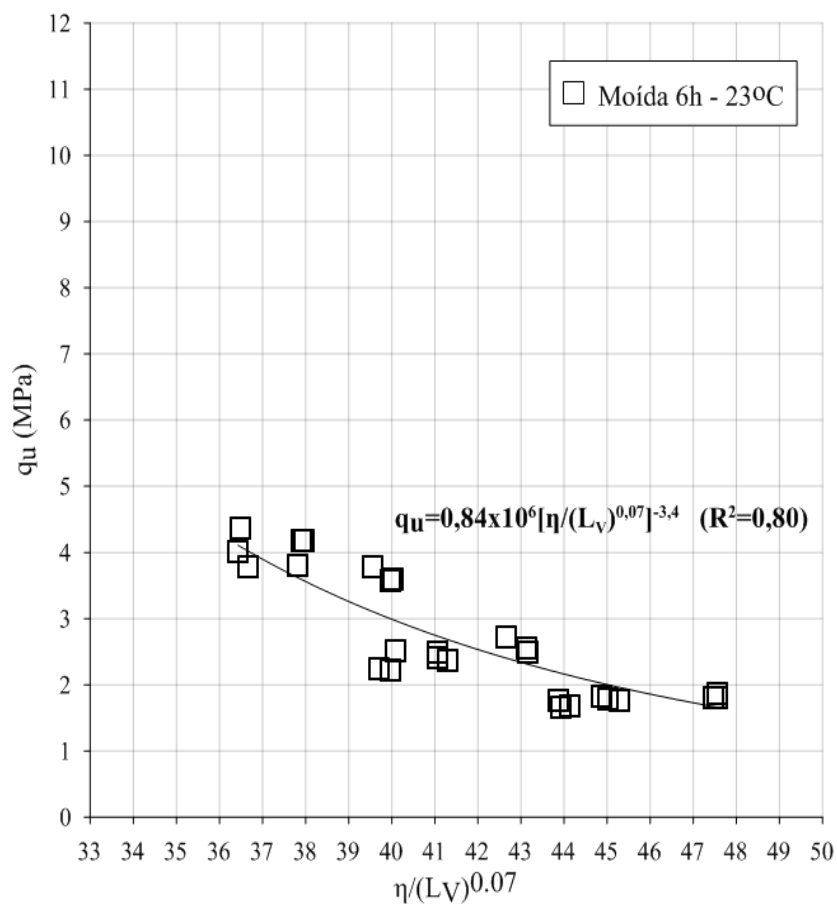


Figura 60 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza moída 6h curados a 23°C

5.3.2 Amostras curadas a 40°C

A correlação entre a resistência a compressão simples e η/L_v obtidas para as misturas de cinza volante (CV) não moída, moída 2h e moída 6h curadas a 40°C em câmara a vapor são apresentadas na Figura 61. O emprego da coeficiente 0,07 no teor volumétrico de cal também proporcionou uma melhor distribuição da relação η/L_v para as misturas estudadas neste item.

Nas figuras 62 a 64, conforme o apresentado anteriormente para a temperatura de 23°C, observa-se que, através da adequação da relação $\eta/(L_v)^{0,07}$ foi determinar de uma equação única para a estimativa da resistência à compressão simples através da dosagem da mistura cinza volante e cal de carbureto, onde, apenas as grandezas da equações variam com o tempo de moagem para a temperatura de 40°C.

O ajuste da relação $\eta/(L_v)$ pelo expoente 0,07 proporcionou uma correlação admissível na estimativa da resistência à compressão simples a partir da dosagem de misturas cinza volante

e cal de carbureto utilizadas nesta pesquisa curados a 40°C em câmara de vapor para cinza não moída, moída 2h e moída 6h. Novamente, o expoente de -3,40 foi considerado o melhor ajuste para a curva de tendência tipo potência apresentada para todos os tempos de moagem estudados. Com esta forma de apresentação dos resultados pode-se observar um crescimento expressivo da resistência com a diminuição da relação $\eta/(L_v)^{0,07}$, independentemente do tempo de moagem.

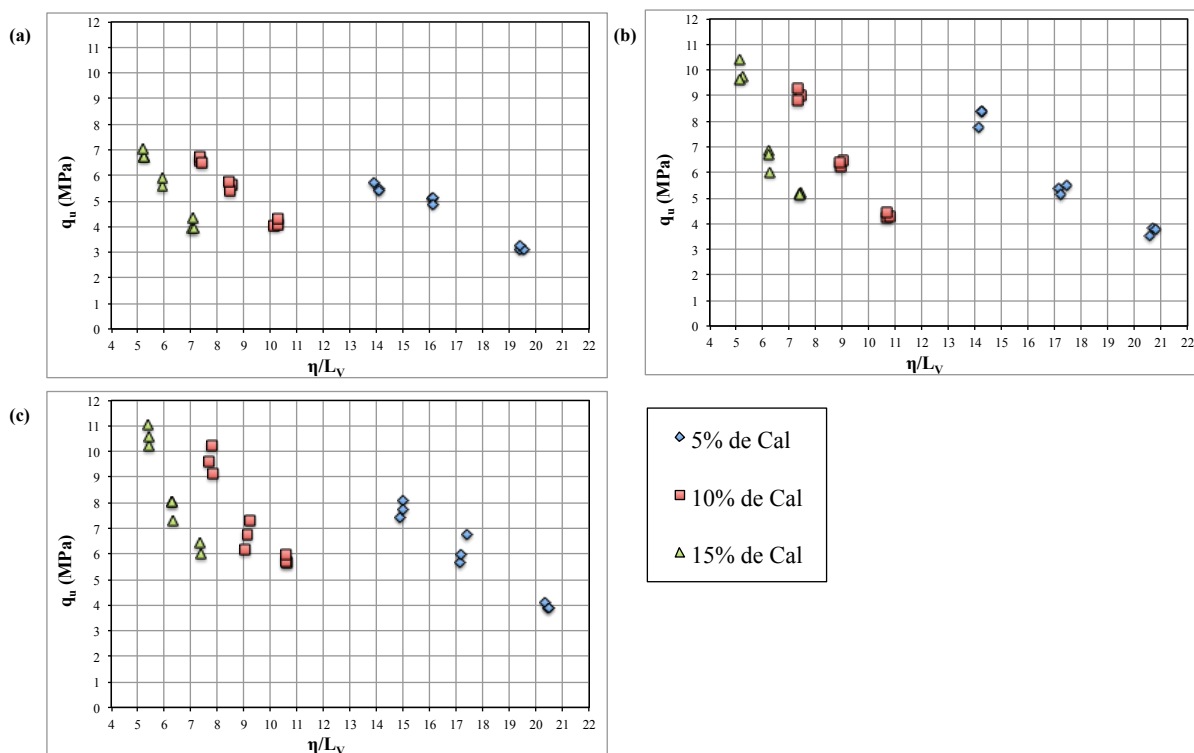


Figura 61 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados a 40°C com cinza (a) não moída (b) moída 2h e (c) moída 6h

Com esta relação, foi possível propor uma equação única (equações 14 a 16) para a determinação da resistência à compressão simples das amostras curadas a 40°C, na qual, somente um escalar diferencia os resultados obtidos para os diferentes tempos de moagem (0h, 2h, 6h). A seguir, são apresentadas as equações para cinza não moída, moída 2h e moída 6h para 40°C, respectivamente.

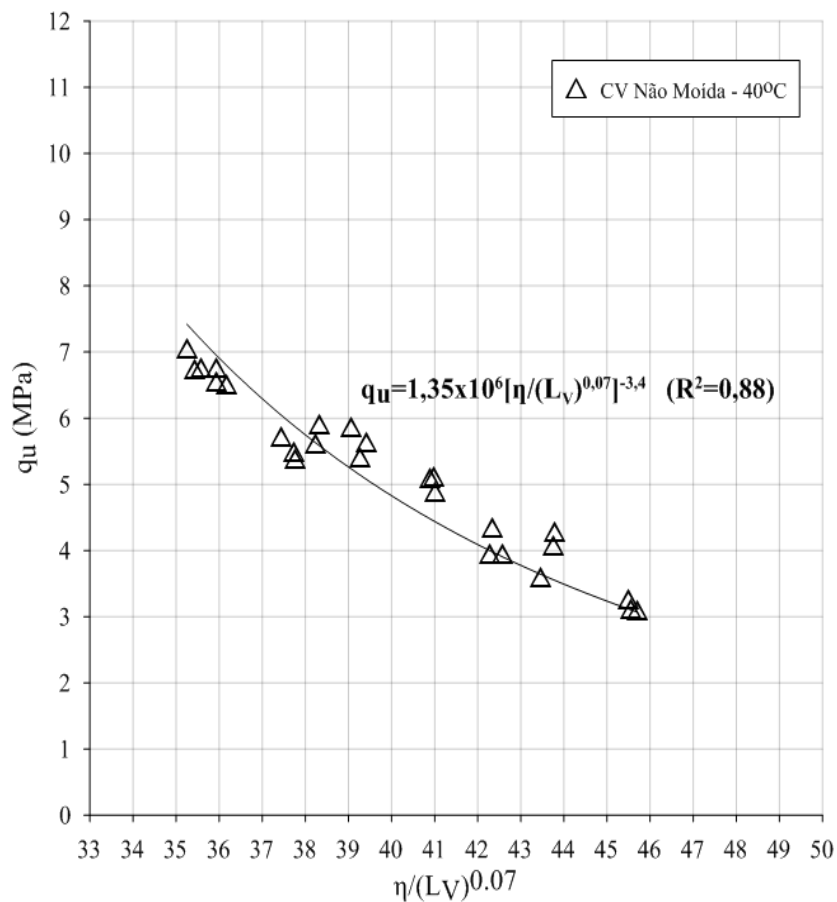


Figura 62 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza não moída curados a 40°C

$$q_u = 1,35 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (\text{equação 14})$$

$$q_u = 1,87 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (\text{equação 15})$$

$$q_u = 2,27 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (\text{equação 16})$$

Onde:

q_u = resistência à compressão simples (MPa);

η = porosidade (%);

L_v = teor volumétrico de cal (%).

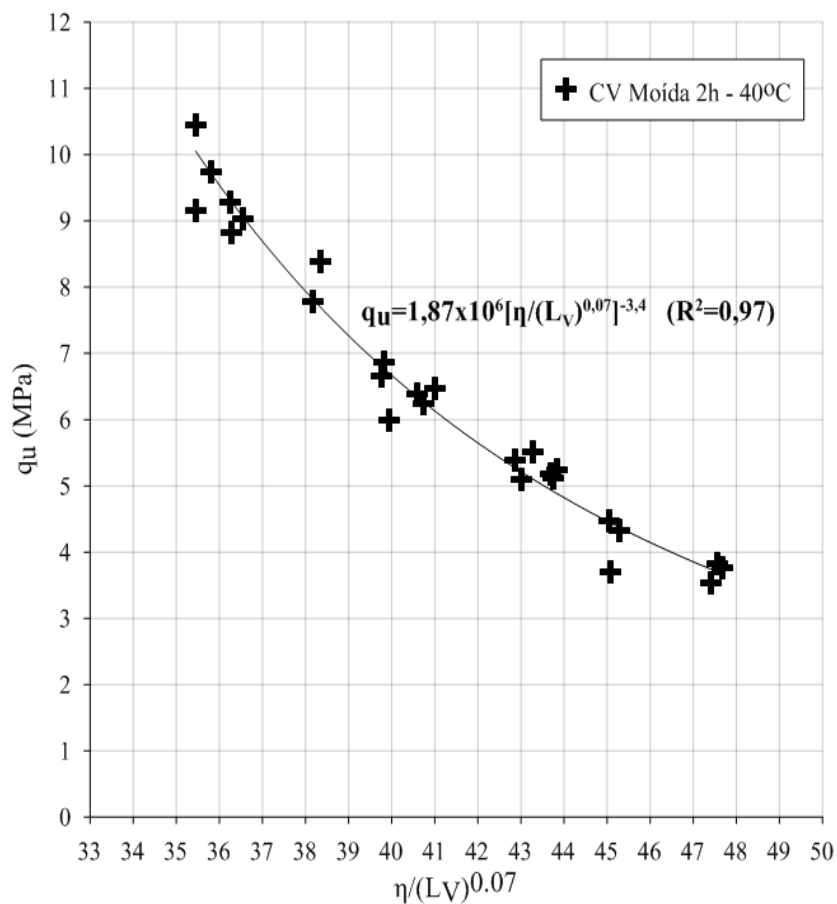


Figura 63 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza moída 2h curados a 40°C

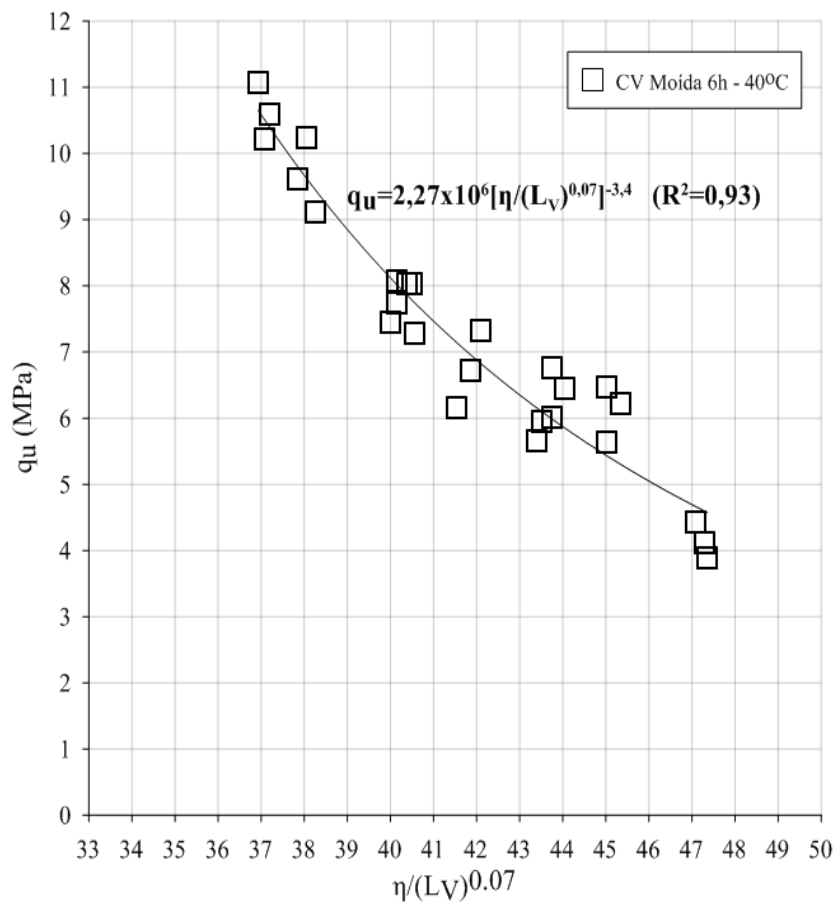


Figura 64 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza moída 6h curados a 40°C

5.3.3 Amostras curadas a 60°C

A Figura 65 apresenta a correlação entre a resistência a compressão simples e η/L_v obtidas para as misturas de cinza volante (CV) não moída e moída 6h curadas a 60°C em câmara a vapor, também é possível observar que a relação não possibilita a determinação de uma tendência única entre os fatores. Assim, o emprego do mesmo coeficiente utilizado para as outras temperaturas (0,07) no teor volumétrico de cal também proporcionou o desenvolvimento de uma única correlação entre q_u e $\eta/(L_v)^{0,07}$ para as misturas estudadas neste item.

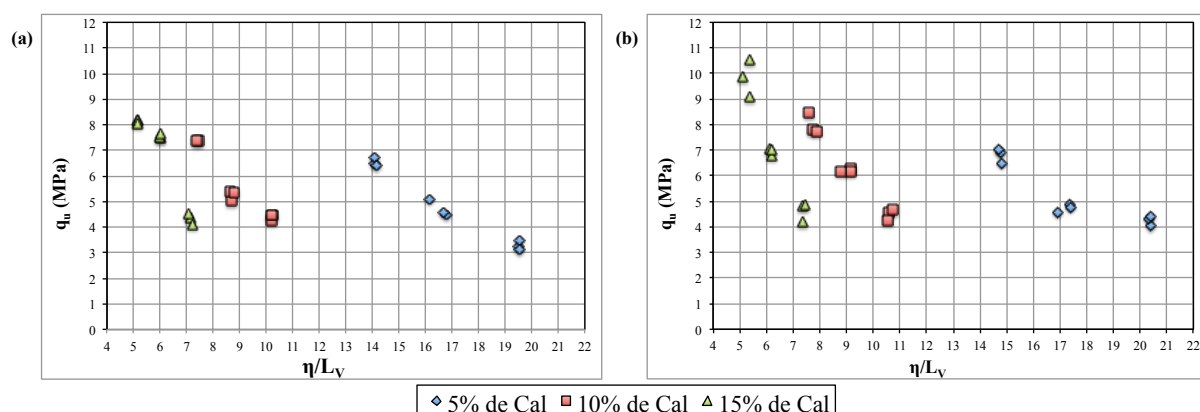


Figura 65 – Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados a 60°C com cinza (a) não moída e (b) moída 6h

Igualmente ao apresentado anteriormente para a temperatura de 23°C e 40°C, observa-se que, através da adequação da relação $\eta/(L_v)^{0,07}$ foi determinar de uma equação única para a estimativa da resistência à compressão simples através da dosagem da mistura cinza volante e cal de carbureto (figuras 66 e 67). O expoente de -3,40 também foi considerado o melhor ajuste para a curva de tendência tipo potência apresentada para todos os tempos de moagem estudados. Com esta forma de apresentação dos resultados pode-se observar um crescimento expressivo da resistência com a diminuição da relação $\eta/(L_v)^{0,07}$, independentemente do tempo de moagem.

Para esta temperatura, o ajuste da relação $\eta/(L_v)$ pelo expoente 0,07 também proporcionou o melhor coeficiente de correlação na estimativa da resistência à compressão simples a partir da dosagem de misturas de cinza volante e cal de carbureto utilizadas nesta pesquisa curados a 60°C em câmara de vapor para cinza não moída e moída 6h.

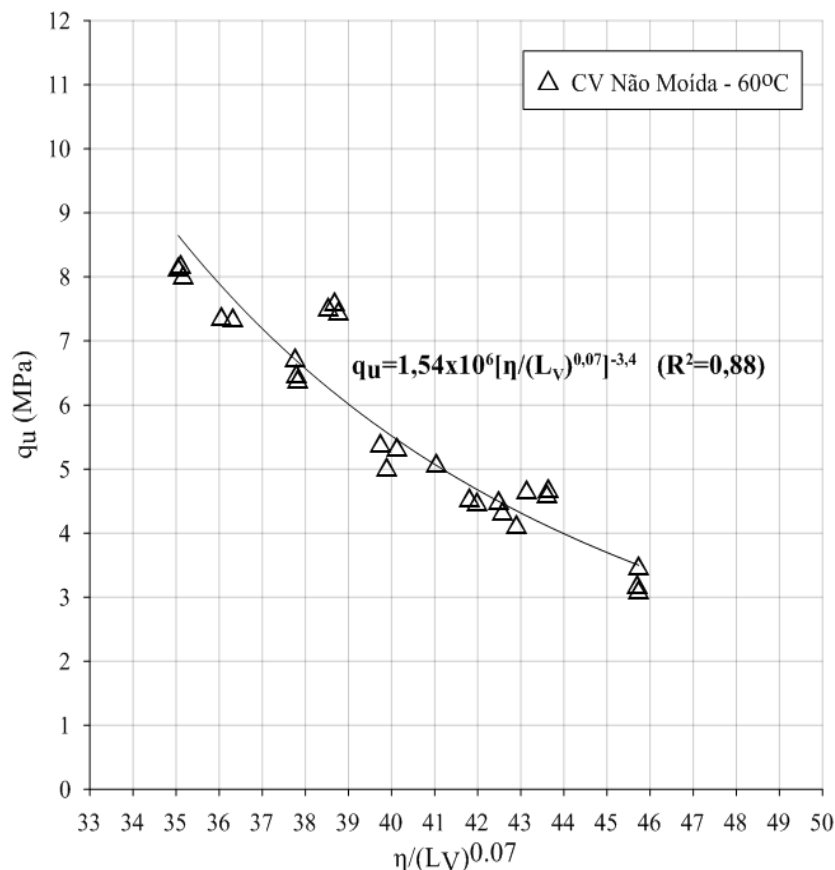


Figura 66 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza não moída curados a 60°C

Com esta relação, foi possível propor uma equação única (equações 17 e 18) para a determinação da resistência à compressão simples das amostras curadas a 60°C, na qual, somente um escalar diferencia os resultados obtidos para os diferentes tempos de cura (0h e 6h). A seguir, são apresentadas as equações para cinza não moída e moída 6h para 60°C, respectivamente.

$$q_u = 1,54 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (\text{equação 17})$$

$$q_u = 1,92 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (\text{equação 18})$$

Onde:

q_u = resistência à compressão simples (MPa);

η = porosidade (%);

L_v = teor volumétrico de cal (%).

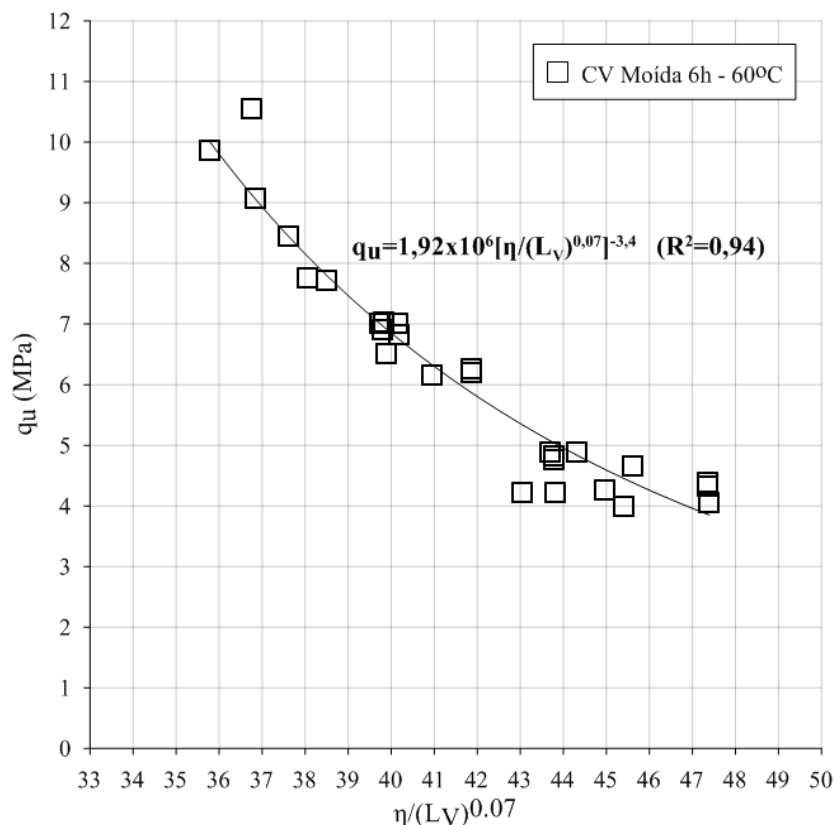


Figura 67 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para as amostras com cinza moída 6h curados a 60°C

5.4 EFEITO DA TEMPERATURA DE CURA

Neste item foram analisados os efeitos da temperatura de cura das amostras no ganho de resistência das mesmas, através da avaliação dos resultados da resistência à compressão simples frente a variação da relação $\eta/(L_v)^{0.07}$ apresentada no item anterior (5.3). A apresentação dos resultados foi dividida pelo tempo de moagem da cinza volante (não moído, moído 2h e moído 6h). Para a CV não moída e moída 6h, são apresentadas as curvas obtidas pelas temperaturas de cura de 23°C, 40°C e 60°C. Já para a CV moída 2h, para 23°C e 40°C.

