

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

**MISTURAS CINZA VOLANTE - CAL DE CARBURETO:
DURABILIDADE, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E
COMPRESSÃO**

Jéssica Flesch Novaes

Porto Alegre
2016

Jéssica Flesch Novaes

**MISTURAS CINZA VOLANTE - CAL DE CARBURETO:
DURABILIDADE, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E
COMPRESSÃO**

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

Porto Alegre
2016

Novaes, Jéssica Plesch
MISTURAS CINZA VOLANTE - CAL DE CARBURETO:
DURABILIDADE, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E COMPRESSÃO /
Jéssica Plesch Novaes. -- 2016.
117 f.

Orientador: Nilo Cesar Consoli.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Misturas Cinza Volante - Cal de Carbureto. 2. Resistência à Compressão Simples. 3. Resistência à Tração na Compressão Diametral. 4. Durabilidade. I. Consoli, Nilo Cesar, orient. II. Título.

JÉSSICA FLESCH NOVAES

**MISTURAS CINZA VOLANTE - CAL DE CARBURETO:
DURABILIDADE, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E COMPRESSÃO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração 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, 09 de Setembro de 2016.

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

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Antônio Thomé (UPF)
D.Sc. pelo PPGEC-UFRGS

Prof^a. Karla Salvagni Heineck (PPGEC-UFRGS)
D.Sc. pelo PPGEC-UFRGS

Prof^a. Cecília Gravina da Rocha (PPGEC-UFRGS)
D.Sc. pelo PPGEC-UFRGS

Prof. Lucas Festugato (PPGEC-UFRGS)
D.Sc. pelo PPGEC-UFRGS

Dedico este trabalho à minha família e amigos pela
compreensão durante o período de seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho não teria sido possível sem o suporte das pessoas que me rodearam durante todo o tempo de sua execução. Assim, meus agradecimentos se dirigem as seguintes pessoas:

Ao meu orientador, Prof. Nilo Cesar Consoli, por ser o orientador mais disponível que já ouvi falar, mesmo em períodos de férias e finais de semana, pela dedicação, pelo encorajamento constante e pelos ensinamentos transmitidos durante a pesquisa e disciplinas ministradas.

Às minhas queridas colegas de mestrado Bruna Hoch, Laura Lavalle, Luiza Godói e Natália Mensch, por termos nos tornado grandes minhas amigas, sendo um refúgio em meio a tantos estudos e listas de exercícios intermináveis. Aos colegas Adrian Siacara, Arthur Ziebell e Camila Kern, juntamente com as colegas anteriormente citadas, pela paciência e boa vontade em me ajudar quando necessário e principalmente por todas as risadas. Juntamente com os ensinamentos que levo desta época, a amizade de vocês é o que levo de mais precioso do mestrado.

Ao doutorando Rodrigo Saldanha e ao graduando Hugo Carlos Scheuermann Filho por terem ajudado imensamente na fases de realização dos ensaios de laboratório e escrita desta pesquisa, agradeço pela disponibilidade e dedicação. Grande parte dos resultados alcançados devo ao auxílio de vocês.

A todos os amigos e familiares que estiveram ao meu lado durante toda essa caminhada. Faço um agradecimento especial à minha mãe, que me deu total apoio e a possibilidade de me dedicar integralmente durante os estudos, a meu pequeno e amado irmão, Gustavo, que tem me ensinado desde o seu nascimento o pleno amor pela vida e a força que podemos ter, independente do nosso tamanho e a meu namorado Jackson Waechter, que dividiu e me auxiliou em todas as dificuldades e saudades de casa durante a graduação e compreendeu as minhas faltas nesta nova etapa.

À CIENTEC pela disponibilização das instalações para a realização de diversos ensaios, em especial ao doutorando Eduardo Mallmann.

A todos os colegas e professores do LEGG, pela oportunidade de conviver e aprender a cada dia com eles.

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

À Braskem pela disponibilização da cinza volante utilizada e à White Martins pela disponibilização da cal de carbureto.

Ao CNPq pelo auxílio proporcionado com a bolsa de estudos que auxiliou na minha dedicação aos estudos e ao desenvolvimento desta pesquisa.

Pois não importa que os primeiros passos pareçam pequenos: o que se faz bem feito faz-se para sempre.

David Henry Thoreau

RESUMO

NOVAES, J. F. **Misturas cinza volante - cal de carbureto: Durabilidade, resistência à tração e compressão.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Assunto cada vez mais em pauta nos foros nacionais e internacionais e nas comunidades ao redor do mundo, a questão ambiental tem sido a grande responsável pela geração de produtos novos. A construção de obras de infraestrutura é um dos maiores consumidores de recursos naturais, gerando uma enorme quantidade de resíduos, acaba também por ser um setor causador do impacto ambiental. Tais resíduos, se descartados de maneira incorreta geram problemas ambientais, em contraponto o descarte em aterros sanitários tem um custo bastante elevado. Partindo dessas premissas, buscar a utilização de resíduos como matéria prima para a indústria da construção de obras de infraestrutura é o objetivo global desta pesquisa, visando benefícios ambientais e econômicos. Para tal, foram utilizados a cinza volante, obtida através da queima do carvão nas termelétricas e rica em sílica e alumina e a cal de carbureto, oriunda da produção do gás acetileno e que possui grande quantidade de óxido de cálcio. Através de ensaios de laboratório, busca-se nesta pesquisa avaliar a influência da quantidade de cal e da porosidade, isoladamente, na durabilidade, resistência à tração e resistência à compressão e a relação resistência à tração/resistência à compressão, objetiva-se ainda avaliar a utilização do parâmetro porosidade/teor volumétrico de cal na estimativa de resistência e verificar a existência de uma relação única para este parâmetro versus a perda de massa acumulada/número de ciclos. Para isto, foram escolhidos os pesos específicos aparentes secos de 10,6, 11,6 e 12,6 kN/m³ com os respectivos teores de umidade de 36,6%, 31,3% e 25 %, sendo os teores de cal de carbureto adotados de 5, 8 e 11%. Todas as amostras foram curadas por um período de 28 dias em câmara úmida a 23°C. Os resultados apontam que o incremento da quantidade de cal e do peso específico aparente seco provocam aumentos na resistência à tração por compressão diametral, na resistência à compressão simples e na durabilidade da mistura. A utilização de um expoente como ajuste para a relação porosidade/teor volumétrico de cal $[\eta/(L_v)^{0,11}]$ apresentou-se adequada para a formulação de equações para a previsão da resistência do material cimentado e para a estimativa da perda de massa acumulada/número de ciclos. Além disso, a existência de relações únicas para o controle da resistência à tração na compressão diametral e da resistência à compressão simples em função da porosidade e teor volumétrico de cal mostraram-se úteis para as formulações de dosagem.

Palavras-chave: *cinza volante; cal de carbureto; relação porosidade/teor volumétrico de cal; resistência à compressão simples; resistência à tração na compressão diametral; durabilidade.*

ABSTRACT

NOVAES, J. F. **Fly ash - carbide lime blends: Durability, tensile and compressive strength.** 2016. M.Sc. Dissertation – Department of Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The environmental issue is increasingly been responsible for the generation of new products. Infrastructure construction is one of the largest consumers of natural resources. Looking for the use of industrial residues as material for the construction industry is the overall objective of this research, aiming at environmental and economic benefits. For this, present study has used fly ash (obtained by burning coal in thermoelectric power plants) and carbide lime (originated from the production of acetylene gas) to fabricate a novel material. Through laboratory tests, one aim in this research was to evaluate the influence of the amount of lime and porosity of the blend on durability, splitting tensile strength and unconfined compressive strength, as well as on tensile/compressive ratio. Another objective was to further evaluate the use of the porosity/lime index in the estimation of strength and checking for a unique relationship for this parameter versus accumulated loss of mass/number of cycles. For such study were chosen dry unit weights of 10.6 kN/m³, 11.6 kN/m³ and 12.6 kN/m³ with the respective moisture contents of 36.6%, 31.3% and 25.0% and carbide lime contents of 5%, 8% and 11%. All samples were cured for a period 28 days in a moist chamber at 23°C. The results show that increasing dry unit weight and the amount of carbide lime cause increases in durability and splitting tensile and unconfined compressive strength of the studied blends. The use of an exponent as an adjustment to the porosity/lime index $[\eta/(L_v)^{0.11}]$ showed to be appropriate for formulating equations for predicting the strength of cemented material and to estimate the accumulated loss of mass/number of cycles. Furthermore, the existence of unique relationships for the control of splitting tensile tests and unconfined compression strength as a function of porosity and volumetric lime content proved useful for the dosage formulations.

Keywords: *fly ash; carbide lime; porosity/lime index; unconfined compression strength; splitting tensile tests; durability.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização das termelétricas localizadas na região sul do Brasil. Fonte: Hoppe Filho (2008).....	23
Figura 2 - Gráfico de comparação das dimensões de partículas. Fonte: Mehta e Monteiro (2008)	24
Figura 3 - Micrografia eletrônica de varredura de uma cinza volante. Fonte: Mehta e Monteiro (2008)	25
Figura 4 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 20°C. Fonte : Silvani (2013).....	38
Figura 5 - Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 20°C. Fonte : Silvani (2013).....	39
Figura 6 - Relação o acréscimo do teor de cal de carbureto em solo argiloso e a resistência á compressão simples para 28 dias de cura. Fonte: Horpibulsuk e Phetchuay (2012).....	40
Figura 7 - Variação da resistência à tração por compressão diametral em relação à porosidade das amostras curadas a 20°C. Fonte: Silvani (2013)	41
Figura 8 - Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade dos corpos-de-prova curados a 20°C. Fonte: Silvani (2013).....	42
Figura 9 - Perda de Massa Acumulada versus N° de Ciclos – Solo-Cal: 5% - γ_d :1,60g/cm ³ (7, 14, 28 e 60 dias de cura. Fonte: Kanazawa (2015).....	44
Figura 10 - Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Larnach, 1960, <i>apud</i> Saldanha, 2014)	45
Figura 11 -Relação da tração versus vazios/cimento expresso em termos da porosidade e do teor volumétrico de cimento. Fonte: Foppa, 2005.....	46
Figura 12 - Variação da resistência à tração por compressão diametral pela variação da relação $\eta/(Lv)^{0,3}$ para a temperatura de 35°C. Fonte: Silvani (2013)	48
Figura 13 - Variação da resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta/(Lv)^{0,3}$ para a temperatura de 35°C. Fonte: Silvani (2013)	48
Figura 14 - Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e à resistência à compressão simples para a temperatura 20°C. Fonte: Silvani (2013).....	50
Figura 15 - Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias. Fonte: Adaptado de Ingles e Metcalf, 1972, <i>apud</i> Benetti, 2015)	51
Figura 16 – Relação entre vazios/cal teor de cal e resistência à compressão simples. Fonte: Lopes Júnior (2007).....	52

Figura 17 - Ensaio de compactação e pontos de moldagem.....	59
Figura 18 – Cinza volante gerada pela Braskem	60
Figura 19 – Granulometria da cinza volante da Braskem. Fonte: De Paula (2016).....	61
Figura 20 - Difractometria de Raios-X da cinza volante da Braskem. Fonte: De Paula (2016)	61
Figura 21 - Armazenamento (a) e cal de carbureto após a secagem (b).....	63
Figura 22 – Definição do mínimo teor de cal de carbureto pelo método ICL.....	65
Figura 23 – Câmara úmida da CIENTEC.....	67
Figura 24 – Corpos-de-prova moldados para ensaios de resistência à tração imersos em água	67
Figura 25 – Molde utilizado para confecção dos corpos-de-prova	69
Figura 26 – Prensa utilizada	69
Figura 27 - Corpo-de-prova embalado	70
Figura 28 – Corpos-de-prova durante a cura em câmara úmida.....	70
Figura 29 – Ruptura típica do ensaio de tração na compressão diametral. Fonte: ABNT (1994)	71
Figura 30 - Ensaio de resistência à tração na compressão diametral	72
Figura 31 – Molde utilizado para os corpos-de-prova dos ensaios de resistência à compressão simples.....	73
Figura 32 – Posicionamento e prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão simples.....	74
Figura 33 – Corpo-de-prova após moldagem (100mm x 120mm).....	75
Figura 34 - Amostra retirada com auxílio do extrator	76
Figura 35 – Corpos-de-prova dos ensaios de durabilidade ensacados e curando em câmara úmida	77
Figura 36 – Imersão em água	78
Figura 37 – Secagem em estufa a 71°C.....	78
Figura 38 – Escovação.....	79
Figura 39 - Variação da resistência à tração na compressão diametral em relação à quantidade de cal.....	81