5.4.1 Amostras com cinza volante não moída

Na Figura 68 apresentam-se as curvas para as temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C no gráfico da resistência à compressão simples *versus* a relação $\eta/(L_v)^{0,07}$. Através destes resultados, pode-se observar uma aumento da resistência com o aumento da temperatura de cura. Este aumento de resistência foi expressivo entre 23°C e 40°C, em média, a resistência à compressão simples teve um aumento de 335%. Já entre 40°C e 60°C, o ganho de resistência foi de, em média, 14%. Esta grande diminuição na taxa de ganho de resistência entre as temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C aponta uma tendência de estabilização no ganho de resistência com o aumento da temperatura a partir de 40°C.

Somente o escalar das equações geradas para a previsão da resistência à compressão simples alterou-se com o aumento da temperatura. Assim, é possível realizar a análise do ganho de resistência proporcionado pelo aumento da temperatura de cura, através da normalização de $(q_u/[\eta/(L_v)^{0,07}]^{-3,40})$.

Ao pesquisar a variação da resistência à compressão simples de argamassas de cimento com adição de cinza volante, moída e não moída, frente a variação da temperatura de cura (de 20°C a 80°C), Payá *et al.* (2000), sugeriram uma tendência polinomial entre q_u e a temperatura de cura para cinza volante não moída e moída por uma hora, para diferentes teores de cinza adicionados à argamassa, já que, a q_u apresentou uma queda para temperatura mais elevadas nas misturas com cinza volante moída. Esta tendência também foi observada para os resultados obtidos neste trabalho. A Figura 69 apresenta a curva de tendência apresentada pelas misturas com cinza volante não moída.

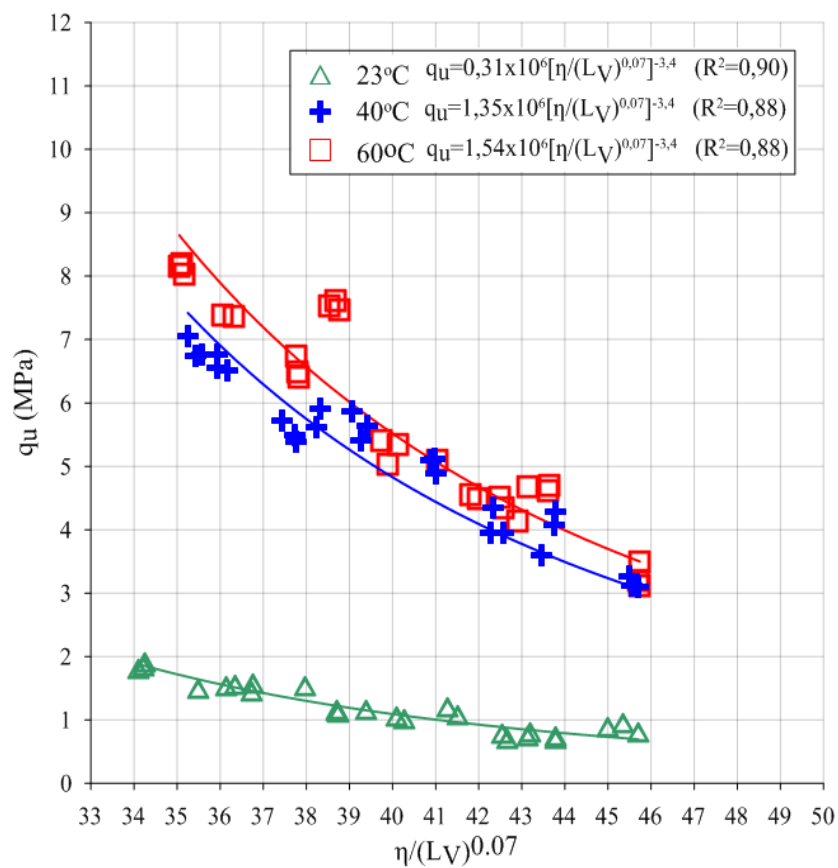


Figura 68 – Efeito da variação da temperatura para cinza volante não moída

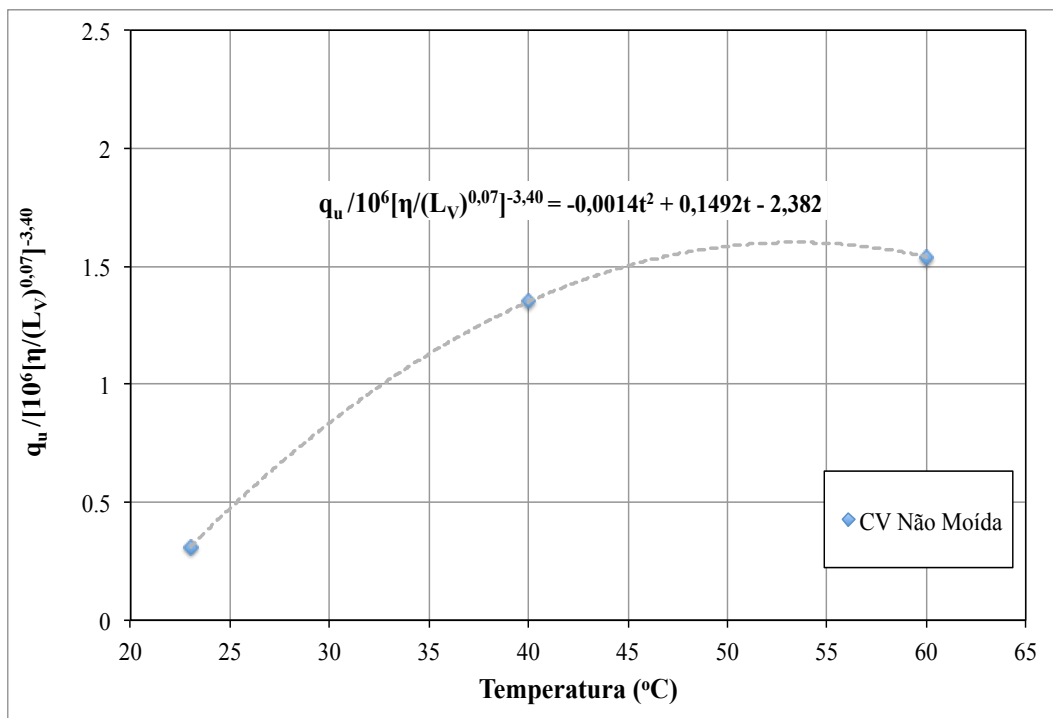


Figura 69 – Ajuste da tendência da variação da temperatura para cinza volante não moída

A equação obtida por esta tendência é apresentada na equação 19. Através desta equação, pode-se estimar que o maior ganho de resistência obtida por estas misturas ocorria, aproximadamente, aos 53°C, o que leva à uma relação $(q_u / [\eta / (L_v)^{0,07}]^{-3,40})$ de 1,59.

$$q_u = (-0,0014t^2 + 0,1492t - 2,382) \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (\text{equação 19})$$

Onde:

q_u = resistência à compressão simples (MPa);

η = porosidade (%);

L_v = teor volumétrico de cal (%);

t = temperatura de cura (°C).

Estudando misturas de cinza volante, com características semelhantes às utilizadas nesta pesquisa, com a mesma cal de carbureto utilizada, Saldanha (2014) chegou a uma estabilização da resistência em função da temperatura de cura à, aproximadamente, 50°C, para 7 dias de cura, embora o autor tenha utilizado tendências lineares na sua análise.

5.4.2 Amostras com cinza volante moída 2h

Na Figura 70 apresentam-se as curvas para as temperaturas de 23°C e 40°C no gráfico da resistência à compressão simples *versus* a relação $\eta/(L_v)^{0,07}$. Através destes resultados, pode-se observar que para este tempo de moagem, também houve um ganho da resistência com o aumento da temperatura de cura. Este aumento de resistência foi de, em média, 110% entre 23°C e 40°C. Como pode-se observar, o percentual de ganho de resistência entre estas duas temperaturas foi aproximadamente 3 vezes menor que o ganho observado para a cinza volante não moída. Esta redução ocorre, provavelmente, pelo fato da moagem da cinza proporcionar um maior ganho de resistência à mistura mesmo à temperatura ambiente. Assim, o impacto na resistência em função da temperatura se torna menor.

Novamente, somente o escalar das equações geradas para a previsão da resistência à compressão simples alterou-se com o aumento da temperatura. Assim, é possível realizar a análise do ganho de resistência proporcionado pelo aumento da temperatura de cura, através da normalização de $(q_u/[\eta/(L_v)^{0,07}]^{-3,40})$.

Contudo, como foram realizados somente ensaios para duas temperaturas para este tempo de moagem, não foi possível estabelecer uma tendência polinomial para este grupo de resultados. Então, apresenta-se na Figura 71 o gráfico do ajuste da tendência da variação da temperatura para cinza volante moída por duas horas, com uma relação linear.

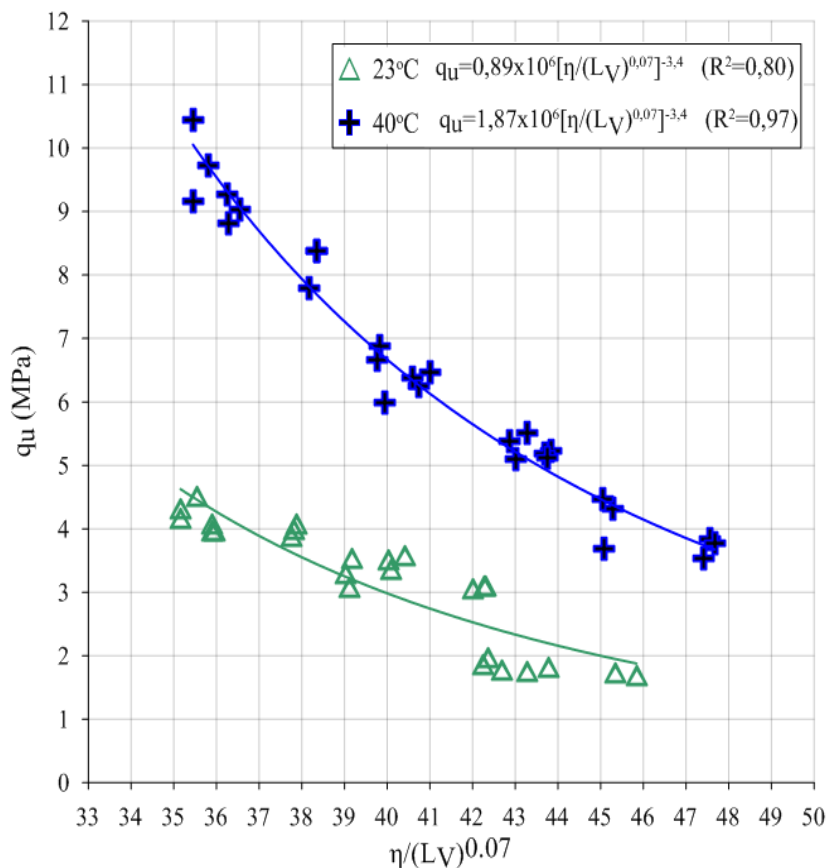


Figura 70 – Efeito da variação da temperatura para cinza volante moída 2h

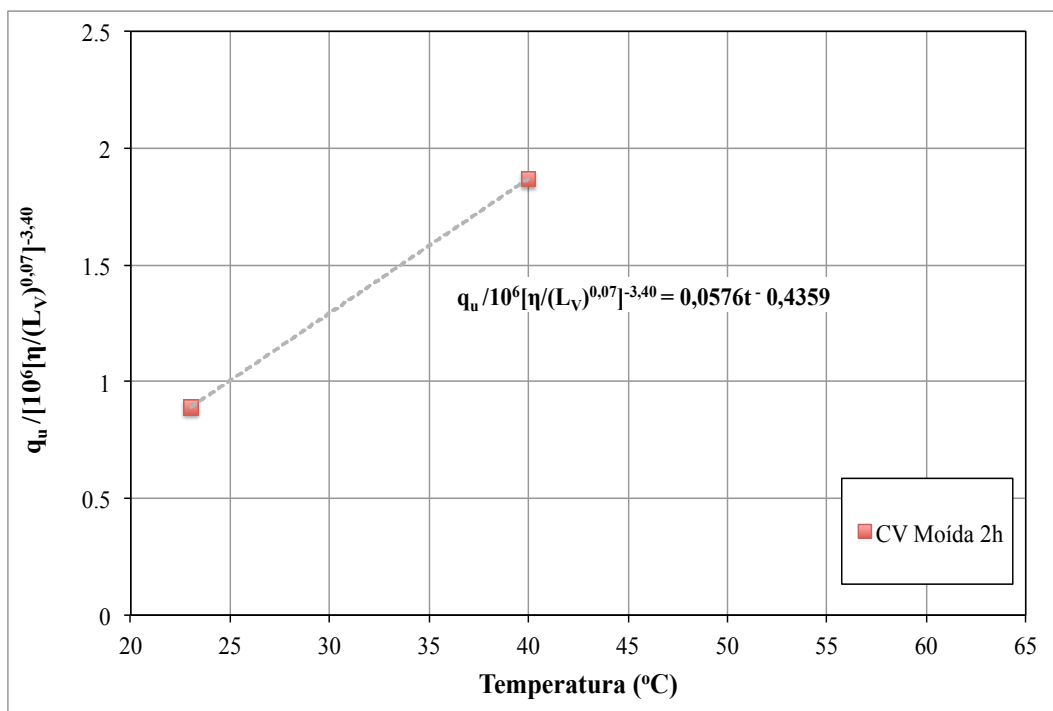


Figura 71 – Ajuste da tendência da variação da temperatura para cinza volante moída 2h

A equação obtida por esta tendência é apresentada na equação 20.

$$q_u = (0,0576t - 0,4359) \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (\text{equação 20})$$

Onde:

q_u = resistência à compressão simples (MPa);

η = porosidade (%);

L_v = teor volumétrico de cal (%);

t = temperatura de cura (°C).

5.4.3 Amostras com cinza volante moída 6h

Na Figura 72 apresentam-se as curvas para as temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C no gráfico da resistência à compressão simples *versus* a relação $\eta/(L_v)^{0,07}$. Através destes resultados, pode-se observar uma aumento da resistência com o aumento da temperatura de cura entre 23°C e 40°C, em média, a resistência à compressão simples teve um aumento de 170%. Já entre 40°C e 60°C, ocorreu uma queda da resistência de, em média, 15%.

Payá et al. (2000), ao pesquisar a variação da resistência à compressão simples de argamassas de cimento com adição de 30% de cinza volante, não moída e moída 1h, frente a variação da temperatura de cura (de 20°C a 80°C), observaram que a partir de 60°C a resistência obtida estabiliza-se para 3 dias de cura, porém, houve uma queda na resistência das misturas se comparadas a obtida a 40°C, a partir de 7 dias de cura.

Bouzoubaâ *et al.* (1997) observaram que misturas de clínquer com cinza volante moída apresenta um aumento na quantidade de água necessária para que as reações pozolânicas ocorram a partir de 4h de moagem. E, que tal aumento de necessidade de água, gera uma queda de resistência quando o teor de umidade é mantido constante. Este fenômeno será mais discutido no próximo item (5.5).

O aumento na taxa de ganho de resistência entre 23°C e 40°C em relação à cinza moída 6h pode ocorrer devido ao aumento da atividade pozolânica devido ao aumento da temperatura de cura, mesmo com a possível influência negativa da quebra das partículas. Contudo, a queda

de resistência apresentada pelo aumento da temperatura de cura de 40°C para 60°C, pode ocorrer pelo aumento da quantidade de água necessária para que as reações pozolânicas ocorram devido ao aumento da superfície específica do material, aliado ao fato das amostras terem sido curadas em uma temperatura mais elevada, o que pode ter acabado agravando o problema, mesmo que as amostras tenham sido curadas em câmara a vapor.

Mais uma vez, somente o escalar das equações geradas para a previsão da resistência à compressão simples alterou-se com o aumento da temperatura. Assim, é possível realizar a análise do ganho de resistência proporcionado pelo aumento da temperatura de cura, através da normalização de $(q_u/[\eta/(L_V)^{0,07}]^{-3,40})$.

A Figura 73 apresenta a curva de tendência apresentada pelas misturas com cinza volante não moída, novamente, foi utilizada uma tendência polinomial entre a q_u e a temperatura de cura.

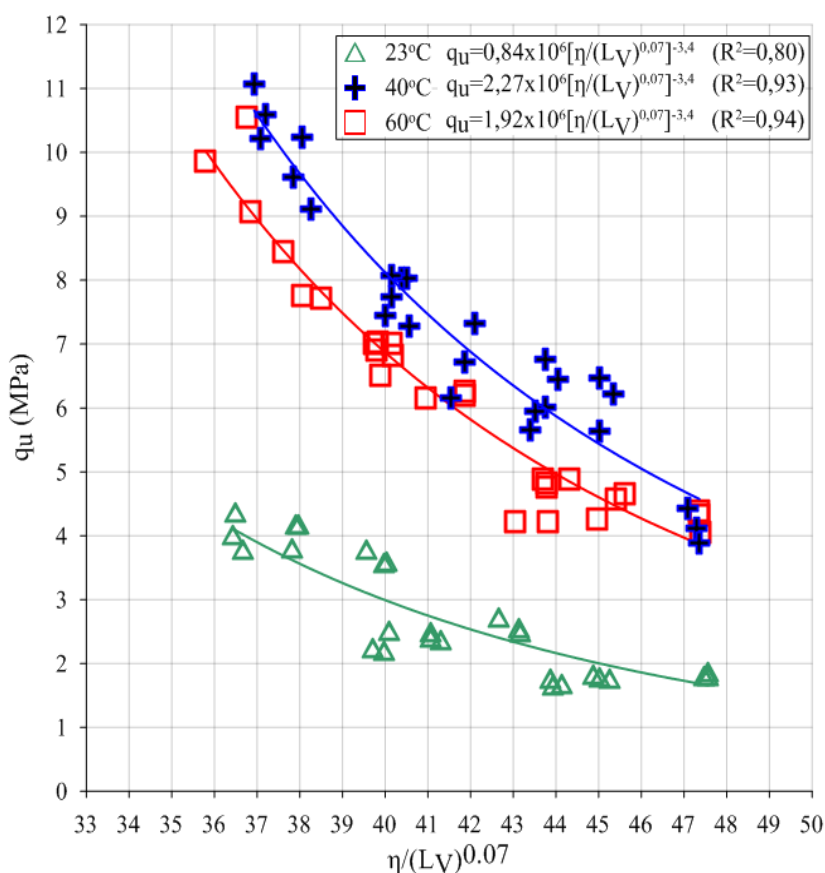


Figura 72 – Efeito da variação da temperatura para cinza volante moída 6h

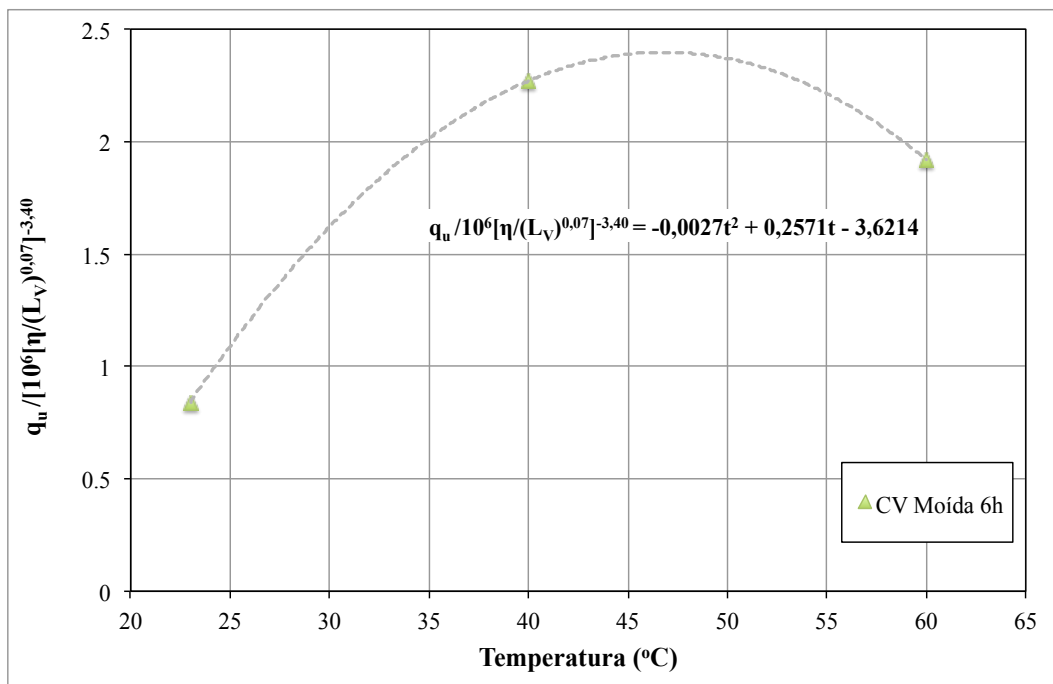


Figura 73 – Ajuste da tendência da variação da temperatura para cinza volante moída 6h

A equação obtida por esta tendência é apresentada na equação 21. Através desta equação, pode-se estimar que o maior ganho de resistência obtida por estas misturas ocorria, aproximadamente, aos 48°C, o que leva à uma relação $(q_u / [\eta / (L_v)^{0,07}]^{-3,40})$ de 2,49.

$$q_u = (-0,0027t^2 + 0,2571t - 3,6214) \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (\text{equação 21})$$

Onde:

q_u = resistência à compressão simples (MPa);

η = porosidade (%);

L_v = teor volumétrico de cal (%);

t = temperatura de cura (°C).

5.4.4 Efeito da temperatura de cura em função do tempo de moagem

Na Figura 74 é apresentado o comportamento global da variável avaliada neste item, a temperatura. Conforme visto anteriormente, como não foram feitas as misturas cinza volante

moída 2h curadas a 60°C, não foi possível obter uma tendência polinomial para este tempo de moagem.

Pode-se observar nesta figura que, embora a resistência tenha diminuído entre 40°C e 60°C para a cinza volante moída 6h, em relação os resultados obtidos pelos corpos de prova curados a 23°C, o aumento da temperatura proporcionou ganhos de resistência, independentemente do tempo de moagem. Contudo, a temperatura de 40°C se mostrou mais eficiente, proporcionando um maior aumento relativo de resistência das misturas para os diferentes tempos de moagem da cinza.

Outro ponto que pode ser observado na Figura 74 é que há uma pequena redução na resistência (6%) entre a cinza volante moída 2h e 6h a 23°C. Esta redução pode ser atribuída ao aumento da quantidade de água necessária para que as reações ocorram, sem interferência da cura acelerada. Através das equações obtidas para os polinômios (cinza não moída e moída 6h) verifica-se na relação entre porosidade, teor volumétrico de cal e temperatura, o ganho de resistência atribuído a moagem da cinza. Também, que o ponto onde a temperatura proporciona maior resistência diminui levemente com a moagem da cinza (de 53°C para 48°C entre cinza não moída e moída 6h), fenômeno este também observado por Payá *et al.* (2000).