Figura 40 - Variação da resistência à tração na compressão diametral em relação à porosidade	83
Figura 41 - Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à tração na compressão diametral	84
Figura 42 – Efeito de ajuste.....	85
Figura 43 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para todas as amostras	86
Figura 44 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal	87
Figura 45 - Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade.....	88
Figura 46 - Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples.....	89
Figura 47 - Efeito de ajuste.....	90
Figura 48 - Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para todas as amostras	91
Figura 49 – Perda de massa acumulada versus número de ciclos em função do teor de cal ($\gamma d = 10,6 \text{ kN/m}^3$ para todos os espécimes).....	92
Figura 50 - Perda de massa acumulada versus número de ciclos em função do teor de cal ($\gamma d = 11,6 \text{ kN/m}^3$ para todos os espécimes).....	92
Figura 51 - Perda de massa acumulada versus número de ciclos em função do teor de cal ($\gamma d = 12,6 \text{ kN/m}^3$ para todos os espécimes).....	93
Figura 52 – Perda de massa acumulada no 12º ciclo em função do teor de cinza.....	94
Figura 53 - Variação da perda de massa acumulada em relação à porosidade.....	95
Figura 54 – Perda de massa acumulada versus porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para 3, 6, 9 e 12 ciclos de molhagem e secagem.....	96
Figura 55 - Perda de massa acumulada/número de ciclos versus porosidade/teor volumétrico de cal ajustado	97
Figura 56 - Mudanças na resistência à tração na compressão diametral e à compressão simples pela variação da relação $(\eta/Lv)_{0,11}$	98
Figura 57 - Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e à resistência à compressão simples	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas da cal de carbureto.....	29
Tabela 2 - Propriedades químicas da cal de carbureto.	29
Tabela 3 - Exigências físicas	33
Tabela 4 – Exigências químicas	33
Tabela 5 – Índice de atividade pozolânica.....	34
Tabela6 - Resumo do programa experimental, com fases e ensaios.	56
Tabela 7 - Caracterização e procedimentos empregados para os materiais utilizados...	58
Tabela 8 – Análise química da cinza volante.	62
Tabela 9 – Propriedades da cal de carbureto	63
Tabela 10 – Variáveis e níveis estabelecidos.	64
Tabela 11- Itens constantes.....	64
Tabela 12 – Pontos de moldagem.....	66
Tabela 13 - Resistência à tração na compressão diametral e ganho de resistência para variação de cal.	81
Tabela 14 - Resistência à compressão simples e ganho de resistência para variação de cal.	87
Tabela 15 – Perda de massa acumulada no 12º ciclo.	94

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM: American Society for Testing and Materials

BEN – Balanço Energético Nacional

CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia - RS

e: índice de vazios

ENVIRONGEO: Laboratório de Resíduos, Novos Materiais e Geotecnia Ambiental

FA= teor de cinza volante;

LACER: Laboratório de Materiais Cerâmicos

LEGG: Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

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

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

LL: limite de liquidez

LP: limite de plasticidade

NBR: Norma Brasileira

q_t : resistência à tração na compressão diametral

q_u : resistência à compressão simples

R^2 : coeficiente de uniformidade

TRB: Transportation Research Board

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USACE: United States Army Corps of Engineers

V_v – volume de vazios

V_{cal} – volume absoluto de cal

V_S – volume da amostra

η : porosidade

η/L_v – relação porosidade/teor volumétrico de cal

ω : teor de umidade

γ_L =peso específico real da cal;

γ_{SFA} = peso específico real da cinza volante;

γ_S = peso específico real do solo.

γ_d : peso específico aparente seco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DO TEMA	18
1.2 OBJETIVO	20
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 CINZA DE CARVÃO MINERAL	22
2.1.1 Resíduo produzido pela queima do carvão mineral.....	22
2.1.2 A cinza volante e suas características.....	23
2.1.3 A cinza como subproduto.....	26
2.2 CAL DE CARBURETO.....	28
2.2.1 Resíduo da indústria de fabricação do gás acetileno	28
2.2.2 A cal de carbureto e suas características	28
2.3 ÁGUA.....	30
2.4 EMPREGO DA CINZA E CAL.....	30
2.5 MATERIAIS ESTABILIZADOS POZOLANICAMENTE.....	32
2.5.1 Classificação dos materiais pozolânicos.....	32
2.5.2 Pozolanicidade da cinza volante.....	34
2.5.3 Fatores que influenciam as reações pozolânicas	36
2.6 VARIÁVEIS DETERMINANTES NO COMPORTAMENTO DE MISTURAS CINZA-CAL	37
2.6.1 Efeito da cal.....	37
2.6.2 Efeito da porosidade.....	40
2.6.3 Efeito do tempo de cura e temperatura.....	43
2.6.4 Efeito da relação entre porosidade e teor volumétrico de cal.....	44
2.7 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM CAL	49
2.7.1 Resistência à tração	49
2.7.2 Resistência à compressão simples	50
2.7.3 Durabilidade.....	52
3. MÉTODO DE PESQUISA.....	53
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	53

3.2 FASES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	55
3.3 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO	57
3.3.1 Coleta de amostras	57
3.3.2 Preparação das amostras.....	57
3.3.3 Ensaio de Caracterização	57
3.3.4 Ensaio de compactação	58
3.4 MATERIAIS DA MISTURA.....	59
3.4.1 Cinza volante.....	59
3.4.2 Cal de carbureto	62
3.5 PROGRAMA DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DE DURABILIDADE	63
3.5.1 Definição dos teores de cal.....	64
3.5.3 Definição do tempo e temperatura de cura.....	66
3.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	68
3.6.1 Moldagem dos corpos de prova.....	68
3.6.2 Ensaio de resistência à tração na compressão diametral	71
3.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	72
3.7.1 Moldagem dos corpos-de-prova.....	72
3.7.2 Ensaio de resistência à compressão simples.....	73
3.8 ENSAIOS DE DURABILIDADE.....	74
3.8.1 Moldagem dos corpos de prova.....	74
3.8.2 Programa de ensaio de durabilidade.....	77
4. RESULTADOS E ANÁLISES	80
4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL	80
4.1.1 Efeito do teor de cal	80
4.1.2 Efeito da Porosidade.....	82
4.1.3 Efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal.....	83
4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	86
4.2.1 Efeito do teor de cal	86
4.2.2 Efeito da Porosidade.....	87
4.2.3 Efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal.....	88
4.3 ENSAIOS DE DURABILIDADE.....	91

4.3.1 Efeito do teor de cal	91
4.3.2 Efeito da Porosidade.....	94
4.3.3 Efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal.....	96
4.4 RELAÇÃO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO/RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	97
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
5.1 CONCLUSÕES	100
5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	101

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DO TEMA

As alterações climáticas que o planeta vem apresentando indicam que estamos caminhando para que haja um esgotamento dos recursos disponíveis. A necessidade de buscar-se a sustentabilidade ambiental é consensual, a grande questão é como alcançar isto (Mourão *et al.*, 2009).

Considerando que a indústria da construção é uma das maiores consumidoras de recursos naturais, é evidente a demanda cada vez maior do desenvolvimento de técnicas e materiais que levem em conta os impactos ambientais gerados (Pacheco-Torgal e Jalali, 2012). A partir disso, fica claro que existe a necessidade de buscar meios capazes de reutilizar os materiais, reduzindo o uso dos recursos naturais, diminuindo o risco por contaminações ao meio ambiente e aumentando a vida útil dos aterros, uma vez que um número menor de resíduos será depositado (Saldanha, 2014).

A engenharia geotécnica como um todo é responsável por um consumo gigantesco de recursos, bem como produz uma grande quantidade de resíduos. Partindo-se dessa premissa vem sendo ampliado largamente o número das pesquisas que analisam os impactos do uso dos materiais e as que possuem o intuito de introduzir técnicas fazendo o uso de materiais geotécnicos sustentáveis (Consoli *et al.*, 2016). É o caso dos estudos de Kempala *et al.* (2014) que estudaram o comportamento mecânico de solo cinza-cal através da durabilidade e Consoli *et al.* (2011a, 2011b) que vem fazendo estudos acerca da compressão simples e rigidez com o intuito de reduzir os impactos ambientais através da reutilização dos resíduos.

Seguindo a linha de buscar reutilizar os resíduos, esta pesquisa teve por objetivo fazer uso de dois resíduos largamente produzidos no estado do Rio Grande do Sul. Um deles, a cinza volante ou cinza leve, é produzido no RS na escala de centenas de toneladas/ano através da queima do carvão mineral nas termoeletricas e indústrias, juntamente com outros tipos de cinzas (Rohde *et al.*, 2006). Deve-se ter em mente que a cinza volante é um material com alto potencial poluidor, classificado como resíduo não inerte em função de possuir em sua composição

elementos-traço de cobre, cromo, mercúrio, chumbo, fósforo, zinco, entre outros (Mallmann, 1996).

Por este motivo, o destino final da cinza deve ser pensado de modo ambientalmente correto, evitando a possibilidade de que os elementos-traços contaminem o solo. Assim, pensar na reutilização deste material é dar a cinza volante um fim sustentável e evitar a geração de passivos ambientais (Saldanha, 2014)

Segundo Metha e Monteiro (2008) a cinza volante é o principal resíduo industrial no mundo e os impulsionadores desta produção são China, Índia, Estados Unidos, Rússia, Alemanha e Reino Unido. Aproximadamente 3 milhões de toneladas cinza são geradas anualmente no Brasil, sendo o Rio Grande do Sul um dos maiores responsáveis por este número, uma vez que a maioria das termelétricas se situam no estado. Aproximadamente 25% deste valor é relativo a cinza pesada e 75% a cinza leve, o que nos leva a um problema ambiental já que apenas cerca de 30% das cinzas produzidas são reutilizadas no setor da construção civil (Depoi *et al.*, 2007).

De acordo com Silva (2011), até a década de 90, as cinzas geradas no processo de queima das termelétricas eram enviadas para depósitos nos arredores das fontes geradoras. Somente após a pressão da sociedade e ações dos órgãos governamentais e ambientais grande parte das cinzas passou a ser encaminhada para depósitos, bacias de decantação, e cavas de minas desativadas.

O segundo material utilizado é a cal de carbureto, resíduo da produção do gás acetileno e também produzido no Rio Grande do Sul. Este material é resultado da reação química entre a água e o carbureto de cálcio, possui alto potencial poluidor devido à alcalinidade. Sua destinação final são os aterros industriais ou a comercialização, mas, como possui alto potencial de reação com a cinza volante vem sendo utilizado nas reações de cimentação com a cinza (Thomé, 1999).

Nos dias de hoje já é reconhecido que as reações pozolânicas que ocorrem na mistura da cinza com a cal são função da reação da sílica ativa da primeira com o hidróxido de cálcio em presença de água da segunda (Saldanha, 2014). Existem inúmeros relatos da utilização dessa mistura em Geotecnia, entre eles a produção de tijolos para habitação (Andrade, 1991), nos processos produtivos pode-se ter a estabilização de agentes contaminantes (Pb, Cu e Fe) através

da fixação destes à matriz cimentícia gerada através das reações pozolânicas (Manjunath, 2013), estabilização de solos, construção de base para pavimentos, proteção de taludes e como camada suporte para fundações superficiais (Foppa, 2005).

A dosagem e compreensão do comportamento mecânico são necessárias uma vez que fatores como tempo de cura, porosidade, teor de cal e temperatura podem influenciar nas reações pozolânicas (Consoli *et al.*, 2001, 2007). Porém, não existe uma formulação para a dosagem que indique o comportamento mecânico da resistência à tração, razão tração- compressão e da durabilidade de misturas compactadas de cinza volante e cal de carbureto.

A presente pesquisa busca encontrar subsídios para que, através das relações porosidade/teor volumétrico de cal, possa determinar uma dosagem para previsão do comportamento mecânico à tração, razão tração-compressão e durabilidade do material cimentado.

1.2 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é avaliar a durabilidade, a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples de misturas compactadas de cinza volante de carvão e cal de carbureto.

Têm-se como objetivos específicos estabelecidos nesta pesquisa:

1. Avaliação da utilização do parâmetro porosidade/teor volumétrico agente cimentante na estimativa da resistência à tração e compressão das misturas estudadas;
2. Verificação da existência de uma relação única entre a perda de massa acumulada/nº de ciclos e a porosidade/teor volumétrico de cal, através dos ensaios de durabilidade;
3. Verificar a relação resistência à tração/resistência à compressão.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O capítulo 1 apresenta uma introdução, a qual indica o problema, a importância e o objetivo da pesquisa.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, dando ao leitor um conhecimento geral dos materiais e ensaios a serem utilizados.

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

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na etapa experimental e uma discussão dos resultados, levando em conta outros resultados encontrados na literatura.

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

Para finalizar, são apresentadas as referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura acerca da geração da cinza volante, seu potencial de aplicação, questões ambientais envolvidas e mecanismos de reação pozolânicas da mistura de cinza volante com a cal de carbureto.

A crescente necessidade da busca de formas de reutilização dos resíduos industriais, fazendo com que o impacto ambiental causado por sua deposição seja reduzido, torna a utilização de materiais pozolânicos, comumente apenas descartados pelas indústrias, o fator que impulsiona esta pesquisa. Além de, através da utilização de dois resíduos largamente produzidos no Rio Grande do Sul, se tentar atender ao conceito de desenvolvimento sustentável introduzido em 1987 que diz que se trata do desenvolvimento que satisfaz as necessidades da geração atual, sem comprometer a possibilidade de as gerações vindouras satisfazerem as suas próprias necessidades (WCED, 1987).

2.1 CINZA DE CARVÃO MINERAL

2.1.1 Resíduo produzido pela queima do carvão mineral

De modo que o carvão mineral é utilizado largamente para a produção de energia no mundo todo, a cinza gerada durante a combustão deste carvão passa a ser um resíduo importante e de larga escala. Em 2010 o consumo mundial de carvão foi um valor próximo de 6,5 bilhões de toneladas de carvão mineral, mais de 50% desse valor foi destinado à geração elétrica (BEN, 2010). Prevê-se que em 2020 a demanda pelo carvão será ainda maior, podendo ter seu valor duplicado (Silva *et al.*, 1997).

No Brasil, em 2014, aproximadamente 7 milhões de toneladas de carvão mineral foram produzidas e o consumo foi de cerca de 3,8 milhões de toneladas equivalentes de petróleo. O carvão mineral é considerado como fonte de energia primária no balanço energético nacional, e o carvão utilizado é predominantemente de origem nacional, cujos estados produtores são Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (BEN, 2015) Segundo Brown (2011), devido à composição e qualidade do carvão brasileiro ele é basicamente utilizado para produção de energia em indústrias e as principais consumidoras são as usinas termelétricas e indústrias de

cimento, cerâmica, papel e celulose. Na Figura 1, são indicadas as termelétricas localizadas em toda região sul do país.

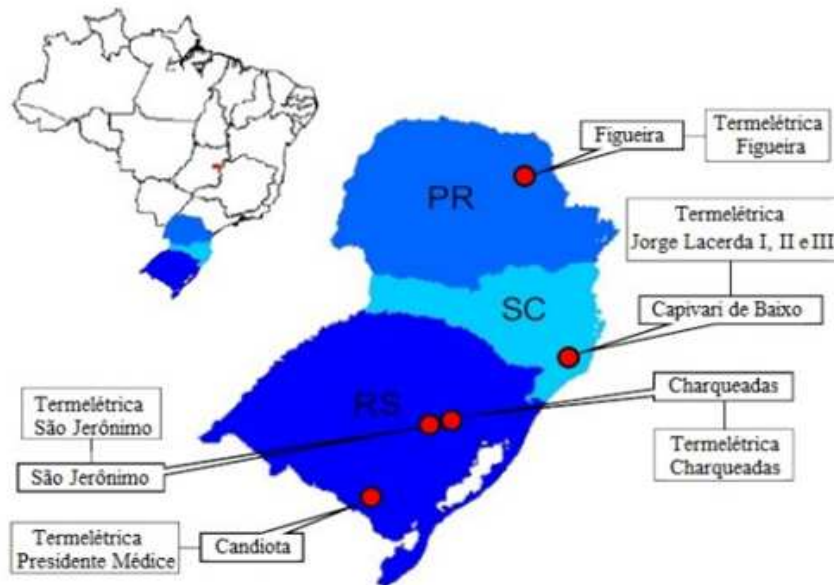


Figura 1- Localização das termelétricas localizadas na região sul do Brasil. Fonte: Hoppe Filho (2008)

2.1.2 A cinza volante e suas características

No processo da queima do carvão mineral nas termelétricas são produzidos dois tipos de cinzas, a cinza volante, também conhecida como cinza leve e a cinza pesada. A primeira e que é utilizada nesta pesquisa é coletada nos precipitadores eletrostáticos, a cinza pesada fica armazenada no fundo das fornalhas, em tanques de resfriamento, sendo retirada por fluxo de água. De acordo com a NBR-12653 (ABNT, 2014) as cinzas volantes são materiais finamente divididos e que apresentam características pozolânicas (ISAIA, 2007).

O carvão brasileiro em grande parte é composto por matéria mineral e a cada 100 toneladas de carvão queimado são geradas cerca de 50 toneladas de cinza (BROWN, 2011). A cinza volante corresponde a aproximadamente 80 % dos resíduos gerados na combustão do carvão mineral (KIHARA, 1986). Este é um dos motivos pelo qual Hoppe Filho (2008) diz que existe a grande

necessidade de se agregar conhecimento sobre este subproduto, de forma a viabilizar sua utilização.

Para Núñez (2007), a cinza volante trata-se de uma pozolana artificial. Segundo a ASTM (American Society for Testing and Materials) a pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso, que sozinho possui praticamente nenhuma capacidade de cimentação, mas que em presença de água reage com hidróxidos alcalinos e alcalinos terrosos e passa a ter propriedades cimentantes. As características da cinza volante variam conforme as propriedades do carvão utilizado na queima, isto quer dizer que as amostras podem ter a composição variada de acordo com a localização da mina onde o carvão foi retirado, por exemplo (Brown, 2011).

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a mineralogia das cinzas é diversificada, variando de acordo com a composição do carvão, ambiente de armazenamento e condições de calcinação. Os autores ainda dizem que o teor de cálcio é o fator predominante na composição mineralógica para que exista uma divisão das cinzas volantes em duas categorias. As cinzas que possuem baixo teor de cálcio geralmente são produto da combustão de carvões betuminosos e antracito e possuem um valor inferior a 10 % de CaO, já as com alto teor de cálcio apresentam de 15 a 40% de CaO e costumam ser produto da combustão de carvões sub-betuminosos e de lignita. A Figura 2 compara as dimensões das partículas de cimento Portland e das cinzas volantes de baixo e alto teor de cálcio.

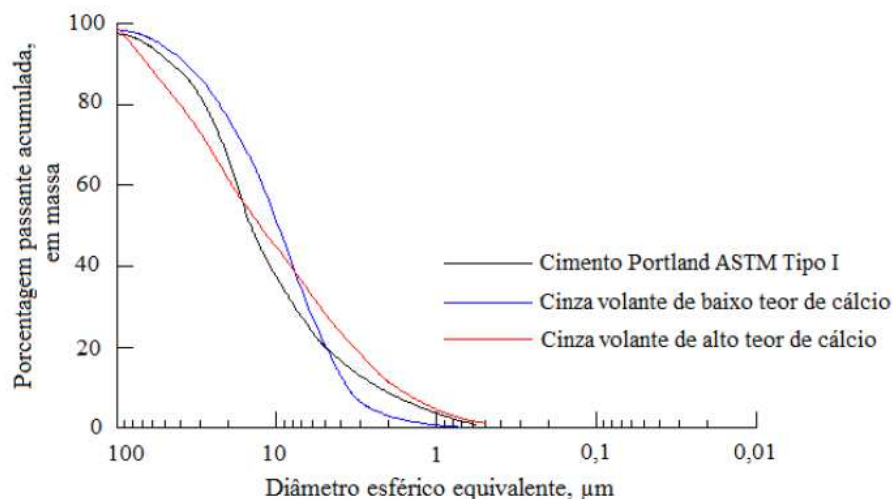


Figura 2 - Gráfico de comparação das dimensões de partículas. Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

A cinza volante é a cinza de granulometria mais fina e processo de resfriamento mais rápido, possui de 60 % a 85% de sílica amorfa, ao contrário da cinza pesada, a cinza pesada tem a granulometria semelhante a uma areia grossa e com baixo potencial aglomerante (ISAIA, 2007). A granulometria é o principal fator que afeta sua qualidade, interferindo na resistência, pela relação direta com a água, incremento de volume na mistura e atividade pozolânica (CANON, 1968).

No que diz respeito às atividades pozolânicas, a influência se dá pelo teor de vidro apresentado. Grande maioria das partículas da cinza volante são constituídas por esferas sólidas de vidro e a minoria de esferas ocas (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Para uma cinza volante ser considerada de boa qualidade precisa apresentar de 70 a 85% da fase vítrea, apresentando fases cristalinas, como quartzo, mulita, hematita e magnetita (ISAIA, 2007).

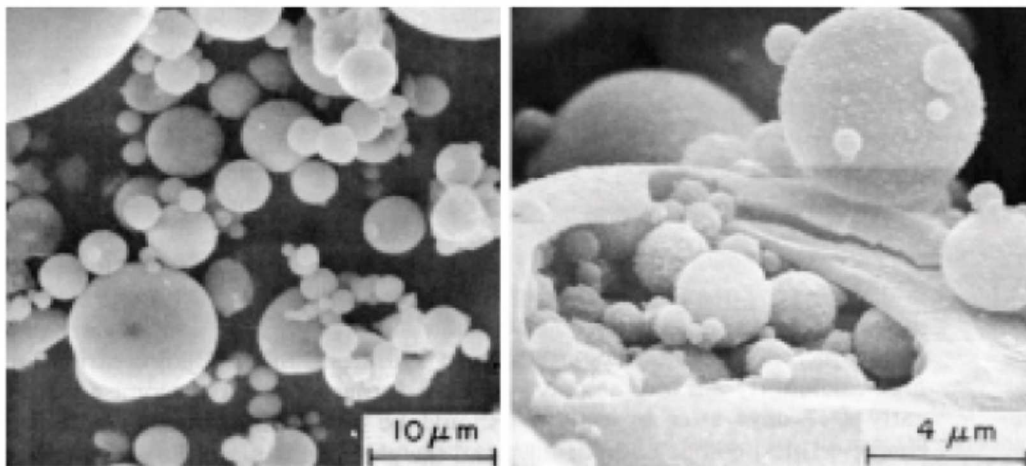


Figura 3 - Micrografia eletrônica de varredura de uma cinza volante.
Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

No que tange o impacto ambiental, a NBR 10004 (ABNT,2004) classifica os resíduos de maneira que seu destino final seja o mais adequado (aterros sanitários, industriais, autoclavagem). A NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004) propõem que a classificação dos resíduos seja feita através de ensaios de lixiviação e solubilização, respectivamente.

Um indicativo da capacidade de impacto ambiental dos resíduos está associado à sua composição química. O carvão contém 26 elementos que são considerados de interesse

ambiental, entre eles Arsênio (As), Cádmiio (Cd), Mercúrio (Hg), Chumbo (Pb) e Selênio (Se), maiores causadores de impactos ambientais (Swaine, 2000). Além de Alumínio (Al), com toxicidade para plantas e mamíferos, nos últimos associada à doenças neurológicas como a doença de Alzheimer (Huheey et al., 1993).

Os “elementos-traços”, zinco, cobre, chumbo, cromo, mercúrio e fósforo são os responsáveis pelo potencial tóxico da cinza. Porém, estes elementos não são os responsáveis pela determinação da periculosidade da cinza, somente o ensaio de lixiviação determina os elementos que são liberados. Os chamados “componentes maiores” são os elementos que se apresentam em maior quantidade como sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e carbono (C) (Mallmann, 1996).

As cinzas brasileiras, de maneira geral, são classificadas como não perigosos e não inertes (Classe II – A) conforme NBR 10004. Assim, quando não se optar pela reciclagem, elas devem ser encaminhadas à aterros sanitários (Rohde, 1995). O grande problema das cinzas é quanto à solubilização de componentes como alumínio, por exemplo, que podem ser disponibilizados ao solo e águas subterrâneas ou superficiais. Tanto o ensaio de lixiviação proposto pela norma brasileira (NBR 10005) quanto o ensaio de extração (EP test) recomendado pela EPA (Environmental Protection Agency – USA), potencializam a mobilidade dos metais presentes na amostra através da adição de soluções ácidas na amostra pulverizada, fazendo com que a pior situação de campo seja evidenciada (Saldanha, 2014).

A fim de mitigar os impactos ambientais gerados na produção da cinza é necessário tomarmos a mesma como subproduto/matéria-prima/recurso, dando a ela uma nova utilização. Para isto, deve-se estudar e aplicar as potencialidades da sua utilização (Saldanha, 2014).

2.1.3 A cinza como subproduto

As cinzas de carvão, volantes ou de fundo e escórias, podem ser enquadradas na categoria de resíduos sólidos. O potencial das cinzas para utilização depende das características físicas, químicas e mineralógicas da mesma (Rohde *et al.*, 2006)

De acordo com Clarke (1992) algumas restrições de caráter não ambiental são fatores importantes para o potencial de utilização das cinzas como subproduto, são elas:

- Competição com outros materiais já conhecidos no mercado;
- Visão dos usuários;

- Subsídios e incentivos;
- Oferta e demanda dos materiais;
- Fatores relacionados ao transporte e a estocagem.

Existem três grandes linhas de utilização da cinza de carvão. A primeira, as aplicações na construção civil. Desse modo pode ser aplicada na base de pavimentos, injeções para estabilização de maciços, construção de túneis, aterros, etc. A segunda, na fabricação de artefatos, pode ser empregada como matéria prima para tubos, placas, tijolos, como agregados leves, etc. E a terceira seria a estabilização de resíduos, fazendo o uso das propriedades pozolânicas da cinza aliada a cal ou cimento (Rohde *et al.*, 2006)

Para Rohde *et al.* (2006), como resultado benéficos da utilização das cinzas de carvão como subproduto temos:

- Diminuição do tamanho das áreas utilizadas como aterros;
- Preservação de recursos naturais;
- Ambiente mais limpo e seguro;
- Diminuição do custo para os consumidores;
- Diminuição do custo de geração de energia elétrica.