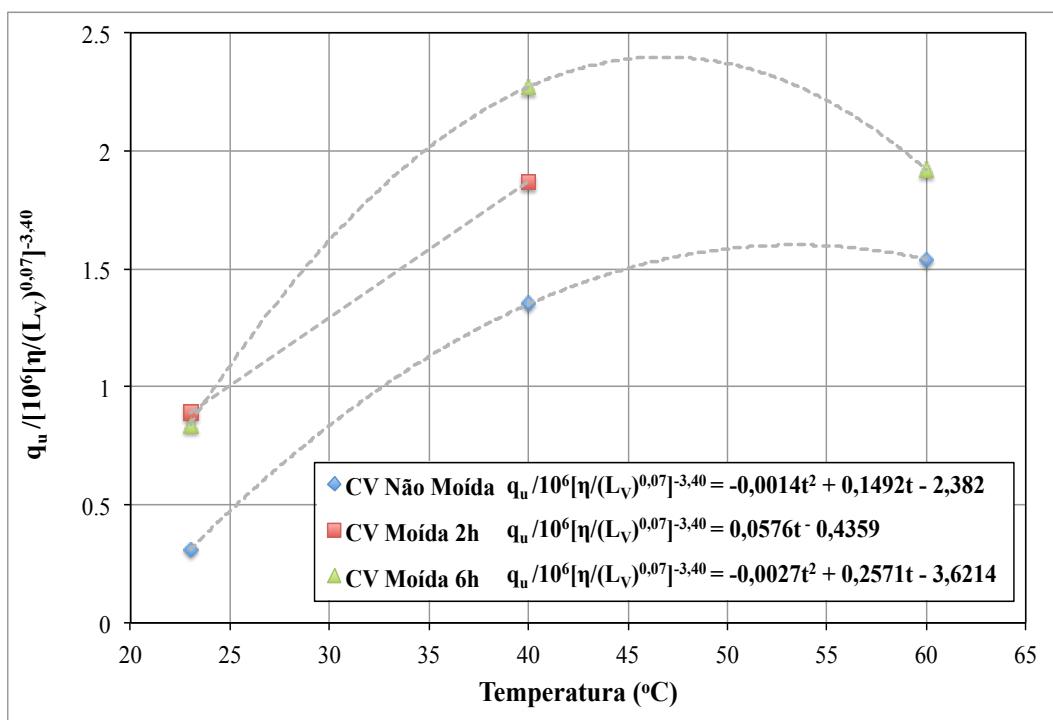


Figura 74 – Comportamento global da resistência frente à variação da temperatura

5.5 EFEITO DO TEMPO DE MOAGEM

Foi possível observar no último tópico, através da análise da temperatura de cura, que a moagem da cinza volante é benéfica ao ganho de resistência da mistura. Entretanto, a interação entre o aumento da temperatura de cura e do tempo de moagem nem sempre são favoráveis. Neste item são analisados com maior detalhe os efeitos da moagem para os resultados obtidos.

Os dados apresentados a seguir estão em função dos resultados da resistência à compressão simples frente a variação da relação $\eta/(L_V)^{0,07}$ apresentada no item (5.3) e, foi dividida pelo temperatura de cura das amostras (23°C, 40°C e 60°C). Para as temperaturas de 23°C e 40°C são apresentados os resultados para cinza não moída, moída 2h e moída 6h. Já para 60°C, são apresentados os valores para cinza não moída e moída 6h.

5.5.1 Amostras curadas a 23°C

São apresentados na Figura 75 os resultados para os corpos de prova curados a 23°C para as amostras de cinza volante não moída, moída 2h e moída 6h. Pode-se observar um ganho de resistência de, em média, 187% entre a cinza volante não moída e a moída por 2h. Toda via, houve uma queda de 6% na resistência entre a cinza moída 2h e a moída 6h.

Este fenômeno foi observado por Bouzoubaâ *et al.* (1997), estudando a utilização de cinza volante moída (2h, 4h e 10h) em mistura com clínquer na produção de cimento Portland curados a temperatura ambiente, observaram que a quantidade de água requerida pelas misturas diminuiu com a moagem até 2h, se manteve constante até 4h de moagem, depois, houve um aumento na quantidade de água necessária para que as reações ocorressem até 10h de moagem. Os autores atribuíram o primeiro fenômeno à quebra das plerosferas, e o último, ao aumento da quantidade de partículas com tamanhos irregulares do material. Este aumento na quantidade de água necessária foi citado pelos autores como a possível causa da queda do índice de atividade de resistência das amostras curadas por 7 dias com cinza volante moída por 10h em relação à moída por 4h.

Assim, a leve queda da resistência observada com o aumento da moagem em 4h (de 2h para 6h) pode ser atribuída ao aumento da quantidade de água requerida pela mistura. Com isto, é

possível observar uma estagnação no ganho de resistência, ou seja, o aumento da moagem de 2h para 6h para corpos de prova curados a 23°C foi ineficiente.

Como somente o escalar das equações geradas para a previsão da resistência à compressão simples alterou-se com o aumento do tempo de moagem. Foi possível realizar a análise do ganho de resistência proporcionado pelo aumento do tempo de moagem, através da normalização de $(q_u/[\eta/(L_V)^{0,07}]^{-3,40})$. Esta comparação é apresentada na Figura 76, onde foram estabelecidas tendências lineares, para o ganho de resistência entre a cinza não moída e moída por 2h, e para a leve queda da resistência entre a cinza moída por 2h e moída por 6h, mesmo que a diferença entre estes possa ser considerada uma estagnação no ganho de resistência, o trabalho de Bouzoubaâ *et al.* (1997) aponta que a prolongação do tempo de moagem proporcionaria uma contínua queda da resistência.

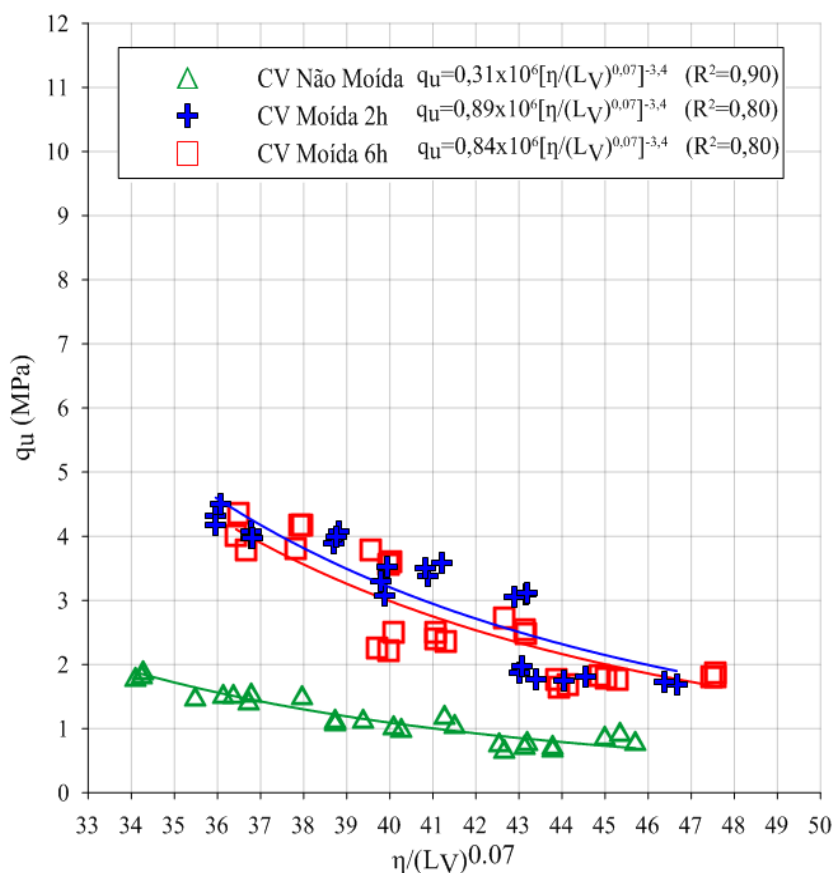


Figura 75 – Efeito da variação da moagem da cinza volante para amostras curadas a 23°C

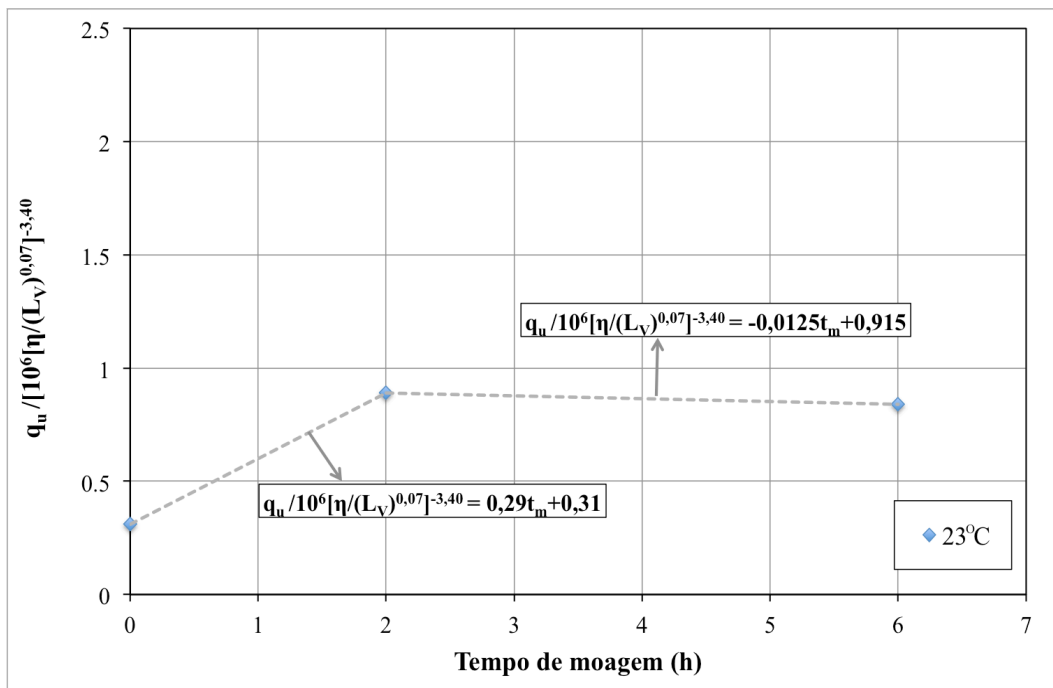


Figura 76 – Ajuste da tendência da variação do tempo de moagem da cinza volante a 23°C

As equações obtidas pelas tendências são apresentadas nas equações 22 e 23.

$$q_u = (0,29t_m + 0,31) \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (0h \leq t_m \leq 2h) \quad (\text{equação 22})$$

$$q_u = (-0,0125t_m + 0,915) \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (2h < t_m \leq 6h) \quad (\text{equação 23})$$

Onde:

q_u = resistência à compressão simples (MPa);

η = porosidade (%);

L_v = teor volumétrico de cal (%);

t_m = tempo de moagem (h).

5.5.2 Amostras curadas a 40°C

São apresentados na Figura 77 os resultados para os corpos de prova curados a 40°C para as amostras de cinza volante não moída, moída 2h e moída 6h. Pode-se observar um ganho de resistência de, em média, 39% entre a cinza volante não moída e a moída por 2h. E, um ganho de 21% na resistência entre a cinza moída 2h e a moída 6h.

O percentual de ganho de resistência entre a cinza não moída e moída 2h foi inferior ao observado pelas amostras curadas a 23°C. Isto pode ser atribuído ao ganho de resistência devido ao aumento da temperatura de cura.

Diferentemente do observado pelas amostras curadas a 23°C, o aumento da moagem de 2h para 6h proporcionou um aumento na resistência do material. O que indica que, mesmo com um aumento na quantidade de água requerida pela mistura devido à quebra de partículas na moagem, o aumento da temperatura de cura proporcionou um ambiente favorável para o desenvolvimento das reações pozolânicas.

Foi possível realizar a análise do ganho de resistência proporcionado pelo aumento do tempo de moagem, através da normalização de $(q_u/[\eta/(L_v)^{0,07}]^{-3,40})$, pois, somente o escalar das equações geradas para a previsão da resistência à compressão simples alterou-se com o aumento de tempo de moagem. Esta comparação é apresentada na Figura 78, onde foram estabelecidas tendências lineares para o ganho de resistência entre a cinza não moída e moída por 2h, e outra para da resistência apresentada pela cinza moída por 2h e moída por 6h, semelhantemente ao realizado para o tempo de cura de 23°C.

As equações obtidas pelas tendências são apresentadas nas equações 24 e 25.

$$q_u = (0,26t_m + 1,35) \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (0h \leq t_m \leq 2h) \quad \text{(equação 24)}$$

$$q_u = (0,1t_m + 1,67) \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (2h < t_m \leq 6h) \quad \text{(equação 25)}$$

Onde:

q_u = resistência à compressão simples (MPa);

η = porosidade (%);

L_v = teor volumétrico de cal (%);

t_m = tempo de moagem (h).

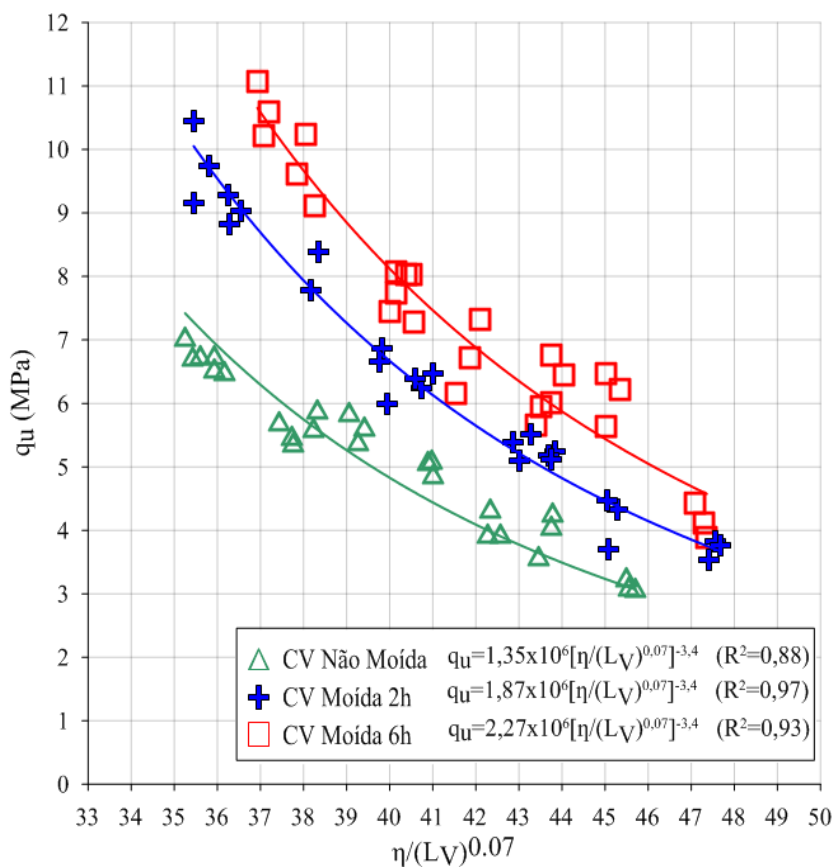


Figura 77 – Efeito da variação da moagem da cinza volante para amostras curadas a 40°C

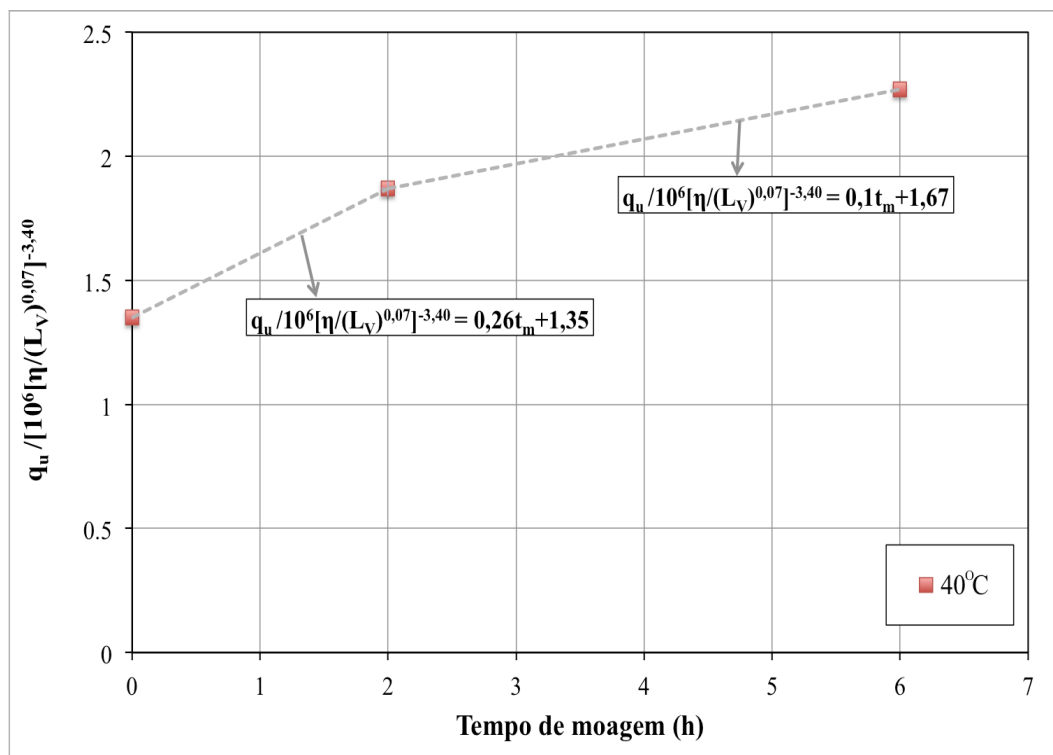


Figura 78 – Ajuste da tendência da variação do tempo de moagem da cinza volante a 40°C

5.5.3 Amostras curadas a 60°C

São apresentados na Figura 79 os resultados para os corpos de prova curados a 60°C para as amostras de cinza volante não moída e moída 6h. Pode-se observar um ganho de resistência de, em média, 27% entre a cinza volante não moída e a moída 6h. Observa-se uma porcentagem de ganho de resistência bastante menor entre a cinza não moída e moída se comparada às outras temperaturas de cura, fato que pode ser atribuído, em parte, pela aceleração das reações pozolânicas devido ao aumento da temperatura de cura.

Todavia, se estes resultados forem comparados com os obtidos pela cinza volante moída 6h curada a 40°C, pode-se observar uma queda média na resistência de 14%. Conforme visto anteriormente, tal fenômeno foi relatado por Payá *et al.* (2000), que ao analisar o ganho de resistência de argamassas de cimento com 30% de cinza volante (não moída e moída por 1h), para diferentes tempos de cura (3, 7, 14 e 28 dias) e diferentes temperaturas de cura (23°C, 40°C, 60°C e 80°C) observaram que, a partir dos 7 dias de cura a resistência apresentada pelos corpos de prova curados a 40°C apresentavam uma maior resistência que os curados a 60°C e 80°C, os quais apresentaram uma estabilização na resistência independente do tempo de cura. Os autores atribuíram este fenômeno devido a um maior valor de q_u ser obtido para tempos de

cura muito pequenos, e, conseqüentemente, o aumento de resistência é limitado, principalmente para as cinzas volante mais reativas

Novamente, realizou-se a análise do ganho de resistência proporcionado pelo aumento do tempo de moagem, através da normalização de $(q_u/[\eta/(L_V)^{0,07}]^{-3,40})$, já que, somente o escalar das equações geradas para a previsão da resistência à compressão simples alterou-se com o aumento de tempo de moagem. Esta comparação é apresentada na Figura 80, onde foi estabelecida uma tendência linear para o ganho de resistência entre a cinza não moída e moída por 6h.

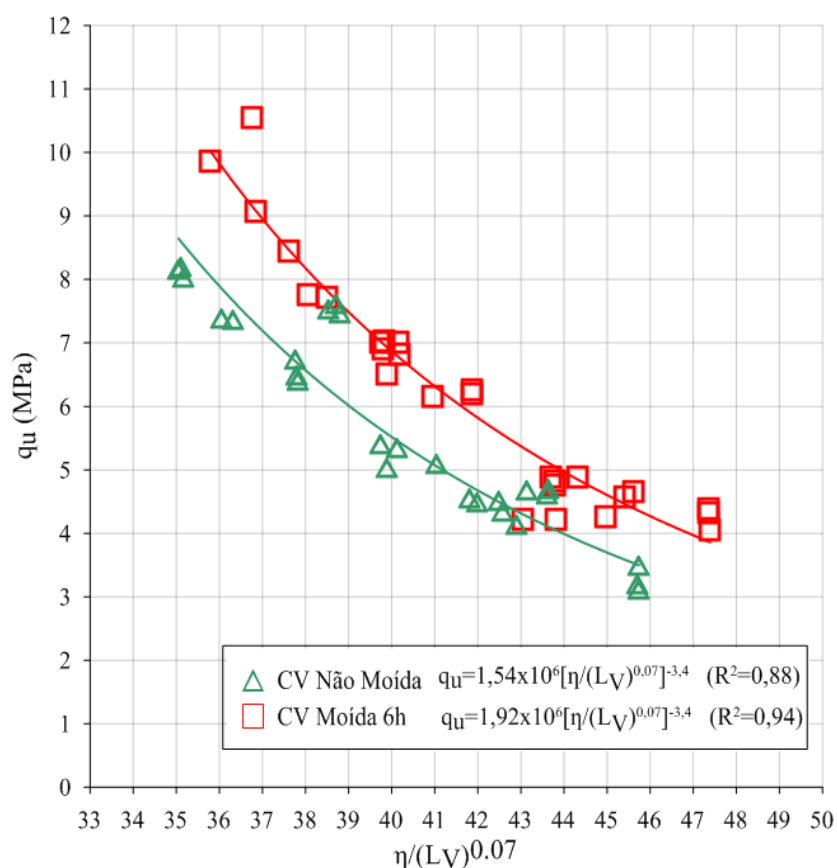


Figura 79 – Efeito da variação da moagem da cinza volante para amostras curadas a 60°C

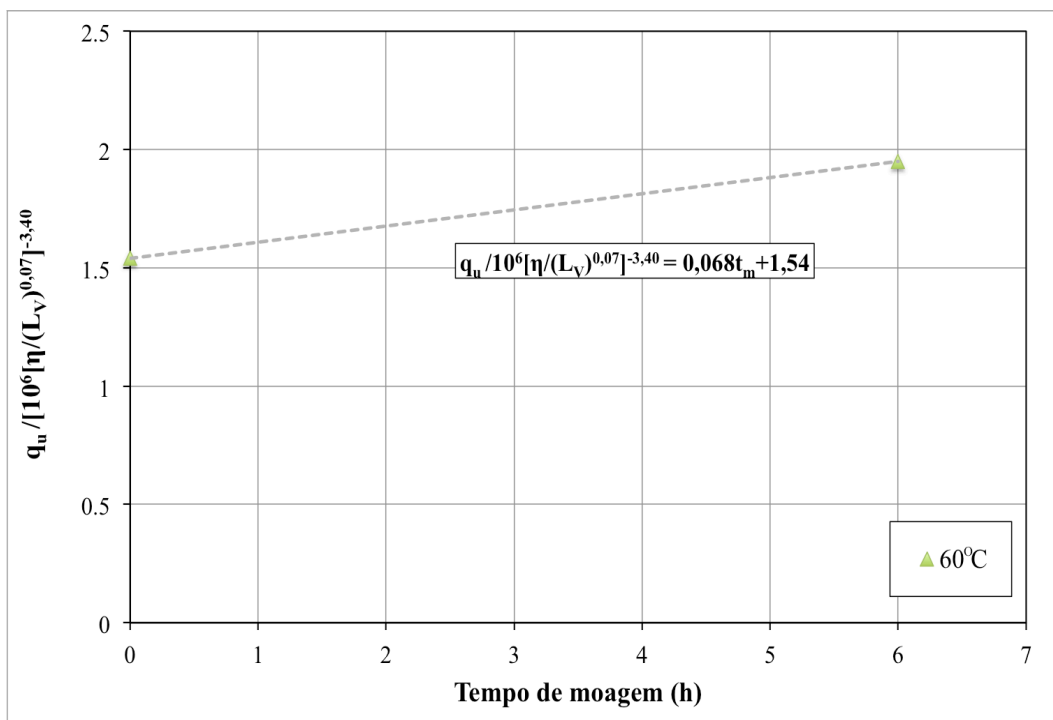


Figura 80 – Ajuste da tendência da variação do tempo de moagem da cinza volante a 60°C

A equação obtida pela tendência é apresentada na equação 26.

$$q_u = (0,068t_m + 1,54) \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (0h \leq t_m \leq 2h) \quad (\text{equação 26})$$

Onde:

q_u = resistência à compressão simples (MPa);

η = porosidade (%);

L_v = teor volumétrico de cal (%);

t_m = tempo de moagem (h).