Em média 16% das cinzas geradas são empregadas como subproduto, podendo variar de um mínimo de 3% a um máximo de pouco mais de 50% (Joshi *et al.*, 1997). Em um dos estados onde mais se gera este resíduo, o Rio Grande do Sul, somente cerca de 30% das cinzas são reutilizadas (Chies *et al.*, 2003). Deve-se aumentar o emprego da cinza como matéria prima, evitando a disposição inadequada ou em aterros, que aumentam significativamente o custo das empresas produtoras (Saldanha, 2014).

Em muitos países, graças à legislação e intenções políticas, a visão da cinza como um subproduto já é bastante difundida. Chegando a um valor de 100% de utilização em alguns locais (FEUERBORN 2005). Nos Estados Unidos, por exemplo, mais de 40% da cinza volante produzida é utilizada (AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION, 2013). Segundo a

EUROPEAN COAL COMBUSTION PRODUCTS ASSOCIATION (2010), na Europa, mais de 43% da cinza volante produzida é utilizada na indústria da construção.

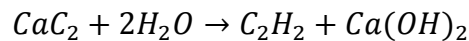
2.2 CAL DE CARBURETO

2.2.1 Resíduo da indústria de fabricação do gás acetileno

Produzido através da obtenção do gás acetileno, a cal de carbureto é um subproduto resultante da reação química entre o carbureto de cálcio e a água. Apresenta características semelhantes às cales comercializadas, uma vez que é composta por óxido de cálcio hidratado e possui alto potencial para ser utilizado como aglutinante na estabilização de solos. No entanto, devido ao teor de umidade e baixa finura, possui algumas restrições técnicas (Consoli, 2003).

2.2.2 A cal de carbureto e suas características

A cal de carbureto é obtida a partir da reação química entre o carbureto de cálcio e a água, como mostrado a seguir:



Da reação química são obtidos o gás acetileno (C_2H_2) e um resíduo na sua forma líquida, conhecido como cal de carbureto. Após a reação, a cal é colocada em tanques de decantação para obtenção da sua forma sólida e posteriormente comercializada ou enviada para aterros de resíduos sólidos (Thomé, 1999).

Sua utilização na construção civil é restringida pelas propriedades físicas que apresenta. A cor cinza com tom azulado, em função da presença de carbono, que apresenta compromete sua aceitação no mercado, visto que se espera uma cor branca para cales. Na produção de 100 m³/h de acetileno são geradas cerca de 12 toneladas de cal de carbureto, a mesma apresenta uma forma pastosa, com 60 a 70% do material em fase líquida (RAMASAMY et al., 2002).

O fato de seu teor de umidade ser bastante elevado pode exigir seu processamento antes da aplicação. Quanto à granulometria, a cal de carbureto não passa nas especificações propostas pela C-977 (ASTM, 1989) para estabilização de solos, como pode ser verificado na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades físicas da cal de carbureto

Material retido na peneira n° 30 (0,59mm)	12,7%	<3,0%*
Material retido na peneira n° 200 (0,074mm)	56,6%	<25%*
Umidade <i>in situ</i>	46,8%	--

*Limites da C-977 (ASTM, 1989).

(fonte: Thomé, 1999)

Devido a maior presença de óxido de cálcio, a cal de carbureto é classificada como cal cálcica. Em pesquisa sobre os efeitos da cal de carbureto em misturas solo-cinza-cal, Thomé (1999) diz que a cal de carbureto empresa White Martins no Rio Grande do Sul, apresenta maior pureza que a cal comumente comercializada no Estado, produzida através de calcários dolomíticos. A Tabela 2 compara as propriedades químicas da cal de carbureto com uma cal comercializada no Rio Grande do Sul, de natureza dolomítica.

Tabela 2 - Propriedades químicas da cal de carbureto

Propriedade	Cal de carbureto	Cal comercial*
Óxido de cálcio (CaO)	95,1%	30,0%
Óxido de magnésio(MgO)	1,5%	54,3%
Resíduos insolúveis	0,7%	--
CaO + MgO (bases não voláteis)	96,6% ($\geq 88\%$)**	84,3%
Carbono orgânico	0,1%	--

*Fonte: Rocha Neto *et al.* (1991) **Limite NBR 7175 (ABNT, 1994)

(fonte: Thomé, 1999)

Com base na análise química termogravimétrica e difração de raios X, a cal de carbureto produzida pela empresa White Martins em São Paulo e a cal hidratada comumente utilizada na construção civil no Brasil foram comparadas, chegando-se a conclusão que a cal de carbureto também possui potencial para ser utilizada na construção civil como aglomerante principal ou adicionada à argamassas. Os autores afirmam que alguns ajustes devem ser realizados, pois a

cal de carbureto tende a se aglomerar tendo transcorrido cerca de 90 minutos da mistura com água (Cardoso *et al.*, 2009).

O fator relevante para sua utilização é a afinidade com os silicatos e aluminatos, importantes para a formação das reações pozolânicas.

2.3 ÁGUA

A água potável é considerada satisfatória para utilização em misturas de solo-cal. O volume a ser adicionado normalmente é determinado pela compactação requerida (Ingles & Metcalf, 1972 apud Saldanha 2014).

2.4 EMPREGO DA CINZA E CAL

Existem relatos da utilização da mistura cinza-cal nas edificações desde a época do império romano, onde foi utilizado solo vulcânico com material pozolânico (o mesmo encontrado nas cinzas de carvão atuais) misturado a cal, tornando a mistura mais resistente à água (Andrade, 1991). Na construção do Coliseu e o do Panteão também se utilizou cal adicionada à cinza vulcânica. Podemos constatar que as propriedades da cinza e da cal já eram aplicadas desde a antiguidade.

No Brasil, o início do emprego de cinza data da de 60, quando esta foi utilizada no complexo hidroelétrico de Jupiá, em São Paulo. Nesta situação a cinza foi misturada ao concreto. A partir de então o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT/SP) passou a estudar a cinza brasileira e corroborar para a posterior utilização das cinzas em barragens. Em toda a região sul do Brasil, a maior aplicação das cinzas é na produção de cimentos pozolânicos (ROHDE, 2006).

Quando combinadas à cal, as cinzas tornam-se um valioso recurso mineral. Segundo Rohde *et al.* (2006), para as misturas feitas com as cinzas do Rio Grande do Sul destacam-se:

- As cinzas serem um dos recursos minerais mais produzidos no estado;
- A capacidade de reação das cinzas, principalmente a volante, com aglomerantes do tipo cal, devido as peculiares propriedades físicas, químicas e mineralógicas das cinzas;
- Disponibilização imediata das cinzas para uso logo após sua produção, salvos os casos em que se necessita secagem;

- Amplo campo de utilização.

Para base de pavimentos, diversos autores já comprovaram que é possível a utilização da mistura cinza volante-cal para melhoria das propriedades de um solo residual (Ceratti 1979; Pinto *et al.*, 1983;). O projeto CICASOL, fruto de parceria entre a CIENTEC (Fundação de Ciência e Tecnologia) e o DAER-RS desenvolveu um método de dimensionamento de pavimentos semi-rígidos, estabelecendo especificações construtivas e de viabilidade para o emprego da tecnologia. Experiências de campo demonstraram que o tratamento de cinza com cal torna a primeira um material rígido o suficiente para exercer funções de base em rodovias com alto tráfego e cargas elevadas (Rohde *et al.*, 2006)

Em estudos de resistência à compressão simples, compressão diametral, durabilidade e impacto ambiental, Thomé (1999) avaliou a influência de fatores como tempo de cura, temperatura, reatividade da cinza pesada com a cal de carbureto e influência do teor de resíduo, tendo como conclusão que a utilização destes resíduos é satisfatória para a estabilização de solos.

Na fabricação de tijolos, Baradan (1987) utilizou a cinza volante com cimento Portland, cal virgem e cinza de fundo e os resultados de resistência à flexão e compressão foram satisfatórios. Andrade (1991), também na fabricação de tijolos, estudou a resistência à compressão simples, durabilidade e absorção de uma mistura de cinza volante de Charqueadas, no Rio Grande do Sul, e cal hidratada dolomítica. Quanto à durabilidade, as amostras com teores de cal de 5 e 10%, curadas por 7 dias, não foram satisfatórias. Todas as mostras atenderam aos requisitos de resistência à compressão simples. Porém, para absorção os valores ultrapassaram o máximo estipulado por norma, impossibilitando a utilização em paredes externas. Estes estudos corroboram de maneira a incentivar a aplicação das cinzas na construção civil, atentando para os problemas de absorção.

Também para a produção de tijolos e blocos de cinza e cal, com aplicação em habitação, a CIENTEC desenvolve um projeto intitulado CINCAL (1993). Este estudo revela como vantagens do uso da cinza e cal na fabricação de blocos e tijolos a possibilidade de moldagem do material em diversas dimensões, a baixa variação nas dimensões dos objetos após a cura, o bom isolamento térmico, menor massa específica se comparado a outros materiais de mesma finalidade.

Estes estudos comprovam que, além de termos mais um material que pode ser utilizado como matéria prima para melhoramento de solos ou fabricação de novos produtos, é possível a redução do valor de resíduos depositados na natureza.

2.5 MATERIAIS ESTABILIZADOS POZOLANICAMENTE

Os primeiros indícios do uso da pozolana datam de 2.000 a.C., na Ilha de Creta na Grécia, onde cerâmicas de argila calcinada foram utilizadas em argamassas (MEHTA, 1987). O nome pozolana é em função de que na cidade de Pozzuoli, na Itália, a utilização de cinza vulcânica na construção foi bastante difundida. A partir de então, os materiais de origem vulcânica semelhantes aos desta cidade, passaram a ser chamados de pozolanas. Anos depois, esta definição passou a abranger matérias de origem distinta, mas que apresentavam comportamento semelhante na reação com a cal na presença de água (Kaefer, 1998).

Pozolanas são materiais que, quando incorporados às argamassas e concretos, alteram as características tecnológicas. Assim, fazendo com que o produto final possua propriedades superiores se comparado ao que não possui pozolana. As ruínas de obras do período romano comprovam a resistência e durabilidade do uso da pozolana como material cimentante (BAUER, 2008).

Devido ao aumento da geração de cinzas pelas termelétricas entre os séculos XIX e XX, iniciaram-se os estudos associando o cimento Portland à cinza. Isto dá origem ao que conhecemos hoje como cimento Portland pozolânico, de alta aceitação em todo o mundo (Da Silva, 1982).

2.5.1 Classificação dos materiais pozolânicos

As pozolanas podem ser naturais ou artificiais, dependendo da sua origem. As naturais são as de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO₂), ou de origem sedimentar, como por exemplo os tufos vulcânicos, terras diatomáceas, argilas e folhelhos calcinados são exemplos. As artificiais são resultantes de um processo térmico ou subprodutos industriais, a cinza volante, a escória de alto forno, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

A NBR-12653 (ABNT, 2014) divide as pozolanas em três classes, conforme sua origem, descritas da seguinte forma:

- a) Classe N: Pozolanas de origem natural ou artificial, materiais vulcânicos, argilas calcinadas e terras diatomáceas.
- b) Classe C: Pozolana gerada a partir da queima de carvão mineral oriundo de usinas termoelétricas.
- c) Classe E: Pozolanas não enquadradas nas classes já citadas.

As exigências físicas, químicas e de índice de atividade pozolânica, são descritas Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente.

Tabela 3 - Exigências físicas

Propriedades	Classes		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm, % máx.	34	34	34

(fonte: NBR-12653 - ABNT, 2014)

Tabela 4 – Exigências químicas

Propriedades	%	Classes de materiais pozolânicos		
		N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	mín.	70	70	50
SO ₃	máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de Umidade	máx.	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo	máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	máx.	1,5	1,5	1,5

(fonte: NBR-12653 - ABNT, 2014)

Tabela 5 – Índice de atividade pozolânica

Índice de Atividade Pozolânica:			
	N	C	E
Com Cal aos 7 dias, em MPa	6	6	6
Com Cimento aos 28 dias, (% mínima)	75	75	75
Água requerida, % máx.	115	110	110

(Fonte: NBR-12653 -ABNT, 2014)

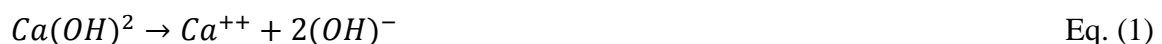
2.5.2 Pozolanidade da cinza volante

As cinzas volantes são formadas basicamente pela fração vítrea (amorfa) e pela fração cristalina. A primeira, de natureza silicosa ou sílico-aluminosa, ainda é pouco explorada. A segunda é representada por cristais de quartzo, mulita e hematita (Saldanha, 2014).