5.5.4 Efeito do tempo de moagem em função da temperatura de cura

Na Figura 81 é apresentado o comportamento global da variável avaliada neste item, o tempo de moagem. Através desta figura, observa-se que a moagem da cinza proporciona aumentos em q_u , porém, embora não se tenha os dados para a cinza moída 2h a 60°C, a moagem da

cinza por 2h aparenta ser mais eficiente para as temperaturas em que foram realizados os ensaios (23°C e 40°C)

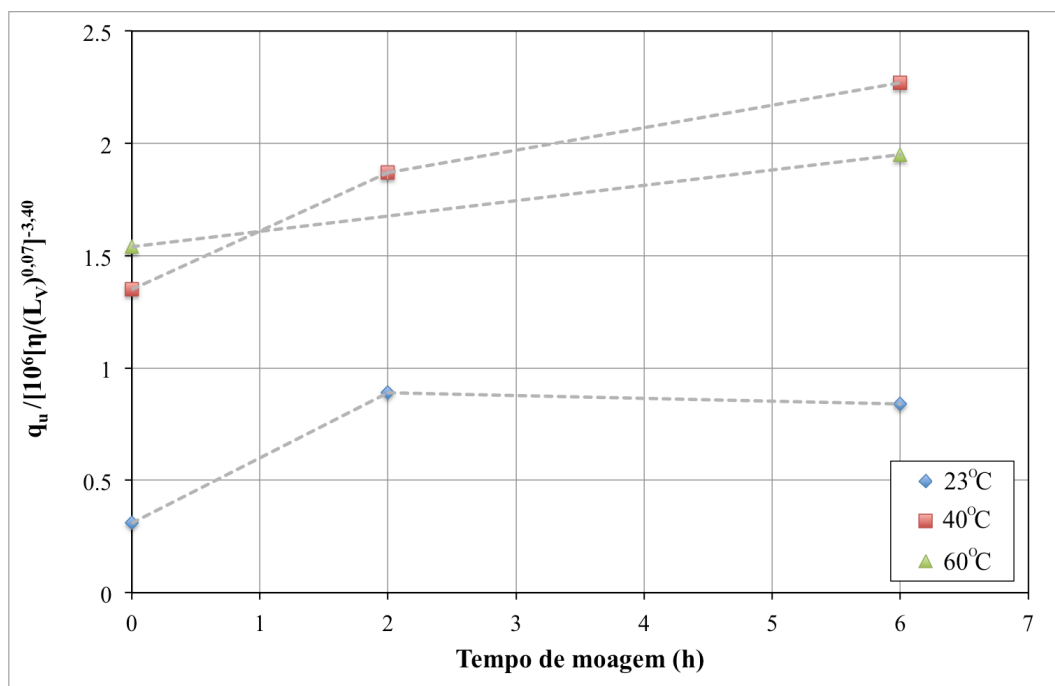


Figura 81 – Comportamento global da resistência frente à variação do tempo de moagem

Observando as equações 22 e 24, nota-se uma tendência das retas a um paralelismo, o que pode implicar que a taxa de ganho de resistência proporcionada pela moagem do material independe da temperatura de cura, sendo este responsável pelo aumento da resistência “inicial” do gráfico (cinza volante não moída), contudo, seriam necessários mais dados para validar esta hipótese.

É possível observar que, em algum ponto entre a cinza não moída e a cinza moída 6h, as retas de tendência apresentadas para 40°C e 60°C se interceptam, invertendo a tendência da temperatura mais alta proporcionar maior resistência à compressão simples. Payá et al. (2000) estudando o efeito do tempo de cura na influência da resistência variando-se a temperatura de cura e a moagem da cinza, observou que a partir de um tempo de cura, entre 3 e 7 dias, os corpos de prova curados a 40°C apresentaram maior resistência que os curados a 60°C. Os autores também observaram que o ponto em que esta mudança de comportamento acontecia diminuiu com a moagem da cinza. Assim, é possível perceber que, para a mistura analisada, a inversão da tendência ocorreu em algum ponto após os 7 dias de cura para a cinza não moída,

e antes, para a cinza moída 6h. Contudo, não foi possível precisar o ponto em que isto ocorre, já que não foram realizados os ensaios com cinza moída 2h a 60°C.

A queda de resistência observada entre os corpos de prova curados a 40°C e 60°C pode acontecer devido ao desenvolvimento muito acelerado dos cristais de CSH e CAH impulsionados pela alta temperatura no começo do tempo de cura, conforme observado por Payá et al. (2000). Isto implica que, os cristais formados a 60°C tendem a ser mais frágeis e, portanto, proporcionariam uma cimentação mais fraca das misturas. Este fenômeno pode ser intensificado pela moagem do material, já que, este processo implica em um aumento no número de reações que ocorrem na mistura.

Através deste gráfico também é possível observar que a variação da resistência devido da mudança da temperatura de cura de 40°C para 60°C não foi muito expressiva. Apontando que a cura à temperatura de 40°C é mais eficiente na obtenção de melhores resultados, principalmente se a cinza passou por um processo de moagem.

5.5 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA BIBLIOGRAFIA

Neste item os resultados obtidos pela presente pesquisa foram comparados aos resultados obtidos por Saldanha (2014), que estudou o impacto da variação da temperatura de cura para diferentes períodos de cura em misturas de cinza volante e cal de carbureto. A cinza volante utilizada pelo autor é proveniente da empresa Celulose Riograndese, e apresenta composição química e quantidade de material amorfo similares aos da cinza volante utilizada no trabalho desenvolvido na atual pesquisa, da empresa Braskem (Tabela 21). Porém, a área superficial específica da cinza volante da Celulose Riograndese é muito maior que a da Braskem, 6,84 m²/g e 3,28 m²/g, respectivamente (o ensaio para a determinação da área superficial da cinza volante da Celulose Riograndese também foi realizada com o equipamento BET no LACER). A cal de carbureto utilizada por Saldanha (2014) é a mesma utilizada neste trabalho.

Nos resultados apresentados por Saldanha (2014), a relação $\eta/(L_V)$ para as misturas realizadas teve o teor volumétrico de cal ajustado por um expoente de 0,11. Este valor proporcionou um melhor coeficiente de determinação para as curvas geradas em sua pesquisa. Todavia, o expoente que melhor se adaptou aos resultados obtidos pela atual pesquisa foi de 0,07. Portanto, os dados obtidos por Saldanha (2014) foram ajustados pelo expoente definido na presente pesquisa, a fim de que os resultados possam ser comparados. O mesmo foi realizado

para o expoente da linha de tendência de potência obtida, Saldanha (2014) havia estipulado um valor de -2,97, e para fins de comparação, este expoente foi alterado para -3,4, valor obtido pela pesquisa atual.

Tabela 21 – Comparação das características químicas das cinzas volantes das empresas Braskem e Celulose Riograndense

Características químicas	Braskem (%)	Celulose Riograndense* (%)
SiO ₂	66,40	66,281
Al ₂ O ₃	18,20	22,505
Fe ₂ O ₃	6,50	2,839
TiO ₂	0,80	1,600
CaO	2,15	1,865
MgO	0,88	-
K ₂ O	1,41	1,960
Na ₂ O	0,34	-
C	0,14	-
S	0,09	-
Material amorfo	69,95	57,7

(*dados apresentados por SALDANHA, 2014)

Nas figuras 82, 83 e 84 são apresentadas as curvas de tendência observadas para as misturas com cinza volante proveniente da Braskem (utilizada neste trabalho) e da Celulose Riograndense – utilizada por Saldanha (2014) para cinza volante não moída curadas a 23°C, 40°C e 60°C, respectivamente.

Foi observado que o coeficiente de determinação (R^2) dos resultados de Saldanha (2014) não foi muito impactado pela alteração dos expoentes para a adequação aos resultados apresentados por esta pesquisa, tendo aumentado de 0,92 para 0,95 para as amostras curadas a 23°C. Para 40°C, R^2 diminuiu de 0,97 para 0,93. Já para 60°C, R^2 manteve-se constante igual a 0,96. Portanto a mudança dos expoentes foi considerada válida para fins comparativos dos resultados.

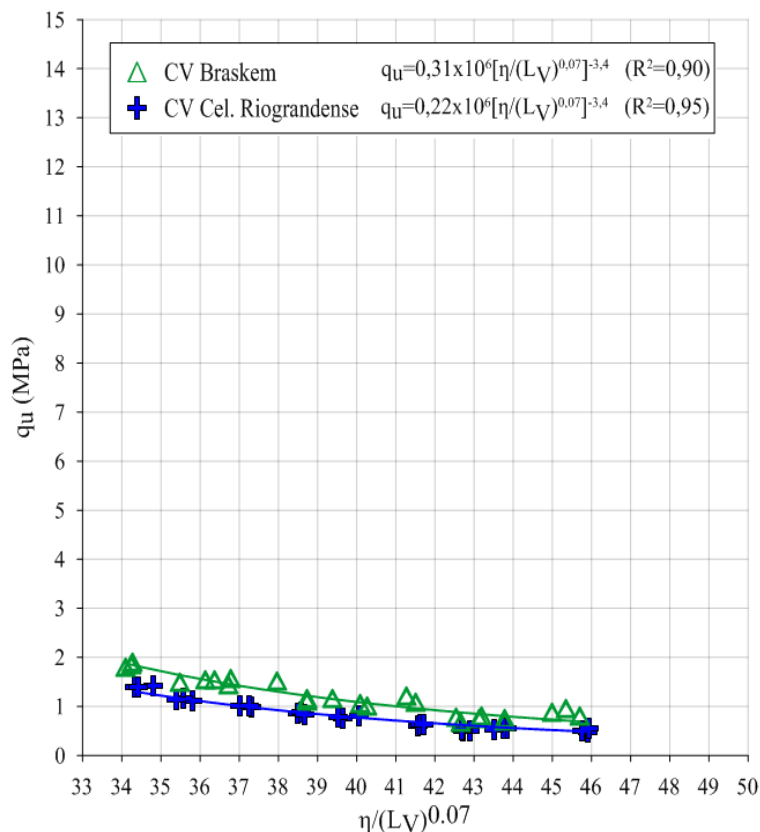


Figura 82 – Comparação dos resultados das relações $\eta/(LV)^{0,07}$ entre misturas de cinza volante não moída das empresas Braskem e Celulose Riograndense curadas a 23°C

Embora as misturas com a cinza volante utilizadas neste trabalho tenham apresentado uma maior resistência com temperatura de cura de 23°C, em termos de valores absolutos de resistência, pode-se observar uma maior diferença entre os valores de resistência com o aumento da temperatura, indicando que a aceleração das reações pozolânica através do aumento da temperatura foi bem mais eficiente para as misturas apresentadas por Saldanha (2014).

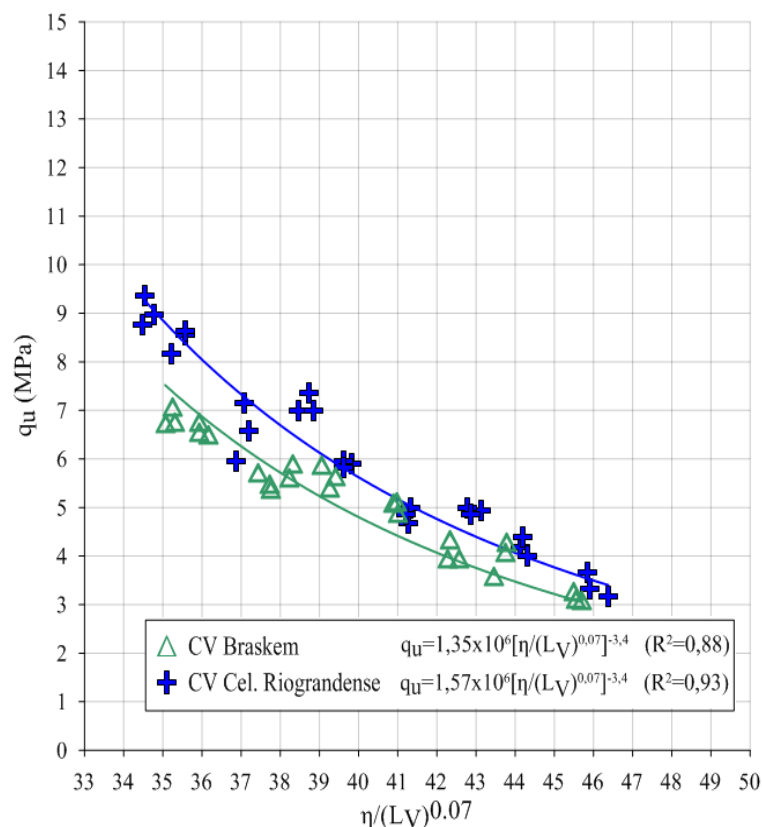


Figura 83 – Comparação dos resultados das relações $\eta/(LV)^{0,07}$ entre misturas de cinza volante não moída das empresas Braskem e Celulose Riograndense curadas a 40°C

Pode-se observar nas figuras apresentadas que, para 23°C a cinza volante proveniente da Braskem apresentou resultados, em média, 29% maiores. Já para as amostras curadas a 40°C e 60°C os resultados da Celulose Riograndense foram melhores, a diferença entre a resistência apresentada pelas diferentes cinzas aumentou com o aumento da temperatura de cura – em média 16% para 40°C e 49% para 60°C.

Tal fato pode ser atribuído à maior área superficial específica, a maior superfície proporciona uma maior quantidade de sílica e alumina disponível na cinza para reagir com a cal de carbureto, promovendo um maior ganho de resistência. Para a cura a 23°C, provavelmente, o tempo de cura de 7 dias não é suficiente para que o maior número de pontos de contatos promovam um ganho significativo de resistência da mistura. Contudo, o aumento da temperatura gera uma aceleração das reações pozolânicas, então, é possível observar um aumento mais expressivo da resistência para a cinza volante da Celulose Riograndese do que o apresentado pela cinza da Braskem.

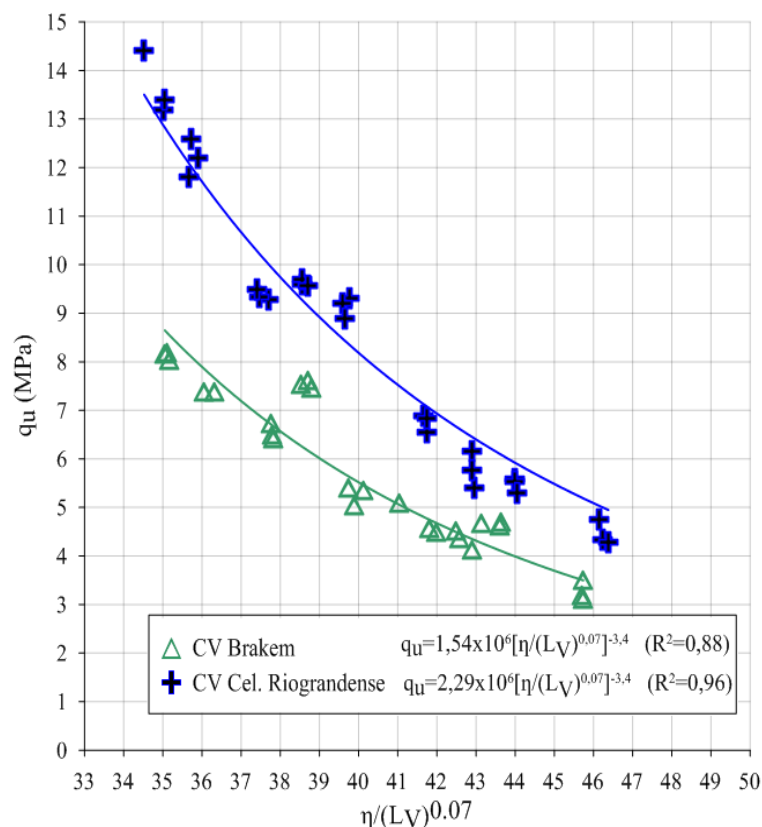


Figura 84 – Comparação dos resultados das relações $\eta/(L_V)^{0,07}$ entre misturas de cinza volante não moída das empresas Brakem e Celulose Riograndense curadas a 60°C

5.6 ANÁLISE DA VARIÂNCIA

Visando um melhor apreciação dos efeitos das variáveis estabelecidas nesta pesquisa na resistência à compressão simples, foi realizada a análise da variância dos resultados. Como não foi realizada a mistura de cinza moída por 2h para a temperatura de cura de 60°C, a análise de resultados foi dividida em duas partes. A primeira, onde foi comparado o efeito da cinza não moída e moída 6h para as temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C. Já a segunda, onde foi comparado o efeito da cinza não moída, moída 2h e moída 6h para as temperaturas de 23°C e 40°C.

5.6.1 Análise para o experimento sem cinza volante moída 2h

5.6.1.1 Tabela ANOVA

Através da tabela ANOVA (Tabela 22) com as 4 variáveis independentes (fatores) controláveis: quantidade cal (A), peso específico aparente seco (B), tempo de moagem (C) e

temperatura de cura (D), foi realizada a análise da variância. Isto possibilitou a análise dos fatores controláveis e de suas interações para um nível de significância de 95%.

Para cada fator independente e combinação foram calculados dos seguintes termos: SQ (raiz quadrada), GDL (número de graus de liberdade correspondente a cada termo), MQ (média quadrada), Teste F (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 valores de significância inferiores a 5% indicam que os resultados pertencem a distribuições diferentes, ou seja, a variação do fator controlável provoca alteração significativa nos resultados.

A partir dos resultados obtidos pela tabela ANOVA, é possível verificar que todas as variáveis estudadas neste item são estatisticamente significativas na alteração da variável de resposta (resistência à compressão simples). Também, através do “Teste F”, é possível determinar quais variáveis e qual interação entre variáveis proporcionam o maior impacto na variação da resistência, pois, quanto maior o valor deste teste, maior será a sua significância. Então, em ordem decrescente, as variáveis com maior influência da variação de q_u são: temperatura de cura, peso específico aparente seco, tempo de moagem e teor de cal.

Com os resultados da Tabela 22, é demonstrado que as interações de 1ª e 2ª ordem e a interação de 3ª ordem são significativas. Contudo, percebe-se, a partir do “Teste F”, que o nível de influência das interações diminuiu com o aumento da ordem de interação. Ou seja, os fatores de independentes (A, B, C e D) são mais fortemente significativos que os de 1ª ordem (AB, AC, AD, BC, BD e CD), que por sua vez, são mais fortemente significativos que os de 2ª ordem (ABC, ABD, ACD, BCD). E estes, com exceção da interação ABC, são mais fortemente significativos que o fator de 3ª ordem (ABCD).

É possível perceber que o experimento foi realizado corretamente, já que a MQ do erro foi pequena em relação às demais MQ. Pode-se atribuir este resultado ao fato de q_u de cada corpo de prova não poder variar em mais de 10% da média da resistência do conjunto da tréplica dos corpos de prova, já que este fato gera consequências negativas no estudo da variabilidade dos experimentos e, portanto, na identificação dos fatores mais significativos.

Tabela 22 – Tabela ANOVA para as variáveis independentes estudadas sem cinza volante moída 2h

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância	
A	37,72	2	18,86	303,32	0,00%	significativo
B	208,42	2	104,21	1676,12	0,00%	significativo
C	71,64	1	71,64	1152,22	0,00%	significativo
D	615,44	2	307,72	4949,42	0,00%	significativo
AB	4,37	4	1,10	17,55	0,00%	significativo
AC	1,33	2	0,67	10,63	0,00%	significativo
AD	18,90	4	4,73	76,00	0,00%	significativo
BC	10,55	2	5,28	84,81	0,00%	significativo
BD	22,66	4	5,67	91,12	0,00%	significativo
CD	16,34	2	8,17	131,41	0,00%	significativo
ABC	1,44	4	0,36	5,76	0,03%	significativo
ABD	4,96	8	0,62	9,96	0,00%	significativo
ACD	2,52	4	0,63	10,12	0,00%	significativo
BCD	2,02	4	0,51	8,09	0,00%	significativo
ABCD	3,15	8	0,40	6,32	0,00%	significativo
Erro	6,78	109	0,07			
Total	1028,16	162				

5.6.1.2 Comparação das médias

Uma vez que todos os fatores e suas interações são significativas, deve-se realizar uma comparação das médias. Através desta comparação, é possível determinar as diferenças entre os níveis dos fatores (diferentes porcentagens de cal, temperaturas, peso específico e tempos de moagem) na variação da resistência à compressão simples por meio da sua média comparada. Para esta comparação, um fator foi variado, enquanto os outros três fatores foram fixados. Desta maneira é possível identificar em que nível de cada fator existe uma diferença real entre as médias de resistência.

Na Tabela 23 são apresentadas as médias para cada nível de cada fator estudado. As médias são comparadas a um valor fixo chamado de limite de decisão (LD), este dado é obtido para um nível de significância de 95% e, também é dependente do desvio padrão e do erro residual dos dados analisados. Para esta análise o valor do LD é de 0,57, isso significa que, se a diferença entre as médias dos níveis analisados for maior que este valor absoluto, os níveis

comparados são diferentes. Caso contrário, as médias comparadas são consideradas iguais estatisticamente e podem ser explicadas pela variabilidade residual do próprio experimento.

Tabela 23 – Tabela das médias das variáveis analisadas sem cinza volante moída 2h

		Temperatura										
		60°C			40°C			23°C				
		Cal										
		5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%		
Peso Específico	11 kN/m ³	Tempo de Moagem	0h	3,28	4,4	4,34	3,17	4,14	4,08	0,89	0,75	0,75
			6h	4,27	4,51	4,64	3,98	5,77	6,22	1,83	1,8	1,7
	12 kN/m ³	0h	4,72	5,26	7,55	5,04	5,61	5,75	1,13	1,08	1,14	
		6h	4,63	6,21	6,96	6,12	6,74	7,79	2,6	2,42	2,33	
	13 kN/m ³	0h	6,55	7,39	8,13	5,53	6,61	6,86	1,52	1,54	1,86	
		6h	6,81	7,98	9,84	7,75	9,66	10,63	3,66	4,05	4,06	

Cada nível dos fatores controlados é escolhido em função das necessidades do experimento. Neste caso, cada nível dos fatores analisados deve ser escolhido com o objetivo de otimizar a relação entre maior resistência e economia. Um aumento no nível dos fatores, na maioria dos casos, leva a um aumento na resistência, mas, também gera um aumento no custo de produção. Assim, se a comparação das médias for igual, a solução mais econômica é escolher o menor nível. Se não, deve-se optar pelo nível maior. Esta comparação é realizada para os fatores estipulados nas tabelas 24 a 27.