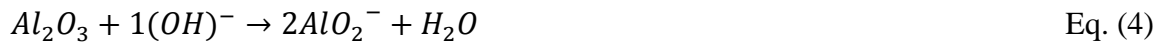
Segundo Massazza (1998), as reações pozolânicas são caracterizadas pela reação química entre fase amorfa do material pozolânico com o hidróxido de cálcio na presença de umidade. Sendo resumida da seguinte forma:

Pozolana + Hidróxido de cálcio + água => Compostos hidratados

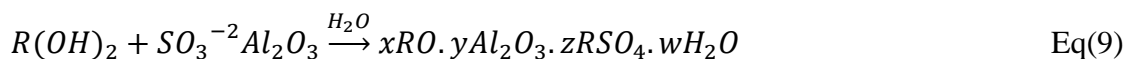
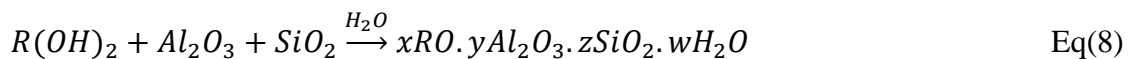
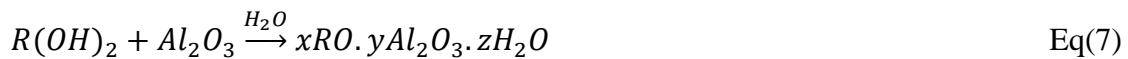
Quando acrescidos à água, cinza volante e hidróxido de cálcio resultam na dissipação do hidróxido de cálcio provendo íons cálcio e hidroxila para a solução (Equação 1 e 2).



Os cátions são rapidamente adsorvidos pela superfície das partículas da cinza volante (Massazza, 1998). Este processo proporciona a floculação da cinza volante alterando a sua granulometria. Após, as hidroxilas atacam a matriz vítrea, composta por Óxido de Alumínio (Al_2O_3) e Dióxido de Silício (SiO_2) que quebram as ligações O-Al e O-Si, concentrando os íons SiO_3^{-2} e AlO_2^- em solução (Berry et al., 1994 apud Saldanha 2014; Fu et al., 2002 apud Saldanha, 2014; Malek *et al.*, 2005 apud Saldanha, 2014). A dissolução dos principais compostos vítreos da cinza volante, em pH maior que 12 (pH básico), ocorre da seguinte forma (Brouwers, Van Eijk, 2003 apud Saldanha 2014), apresentadas nas Equações 3, 4 e 5:



Na sequência ocorrem as reações da cal com a sílica e alumina formando géis de silicato (C-S-H) ainda ligantes fracos, posteriormente serão cristalizados e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos (Inglês e Metcalf, 1972 apud Saldanha 2014). Os íons de alumínio formarão aluminato de cálcio hidratado (C₄AH₁₃) que, posteriormente, irá converter-se em hidrogranada (C₃AH₆) e katoita (C₃ASH₄) (Malek *et al.*, 2005 apud Saldanha 2014). Onde: C=CaO; S=SiO₂; A=Al₂O₃ e H=H₂O. Segundo Minnick (1967 apud Saldanha 2014), alguns dos possíveis compostos oriundos das reações entre a cal e os componentes de natureza pozolânica das cinzas volantes são apresentados conforme as expressões abaixo (Equações 6, 7, 8 e 9):



R representa, alternativamente, os cátions Ca⁺² ou Mg⁺², separados ou, possivelmente, combinados. Minnick (1976 apud Saldanha 2014), sugere que os principais compostos cimentantes formados nas misturas cinza volante-cal são membros da família da tobermorita (silicato de cálcio hidratado).

Se o óxido de ferro estiver presente na fase vítrea da cinza volante, é possível que haja reação com cátions de cálcio e magnésio. Também podem ser formados sulfo-aluminatos com teores de sulfato baixos e outros (Minnick 1976 apud Saldanha, 2014).

Para uma expressiva solubilização é requerido, pelo menos, um pH de 13,3 (Fraay *et al.*, 1989, apud Saldanha, 2014). Sílica e alumina aumentam a sua solubilidade para pH de valores elevados (TRB, 1987, apud Saldanha, 2014). A fase vítrea da cinza volante bastante estável sob a ação de hidróxido de cálcio e a velocidade de solubilização da estrutura amorfa lenta, pois o pH da solução saturada é equivalente a 12,6 quando a 25°C (Antihos & Tsimas, 2004, apud Saldanha 2014), quando para uma velocidade de solubilização maior é requerido um pH de pelo menos 13,3 (Fraay *et al.*, 1981, apud Saldanha, 2014). Além da sílica, a alumina também tem sua solubilidade aumentada em valores altos de pH (TRB, 1987 apud Saldanha, 2014).

Um problema enfrentado pela utilização de cal é a possibilidade de carbonatação do material. Esta reação forma os carbonatos que são cimentos fracos e inviabilizam as reações pozolânicas (Harty & Thompson, 1973, apud Saldanha, 2014). No caso da cal de carbureto existe o agravante de o material ficar exposto ao ar livre na empresa geradora, diminuindo a sua capacidade de reação com a cinza volante (Saldanha, 2014).

2.5.3 Fatores que influenciam as reações pozolânicas

O desenvolvimento das reações pozolânicas na mistura cinza volante – cal é dependente dos materiais e processos empregados. No que diz respeito aos materiais, deve-se atentar às propriedades físicas, químicas e físico-químicas, relação cal/cinza volante e quantidade de aditivo. Quanto aos processos utilizados, devem ser observados o tempo transcorrido desde a preparação até a compactação da mistura, a temperatura e tempo de cura, energia de compactação, etc (Cru *et al.*, 1955 apud Dalla Rosa, 2009).

Questões ligadas ao material devem ser bastante observadas. No que diz respeito à cal, ela pode ter o desempenho afetado pelo tipo de cal, natureza do processo de produção, finura e teor de material reativo. Para a cinza, são importantes o tipo de cinza, quantidade de sílica presente, morfologia, mineralogia das partículas entre outros (Minnick, 1967, apud Saldanha, 2014).

A curto prazo as reações pozolânicas são bastante ligadas à superfície específica e a longo prazo à quantidade de sílica e alumina ativas presentes (Kihara 1983 apud Andrade, 1991). Assim, cinzas com maiores teores dessas matérias presentes, em estado reativo e maior superfície de grãos, serão mais reativas.

Granulometria e superfície específica são fatores, normalmente interligados. Portanto, cinzas com menores partículas possuem maiores superfícies específicas e mais capacidade de cimentação (Saldanha, 2014).

Quanto maior a pureza da cal (maior quantidade de óxidos de cálcio), maior o número de reações possíveis entre ela e a cinza volante. Do mesmo modo que para as cinzas, uma cal mais fina possibilita uma área de contato maior para que ocorram as reações químicas (Andrade, 1991).

2.6 VARIÁVEIS DETERMINANTES NO COMPORTAMENTO DE MISTURAS CINZA-CAL

Nos itens subsequentes serão detalhados os efeitos de alguns dos fatores considerados relevantes na determinação da resistência e durabilidade de misturas cinza volante – cal de carbureto e que tem relação com as variáveis de estudo escolhidas nesta pesquisa. A alteração das variáveis possibilita a criação de relações entre elas (porosidade/teor volumétrico de cal), bem como uma visão do comportamento da mistura quanto à durabilidade, resistência à tração e a compressão.

2.6.1 Efeito da cal

As misturas de cinza volante e cal, como já foi visto nesta revisão bibliográfica anteriormente, tornam-se mais resistentes com o desenvolvimento das reações pozolânicas que formam silicatos e aluminatos. Devido ao fato de a cinza volante ter maior volume muito maior na mistura, se comparado aos demais materiais utilizados, há a carência do hidróxido de cálcio. Assim, um aumento do mesmo culmina em novas reações, conduzindo a maiores resistências (Andrade, 1991).

De modo geral, as alterações ao solo causadas pela cal são favoráveis, o que culmina em alterações de características físicas como a granulometria, plasticidade, contração e retração, umidade de campo, densidade, trabalhabilidade, desintegração e compactação, resistência e permeabilidade (Guimarães, 1971, apud Saldanha, 2014).

Em estudo com solo tratado com cal dolomítica e cinza volante produzida na cidade de Charqueadas, Dalla Rosa (2009) observou que um aumento no teor de cinza volante representava um aumento na resistência. Demonstrando, assim, que os produtos das reações entre cinza volante e cal são os maiores responsáveis pelo aumento da resistência. Para uma mesma cinza volante com adições de cal variando de 3 a 9% os ganhos de resistência foram lineares. Acrescido o teor de cal, a resistência aumentava.

O mesmo ocorreu no estudo da influência da temperatura na cura da mistura areia- cinza volante-cal de Silvani (2013), onde os resultados mostraram, que para os teores de cal e temperatura estudados, a resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral aumentaram linearmente com o aumento da quantidade de cal. Fato que pode ser observado na Figura 4 e Figura 5, respectivamente.

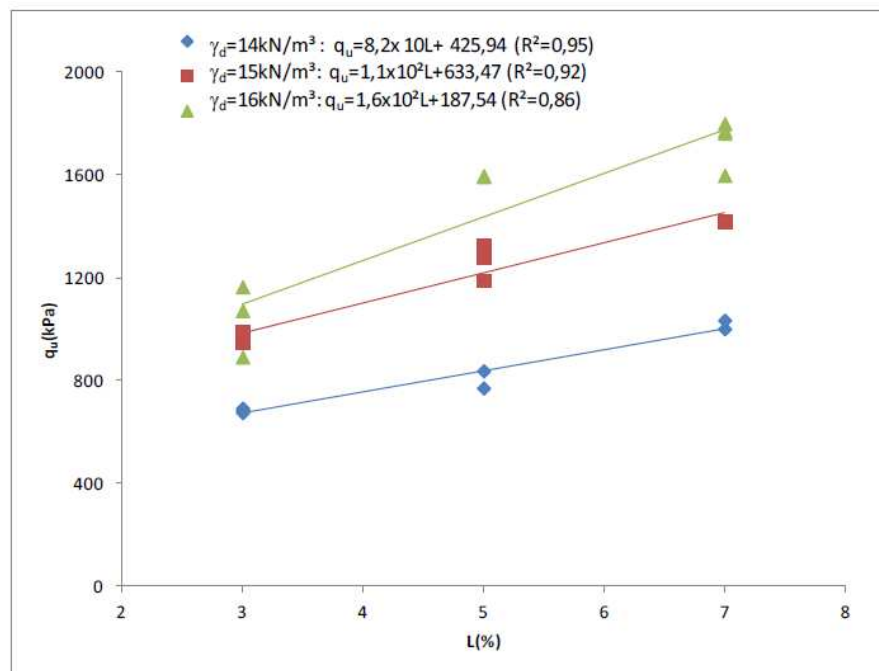


Figura 4 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 20°C. Fonte : Silvani (2013)

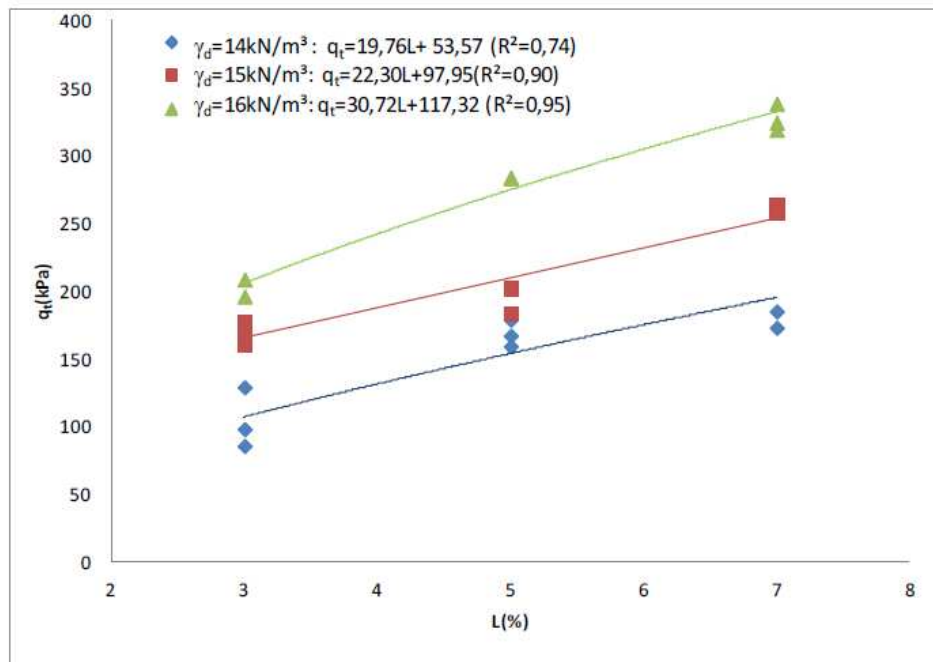


Figura 5 - Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 20°C.
Fonte : Silvani (2013)

No entanto, o aumento na resistência devido à adição de cal tem um limite. Segundo Horpibulsuk e Phetchuay (2012), as reações pozolânicas dependem da disponibilidade de silicatos e aluminatos e de hidróxido de cal. Após todas as reações pozolânicas terem ocorrido o aumento do teor de cal leva à redução da resistência da mistura. Isto porque uma parcela da cal adicionada não terá material pozolânico disponível para reagir. Saldanha (2014), ao avaliar o máximo teor de carbureto em misturas de cal e cinza volante provenientes do Rio Grande do Sul, observou que 15% era o máximo teor de cal de carbureto que colaborava para o aumento da resistência nessa mistura.