Na Tabela 24 pode-se observar que para todos os níveis de cal analisados os resultados foram estatisticamente iguais para a temperatura de 23°C, indicando que, conforme observado no item 5.1, o tempo de cura 7 dias para esta temperatura de cura não é suficiente para que as reações pozolânicas entre a cinza volante, moída ou não, com a cal de carbureto ocorram.

Para as demais temperaturas, 72% das combinações foram consideradas diferentes, implicando que o aumento do teor de cal promove, na maioria dos casos, ganhos de resistência da mistura. Também é possível observar que, para a temperatura de cura de 40°C, o aumento do teor de cal não promoveu ganhos estatisticamente diferentes de resistência para a variação de 10% para 15% de cal, conforme observado por Horpibulsuk *et al.* (2012), isto pode ocorrer devido à incapacidade da cinza volante de reagir como excesso de cal de carbureto e, este excesso de cal na mistura não proporciona um aumento significativo de

resistência, podendo até diminuí-la. Já para os corpos de prova curados a 60°C, o ganho de resistência não foi considerado estatisticamente diferente para valores de peso específico aparente seco mais baixos, principalmente para cinza volante moída 6h com 11 kN/m³. Fenômeno que pode ser explicado pela menor quantidade de ponto de contatos entre a cal e a superfície da cinza volante, o que não favorece a promoção de reações, como observado por Lopes Junior (2007).

Tabela 24 – Comparação de média para o fator A (teor de cal) sem cinza volante moída 2h

Fator A (cal) variando, Fatores B (peso específico), C (tempo de moagem) e D (temperatura de cura) fixos							
B=11kN/m ³ C=0h D=60°C	A1-A2	1,13	diferente	B=12kN/m ³ C=6h D=40°C	A1-A2	0,62	diferente
	A1-A3	1,06	diferente		A1-A3	1,67	diferente
	A2-A3	-0,07	igual		A2-A3	1,06	diferente
B=11kN/m ³ C=6h D=60°C	A1-A2	0,25	igual	B=13kN/m ³ C=0h D=40°C	A1-A2	1,08	diferente
	A1-A3	0,38	igual		A1-A3	1,33	diferente
	A2-A3	0,14	igual		A2-A3	0,25	igual
B=12kN/m ³ C=0h D=60°C	A1-A2	0,55	igual	B=13kN/m ³ C=6h D=40°C	A1-A2	1,91	diferente
	A1-A3	2,83	diferente		A1-A3	2,88	diferente
	A2-A3	2,29	diferente		A2-A3	0,97	diferente
B=12kN/m ³ C=6h D=60°C	A1-A2	1,59	diferente	B=11kN/m ³ C=0h D=23°C	A1-A2	-0,14	igual
	A1-A3	2,34	diferente		A1-A3	-0,15	igual
	A2-A3	0,75	diferente		A2-A3	-0,01	igual
B=13kN/m ³ C=0h D=60°C	A1-A2	0,84	diferente	B=11kN/m ³ C=6h D=23°C	A1-A2	-0,03	igual
	A1-A3	1,59	diferente		A1-A3	-0,13	igual
	A2-A3	0,75	diferente		A2-A3	-0,10	igual
B=13kN/m ³ C=6h D=60°C	A1-A2	1,18	diferente	B=12kN/m ³ C=0h D=23°C	A1-A2	-0,06	igual
	A1-A3	3,03	diferente		A1-A3	0,01	igual
	A2-A3	1,86	diferente		A2-A3	0,07	igual
B=11kN/m ³ C=0h D=40°C	A1-A2	0,98	diferente	B=12kN/m ³ C=6h D=23°C	A1-A2	-0,18	igual
	A1-A3	0,92	diferente		A1-A3	-0,27	igual
	A2-A3	-0,07	igual		A2-A3	-0,10	igual
B=11kN/m ³ C=6h D=40°C	A1-A2	1,80	diferente	B=13kN/m ³ C=0h D=23°C	A1-A2	0,02	igual
	A1-A3	2,25	diferente		A1-A3	0,34	igual
	A2-A3	0,45	igual		A2-A3	0,32	igual
B=12kN/m ³ C=0h D=40°C	A1-A2	0,57	igual	B=13kN/m ³ C=6h D=23°C	A1-A2	0,40	igual
	A1-A3	0,72	diferente		A1-A3	0,41	igual
	A2-A3	0,15	igual		A2-A3	0,01	igual

Onde: A1 = 5%, A2 = 10%, A3 = 15% de cal

Na Tabela 25 observa-se que, para a grande maioria, 87% das combinações, a comparação das médias dos níveis foram diferentes. Observa-se que a maioria dos níveis onde a diferença entre as médias foram consideradas estatisticamente iguais ocorreram nas misturas com temperatura mais baixa ($D = 23^{\circ}\text{C}$) onde foi utilizada cinza volante não moída ($C = 0\text{h}$). Isto indica que, o aumento do nível de peso específico aparente seco da mistura para o tempo de cura 7 dias, promove um aumento significativo em q_u principalmente entre as combinações com cinza volante moída e temperatura de cura elevadas, fatores estes, que normalmente promovem a aceleração da ocorrência de reações pozolânicas. Com isto, percebe-se que todos os níveis dos fatores A, C e D interferem nos níveis do fator B, o que comprova suas interações.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 26, observa-se para 82% dos resultados foram obtidas comparações de médias diferentes. Contudo, para a temperatura de 60°C , 44% dos resultados da diferença das médias foram considerados estatisticamente iguais, contudo, se for considerado que um dos valores considerados estatisticamente diferente é negativo, indicando uma queda de resistência, 56% dos dados apontam que, pra esta temperatura de cura a moagem da cinza volante por 6h não proporcionou ganhos significativos de resistência à compressão simples em relação a cinza volante não moída, para a maioria dos casos.

Finalmente, na Tabela 27, observa-se embora 91% dos resultados tenham sido considerados estatisticamente diferentes, apenas para 82% das combinações, o aumento da temperatura de cura promoveu ganhos de resistência significativos, apresentando comparação das médias dos níveis estipulados diferentes. Os níveis onde a comparação das médias foram consideradas estatisticamente iguais, ou diferentes porém indicando uma queda de resistência, ocorreram, em sua maioria, para as combinações com cinza volante moída por 6h quando a temperatura de cura foi variada de 40°C para 60°C . Isto aponta que, para a cinza volante moída por 6h estudada, o aumento da temperatura de cura de 40°C para 60°C , não somente, não promove ganhos significativos de resistência, como implica em uma redução da mesma. Assim, o aumento da temperatura de cura, nesta situação, seria considerada ineficiente.

Tabela 25 – Comparação de média para o fator B (peso específico) sem cinza volante moída 2h

Fator B (peso específico) variando, Fatores A (cal), C (tempo de moagem) e D (temperatura de cura) fixos							
A=5% C=0h D=60°C	B1-B2	1,45	diferente	A=10% C=6h D=40°C	B1-B2	0,97	diferente
	B1-B3	3,27	diferente		B1-B3	3,89	diferente
	B2-B3	1,83	diferente		B2-B3	2,93	diferente
A=5% C=6h D=60°C	B1-B2	0,37	igual	A=15% C=0h D=40°C	B1-B2	1,67	diferente
	B1-B3	2,55	diferente		B1-B3	2,79	diferente
	B2-B3	2,19	diferente		B2-B3	1,12	diferente
A=10% C=0h D=60°C	B1-B2	0,87	diferente	A=15% C=6h D=40°C	B1-B2	1,57	diferente
	B1-B3	2,99	diferente		B1-B3	4,41	diferente
	B2-B3	2,13	diferente		B2-B3	2,85	diferente
A=10% C=6h D=60°C	B1-B2	1,71	diferente	A=5% C=0h D=23°C	B1-B2	0,25	igual
	B1-B3	3,48	diferente		B1-B3	0,64	diferente
	B2-B3	1,78	diferente		B2-B3	0,40	igual
A=15% C=0h D=60°C	B1-B2	3,22	diferente	A=5% C=6h D=23°C	B1-B2	0,77	diferente
	B1-B3	3,80	diferente		B1-B3	1,84	diferente
	B2-B3	0,59	diferente		B2-B3	1,07	diferente
A=15% C=6h D=60°C	B1-B2	2,32	diferente	A=10% C=0h D=23°C	B1-B2	0,33	igual
	B1-B3	5,20	diferente		B1-B3	0,79	diferente
	B2-B3	2,88	diferente		B2-B3	0,46	igual
A=5% C=0h D=40°C	B1-B2	1,88	diferente	A=10% C=6h D=23°C	B1-B2	0,63	diferente
	B1-B3	2,37	diferente		B1-B3	2,26	diferente
	B2-B3	0,50	igual		B2-B3	1,63	diferente
A=5% C=6h D=40°C	B1-B2	2,15	diferente	A=15% C=0h D=23°C	B1-B2	0,40	igual
	B1-B3	3,78	diferente		B1-B3	1,11	diferente
	B2-B3	1,64	diferente		B2-B3	0,72	diferente
A=10% C=0h D=40°C	B1-B2	1,47	diferente	A=15% C=6h D=23°C	B1-B2	0,63	diferente
	B1-B3	2,48	diferente		B1-B3	2,37	diferente
	B2-B3	1,01	diferente		B2-B3	1,74	diferente

Onde: B1 = 11kN/m³, B2 = 12kN/m³, B3 = 13kN/m³

Tabela 26 – Comparação de média para o fator C (tempo de moagem) sem cinza volante moída 2h

Fator C (tempo de moagem) variando, Fatores A (cal), B (peso específico) e D (temperatura de cura) fixos			
A=5% B=11kN/m ³ D=60°C	C1-C2	0,99	diferente
A=5% B=12kN/m ³ D=60°C	C1-C2	-0,10	igual
A=5% B=13kN/m ³ D=60°C	C1-C2	0,27	igual
A=10% B=11kN/m ³ D=60°C	C1-C2	0,11	igual
A=10% B=12kN/m ³ D=60°C	C1-C2	0,96	diferente
A=10% B=13kN/m ³ D=60°C	C1-C2	0,60	diferente
A=15% B=11kN/m ³ D=60°C	C1-C2	0,31	igual
A=15% B=12kN/m ³ D=60°C	C1-C2	-0,59	diferente
A=15% B=13kN/m ³ D=60°C	C1-C2	1,71	diferente
A=5% B=11kN/m ³ D=40°C	C1-C2	0,82	diferente
A=5% B=12kN/m ³ D=40°C	C1-C2	1,09	diferente
A=5% B=13kN/m ³ D=40°C	C1-C2	2,22	diferente
A=10% B=11kN/m ³ D=40°C	C1-C2	1,64	diferente
A=10% B=12kN/m ³ D=40°C	C1-C2	1,14	diferente
A=10% B=13kN/m ³ D=40°C	C1-C2	3,05	diferente
A=15% B=11kN/m ³ D=40°C	C1-C2	2,15	diferente
A=15% B=12kN/m ³ D=40°C	C1-C2	2,04	diferente
A=15% B=13kN/m ³ D=40°C	C1-C2	3,77	diferente
A=5% B=11kN/m ³ D=23°C	C1-C2	0,95	diferente
A=5% B=12kN/m ³ D=23°C	C1-C2	1,47	diferente
A=5% B=13kN/m ³ D=23°C	C1-C2	2,14	diferente
A=10% B=11kN/m ³ D=23°C	C1-C2	1,05	diferente
A=10% B=12kN/m ³ D=23°C	C1-C2	1,35	diferente
A=10% B=13kN/m ³ D=23°C	C1-C2	2,52	diferente
A=15% B=11kN/m ³ D=23°C	C1-C2	0,96	diferente
A=15% B=12kN/m ³ D=23°C	C1-C2	1,20	diferente
A=15% B=13kN/m ³ D=23°C	C1-C2	2,21	diferente

Onde: C1 = 0 horas, C2 = 6 horas

Tabela 27 – Comparação de média para o fator D (temperatura) sem cinza volante moída 2h

Fator D (temperatura de cura) variando, Fatores A (cal), B (peso específico) e C (tempo de moagem) fixos							
A=5% B=11kN/m ³ C=0h	D1-D2	0,12	igual	A=5% B=11kN/m ³ C=6h	D1-D2	0,29	igual
	D1-D3	2,40	diferente		D1-D3	2,44	diferente
	D2-D3	2,28	diferente		D2-D3	2,15	diferente
A=5% B=12kN/m ³ C=0h	D1-D2	9,75	diferente	A=5% B=12kN/m ³ C=6h	D1-D2	-1,50	diferente
	D1-D3	3,59	diferente		D1-D3	2,03	diferente
	D2-D3	3,91	diferente		D2-D3	3,53	diferente
A=5% B=13kN/m ³ C=0h	D1-D2	1,02	diferente	A=5% B=13kN/m ³ C=6h	D1-D2	-0,95	diferente
	D1-D3	5,03	diferente		D1-D3	3,15	diferente
	D2-D3	4,01	diferente		D2-D3	4,10	diferente
A=10% B=11kN/m ³ C=0h	D1-D2	0,26	igual	A=10% B=11kN/m ³ C=6h	D1-D2	-1,27	diferente
	D1-D3	3,65	diferente		D1-D3	2,71	diferente
	D2-D3	3,39	diferente		D2-D3	3,98	diferente
A=10% B=12kN/m ³ C=0h	D1-D2	10,86	diferente	A=10% B=12kN/m ³ C=6h	D1-D2	-0,53	igual
	D1-D3	4,19	diferente		D1-D3	3,79	diferente
	D2-D3	4,53	diferente		D2-D3	4,32	diferente
A=10% B=13kN/m ³ C=0h	D1-D2	0,78	diferente	A=10% B=13kN/m ³ C=6h	D1-D2	-1,68	diferente
	D1-D3	5,85	diferente		D1-D3	3,94	diferente
	D2-D3	5,08	diferente		D2-D3	5,61	diferente
A=15% B=11kN/m ³ C=0h	D1-D2	0,26	igual	A=15% B=11kN/m ³ C=6h	D1-D2	-1,58	diferente
	D1-D3	3,60	diferente		D1-D3	2,95	diferente
	D2-D3	3,34	diferente		D2-D3	4,52	diferente
A=15% B=12kN/m ³ C=0h	D1-D2	13,29	diferente	A=15% B=12kN/m ³ C=6h	D1-D2	-0,83	diferente
	D1-D3	6,41	diferente		D1-D3	4,64	diferente
	D2-D3	4,61	diferente		D2-D3	5,46	diferente
A=15% B=13kN/m ³ C=0h	D1-D2	1,28	diferente	A=15% B=13kN/m ³ C=6h	D1-D2	-0,80	diferente
	D1-D3	6,28	diferente		D1-D3	5,78	diferente
	D2-D3	5,01	diferente		D2-D3	6,57	diferente

Onde: D1 = 60°C, D2 = 40°C, D3 = 23°C

5.6.1 Análise para o experimento sem a temperatura de 60°C

5.6.1.1 Tabela ANOVA

Através da tabela ANOVA (Tabela 28) com as 4 variáveis independentes (fatores) controláveis: quantidade cal (A), peso específico aparente seco (B), tempo de moagem (C) e temperatura de cura (D), foi realizada a análise da variância. Isto possibilitou a análise dos fatores controláveis e de suas interações para um nível de significância de 95%.

Tabela 28 – Tabela ANOVA para as variáveis independentes estudadas sem a temperatura de 60°C

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância	
A	19,59	2	9,79	263,47	0,00%	significativo
B	205,50	2	102,75	2764,11	0,00%	significativo
C	102,30	1	51,15	1376,04	0,00%	significativo
D	640,80	2	640,78	17238,08	0,00%	significativo
AB	1,69	4	0,42	11,40	0,00%	significativo
AC	1,74	2	0,44	11,73	0,00%	significativo
AD	15,10	4	7,57	203,70	0,00%	significativo
BC	17,93	2	4,48	120,59	0,00%	significativo
BD	26,40	4	13,20	355,15	0,00%	significativo
CD	6,98	2	3,49	93,91	0,00%	significativo
ABC	1,42	4	0,18	4,80	0,00%	significativo
ABD	0,39	8	0,10	2,65	3,72%	significativo
ACD	2,47	4	0,62	16,65	0,00%	significativo
BCD	3,99	4	1,00	26,87	0,00%	significativo
ABCD	1,72	8	0,21	5,79	0,00%	significativo
Erro	4,05	109	0,037			
Total	1052,12	162				

Para cada fator independente e combinação foram calculados dos seguintes termos: SQ (raiz quadrada), GDL (número de graus de liberdade correspondente a cada termo), MQ (média quadrada), Teste F (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 valores de significância inferiores a 5% indicam que os resultados pertencem a

distribuições diferentes, ou seja, a variação do fator controlável provoca alteração significativa nos resultados.

A partir dos resultados obtidos pela tabela ANOVA, é possível verificar que todas as variáveis estudadas neste item são estatisticamente significativas na alteração da variável de resposta (resistência à compressão simples). Também, através do “Teste F”, é possível determinar quais variáveis e qual interação entre variáveis proporcionam o maior impacto na variação da resistência, pois, quanto maior o valor deste teste, maior será a sua significância. Então, em ordem decrescente, as variáveis com maior influência da variação de q_u são: temperatura de cura, peso específico aparente seco, tempo de moagem e teor de cal.

Com os resultados da Tabela 28, é demonstrado que as interações de 1ª e 2ª ordem e a interação de 3ª ordem são significativas. Contudo, percebe-se, a partir do “Teste F”, que o nível de influência das interações diminuiu com o aumento da ordem de interação. Ou seja, os fatores de independentes (A, B, C e D) são mais fortemente significativos que os de 1ª ordem (AB, AC, AD, BC, BD e CD), que por sua vez, são mais fortemente significativos que os de 2ª ordem (ABC, ABD, ACD, BCD). E as interações ACD e BCD, são mais fortemente significativos que o fator de 3ª ordem (ABCD).

É possível perceber que o experimento foi realizado corretamente, já que a MQ do erro foi pequena em relação às demais MQ. Pode-se atribuir este resultado ao fato de q_u de cada corpo de prova não poder variar em mais de 10% da média da resistência do conjunto da tréplica dos corpos de prova, já que este fato gera consequências negativas no estudo da variabilidade dos experimentos e, portanto, na identificação dos fatores mais significativos.

5.6.1.2 Comparação das médias

Uma vez que todos os fatores e suas interações são significativas, deve-se realizar uma comparação das médias. Através desta comparação, é possível determinar as diferenças entre os níveis dos fatores (diferentes porcentagens de cal, temperaturas, peso específico e tempos de moagem) na variação da resistência à compressão simples por meio da sua média comparada. Para esta comparação, um fator foi variado, enquanto os outros três fatores foram fixados. Desta maneira é possível identificar em que nível de cada fator existe uma diferença real entre as médias de resistência.

Na Tabela 29 são apresentadas as médias para cada nível de cada fator estudado. As médias são comparadas a um valor fixo chamado de limite de decisão (LD), este dado é obtido para um nível de significância de 95% e, também é dependente do desvio padrão e do erro residual dos dados analisados. Para esta análise o valor do LD é de 0,44, isso significa que, se a diferença entre as médias dos níveis analisados for maior que este valor absoluto, os níveis comparados são diferentes. Caso contrário, as médias comparadas são consideradas iguais estatisticamente e podem ser explicadas pela variabilidade residual do próprio experimento. A comparação para definição das combinações que podem ser consideradas eficientes é realizada para os fatores estipulados nas tabelas 30 a 33.

Tabela 29 – Tabela das médias das variáveis analisadas sem a temperatura de 60°C

		Temperatura							
		60°C			40°C				
		Cal							
		5%	10%	15%	5%	10%	15%		
Peso Específico	11 kN/m ³	Tempo de Moagem	0h	3,17	4,14	4,08	0,89	0,75	0,75
			2h	3,72	4,36	5,18	1,71	1,78	1,88
			6h	3,98	5,77	6,22	1,83	1,80	1,7
	12 kN/m ³		0h	5,04	5,61	5,75	1,13	1,08	1,14
			2h	5,34	6,37	6,51	3,10	3,49	3,31
			6h	6,12	6,74	7,79	2,60	2,42	2,33
	13 kN/m ³		0h	5,53	6,61	6,86	1,52	1,54	1,86
			2h	8,19	9,04	9,95	3,99	4,00	4,34
			6h	7,75	9,66	10,63	3,66	4,05	4,06

Na Tabela 30 pode-se observar que, novamente, para todos os níveis de cal analisados os resultados foram estatisticamente iguais para a temperatura de 23°C, indicando que, conforme observado no item 5.1, o tempo de cura 7 dias para esta temperatura de cura não é suficiente para que as reações pozolânicas entre a cinza volante, moída ou não, com a cal de carbureto ocorram.

Para as temperatura de 40°C, 85% das combinações foram consideradas diferentes, implicando que o aumento do teor de cal promove, na maioria dos casos, ganhos de resistência da mistura. Também é possível observar que, o aumento do teor de cal não promoveu ganhos estatisticamente diferentes de resistência para a variação de 10% para 15%

de cal para a cinza volante não moída, conforme observado por Horpibulsuk *et al.* (2012), isto pode ocorrer devido à incapacidade da cinza volante de reagir como excesso de cal de carbureto e, este excesso de cal na mistura não proporciona um aumento significativo de resistência, podendo até diminuí-la. Contudo, a moagem promoveu um ganho de resistência significativo para esta temperatura para a grande maioria das amostras, o que pode apontar um maior número de pontos de reações possíveis devido ao aumento da superfície específica da cinza.

Na Tabela 31 observa-se que, para a grande maioria, 93% das combinações, a comparação das médias dos níveis foram diferentes. Observa-se que a maioria dos níveis onde a diferença entre as médias foram consideradas estatisticamente iguais ocorreram nas misturas com temperatura mais baixa ($D = 23^{\circ}\text{C}$) onde foi utilizada cinza volante não moída ($C = 0\text{h}$), entre os menores teores de peso específico aparente seco 11 kN/m^3 , e 12 kN/m^3 . Isto indica que, o aumento do nível de peso específico aparente seco da mistura para o tempo de cura 7 dias, promove um aumento significativo de q_u principalmente entre as combinações com cinza volante moída e temperatura de cura elevada, fatores estes, que normalmente promovem a aceleração da ocorrência de reações pozolânicas. Com isto, percebe-se que todos os níveis dos fatores A, C e D interferem nos níveis do fator B, o que comprova suas interações.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 32, observa-se para 79% dos resultados foram obtidas comparações de médias diferentes. Observa-se que para a temperatura de 23°C , a comparação das médias da resistência à compressão simples entre as amostras moídas 2h e moídas 6h são estatisticamente iguais, ou diferentes porém com uma queda da resistência. Para a temperatura de cura de 40°C , 82% dos resultados obtiveram comparações de médias diferentes, e a influência da moagem foi mais visível para as amostras com maior teor de cal na mistura, o que pode apontar um maior número de pontos de reações possíveis devido ao aumento da superfície específica da cinza.