No estudo de Horpibulsuk e Phetchuay (2012), estabilização de um solo argiloso com cinza volante e cal de carbureto, os autores observaram que existem zonas determinando o ganho de resistência à compressão simples através do aumento no teor de cal. Neste estudo de solo argiloso com cinza volante e cal de carbureto são definidas três zonas que norteiam o comportamento do aumento da resistência: zona ativa, zona inerte e zona de deterioração, conforme Figura 4.

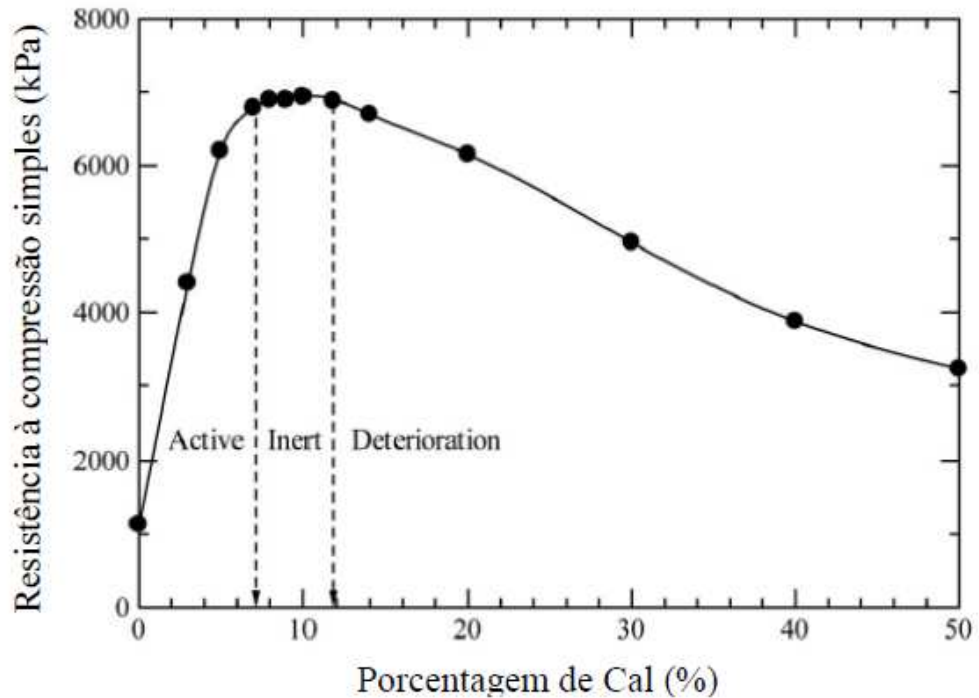


Figura 6 - Relação o acréscimo do teor de cal de carbureto em solo argiloso e a resistência á compressão simples para 28 dias de cura. Fonte: Horpibulsuk e Phetchuay (2012)

De acordo com Consoli *et al.* (2001), em estudo de um solo arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, verifica-se que que, com uma mesma tensão confinante, o aumento do teor de cal provoca aumento na resistência de pico e diminuição da deformação na qual o pico é atingido.

Guimarães (2002) comenta que a cal influencia no processo de estabilização de um solo em função do valor de seus teores de óxidos de cálcio e de magnésio. Estes íons presentes nas cales modificam o comportamento dos argilo-minerais presentes no solo e cada solo reage de uma forma para cada tipo de cal utilizada. Por este motivo, a escolha da cal e sua aplicação requer conhecimento, não podendo ser de maneira aleatória.

2.6.2 Efeito da porosidade

Com efeito semelhante ao da quantidade de cal, a massa específica aparente seca da mistura afeta diretamente a sua resistência. A energia de compactação tem relação com a distância entre

as partículas, proporcionando uma maior capacidade de cimentação nas misturas de cinza e cal (Saldanha, 2014).

Em estudo feito sobre a influência da temperatura na cura da mistura de areia- cinza volante-cal, Silvani (2013) observou que a diminuição da porosidade gera grandes benefícios à resistência à tração por compressão diametral, o que pode ser visualizado na Figura 7, independente do teor de cal utilizado e da temperatura. O decréscimo na porosidade também favoreceu o aumento da resistência à compressão simples, como mostrado na Figura 8. Assim, foi verificado que ambas as resistências aumentaram exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

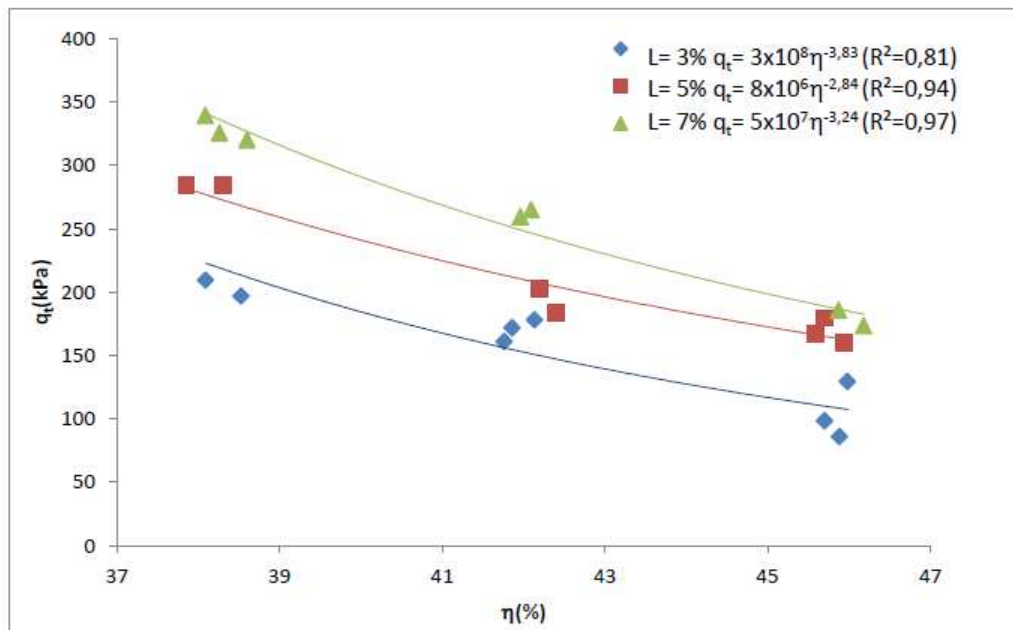


Figura 7 - Variação da resistência à tração por compressão diametral em relação à porosidade das amostras curadas a 20°C. Fonte: Silvani (2013)

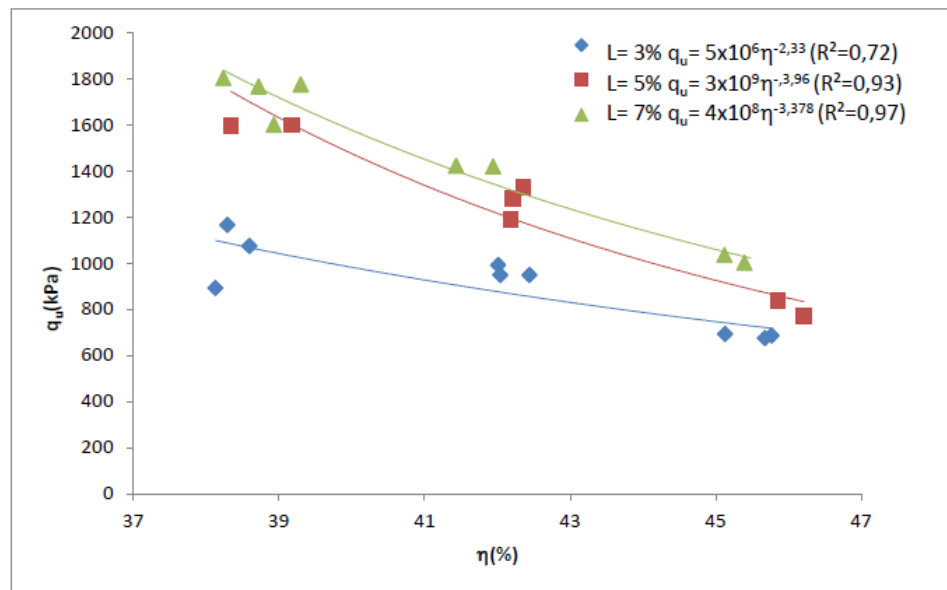


Figura 8 - Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade dos corpos-de-prova curados a 20°C. Fonte: Silvani (2013)

Em estudo com blocos de solo-cinza-cal, Rushad *et al.* (2011) observaram que a diminuição da porosidade para misturas com apenas cinza volante e cal foram maiores conforme o aumento da compactação, a resistência à compressão simples para os blocos com o mesmo teor de cal compactados na força de 10 kN tiveram resultados quatro vezes inferiores quando comparados aos moldados a 50 kN.

Assim como ocorre com as misturas de cinza - cal, em misturas de solo - cal a adição do agente cimentante faz com que a massa específica aparente seca (γ_d) da mistura seja reduzida, pois a massa específica aparente seca do agente cimentante é inferior à do solo (TRB, 1987, apud Saldanha, 2014). O aumento do número de vazios, requer mais água para preenchê-los, o que resultará em uma umidade ótima maior e uma curva de compactação mais achatada (SIVAPULLAIAH *et al.*, 1998).

No que diz respeito aos ensaios de durabilidade, Kanazawa (2015) observou que as perdas de massa acumulada para um solo dispersivo estabilizado com 5% de cal e curado por 28 dias diminuem. E que, para um teor de cal de 7%, a diferença de perda de massa entre os pesos específicos aparentes secos estudados é menor.

2.6.3 Efeito do tempo de cura e temperatura

Com o aumento da temperatura as reações pozolânicas são aceleradas. Sendo as reações endotérmicas, a taxa de desenvolvimento da resistência será maior se as temperatura de cura forem maiores. Thompson (1966, apud Silvani, 2013) observou que a resistência para corpos de prova curados por algumas horas a 48,9°C foi semelhante à dos curados por 30 dias a 21,1°C.

Nos ensaios de Saldanha (2014) o tempo de cura exerceu influência na resistência à compressão simples da mistura estudada para todas as temperaturas verificadas (23°C, 40°C e 80°C). No entanto, para a maior temperatura a taxa de crescimento foi inferior à de 40°C e na curva de 60°C houve uma tendência de redução nos ganhos de resistência devido à aceleração promovida pelas altas temperaturas, pois estas obtiveram altos valores mais rapidamente. Como não foi observado paralização nos ganhos de resistência o autor afirma que há a possibilidade de aumentos maiores de resistência para tempos de cura maiores do que os executados nesta pesquisa.

Serafini (2002) em estudo de misturas solo-cal com três variações no teor de cal (9%, 12% e 15%), com quatro diferentes temperaturas de cura (10°C, 20°C, 30°C e 40°C), curados por 28 dias, constatou que os fatores que influenciam o aumento da resistência à tração por compressão diametral são os mesmos que propiciam aumento de resistência a compressão, ou seja, que o aumento da quantidade de cal, da temperatura de cura e do tempo de cura.

Quanto à perda de massa através de ensaios de durabilidade de solo dispersivo estabilizado com cal, Kanazawa (2015) observou que para o caso de misturas com mesmo peso específico aparente seco e mesmo teor de cal, as perdas de massa decrescem com o aumento do tempo de cura, não existindo uma diferença apreciável entre as perdas de massa para 28 e 60 dias, como pode ser visto na Figura 9.

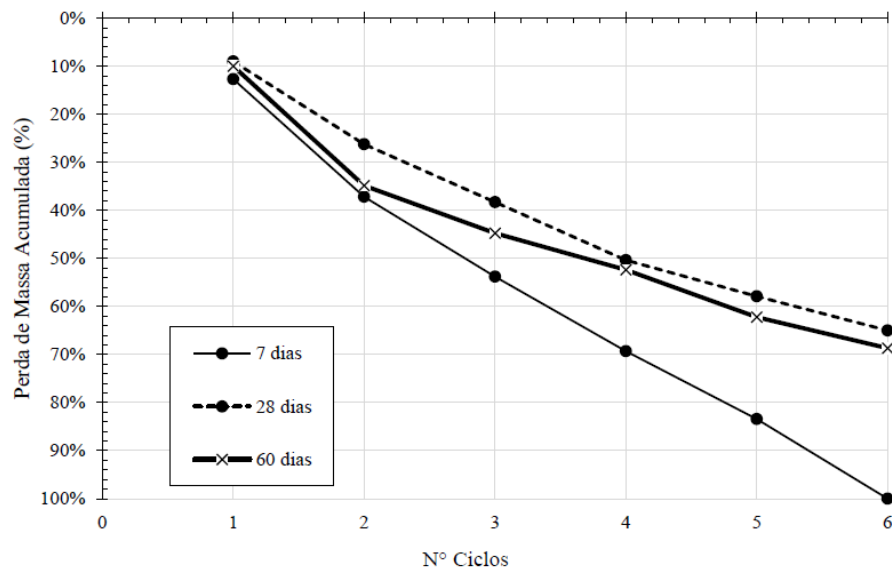


Figura 9 - Perda de Massa Acumulada versus N° de Ciclos – Solo-Cal: 5% - γ_a :1,60g/cm³ (7, 14, 28 e 60 dias de cura. Fonte: Kanazawa (2015)

2.6.4 Efeito da relação entre porosidade e teor volumétrico de cal

Os primeiros estudos utilizando a relação porosidade/teor volumétrico de aglomerante (Equação 10) para solos foram feitos devido ao fato de o fator água/cimento, utilizado para concreto, não ser adequado em virtude de não preencher completamente os vazios dos solos estabilizados durante a compactação (Foppa, 2005).

$$\frac{\eta}{L_v} = \frac{\text{porosidade}}{\text{teor volumétrico de cal}} \quad \text{Eq. (10)}$$

Para atender à solicitação de a compactação expulsar completamente o ar do sistema, a relação vazios/cimento (Equação 11) é proposta após a verificação de um bom ajuste dos resultados de resistência à compressão simples (q_u) das amostras de solo cimento com tempo de cura equivalente a sete dias, conforme Figura 11 (Larnach, 1960, apud Saldanha, 2014).

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{volume absoluto de vazios (água+ar)}}{\text{volume absoluto de cimento}} \quad \text{Eq. (11)}$$

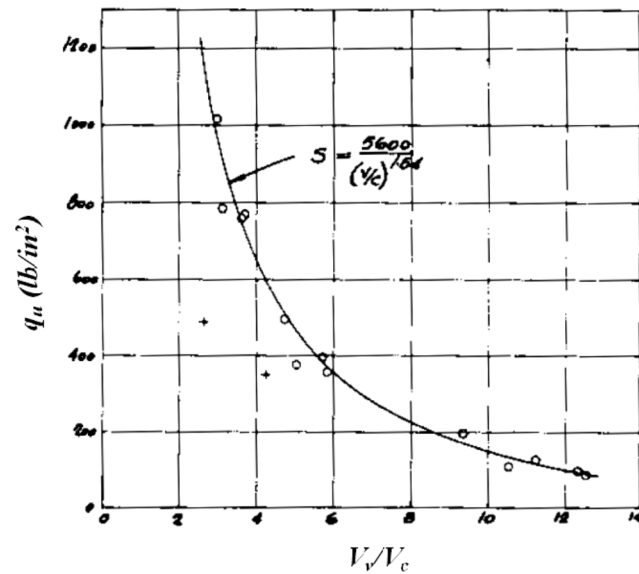


Figura 10 - Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Larnach, 1960, *apud* Saldanha, 2014)

Larnach (1960), afirma que o uso deste tipo de relação é de utilidade para a dosagem e execução da mistura de solo-cimento em campo, sendo possível prever a resistência que se deseja obter através da verificação da relação vazios/agente cimentante.

Ao estudar os parâmetros que influenciam a resistência de um solo residual de arenito Botucatu artificialmente cimentados com cimento Portland, Foppa (2005) observou que uma potência de valor 0,28 sobre o V_{ci} apresentava um melhor ajuste da relação vazios/cimento (Figura 11), pois até então se presumia que para uma variação no volume de vazios haveria uma variação do volume de cimento na mesma proporção. O autor afirma ainda que o valor do expoente é variável conforme os materiais a serem utilizados nas misturas.

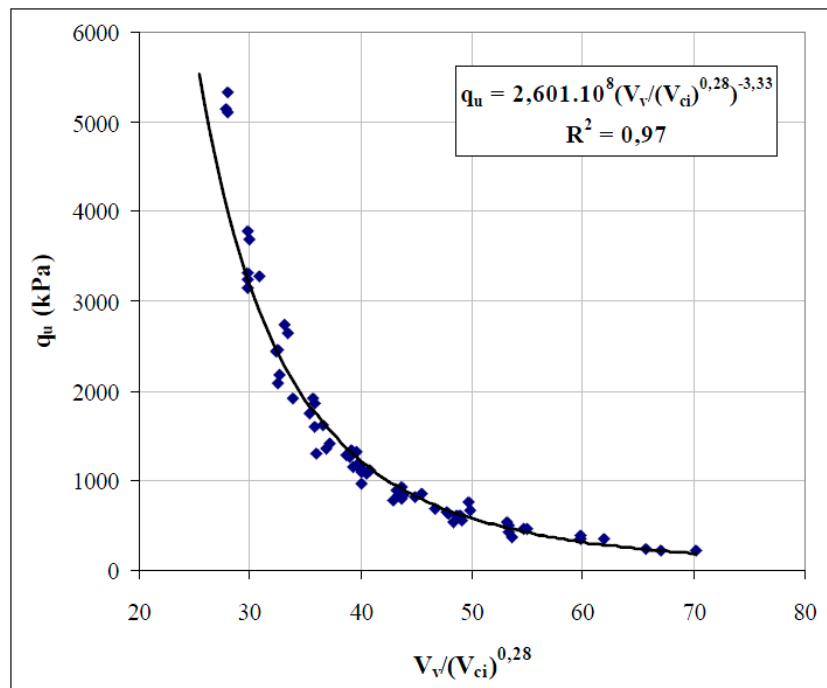


Figura 11 -Relação da tração versus vazios/cimento expresso em termos da porosidade e do teor volumétrico de cimento. Fonte: Foppa, 2005

Em estudo semelhante, Dalla Rosa (2009) obteve 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, com exceção das amostras que não resistiram à imersão.

Consoli et al. (2011), com base na pesquisa de Dalla Rosa (2009) apresentam equações para a determinação da porosidade (Equação 12) e teor volumétrico de cal (Equação 13).

$$L_v = \frac{100 \left(\left[\frac{\gamma}{1 + \left(\frac{L}{100} \right)} \right] \left(\frac{L}{100} \right) \right)}{\gamma_L} \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\eta = 100 - 100 \left\{ \left[\left(\frac{\gamma}{1 + \left(\frac{L}{100} \right)} \right) \right] \left[\left(\frac{\left(\frac{100 - FA}{100} \right)}{\gamma_S} \right) + \left(\frac{\left(\frac{FA}{100} \right)}{\gamma_{SFA}} \right) \left(\frac{L}{\gamma_L} \right) \right] \right\} \quad \text{Eq. (13)}$$

Onde:

L_v = Teor volumétrico de cal;

η = porosidade;

L = teor de cal;

γ = peso específico do solo seco

γ_L = peso específico real da cal;

FA = teor de cinza volante;

γ_{SFA} = peso específico real da cinza volante;

γ_S = peso específico real do material.

Na pesquisa de Silvani (2013) sobre a influência do coeficiente η/L_v na variação de resistência à tração na compressão diametral e de resistência à compressão simples com diferentes temperaturas foram atribuídos três teores de cal (3, 5 e 7%), três valores de peso específico aparente seco (14, 15 e 16 kN/m³, quatro temperaturas diferentes (20, 27, 35 e 50°C) com um tempo de cura de 28 dias e 25% de cinza volante. Segundo a autora, há indícios que as duas resistências aumentam linearmente com o aumento do teor de cal e exponencialmente com a diminuição da porosidade, a última ajustada por um coeficiente de 0,3. Os resultados para a resistência à tração na compressão diametral e resistência à compressão simples a uma temperatura de 35°C são apresentados pela Figura 12 e Figura 13, respectivamente.

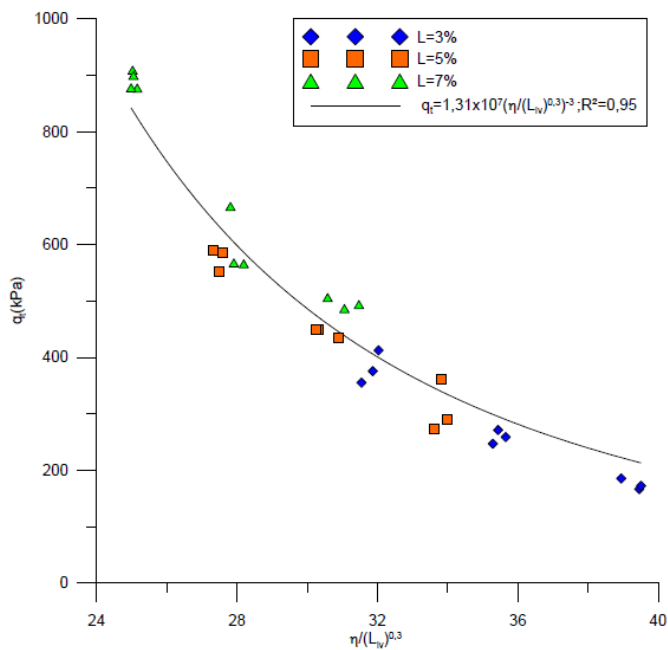


Figura 12 - Variação da resistência à tração por compressão diametral pela variação da relação $\eta / (L_v)^{0,3}$ para a temperatura de 35°C. Fonte: Silvani (2013)

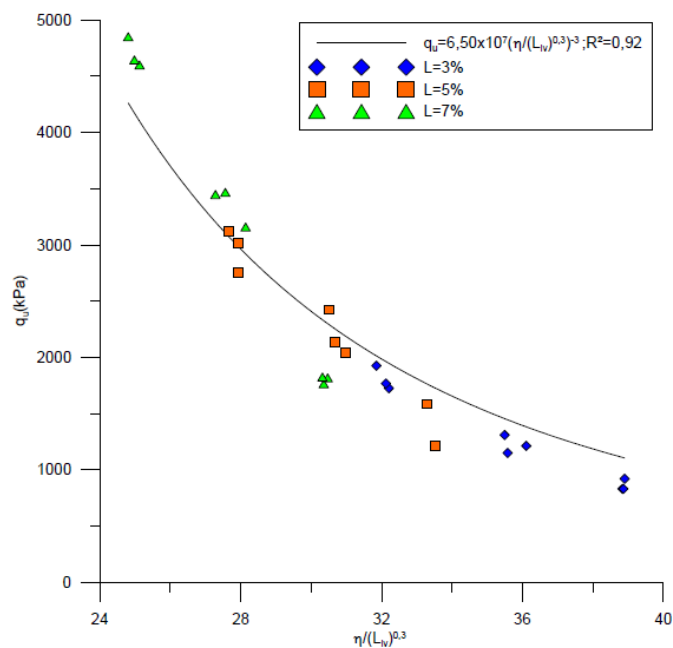


Figura 13 - Variação da resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta / (L_v)^{0,3}$ para a temperatura de 35°C. Fonte: Silvani (2013)

Diversos autores afirmam que a relação se mantém, quando a cal é o material cimentante, tanto para misturas com solo quanto para misturas de apenas material pozolânico e cal (Dalla Rosa, 2009; Silvani, 2013; Saldanha, 2014).

2.7 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM CAL

2.7.1 Resistência à tração

Tensões de tração na base de placas carregadas ou tensões de natureza térmica podem gerar cargas de tração em pavimentos. Isto torna a resistência à tração de solo-cimento um fator interessante para projetos de pavimentos (TRB, 1987, *apud* Dalla Rosa, 2009).

Thompson (1975) *apud* Núñez (1991), constatou que, além de a resistência à tração por compressão diametral ter valores inferiores à resistência à tração na flexão, a relação da resistência a tração pela resistência à compressão simples, não importando o tipo ou o teor de cal, das misturas solo-cal estudadas varia de 0,10 a 0,15. Valores semelhantes aos encontrados por Ceratti (1979) ao estudar os efeitos da adição de cal e cinza volante a um solo residual compactado, em sua pesquisa o autor constatou que a relação varia de 0,10 a 0,13.

Consoli et al. (2012) ao comparar os resultados de resistência à tração de sua pesquisa com os ensaios de resistência à compressão simples de Dalla Rosa (2009) constatou que os valores de resistência à tração equivalem a 15% dos resultados de resistência à compressão simples. O autor observou ainda, que independente do teor de cal utilizado, uma redução da porosidade leva à ganhos exponenciais na resistência à tração. Isso ocorre devido ao maior intertravamento entre as partículas e conseqüentemente melhor cimentação em função do decréscimo de porosidade.