Tabela 30 – Comparação de média para o fator A (teor de cal) sem a temperatura de 60°C

Fator A (cal) variando, Fatores B (peso específico), C (tempo de moagem) e D (temperatura de cura) fixos							
B=11 kN/m ³ C=0h D=40°C	A1-A2	0,98	diferente	B=11 kN/m ³ C=0h D=23°C	A1-A2	-0,14	igual
	A1-A3	0,92	diferente		A1-A3	-0,15	igual
	A2-A3	-0,07	igual		A2-A3	-0,01	igual
B=11 kN/m ³ C=2h D=40°C	A1-A2	0,64	diferente	B=11 kN/m ³ C=2h D=23°C	A1-A2	0,08	igual
	A1-A3	1,47	diferente		A1-A3	0,17	igual
	A2-A3	0,83	diferente		A2-A3	0,10	igual
B=11 kN/m ³ C=6h D=40°C	A1-A2	1,80	diferente	B=11 kN/m ³ C=6h D=23°C	A1-A2	-0,03	igual
	A1-A3	2,25	diferente		A1-A3	-0,13	igual
	A2-A3	0,45	diferente		A2-A3	-0,10	igual
B=12 kN/m ³ C=0h D=40°C	A1-A2	0,57	diferente	B=12 kN/m ³ C=0h D=23°C	A1-A2	-0,06	igual
	A1-A3	0,72	diferente		A1-A3	0,01	igual
	A2-A3	0,15	igual		A2-A3	0,07	igual
B=12 kN/m ³ C=2h D=40°C	A1-A2	1,04	diferente	B=12 kN/m ³ C=2h D=23°C	A1-A2	0,40	igual
	A1-A3	1,18	diferente		A1-A3	0,22	igual
	A2-A3	0,15	igual		A2-A3	-0,19	igual
B=12 kN/m ³ C=6h D=40°C	A1-A2	0,62	diferente	B=12 kN/m ³ C=6h D=23°C	A1-A2	-0,18	igual
	A1-A3	1,67	diferente		A1-A3	-0,27	igual
	A2-A3	1,06	diferente		A2-A3	-0,10	igual
B=13 kN/m ³ C=0h D=40°C	A1-A2	1,08	diferente	B=13 kN/m ³ C=0h D=23°C	A1-A2	0,02	igual
	A1-A3	1,33	diferente		A1-A3	0,34	igual
	A2-A3	0,25	igual		A2-A3	0,32	igual
B=13 kN/m ³ C=2h D=40°C	A1-A2	0,86	diferente	B=13 kN/m ³ C=2h D=23°C	A1-A2	0,02	igual
	A1-A3	1,76	diferente		A1-A3	0,35	igual
	A2-A3	0,91	diferente		A2-A3	0,34	igual
B=13 kN/m ³ C=6h D=40°C	A1-A2	1,91	diferente	B=13 kN/m ³ C=6h D=23°C	A1-A2	0,40	igual
	A1-A3	2,88	diferente		A1-A3	0,41	igual
	A2-A3	0,97	diferente		A2-A3	0,01	igual

Onde: A1 = 5%, A2 = 10%, A3 = 15% de cal

Finalmente, na Tabela 33, observa-se que para todas das combinações, o aumento da temperatura de cura promoveu ganhos de resistência significativos, apresentando comparação das médias dos níveis estipulados diferentes. Então, o aumento da temperatura de 23°C para 40°C foi considerada eficiente para a todos os tempos de moagem.

Tabela 31 – Comparação de média para o fator B (peso específico) sem a temperatura de 60°C

Fator B (peso específico) variando, Fatores A (cal), C (tempo de moagem) e D (temperatura de cura) fixos							
A=5% C=0h D=40°C	B1-B2	1,88	diferente	A=5% C=0h D=23°C	B1-B2	0,25	igual
	B1-B3	2,37	diferente		B1-B3	0,64	diferente
	B2-B3	0,50	diferente		B2-B3	0,40	igual
A=5% C=2h D=40°C	B1-B2	1,62	diferente	A=5% C=2h D=23°C	B1-B2	1,39	diferente
	B1-B3	4,48	diferente		B1-B3	2,28	diferente
	B2-B3	2,86	diferente		B2-B3	0,90	diferente
A=5% C=6h D=40°C	B1-B2	2,15	diferente	A=5% C=6h D=23°C	B1-B2	0,77	diferente
	B1-B3	3,78	diferente		B1-B3	1,84	diferente
	B2-B3	1,64	diferente		B2-B3	1,07	diferente
A=10% C=0h D=40°C	B1-B2	1,47	diferente	A=10% C=0h D=23°C	B1-B2	0,33	igual
	B1-B3	2,48	diferente		B1-B3	0,79	diferente
	B2-B3	1,01	diferente		B2-B3	0,46	diferente
A=10% C=2h D=40°C	B1-B2	2,02	diferente	A=10% C=2h D=23°C	B1-B2	1,71	diferente
	B1-B3	4,69	diferente		B1-B3	2,23	diferente
	B2-B3	2,68	diferente		B2-B3	0,52	diferente
A=10% C=6h D=40°C	B1-B2	0,97	diferente	A=10% C=6h D=23°C	B1-B2	0,63	diferente
	B1-B3	3,89	diferente		B1-B3	2,26	diferente
	B2-B3	2,93	diferente		B2-B3	1,63	diferente
A=15% C=0h D=40°C	B1-B2	1,67	diferente	A=15% C=0h D=23°C	B1-B2	0,40	igual
	B1-B3	2,79	diferente		B1-B3	1,11	diferente
	B2-B3	1,12	diferente		B2-B3	0,72	diferente
A=15% C=2h D=40°C	B1-B2	1,34	diferente	A=15% C=2h D=23°C	B1-B2	1,44	diferente
	B1-B3	4,78	diferente		B1-B3	2,46	diferente
	B2-B3	3,44	diferente		B2-B3	1,03	diferente
A=15% C=6h D=40°C	B1-B2	1,57	diferente	A=15% C=6h D=23°C	B1-B2	0,63	diferente
	B1-B3	4,41	diferente		B1-B3	2,37	diferente
	B2-B3	2,85	diferente		B2-B3	1,74	diferente

Onde: B1 = 11 kN/m³, B2 = 12 kN/m³, B3 = 13 kN/m³

Tabela 32 – Comparação de média para o fator C (tempo de moagem) sem a temperatura de 60°C

Fator C (tempo de moagem) variando, Fatores A (cal), B (peso específico) e D (temperatura de cura) fixos							
A=5% B=11kN/m ³ D=40°C	C1-C2	0,56	diferente	A=5% B=11kN/m ³ D=23°C	C1-C2	0,83	diferente
	C1-C3	0,82	diferente		C1-C3	0,95	diferente
	C2-C3	0,26	igual		C2-C3	0,12	igual
A=5% B=12kN/m ³ D=40°C	C1-C2	0,30	igual	A=5% B=12kN/m ³ D=23°C	C1-C2	1,97	diferente
	C1-C3	1,09	diferente		C1-C3	1,47	diferente
	C2-C3	0,79	diferente		C2-C3	-0,51	diferente
A=5% B=13kN/m ³ D=40°C	C1-C2	2,66	diferente	A=5% B=13kN/m ³ D=23°C	C1-C2	2,47	diferente
	C1-C3	2,22	diferente		C1-C3	2,14	diferente
	C2-C3	-0,44	igual		C2-C3	-0,33	igual
A=10% B=11kN/m ³ D=40°C	C1-C2	0,22	igual	A=10% B=11kN/m ³ D=23°C	C1-C2	1,03	diferente
	C1-C3	1,64	diferente		C1-C3	1,05	diferente
	C2-C3	1,42	diferente		C2-C3	0,02	igual
A=10% B=12kN/m ³ D=40°C	C1-C2	0,77	diferente	A=10% B=12kN/m ³ D=23°C	C1-C2	2,42	diferente
	C1-C3	1,14	diferente		C1-C3	1,35	diferente
	C2-C3	0,37	igual		C2-C3	-1,07	diferente
A=10% B=13kN/m ³ D=40°C	C1-C2	2,44	diferente	A=10% B=13kN/m ³ D=23°C	C1-C2	2,47	diferente
	C1-C3	3,05	diferente		C1-C3	2,52	diferente
	C2-C3	0,62	diferente		C2-C3	0,05	igual
A=15% B=11kN/m ³ D=40°C	C1-C2	1,10	diferente	A=15% B=11kN/m ³ D=23°C	C1-C2	1,13	diferente
	C1-C3	2,15	diferente		C1-C3	0,96	diferente
	C2-C3	1,05	diferente		C2-C3	-0,18	igual
A=15% B=12kN/m ³ D=40°C	C1-C2	0,77	diferente	A=15% B=12kN/m ³ D=23°C	C1-C2	2,17	diferente
	C1-C3	2,04	diferente		C1-C3	1,20	diferente
	C2-C3	1,28	diferente		C2-C3	-0,98	diferente
A=15% B=13kN/m ³ D=40°C	C1-C2	3,10	diferente	A=15% B=13kN/m ³ D=23°C	C1-C2	2,49	diferente
	C1-C3	3,77	diferente		C1-C3	2,21	diferente
	C2-C3	0,68	diferente		C2-C3	-0,28	igual

Onde: C1 = 0 horas, C2 = 2 horas e C3 = 6 horas

Tabela 33 – Comparação de média para o fator D (temperatura) sem a temperatura de 60°C

Fator D (temperatura de cura) variando, Fatores A (cal), B (peso específico) e C (tempo de moagem) fixos			
A=5% B=11kN/m ³ C=0h	D1-D2	2,28	diferente
A=5% B=12kN/m ³ C=0h	D1-D2	6,16	diferente
A=5% B=13kN/m ³ C=0h	D1-D2	4,01	diferente
A=10% B=11kN/m ³ C=0h	D1-D2	3,39	diferente
A=10% B=12kN/m ³ C=0h	D1-D2	6,68	diferente
A=10% B=13kN/m ³ C=0h	D1-D2	5,08	diferente
A=15% B=11kN/m ³ C=0h	D1-D2	3,34	diferente
A=15% B=12kN/m ³ C=0h	D1-D2	6,88	diferente
A=15% B=13kN/m ³ C=0h	D1-D2	5,01	diferente
A=5% B=11kN/m ³ C=2h	D1-D2	2,01	diferente
A=5% B=12kN/m ³ C=2h	D1-D2	2,24	diferente
A=5% B=13kN/m ³ C=2h	D1-D2	4,21	diferente
A=10% B=11kN/m ³ C=2h	D1-D2	2,58	diferente
A=10% B=12kN/m ³ C=2h	D1-D2	2,88	diferente
A=10% B=13kN/m ³ C=2h	D1-D2	5,04	diferente
A=15% B=11kN/m ³ C=2h	D1-D2	3,31	diferente
A=15% B=12kN/m ³ C=2h	D1-D2	3,21	diferente
A=15% B=13kN/m ³ C=2h	D1-D2	5,62	diferente
A=5% B=11kN/m ³ C=6h	D1-D2	2,15	diferente
A=5% B=12kN/m ³ C=6h	D1-D2	3,53	diferente
A=5% B=13kN/m ³ C=6h	D1-D2	4,1	diferente
A=10% B=11kN/m ³ C=6h	D1-D2	3,98	diferente
A=10% B=12kN/m ³ C=6h	D1-D2	4,32	diferente
A=10% B=13kN/m ³ C=6h	D1-D2	5,61	diferente
A=15% B=11kN/m ³ C=6h	D1-D2	4,52	diferente
A=15% B=12kN/m ³ C=6h	D1-D2	5,46	diferente
A=15% B=13kN/m ³ C=6h	D1-D2	6,57	diferente

Onde: D1 = 40°C e D2 = 23°C

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas as conclusões, estabelecidas a partir da análise e discussão dos resultados, juntamente com a avaliação da influência dos fatores controláveis (teor de cal, porosidade, tempo de moagem e temperatura de cura) sobre a resistência à compressão simples de uma cinza volante artificialmente cimentada, dentro das condições e limites específicos desta pesquisa.

(a) quanto à influência do teor de cal

O aumento do teor de cal de 5% até 15% se mostrou estatisticamente não significativo para as misturas curadas a 23°C. A resistência aumentou linearmente com a adição de cal para as demais temperaturas de cura, independentemente do peso específico aparente seco utilizado. Para os corpos de prova curados a 40°C, o aumento do teor de cal promoveu ganhos de resistência para os diferentes tempos de moagem (0h, 2h e 6h) de cinza volante, contudo o ganho de resistência foi maior entre 5% e 10% de cal do que o apresentado entre 10% e 15%. Para a maioria das amostras de cinza volante não moída e moída 6h, a diferença entre 10% e 15% de cal não apresentou um ganho significativo com o aumento do teor de cal. Já para os corpos curados a 60°C, a resistência aumentou com o teor de cal tanto para a cinza volante moída 6h, quanto a não moída, também apresentando uma menor resistência entre 10% e 15% de cal do que entre 5% e 10%. Contudo, aumento da resistência à compressão simples foi considerado significativo para o aumento de 10% para 15% de cal de carbureto para as peso específico de 12 e 13 kN/m³. De maneira geral, a taxa de ganho de resistência aumentou com o aumento da peso específico aparente seco do material compactado, indicando que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactas. O aumento da temperatura promoveu, em geral, uma aceleração no ganho de resistência das amostras estudadas com o aumento do teor de cal, embora a taxa de ganho de resistência entre 40°C e 60°C tenham sido semelhantes. A moagem da cinza volante também proporcionou, em sua maioria, um aumento na taxa de ganho de resistência com aumento da quantidade de cal das misturas. O aumento da superfície específica do material proporcionando um aumento no número de reações entre a pozolana e o agente cimentante, parece ser a causa deste fenômeno. Contudo, este fenômeno

Misturas de cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples frente à moagem da cinza volante.

não foi significativo para maioria das amostras com peso específico de 11 kN/m^3 , curadas a 60°C .

(b) quanto à influência da porosidade

A porosidade tem efeito significativo sobre a resistência à compressão simples, para todas as combinações estudadas – moída 0h, 2h e 6h curadas a 23°C e 40°C e, moída 0h e 6h curadas a 60°C . A resistência teve um aumento exponencial com a diminuição da porosidade das misturas, independentemente da quantidade de cal utilizada. Com a redução da porosidade, os materiais apresentam um maior número de contatos e um maior intertravamento entre as partículas. Assim, ocorre uma cimentação mais efetiva e, conseqüentemente, um aumento da resistência à compressão simples. Além disso, a redução da porosidade promove uma maior capacidade de distribuição de tensões e mobilização de atrito no interior da amostra e, isto também pode contribuir para o ganho de resistência do material.

(c) quanto à relação porosidade/teor volumétrico de cal

A relação direta entre porosidade da mistura compactada (η) e o teor volumétrico da cal de carbureto (L_V) não apresentaram a melhor forma de apresentar o fenômeno, que tem o intuito de obter-se uma correlação capaz de formar equações de dosagem razoáveis para a determinação da resistência à compressão simples das misturas, pois, foi observado que não há uma proporcionalidade entre as duas variáveis. Entretanto, através da adoção de um expoente no teor volumétrico de cal igual a 0,07, foi possível o ajuste dos dados experimentais para a relação entre porosidade/teor volumétrico de cal, tornando possível a concepção de uma correlação única entre $\eta/(L_V)^{0,07}$ e resistência à compressão simples. Através do ajuste de curvas do tipo potência para os dados obtidos, foram geradas equações na previsão do comportamento mecânico das amostras estudadas. Esta relação se mostrou aplicável para todas as combinações estudadas, inclusive para as misturas de cinza volante moída.

(d) quanto à influência temperatura 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,

$[q_u/[\eta/(L_v)^{0,07}]^{-3,40}]$, foi constatado que, embora o ganho de resistência não tenha sido estatisticamente significativo entre 40°C e 60°C para a cinza volante moída 6h, em relação os resultados obtidos pelos corpos de prova curados a 23°C, o aumento da temperatura proporcionou ganhos significativos de resistência, independentemente do tempo de moagem. Contudo, as amostras de cinza volante moída 6h, a cura a 60°C acabou prejudicando o desenvolvimento da resistência da mistura. Assim, a temperatura de 40°C se mostrou mais eficiente, proporcionando um maior aumento relativo de resistência das misturas para os diferentes tempos de moagem da cinza.

(e) quanto à influência do tempo de moagem

O tempo de moagem da cinza volante influencia na resistência à compressão simples da mistura compactada devido ao aumento da superfície específica da mesma, proporcionando uma maior quantidade de silicatos e aluminatos disponíveis para a ocorrência de reações pozolânicas com a cal de carbureto estudada. Portanto, para curtos períodos de cura é possível a utilização da moagem da cinza volante como acelerador no aumento da resistência a compressão simples. Assim, através da normalização da resistência à compressão simples, $[q_u/[\eta/(L_v)^{0,07}]^{-3,40}]$, foi constatado que, a moagem da cinza volante proporcionou ganhos significativos de resistência até 2h de moagem da cinza volante para as amostras curadas a 23°C, o acréscimo de 4h de moagem não proporcionou ganhos de resistência à compressão simples para 7 dias de cura, devido ao provável aumento da quantidade de água necessária para que as reações pozolânicas ocorram, atribuídos ao aumento das partículas irregulares com o excesso de moagem. Para as amostras curadas a 40°C, foi observado um ganho de resistência com o aumento da moagem da cinza volante, provavelmente pela influência da temperatura na aceleração do desenvolvimento de resistência em detrimento ao aumento da necessidade de água necessária para a cinza volante moída 6h. Finalmente, para as amostras curadas a 60°C o aumento do tempo de moagem em 6h não proporcionou um ganho de resistência à compressão simples significativo, possivelmente este fenômeno deve-se ao grande aumento do valor de q_u obtido para tempos de cura muito pequenos, tornando o aumento de resistência limitado, principalmente para a cinza volante mais reativas (moída 6h). Assim, conclui-se que, a moagem da cinza volante por 2h se mostrou mais eficiente, proporcionando um maior aumento relativo de resistência das misturas.

(f) análise da variância

Tanto para a análise sem os dados da cinza volante moída 2h, quanto para a análise sem os dados das misturas curadas a 60°C, as variáveis independentes analisadas no experimento (quantidade cal, porosidade, tempo de moagem e temperatura de cura) são significativas na alteração da resistência à compressão simples. Em ordem decrescente, as variáveis com maior influência da variação de q_u são: temperatura de cura, peso específico aparente seco, tempo de moagem e teor de cal. As interações entre as variáveis estudadas foram consideradas significantes, deste modo, as taxas de ganho observadas nas análises anteriores são respostas da interação entre as variáveis estudadas e portanto, podem potencializar ou atenuar a influência na variável resistência à compressão simples. Sendo assim, a metodologia de Projeto de Experimentos mostrou-se eficiente na determinação de quais fatores participantes são importantes e em que níveis fazem diferença para o fenômeno em estudo.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- (a) verificação do desenvolvimento de resistência à compressão simples para maiores tempos de cura para a temperatura de 23°C para as misturas de cinza volante, não moída e moída, com cal de carbureto estudadas. A fim de determinar quanto tempo é necessário para que as reações pozolânicas da mistura terminem de ocorrer;
- (b) determinar a mineralogia formada no processo de cura acelerada para os diferentes tipos de moagem da cinza volante e comparar com a mineralogia formada para curas por longos períodos para os mesmos tempo de de moagem a 23°C. Deste modo, analisando o tipo de cristais formados através da cura acelerada e os formados à temperatura ambiente, para os diferentes tipos de moagem;

- (c) verificar a resistência à compressão simples para a mistura da cinza volante e cal de carbureto estudadas para a cinza volante moída por 2h curadas a 60°C;
- (d) analisar o efeito da moagem da cinza volante para outras cinzas volantes, com características diferentes, entretanto para as mesmas variáveis do presente estudo para determinar a influência do processo de moagem para diferentes cinzas;
- (e) estudo da quantidade de água necessária para diferentes tempos de moagem da mesma cinza volante e compará-la à sua respectiva resistência à compressão simples;
- (f) a execução de ensaios de resistência à tração e determinação da razão entre tração e compressão;
- (g) realizar ensaios de lixiviação para determinar a efetividade da solidificação/estabilização de elementos traços presentes na cinza volante com o processo de moagem.

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, n. 3, p. 333-334, Jul 1980.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica no Brasil: carvão mineral**. 3 ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689>. Acesso em 24 mar. 2015.

ALEXANDER, G. B.; HESTON, W. M.; ILER, R. K. The solubility of amorphous silica in water. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 58, n. 6, p. 453-455, 1954.

AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION. **Coal Combustion Product (CCP) Production and Use Survey Report**. Farmington Hills: ACAA, 2013. Disponível em: <<http://www.aaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/2013ReportFINAL.pdf>>. Acesso em 20 mar. 2015.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 6276**: Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. Philadelphia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 593**: Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization. Philadelphia, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 618**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Philadelphia, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 595**: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. Philadelphia, 2015.

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

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

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. 1984.

_____. **NBR 6473**: Cal virgem e cal hidratada - Análise química. 2003.

_____. **NBR 6508**: Solo – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. 1984.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. 1984.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. 1986b.

_____. **NBR 10004**: resíduos Sólidos - classificação. Rio de Janeiro – segunda edição, 71p. 2004 a.

_____. **NBR 10005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro – segunda edição, 16p. 2004 b.

_____. **NBR 10006**: - procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro – segunda edição, 3p. 2004 c.

_____. **NBR 12253**: Solo – Cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento. Rio de Janeiro – 7p. 1992.

_____. **NBR 12653**: materiais pozolânicos – especificações. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. 2004.

_____. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. 2001.

BASUMAJUMDAR, A.; DAS, A. K.; BANDYOPADHYAY, N.; MAITRA, S. Some studies on the reaction between fly ash and lime. **Bulletin of Materials Science**, v. 28, n. 2, p. 131-136, 2005.

BINOTTO, R.B. **Avaliação do grau de contaminação das águas subterrâneas em áreas de influência de resíduos do processamento do carvão**. 1997. 184f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgicas e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

BOUZOUBAÂ, N.; ZHANG, M. H.; BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. M. The effect of grinding on the physical properties of fly ashes and a Portland cement clinker. **Cement and concrete research**, v. 27, n. 12, p. 1861-1874, 1997.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. v. 6 Geração termelétrica a partir do carvão mineral. Brasília: MME : EPE, 2007. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/plano-nacional-de-energia-2050>>. Acesso em 13 abr. 2015.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**: ano base 2013. Rio de Janeiro: EPE, 2014. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em 13 abr. 2015.

BRITISH PETROLEUM. **Statistical Review of World Energy**: Coal. London, United Kingdom, jun. 2015. Disponível em: <<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-coal-section.pdf>>. Acesso em 28 maio 2015.

BROUWERS, H. J. H.; EIJK, van RJ. **Chemical reaction of fly ash**. 2003.

CALTEC. **História da Cal**. Curitiba, Brasil, 2015. Disponível em: <www.caltec.com.br/arquivos/livre/Historia%20da%20Cal.doc>. Acesso em 01 ago. 2015.

CARDOSO, F. A.; FERNANDES, H. C.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. Carbide lime and industrial hydrated lime characterization. **Powder Technology**, v. 195, n. 2, p. 143-149, 2009.

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

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

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA, R. B. Variables Governing Strength of Compacted Soil-Fly Ash-Lime Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 23, p. 432-440, April 2011.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers**: Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, p. 1633-1656, 1991.

DAVISON, R. L.; NATUSCH, D. F.; WALLACE, J. R.; EVANS JR, C. A. Trace elements in fly ash. Dependence of concentration on particle size. **Environmental Science and Technology**, v. 8, n. 13, p. 1107-1113, 1974.

ELETROBRAS CGTEE. Companhia de Geração de Energia Elétrica. **O carvão**. Porto Alegre, Brasil, 2015. Disponível em: <<http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=108>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

EUROPEAN COAL COMBUSTION PRODUCTS ASSOCIATION. **Production**. Essen, Alemanha, 2010. Disponível em: <<http://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html>>. Acesso em 28 maio 2015.

FERREIRA, C.; RIBEIRO, A.; OTTOSEN, L. Possible applications for municipal solid waste fly ash. **Journal of Hazardous Materials**, v. 96, n. 2, p. 201-216, 2003.

FEUERBORN, H. J. Coal ash utilization over the world and in Europe. In: **Workshop on environmental and health aspects of coal ash utilization**. 2005.

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

FISHER, G. L.; CHANG, D. P. Y.; BRUMMER, M. Fly ash collected from electrostatic precipitators: microcrystalline structures and the mystery of the spheres. *Science*, v. 192, n. 4239, p. 553-555, 1976.

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

GREENBERG, S. A. The chemisorption of calcium hydroxide by silica. *The Journal of Physical Chemistry*, v. 60, n. 3, p. 325-330, 1956.

HARTY, J. R.; THOMPSON, M. R. Lime reactivity of tropical and subtropical soils. *Highway Research Record*, n. 442, 1973.

HORPIBULSUK, S.; PHETCHUAY, C.; CHINKULKIJNIWAT, A. Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 24, n. 2, p. 184-193, 2012.

INDÚTRIA BRASILEIRA DE GASES (IBG). **Acetileno**. Jundiaí, Brasil, 2015. Disponível em: <<http://www.ibg.com.br/acetileno.htm>>. Acesso em 01 ago. 2015.

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

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global coal demand to reach 9 billion tones per year by 2019**. Paris, França, 15 dec. 2014. Disponível em: <<http://www.iea.org/newsroomandevents/pressreleases/2014/december...bal-coal-demand-to-reach-9-billion-tonnes-per-year-by-2019.html>>. Acesso em 20 mar. 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Coal**. Paris, França, jan. 2015 a. Disponível em: <<http://www.iea.org/topics/coal>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Atlas**. Paris, França, feb. 2015 b. Disponível em: <<http://energyatlas.iea.org/?subject=2020991907>>. Acesso em 20 mar. 2015.

IZQUIERDO, M; QUEROL, X.; DAVIDOVITS, J.; ANTENUCCI, D.; NUGTEREN, H.; FERNÁNDEZ-PEREIRA, C. Coal fly ash-slag-based geopolymers: microstructure and metal leaching. *Journal of hazardous materials*, v. 166, n. 1, p. 561-566, 2009.

KUMAR, S.; KUMAR, R.; ALEX, T. C.; BANDOPADHYAY, A.; MEHROTRA, S. P. Influence of reactivity of fly ash on geopolymerisation. *Advances in applied ceramics*, v. 106, n. 3, p. 120-127, 2007.

KUMAR, S.; KUMAR, R.; ALEX, T. C.; SRIKANTH S.; MEHROTRA.S. P. **Process innovations using mechanical activation of minerals and wastes** In: Experimental and

Theoretical Studies in Modern Mechanochemistry. p.255-272. Kerala:Transworld Research Network, 2010.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. 2007. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

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**, v. 35, n. 6, 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 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

MANZ, O. E. Worldwide production of coal ash and utilization in concrete and other products. **Fuel**, v. 76, n. 8, p. 691-696, 1997.

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**. 1961.

MELIANDE, A. M. C. **Análise do Comportamento de Misturas de Solos com Cinza Volante de Carvão Mineral e Cal**. 2014. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MESQUITA, L. P. **Avaliação da Fixação de Metais Pesados em Matrizes Cimentícias**. 2008, 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MINNICK, L. J. Reactions of hydrated lime with pulverized coal fly ash. In: **Proc., Fly Ash Utilization Conf., American Public Power Association, Bureau of Mines, Pittsburgh**. 1967. p. 287-315.

MARCIALIS, A.; MASSIDDA, L.; SANNA, U. Low temperature steam curing hydration of lime-fly-ash compacts. **Cement and Concrete Research**, v. 13, n. 6, p. 887-894, 1983.

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

- PAYÁ, J.; MONZO, J.; BORRACHERO, M.V.; PERIS-MORA, E. Mechanical treatment of fly ashes. Part I: Physico-chemical characterization of ground fly ashes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1469-1479, 1995.
- PAYÁ, J.; MONZO, J.; BORRACHERO, M.V.; PERIS-MORA, E. Mechanical treatment of fly ashes Part IV. Strength development of ground fly ash-cement mortars cured at different temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 543-551, 2000.
- QIAN, J.; SHI, C.; WANG, Z. Activation of blended cements containing fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 8, p. 1121-1127, 2001.
- RAMASAMY, P.; PERIATHAMBY, A.; IBRAHIM, S.. Carbide sludge management in acetylene producing plants by using vacuum filtration. **Waste management and research**, v. 20, n. 6, p. 536-540, 2002.
- RAVINA, D. Optimized determination of PFA (fly ash) fineness with reference to pozzolanic activity. **Cement and Concrete Research**, v. 10, n. 4, p. 573-580, 1980.
- 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.
- RIOS, S.; FONSECA, A. V.; BAUDET, B. A. Effect of the Porosity/Cement Ratio on the Compression of Cemented Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Civil Engineering**, Reston, v. 138, n. 11, p. 1422-1426, Nov. 2012.
- ROGERS, C. D. F.; ROFF, T. Lime modification of clay soils for construction expediency. **Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering**, v. 125, n. 4, p. 242-249, 1997.
- ROHDE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N. I. W. **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil: aspectos técnicos e ambientais**. v. 1. 1 ed. Porto Alegre: CIENTEC, 2006. 202 p.
- ROHDE, G.M. Cinzas, a outra metade do carvão fóssil – nova estratégia para a termelétricidade. In: **IV Congresso Brasileiro de Carvão Mineral**. Gramado: 2013.
- ROJAS, M. F.; CABRERA, J. The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin–lime–water systems. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 1, p. 133-138, 2002.
- 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**. v.1, n.4, 2011.
- SALDANHA, R. B. **Misturas Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples para Cura Acelerada**. 2014. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SILVANI, C. **Influência da temperatura na cura da mistura areia- cinza volante-cal.** 2013. 106f. 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.

THOMAS, M. Optimizing the use of fly ash on concrete. **Portland Cement Association**. Washington, D.C., 2007.

THOMÉ, A. **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais.** 1999. 238f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

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

UBBRÌACO, P.; CALABRESE, D. Solidification and stabilization of cement paste containing fly ash from municipal solid waste. **Thermochimica acta**, v. 321, n. 1, p. 143-150, 1998.

WANG, J. W. H.; HANDY, R. L. Evaluation of carbide waste lime for soil stabilization. Engineering Experiment Station. **Iowa State University**. Ames, United States, 1966.

WORLD COAL ASSOCIATION. **Coal facts 2014.** Londres, Inglaterra, 2014. Disponível em: <<http://www.worldcoal.org/resources/coal-statistics/l>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

**APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA
PARA OS CICLOS DE MOAGEM**

Tabela A1 – Diâmetro médio para ciclos de moagem de 2h

Amostra	Diâmetro médio (μm)
1	15,65
2	15,87
3	13,47
4	13,84
5	17,14
6	16,15
7	16,85
8	15,88
9	14,05
Média	15,43

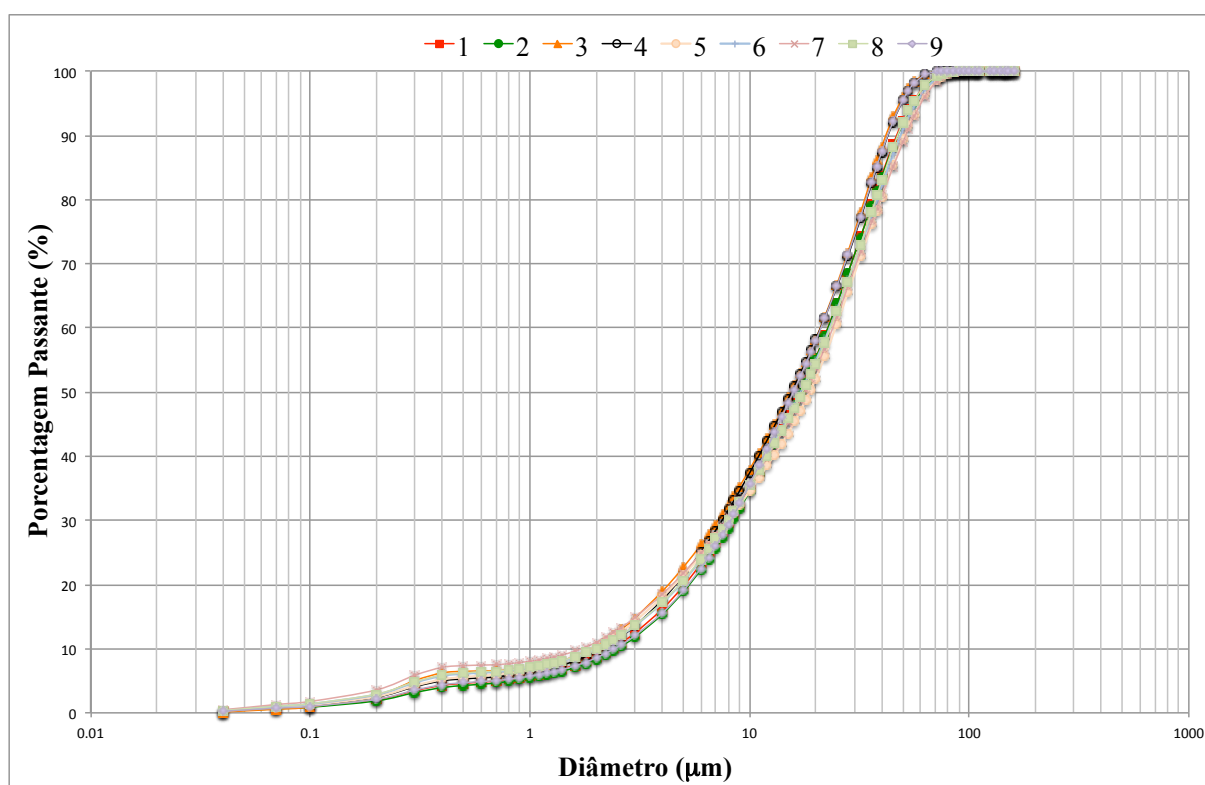


Figura A1 – Curvas granulométricas para cinza volante moída 2h

Tabela A2 – Diâmetro médio para ciclos de moagem de 6h

Amostra	Diâmetro médio (μm)
1	9,95
2	9,55
3	9,42
4	9,91
5	9,81
6	9,44
7	9,38
8	9,57
9	9,26
10	9,78
11	9,53
12	9,59
13	8,82
Média	9,54

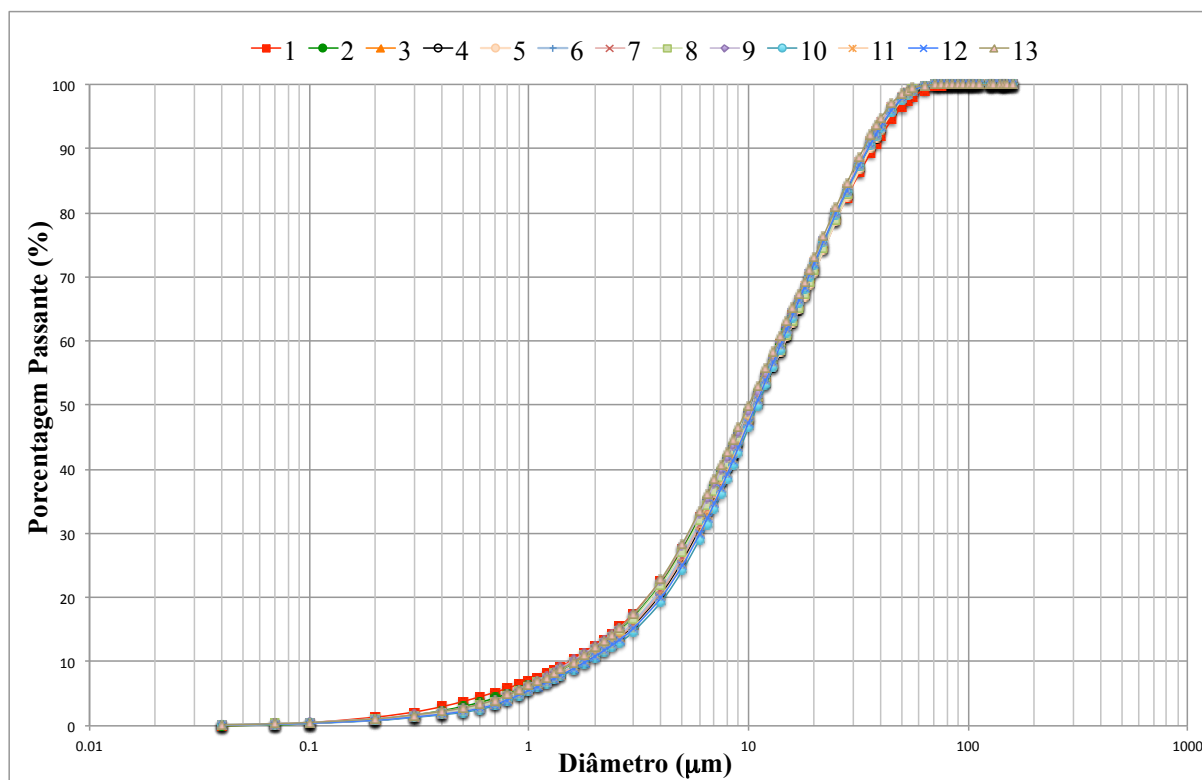


Figura A2 – Curvas granulométricas para cinza volante moída 6h

**APÊNDICE B – DADOS DOS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS À
COMPRESSÃO SIMPLES**

Tabela B1 – Dados gerais copos de prova de cinza volante não moída curada a 23°C

NOME	% cal	γ_d (kN/m ³)	w(%)	V _{CINZA} (%)	V _{ÁGUA} (%)	V _{CAL} (%)	V _V (%)	e	η (%)	L _V (%)	η/L_V	$\eta/(L_V)^{0,07}$	q _u (MPa)
A1-1-5 -1	5	11,20	18,12	95,22	39,31	4,87	94,29	0,94	48,51	2,51	19,35	45,49	0,89
A1-1-5 -2	5	11,10	18,12	95,78	39,54	4,90	95,67	0,95	48,73	2,50	19,52	45,70	0,80
A1-1-5 -3	5	11,20	18,12	95,74	39,53	4,90	94,93	0,94	48,54	2,51	19,37	45,52	0,95
A1-1-10-1	10	11,10	18,20	91,13	39,58	9,33	95,90	0,95	48,84	4,75	10,28	43,79	0,70
A1-1-10-2	10	11,20	18,20	91,28	39,65	9,34	94,61	0,94	48,46	4,79	10,13	43,43	0,80
A1-1-10-3	10	11,10	18,20	91,14	39,59	9,33	95,88	0,95	48,83	4,75	10,28	43,78	0,75
A1-1-15-1	15	11,10	18,15	87,40	39,58	13,42	95,53	0,95	48,65	6,83	7,12	42,53	0,79
A1-1-15-2	15	11,10	18,15	87,23	39,51	13,39	95,85	0,95	48,78	6,82	7,16	42,65	0,69
A1-1-15-3	15	11,00	18,15	86,30	39,09	13,25	96,79	0,97	49,30	6,75	7,30	43,13	0,75
A1-2-5-1	5	12,10	17,54	105,07	41,98	5,38	87,68	0,79	44,25	2,71	16,30	41,27	1,21
A1-2-5-2	5	12,00	17,54	104,45	41,73	5,35	88,06	0,80	44,51	2,70	16,47	41,52	1,08
A1-2-10-1	10	11,90	18,10	98,64	42,62	10,10	88,79	0,82	44,95	5,11	8,79	40,10	1,05
A1-2-10-2	10	12,10	17,75	100,19	42,46	10,26	87,48	0,79	44,20	5,18	8,53	39,39	1,15
A1-2-10-3	10	11,90	18,10	98,38	42,50	10,07	89,15	0,82	45,12	5,10	8,85	40,26	1,01
A1-2-15-1	15	12,00	17,60	95,39	41,90	14,65	88,35	0,80	44,53	7,38	6,03	38,72	1,13
A1-2-15-2	15	12,00	17,76	95,61	42,37	14,68	88,55	0,80	44,53	7,38	6,03	38,72	1,15
A1-2-15-3	15	12,00	17,60	95,53	41,96	14,67	88,58	0,80	44,56	7,38	6,04	38,74	1,12
A1-3-5 -1	5	13,10	17,89	112,85	46,00	5,78	77,92	0,66	39,65	2,94	13,49	36,77	1,57
A1-3-5 -2	5	12,80	18,16	112,31	46,47	5,75	81,63	0,69	40,88	2,88	14,20	37,96	1,53
A1-3-5 -3	5	13,10	17,89	112,92	46,03	5,78	77,85	0,66	39,61	2,94	13,47	36,73	1,45
A1-3-10-1	10	12,80	18,45	107,52	47,36	11,01	81,43	0,69	40,72	5,50	7,40	36,14	1,54
A1-3-10-2	10	12,80	18,45	107,61	47,40	11,02	81,65	0,69	40,77	5,50	7,41	36,18	1,55
A1-3-10-3	10	13,00	17,93	108,37	46,37	11,09	79,72	0,67	40,02	5,57	7,19	35,49	1,50
A1-3-15-1	15	13,10	17,57	103,80	45,50	15,94	78,51	0,66	39,60	8,04	4,93	34,23	1,85
A1-3-15-2	15	13,10	17,57	103,88	45,54	15,95	78,16	0,65	39,47	8,06	4,90	34,11	1,80
A1-3-15-3	15	13,10	17,57	103,67	45,44	15,92	78,54	0,66	39,64	8,03	4,93	34,26	1,90

Tabela B2 – Dados gerais copos de prova de cinza volante moída 2h curada a 23°C

NOME	% cal	γ_d (kN/m ³)	w(%)	V _{CINZA} (%)	V _{ÁGUA} (%)	V _{CAL} (%)	V _V (%)	e	η (%)	L _V (%)	η/L_V	$\eta/(L_V)^{0,07}$	q _u (MPa)
D1-1-5 -1	5	11,10	17,77	94,42	38,93	4,92	98,32	0,99	49,74	2,49	19,98	46,66	1,69
D1-1-5 -2	5	11,10	17,77	94,51	38,96	4,93	97,31	0,98	49,46	2,50	19,76	46,38	1,73
D1-1-10-1	10	11,10	18,33	89,53	39,89	9,33	95,59	0,97	49,16	4,80	10,24	44,05	1,75
D1-1-10-2	10	11,10	18,33	89,72	39,97	9,35	97,80	0,99	49,68	4,75	10,46	44,55	1,81
D1-1-15-1	15	11,10	18,14	86,13	39,71	13,47	96,49	0,97	49,21	6,87	7,16	43,00	1,87
D1-1-15-2	15	11,10	18,14	85,96	39,63	13,44	96,54	0,97	49,27	6,86	7,18	43,06	1,97
D1-1-15-3	15	11,10	18,14	85,91	39,61	13,43	97,92	0,99	49,64	6,81	7,29	43,40	1,77
D1-2-5 -1	5	11,90	18,24	102,45	43,37	5,34	92,64	0,86	46,22	2,66	17,35	43,16	3,10
D1-2-5 -2	5	11,90	18,24	102,56	43,42	5,35	91,74	0,85	45,95	2,68	17,16	42,89	3,06
D1-2-5 -3	5	11,90	18,24	102,52	43,40	5,34	92,83	0,86	46,25	2,66	17,37	43,19	3,11
D1-2-10-1	10	11,90	18,42	97,67	43,74	10,18	91,33	0,85	45,85	5,11	8,97	40,90	3,37
D1-2-10-2	10	11,90	18,42	97,51	43,67	10,16	92,43	0,86	46,19	5,08	9,09	41,22	3,58
D1-2-10-3	10	11,90	18,42	97,67	43,74	10,18	91,06	0,84	45,78	5,12	8,94	40,83	3,51
D1-2-15-1	15	11,90	18,13	93,52	43,10	14,62	91,55	0,85	45,85	7,32	6,26	39,88	3,08
D1-2-15-2	15	11,90	18,13	93,70	43,18	14,65	91,35	0,84	45,74	7,34	6,24	39,79	3,30
D1-2-15-3	15	11,90	18,13	93,66	43,16	14,65	91,87	0,85	45,89	7,32	6,27	39,93	3,53
D1-3-5 -1	5	12,90	17,79	111,52	46,04	5,81	83,89	0,72	41,69	2,89	14,43	38,71	3,89
D1-3-5 -2	5	12,90	17,79	111,02	45,84	5,79	83,89	0,72	41,80	2,88	14,50	38,81	4,07
D1-3-5 -3	5	12,90	17,79	111,27	45,94	5,80	83,90	0,72	41,75	2,89	14,47	38,76	3,99
D1-3-10-1	10	12,90	18,27	105,99	47,08	11,05	82,86	0,71	41,45	5,53	7,50	36,78	4,08
D1-3-10-2	10	12,90	18,27	106,00	47,08	11,05	82,85	0,71	41,45	5,53	7,50	36,77	3,97
D1-3-10-3	10	12,90	17,79	106,45	46,03	11,10	83,35	0,71	41,49	5,52	7,51	36,81	3,96
D1-3-15-1	15	12,90	18,17	101,59	46,92	15,89	83,56	0,71	41,56	7,90	5,26	35,96	4,31
D1-3-15-2	15	12,90	18,17	101,39	46,83	15,85	83,79	0,71	41,68	7,89	5,28	36,07	4,51
D1-3-15-3	15	12,90	17,40	102,11	45,16	15,97	84,01	0,71	41,57	7,90	5,26	35,97	4,17

Misturas de cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples frente à moagem da cinza volante.

Tabela B3 – Dados gerais copos de prova de cinza volante moída 6h curada a 23°C

NOME	% cal	γ_d (kN/m ³)	w(%)	V _{CINZA} (%)	V _{ÁGUA} (%)	V _{CAL} (%)	V _v (%)	e	η (%)	L _v (%)	η/L_v	$\eta/(L_v)^{0.07}$	q _u (MPa)
A2-1-5 -1	5	11,20	18,07	91,66	39,48	4,91	99,12	1,03	50,65	2,51	20,20	47,50	1,80
A2-1-5 -2	5	11,10	18,07	91,68	39,49	4,91	99,43	1,03	50,73	2,50	20,26	47,57	1,80
A2-1-5 -3	5	11,10	18,07	91,69	39,49	4,91	99,42	1,03	50,72	2,50	20,25	47,56	1,87
A2-1-10-1	10	11,20	18,08	87,65	39,58	9,39	99,05	1,02	50,51	4,79	10,55	45,27	1,77
A2-1-10-2	10	11,20	18,08	87,28	39,41	9,35	98,68	1,02	50,52	4,79	10,56	45,28	1,83
A2-1-10-3	10	11,20	18,08	87,34	39,44	9,35	98,74	1,02	50,53	4,79	10,56	45,28	1,78
A2-1-15-1	15	11,10	18,55	83,47	40,43	13,41	98,88	1,02	50,51	6,85	7,38	44,15	1,76
A2-1-15-2	15	11,10	18,55	83,42	40,41	13,40	98,74	1,02	50,49	6,85	7,37	44,13	1,65
A2-1-15-3	15	11,10	18,55	83,45	40,42	13,40	98,84	1,02	50,51	6,85	7,37	44,14	1,68
A2-2-5 -1	5	12,10	18,01	100,20	43,02	5,36	91,05	0,86	46,31	2,73	16,97	43,17	2,49
A2-2-5 -2	5	12,20	18,01	100,15	43,00	5,36	90,84	0,86	46,26	2,73	16,94	43,12	2,55
A2-2-5 -3	5	12,20	18,01	100,00	42,93	5,35	90,41	0,86	46,18	2,73	16,89	43,04	2,73
A2-2-10-1	10	12,10	18,14	95,59	43,29	10,24	91,44	0,86	46,36	5,19	8,93	41,31	2,36
A2-2-10-2	10	12,20	18,14	95,61	43,30	10,24	90,50	0,86	46,09	5,21	8,84	41,06	2,40
A2-2-10-3	10	12,20	18,14	95,59	43,29	10,24	90,52	0,86	46,10	5,21	8,84	41,07	2,50
A2-2-15-1	15	12,10	17,81	91,64	42,61	14,72	91,10	0,86	46,14	7,45	6,19	40,08	2,51
A2-2-15-2	15	12,20	17,81	91,50	42,54	14,70	90,03	0,85	45,88	7,49	6,13	39,85	2,25
A2-2-15-3	15	12,10	17,81	91,62	42,60	14,72	90,60	0,85	46,00	7,47	6,16	39,96	2,21
A2-3-5 -1	5	12,90	17,88	107,77	45,94	5,77	86,03	0,76	43,11	2,89	14,91	40,02	3,60
A2-3-5 -2	5	13,00	17,88	108,34	46,18	5,80	84,84	0,74	42,64	2,91	14,63	39,56	3,79
A2-3-5 -3	5	12,90	17,88	108,27	46,15	5,80	86,24	0,76	43,05	2,89	14,88	39,97	3,57
A2-3-10-1	10	12,90	18,12	103,28	46,72	11,06	85,30	0,75	42,73	5,54	7,71	37,90	4,17
A2-3-10-2	10	12,90	18,12	103,26	46,71	11,06	84,99	0,74	42,64	5,55	7,69	37,82	3,80
A2-3-10-3	10	12,90	18,12	103,33	46,74	11,06	85,58	0,75	42,80	5,53	7,73	37,97	4,17
A2-3-15-1	15	13,00	18,02	98,87	46,51	15,88	83,57	0,73	42,14	8,01	5,26	36,43	4,02
A2-3-15-2	15	13,00	18,02	98,81	46,48	15,87	83,70	0,73	42,19	8,00	5,27	36,48	4,36
A2-3-15-3	15	13,00	18,02	98,71	46,44	15,85	84,35	0,74	42,41	7,97	5,32	36,67	3,79

Tabela B4 – Dados gerais copos de prova de cinza volante não moída curada a 40°C

NOME	% cal	γ_d (kN/m ³)	w(%)	V _{CINZA} (%)	V _{ÁGUA} (%)	V _{CAL} (%)	V _V (%)	e	η (%)	L _V (%)	η/L_V	$\eta/(L_V)^{0,07}$	q _u (MPa)
B1-1-5 -1	5	11,10	17,91	96,05	39,20	4,92	95,32	0,94	48,56	2,50	19,39	45,54	3,12
B1-1-5 -2	5	11,10	17,91	96,12	39,23	4,92	95,97	0,95	48,71	2,50	19,51	45,69	3,09
B1-1-5 -3	5	11,20	17,91	96,15	39,24	4,92	95,28	0,94	48,53	2,51	19,36	45,50	3,27
B1-1-10-1	10	11,20	18,04	91,56	39,43	9,37	94,96	0,94	48,48	4,78	10,13	43,45	4,06
B1-1-10-2	10	11,10	18,04	91,62	39,45	9,38	96,20	0,95	48,78	4,76	10,26	43,74	4,08
B1-1-10-3	10	11,10	18,04	91,62	39,46	9,38	96,33	0,95	48,82	4,75	10,27	43,77	4,28
B1-1-15-1	15	11,20	17,78	87,64	38,89	13,46	94,79	0,94	48,39	6,87	7,04	42,28	3,94
B1-1-15-2	15	11,10	17,78	87,80	38,96	13,48	96,11	0,95	48,69	6,83	7,13	42,56	3,94
B1-1-15-3	15	11,20	17,78	87,74	38,93	13,47	95,13	0,94	48,45	6,86	7,06	42,34	4,35
B1-2-5-1	5	12,20	17,86	104,82	42,64	5,36	86,17	0,78	43,88	2,73	16,06	40,90	5,10
B1-2-5-2	5	12,10	17,86	104,80	42,64	5,36	86,38	0,78	43,95	2,73	16,10	40,97	5,11
B1-2-5-3	5	12,10	17,86	104,74	42,61	5,36	86,45	0,79	43,98	2,73	16,13	41,00	4,89
B1-2-10-1	10	12,10	17,66	100,07	42,18	10,24	87,41	0,79	44,21	5,18	8,53	39,40	5,64
B1-2-10-2	10	12,10	17,66	99,88	42,10	10,22	86,77	0,79	44,08	5,19	8,49	39,27	5,41
B1-2-10-3	10	12,20	18,01	100,11	43,04	10,25	86,19	0,78	43,85	5,21	8,41	39,06	5,75
B1-2-15-1	15	12,10	17,98	95,32	42,78	14,64	86,39	0,79	44,00	7,45	5,90	38,23	5,62
B1-2-15-2	15	12,10	17,80	95,58	42,47	14,68	87,01	0,79	44,11	7,44	5,93	38,33	5,91
B1-3-5 -1	5	12,90	18,45	112,31	47,22	5,75	80,79	0,68	40,63	2,89	14,06	37,72	5,48
B1-3-5 -2	5	12,90	18,45	112,17	47,16	5,74	80,80	0,69	40,66	2,89	14,08	37,75	5,38
B1-3-5 -3	5	12,90	18,45	112,18	47,17	5,74	79,73	0,68	40,34	2,90	13,89	37,44	5,72
B1-3-10-1	10	12,90	18,36	107,18	46,98	10,97	80,42	0,68	40,50	5,52	7,33	35,93	6,56
B1-3-10-2	10	12,90	18,36	107,07	46,93	10,96	80,29	0,68	40,49	5,53	7,33	35,92	6,76
B1-3-10-3	10	12,80	18,36	107,33	47,05	10,99	81,45	0,69	40,77	5,50	7,41	36,18	6,50
B1-3-15-1	15	12,90	18,43	103,16	47,44	15,84	81,10	0,68	40,53	7,92	5,12	35,06	6,74
B1-3-15-2	15	12,80	18,43	102,98	47,35	15,81	81,84	0,69	40,79	7,88	5,18	35,30	6,76
B1-3-15-3	15	12,80	18,43	102,94	47,33	15,81	81,62	0,69	40,74	7,89	5,16	35,25	7,06

Misturas de cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples frente à moagem da cinza volante.

Tabela B5 – Dados gerais copos de prova de cinza volante moída 2h curada a 40°C

NOME	% cal	γ_d (kN/m ³)	w(%)	V _{CINZA} (%)	V _{ÁGUA} (%)	V _{CAL} (%)	V _V (%)	e	η (%)	L _V (%)	η/L_V	$\eta/(L_V)^{0,07}$	q _u (MPa)
D2-1-5-1	5	10,90	17,93	94,01	39,12	4,9	101,39	1,03	50,62	2,45	20,69	47,55	3,83
D2-1-5-2	5	10,90	17,6	94,37	38,53	4,92	102,27	1,03	50,74	2,44	20,79	47,67	3,77
D2-1-5-3	5	10,90	17,93	94,22	39,21	4,91	101,1	1,02	50,49	2,45	20,59	47,42	3,53
D2-1-10-1	10	11,00	18,04	89,83	39,39	9,36	100,18	1,01	50,25	4,7	10,7	45,09	4,27
D2-1-10-2	10	10,90	18,04	89,83	39,39	9,36	101,04	1,02	50,46	4,68	10,79	45,3	4,32
D2-1-10-3	10	11,00	18,04	89,9	39,42	9,37	100,11	1,01	50,21	4,7	10,68	45,06	4,46
D2-1-15-1	15	11,00	17,83	86,11	39,01	13,46	100,07	1,00	50,12	6,74	7,43	43,85	5,23
D2-1-15-2	15	11,00	17,83	86,13	39,02	13,47	99,38	1,00	49,94	6,77	7,38	43,69	5,18
D2-1-15-3	15	11,00	17,81	86,06	38,95	13,46	99,59	1,00	50,02	6,76	7,4	43,75	5,11
D2-2-5 -1	5	11,90	17,93	102,67	42,72	5,35	91,75	0,85	45,93	2,68	17,15	42,87	5,38
D2-2-5 -2	5	11,90	17,93	102,71	42,74	5,35	93,3	0,86	46,34	2,66	17,43	43,27	5,51
D2-2-5 -3	5	11,90	17,93	102,74	42,75	5,35	92,34	0,85	46,07	2,67	17,24	43,01	5,1
D2-2-10-1	10	12,00	17,77	98,16	42,4	10,23	91,11	0,84	45,67	5,13	8,9	40,73	6,24
D2-2-10-2	10	11,90	17,77	98,11	42,38	10,23	92,17	0,85	45,97	5,1	9,01	41,01	6,46
D2-2-10-3	10	12,00	17,77	98,16	42,4	10,23	90,59	0,84	45,53	5,14	8,85	40,6	6,39
D2-2-15-1	15	11,90	17,87	93,81	42,6	14,67	92,02	0,85	45,89	7,32	6,27	39,93	5,99
D2-2-15-2	15	11,90	17,87	93,73	42,57	14,66	91,46	0,84	45,77	7,33	6,24	39,81	6,87
D2-2-15-3	15	11,90	17,87	93,65	42,53	14,64	91,22	0,84	45,72	7,34	6,23	39,77	6,66
D2-3-5 -1	5	13,00	18,05	111,08	46,53	5,79	81,71	0,70	41,15	2,92	14,11	38,18	7,79
D2-3-5 -2	5	12,90	18,05	110,97	46,49	5,78	82,21	0,70	41,32	2,91	14,21	38,35	8,38
D2-3-5 -3	5	12,90	18,05	111,19	46,58	5,8	82,37	0,70	41,32	2,91	14,21	38,34	8,39
D2-3-10-1	10	12,90	18,08	106,06	46,62	11,06	82,11	0,70	41,21	5,55	7,43	36,55	9,03
D2-3-10-2	10	13,00	18,08	106,01	46,6	11,05	80,92	0,69	40,87	5,58	7,32	36,24	9,27
D2-3-10-3	10	13,00	18,08	106,08	46,63	11,06	81,11	0,69	40,91	5,58	7,34	36,28	8,82
D2-3-15-1	15	12,90	18,08	101,37	46,58	15,85	82,81	0,71	41,4	7,92	5,22	35,81	9,73
D2-3-15-2	15	13,00	18,48	101,15	47,5	15,82	81,28	0,69	41	7,98	5,14	35,45	10,44
D2-3-15-3	15	13,00	18,48	100,98	47,42	15,79	81,15	0,70	41	7,98	5,14	35,46	9,67

Tabela B6 – Dados gerais copos de prova de cinza volante moída 6h curada a 40°C

NOME	% cal	γ_d (kN/m ³)	w(%)	V _{CINZA} (%)	V _{ÁGUA} (%)	V _{CAL} (%)	V _V (%)	e	η (%)	L _V (%)	η/L_V	$\eta/(L_V)^{0,07}$	q _u (MPa)
B2-1-5 -1	5	11,10	18,18	91,43	39,61	4,89	100,02	1,04	50,94	2,49	20,43	47,79	3,91
B2-1-5 -2	5	11,10	18,18	91,62	39,69	4,90	99,83	1,03	50,84	2,50	20,35	47,69	4,12
B2-1-5 -3	5	11,10	18,18	91,48	39,64	4,90	100,23	1,04	50,98	2,49	20,47	47,83	3,89
B2-1-10-1	10	11,10	18,09	87,50	39,53	9,37	99,75	1,03	50,73	4,77	10,65	45,48	5,63
B2-1-10-2	10	11,10	18,09	87,53	39,54	9,37	99,19	1,02	50,58	4,78	10,58	45,34	5,70
B2-1-10-3	10	11,10	18,09	87,54	39,55	9,37	99,17	1,02	50,57	4,78	10,58	45,33	5,97
B2-1-15-1	15	11,10	18,43	83,50	40,16	13,41	98,59	1,02	50,43	6,86	7,35	44,07	6,01
B2-1-15-2	15	11,20	18,43	83,46	40,15	13,41	98,41	1,02	50,39	6,86	7,34	44,04	6,44
B2-2-5 -1	5	12,10	18,33	99,71	43,56	5,34	91,44	0,87	46,54	2,72	17,13	43,39	5,66
B2-2-5-2	5	12,00	18,26	99,82	43,45	5,34	92,82	0,88	46,88	2,70	17,37	43,74	6,75
B2-2-5-3	5	12,10	18,33	99,80	43,60	5,34	91,92	0,87	46,65	2,71	17,20	43,50	5,94
B2-2-10-1	10	12,00	18,31	95,20	43,54	10,19	93,18	0,88	46,92	5,13	9,14	41,85	6,72
B2-2-10-2	10	11,90	18,31	95,25	43,56	10,20	94,26	0,89	47,20	5,11	9,24	42,11	7,32
B2-2-10-3	10	12,00	18,31	94,72	43,31	10,14	91,49	0,87	46,59	5,17	9,02	41,53	6,15
B2-2-15-1	15	12,00	18,30	91,11	43,53	14,63	91,77	0,87	46,46	7,41	6,27	40,39	8,02
B2-2-15-2	15	12,00	18,30	91,10	43,52	14,63	92,19	0,87	46,58	7,39	6,30	40,49	8,03
B2-2-15-3	15	12,00	18,30	91,08	43,51	14,63	92,41	0,87	46,64	7,38	6,32	40,55	7,29
B2-3-5 -1	5	12,90	18,09	108,19	46,65	5,79	86,29	0,76	43,09	2,89	14,90	40,00	7,44
B2-3-5 -2	5	12,80	18,06	108,29	46,62	5,80	86,88	0,76	43,23	2,88	14,98	40,14	8,07
B2-3-5 -3	5	12,80	18,06	108,26	46,60	5,80	86,91	0,76	43,25	2,88	15,00	40,16	7,73
B2-3-10-1	10	12,90	18,36	103,04	47,25	11,03	85,63	0,75	42,88	5,52	7,76	38,04	10,23
B2-3-10-2	10	12,80	18,36	103,08	47,27	11,04	86,45	0,76	43,10	5,50	7,83	38,25	9,12
B2-3-10-3	10	12,90	18,41	103,07	47,38	11,04	84,92	0,74	42,67	5,55	7,69	37,85	9,62
B2-3-15-1	15	12,90	18,38	98,52	47,26	15,82	85,17	0,74	42,69	7,93	5,38	36,93	11,07
B2-3-15-2	15	12,90	18,38	98,55	47,28	15,83	85,79	0,75	42,86	7,91	5,42	37,08	10,22
B2-3-15-3	15	12,80	18,38	98,39	47,20	15,80	86,04	0,75	42,97	7,89	5,44	37,19	10,59

Misturas de cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples frente à moagem da cinza volante.

Tabela B7 – Dados gerais copos de prova de cinza volante não moída curada a 60°C

NOME	% cal	γ_d (kN/m ³)	w(%)	V _{CINZA} (%)	V _{ÁGUA} (%)	V _{CAL} (%)	V _V (%)	e	η (%)	L _V (%)	η/L_V	$\eta/(L_V)^{0,07}$	q _u (MPa)
C1-1-5 -1	5	11,10	17,95	96,04	39,28	4,92	95,92	0,95	48,72	2,50	19,51	45,70	3,20
C1-1-5 -2	5	11,10	17,95	96,05	39,29	4,92	96,10	0,95	48,76	2,49	19,55	45,74	3,50
C1-1-5 -3	5	11,10	17,95	96,02	39,28	4,91	96,07	0,95	48,77	2,49	19,55	45,74	3,12
C1-1-10-1	10	11,10	18,04	91,63	39,46	9,38	95,66	0,95	48,64	4,77	10,20	43,60	4,27
C1-1-10-2	10	11,10	18,04	91,59	39,44	9,37	95,78	0,95	48,68	4,77	10,22	43,64	4,47
C1-1-10-3	10	11,10	18,04	91,32	39,32	9,35	95,42	0,95	48,66	4,77	10,21	43,62	4,45
C1-1-15-1	15	11,10	18,19	87,52	39,73	13,44	95,78	0,95	48,68	6,83	7,13	42,56	4,35
C1-1-15-2	15	11,10	18,19	87,54	39,74	13,44	95,49	0,95	48,60	6,84	7,10	42,48	4,52
C1-1-15-3	15	11,00	18,19	87,56	39,75	13,44	97,19	0,96	49,04	6,78	7,23	42,89	4,13
C1-2-5-1	5	12,10	17,86	106,29	43,26	5,44	87,85	0,79	44,02	2,73	16,15	41,03	5,10
C1-2-5-2	5	11,90	17,86	104,69	42,61	5,36	89,99	0,82	44,99	2,68	16,80	41,99	4,49
C1-2-5-3	5	12,00	17,86	104,84	42,67	5,37	89,44	0,81	44,80	2,69	16,67	41,80	4,56
C1-2-10-1	10	12,00	17,85	100,11	42,67	10,25	89,29	0,81	44,72	5,13	8,71	39,89	5,03
C1-2-10-2	10	12,00	17,85	100,01	42,63	10,24	88,59	0,80	44,55	5,15	8,65	39,73	5,40
C1-2-10-3	10	11,90	17,85	99,71	42,50	10,21	89,79	0,82	44,96	5,11	8,80	40,11	5,35
C1-2-15-1	15	12,00	17,85	95,60	42,57	14,68	88,77	0,80	44,60	7,37	6,05	38,78	7,47
C1-2-15-2	15	12,00	17,85	95,64	42,59	14,68	87,80	0,80	44,32	7,41	5,98	38,52	7,54
C1-2-15-3	15	12,00	17,85	95,60	42,58	14,68	88,43	0,80	44,50	7,39	6,02	38,69	7,62
C1-3-5 -1	5	12,90	17,84	113,44	46,11	5,81	81,85	0,69	40,70	2,89	14,10	37,79	6,49
C1-3-5 -2	5	12,90	17,84	113,50	46,14	5,81	81,79	0,69	40,67	2,89	14,08	37,76	6,73
C1-3-5 -3	5	12,80	17,84	113,51	46,14	5,81	82,04	0,69	40,74	2,89	14,12	37,83	6,41
C1-3-10-1	10	12,80	17,86	108,36	46,20	11,09	82,52	0,69	40,86	5,49	7,44	36,26	7,37
C1-3-10-2	10	12,90	17,86	108,33	46,19	11,09	81,75	0,68	40,64	5,51	7,37	36,06	7,39
C1-3-15-1	15	12,90	17,56	103,84	45,51	15,94	81,78	0,68	40,57	7,91	5,13	35,10	8,19
C1-3-15-2	15	12,90	17,56	103,84	45,51	15,94	81,58	0,68	40,51	7,92	5,12	35,05	8,16
C1-3-15-3	15	12,80	17,56	103,86	45,52	15,95	82,02	0,68	40,64	7,90	5,14	35,17	8,04

Misturas de cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples frente à moagem da cinza volante.

Tabela B8 – Dados gerais copos de prova de cinza volante moída 6h curada a 60°C

NOME	% cal	γ_d (kN/m ³)	w(%)	V _{CINZA} (%)	V _{ÁGUA} (%)	V _{CAL} (%)	V _V (%)	e	η (%)	L _V (%)	η/L_V	$\eta/(L_V)^{0,07}$	q _u (MPa)
C2-1-5 -1	5	11,10	18,15	91,66	39,65	4,91	99,78	1,03	50,82	2,50	20,33	47,66	4,33
C2-1-5 -2	5	11,10	18,15	91,63	39,64	4,91	99,93	1,04	50,86	2,50	20,37	47,71	4,39
C2-1-10-1	10	11,10	18,33	87,16	39,90	9,33	99,00	1,03	50,64	4,77	10,61	45,39	4,58
C2-1-10-2	10	11,20	18,33	87,38	40,00	9,36	98,70	1,02	50,50	4,79	10,55	45,26	4,27
C2-1-10-3	10	11,10	18,33	87,26	39,94	9,34	100,07	1,04	50,88	4,75	10,71	45,62	4,66
C2-1-15-1	15	11,20	18,01	83,47	39,24	13,41	98,36	1,02	50,38	6,87	7,34	44,03	4,82
C2-1-15-2	15	11,20	18,23	83,33	39,66	13,38	98,26	1,02	50,40	6,86	7,34	44,04	4,22
C2-1-15-3	15	11,10	18,01	83,72	39,36	13,45	99,90	1,03	50,69	6,82	7,43	44,32	4,88
C2-2-5 -1	5	12,20	18,09	100,12	43,18	5,36	90,54	0,86	46,19	2,73	16,89	43,05	4,21
C2-2-5 -2	5	12,00	18,08	99,88	43,05	5,35	92,69	0,88	46,83	2,70	17,33	43,69	4,89
C2-2-5 -3	5	12,00	18,08	99,93	43,07	5,35	93,14	0,88	46,94	2,70	17,41	43,79	4,77
C2-2-10-1	10	12,00	18,21	95,18	43,28	10,19	93,15	0,88	46,92	5,13	9,14	41,85	6,26
C2-2-10-2	10	12,00	18,21	95,26	43,32	10,20	93,25	0,88	46,93	5,13	9,14	41,85	6,19
C2-2-10-3	10	12,20	18,31	95,52	43,67	10,23	89,94	0,85	45,96	5,23	8,79	40,94	6,16
C2-2-15-1	15	12,10	18,20	91,04	43,25	14,62	90,87	0,86	46,24	7,44	6,21	40,18	6,82
C2-2-15-2	15	12,20	18,38	91,21	43,75	14,65	89,71	0,85	45,87	7,49	6,12	39,84	7,04
C2-2-15-3	15	12,10	18,20	90,90	43,18	14,60	90,64	0,86	46,21	7,44	6,21	40,16	7,01
C2-3-5 -1	5	12,90	17,96	108,28	46,36	5,80	85,96	0,75	42,97	2,90	14,83	39,89	6,51
C2-3-5 -2	5	12,90	17,89	108,59	46,31	5,81	85,87	0,75	42,88	2,90	14,77	39,80	6,90
C2-3-5 -3	5	12,90	17,97	108,27	46,37	5,80	85,44	0,75	42,82	2,91	14,74	39,74	7,00
C2-3-10-1	10	13,00	18,00	103,54	46,55	11,09	84,47	0,74	42,42	5,57	7,62	37,62	8,45
C2-3-10-2	10	12,90	18,00	103,31	46,44	11,06	85,90	0,75	42,89	5,52	7,77	38,06	7,77
C2-3-10-3	10	12,80	18,18	103,00	46,75	11,03	87,27	0,77	43,36	5,48	7,91	38,49	7,72
C2-3-15-1	15	13,20	18,26	98,41	46,91	15,81	80,82	0,71	41,44	8,10	5,11	35,79	9,87
C2-3-15-2	15	12,90	18,26	98,67	47,03	15,85	84,65	0,74	42,50	7,96	5,34	36,76	10,56
C2-3-15-3	15	12,90	18,06	98,78	46,57	15,87	85,06	0,74	42,59	7,94	5,36	36,84	9,08