Silvani (2013) observou que para misturas de areia, cinza volante e cal a relação entre a resistência à tração na compressão diametral e a resistência à compressão simples é equivalente a 0,18 para uma temperatura de cura de 20°C e esta relação é independente da relação porosidade/teor volumétrico de cal. O mesmo valor foi encontrado através da inclinação da reta de ajuste quando traçamos a relação entre a resistência à tração na compressão diametral e à compressão simples,

conforme mostrado na Figura 14. A autora atenta para o fato de que a relação varia com a variação da temperatura, sendo 0,14 para as amostras curadas a 27°C, 0,20 para uma temperatura de 35°C e 0,19 para temperatura de 50°C.

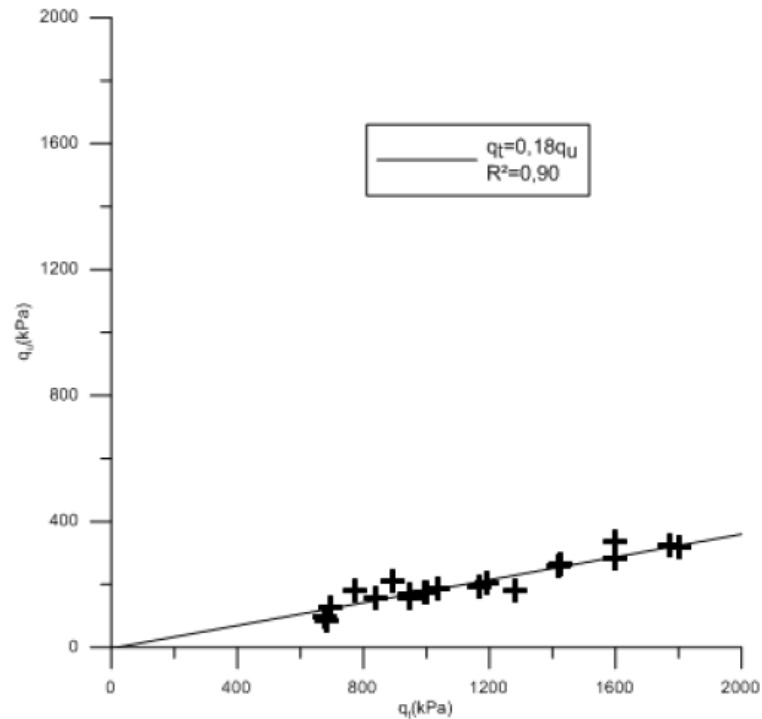


Figura 14 - Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e à resistência à compressão simples para a temperatura 20°C.
Fonte: Silvani (2013)

2.7.2 Resistência à compressão simples

Segundo Inglês e Metcalf (1972) apud Benetti (2015), a resistência à compressão simples tende a aumentar de forma linear conforme se adiciona cal. Porém, até um certo momento que costuma ser com adição de 8% de cal para solos argilosos. A partir disto a nível de acréscimo de resistência reduz (Figura 15). Dalla Rosa (2009), em seu estudo, mostra que com maiores períodos de cura o aumento do teor de cal aumenta a resistência linearmente. Os resultados apresentados por Ingles e Metcalf (1972) apud Benetti (2015) não seguem a linha de Dalla Rosa (2009), provavelmente, pelos baixos tempos de cura.

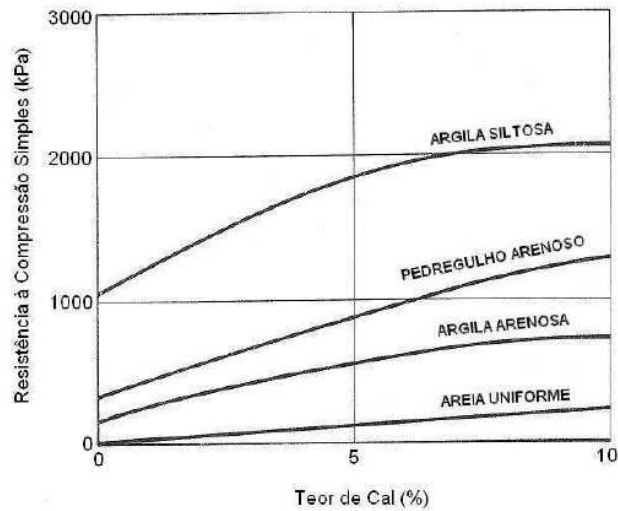


Figura 15 - Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias. Fonte: Adaptado de Ingles e Metcalf, 1972, *apud* Benetti, 2015)

Herrin e Mitchell (1961, *apud* Kanazawa, 2015) relatam que não existe um teor ótimo de cal capaz de produzir uma máxima resistência em um solo estabilizado. Como fatores influenciadores no caso de misturas com solo e cal, os autores apontaram o teor e tipo de cal, o tipo de solo, o peso específico, o tempo e tipo e cura.

Pioneiro na pesquisa da relação volume de vazios/ volume de agente cimentante para solos tratados com cal, Lopes Junior (2007) partiu do princípio que dada uma variação no volume de vazios de uma amostra, ocorreria uma variação proporcional no volume de cal para contrabalançar a perda ou ganho de resistência. A Figura 16 traz os resultados de Lopes Junior (2007) para os ensaios de resistência à compressão simples das amostras tratadas com cal com 28 e 90 dias de cura.

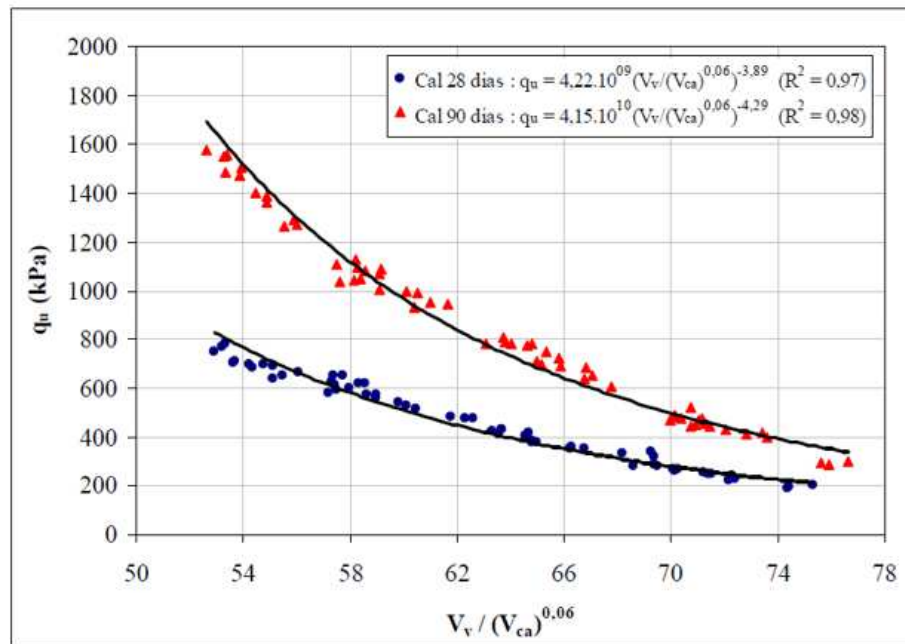


Figura 16 – Relação entre vazios/cal teor de cal e resistência à compressão simples. Fonte: Lopes Júnior (2007)

2.7.3 Durabilidade

Durabilidade é capacidade do material de manter sua integridade estrutural nas condições as quais é exposto. Materiais estabilizados pozolanicamente desestruturam-se frente à ação de cargas repetidas de tráfego e, principalmente, variações de umidade e temperatura (Marcon 1977, apud Kanazawa, 2015).

Para todas as amostras de Solo-Cal Kanazawa (2015) observou, independente do tempo de cura, a influência da quantidade de cal sobre a durabilidade do solo dispersivo estabilizado com cal. Um acréscimo no teor de cal está associado a uma menor perda de massa. O autor observou também que aumentando o peso específico aparente seco da mistura, ocorre uma redução na perda de massa também.

A razão de resistência de resistência é obtida a partir da relação entre a resistência de corpos-de-prova submetidos a ciclos de molhagem e secagem, gelo e degelo ou de vácuo-saturação pela resistência de corpos-de-prova curados normalmente. Alguns autores consideram como resultado satisfatório para essa relação a razão de 80% (Mateos 1961, apud Kanazawa 2015; Robnett e Thompson 1969, apud Kanazawa 2015). O critério de avaliação de durabilidade por perda de resistência não faz parte de especificações fixas.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Neste programa experimental quantifica-se a influência da quantidade de cal e da porosidade da mistura compactada. Além de se verificar se a relação porosidade/teor volumétrico de cal é válida para a estimativa da resistência à tração e perda de massa acumulada nos ensaios de durabilidade.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesta pesquisa utilizaram-se conceitos estatísticos, os quais são destinados a otimizar o planejamento, a execução e a análise do experimento. Esta abordagem permite que se estruture a sequência de ensaios de forma a traduzir os objetivos pré-estabelecidos pelo pesquisador, sendo aplicado desde o planejamento do experimento até a sua análise de dados.

As variáveis são divididas em variáveis independentes e variáveis dependentes. As dependentes estão relacionadas ao objetivo desta pesquisa, o qual deseja investigar a influência/efeito sobre as variáveis dependentes – resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão simples e perda de massa acumulada através de ensaios de durabilidade. As variáveis independentes são divididas em fatores controláveis, fatores constantes e de ruído:

- Fatores controláveis:
 - Porosidade da cinza-cal: expressa através da porosidade (η) ou do peso específico aparente seco (γ_d) da mistura compactada;
 - Quantidade de cal (L): massa de cal dividida pela massa de cinza seca, expressa em porcentagem;
- Fatores constantes:
 - Tipo de cinza: cinza volante proveniente da empresa Braskem;

- Tipo de agente cimentante: cal carbureto proveniente da empresa White Martins;
 - Tempo de cura (d): 28 dias;
 - Temperatura de cura: 23°C ($\pm 3^\circ\text{C}$)
 - Teor de umidade (ω): massa de água dividida pela massa de material seco (cinza volante + cal), expresso em porcentagem;
 - Taxa de deformação nos ensaios de compressão e de tração: 1,14 mm por minuto.
-
- Fatores de ruído: diz respeito aos equipamentos utilizados, operadores, temperatura e umidade do ambiente. A fim de minimizar estes feitos foi feita a utilização de um equipamento único, climatização do local onde foram realizados os experimentos, as misturas foram realizadas de forma única e aleatória para cada corpo de prova e número de operadores restrito desde o processo de mistura até a moldagem.

Nesta pesquisa todos os fatores controláveis foram variados e todas as possíveis combinações foram realizadas entre eles. Assim, cada um dos três pontos de diferentes massas específicas foi moldado com as três variações de teor de cal.

O sistema de amostras era composto por um trio de corpos de prova para cada variação estabelecida a serem ensaiados à resistência à tração na compressão diametral e uma dupla para os ensaios de durabilidade. Nos primeiros a quantidade de moldagens para cada variação possibilita uma comparação média entre eles para durabilidade um corpo de prova era submetido à escovação e outro para controle do teor de umidade. Para este estudo foram realizadas 9 combinações para os ensaios de resistência à tração na compressão diametral e, também 9 combinações, para os ensaios de durabilidade. Como resultado, foram moldados 27 corpos de prova para os ensaios de resistência à tração, 27 corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão e 18 corpos de prova para durabilidade.

A relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_v) é definida com é uma variável derivada dos fatores controláveis e será utilizada na análise dos dados. À esta relação é adicionado um fator de correção exponencial ao teor volumétrico de cal (L_v) a fim de possibilitar uma melhor

proporção com a porosidade. Isto permite que se formulem equações que definem o comportamento das misturas, estas equações podem ser utilizadas na definição de dosagem.

3.2 FASES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa experimental foi dividido em quatro fases. Na primeira fase, visando a determinação das características físicas e químicas da cinza volante e da cal de carbureto, foram coletadas e preparadas as amostras. Após, foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais.

Na segunda fase fez-se a definição das variáveis controláveis: teores de cal e porosidades. Além da definição do tempo e temperatura de cura.

A terceira fase, constituiu-se da moldagem e cura dos corpos de prova e foram realizados os ensaios de tração na compressão diametral das misturas estabelecidas de acordo com o programa de ensaios detalhado.

A quarta fase, constituiu-se da moldagem e cura dos corpos de prova e foram realizados os ensaios compressão simples.

Na quinta e última fase, os corpos de prova para o ensaio de durabilidade foram moldados e o ensaio executado. A Tabela 6 resume o programa experimental.

Tabela6 - Resumo do programa experimental, com fases e ensaios

	Etapas	Material	Tipo de ensaio/procedimento	
1ª Fase	Métodos de Caracterização e Materiais da Mistura	Cinza Volante e Cal de Carbureto	Coleta e preparação das amostras	
		Cinza Volante	Caracterização	Massa específica real dos grãos
				Análise granulométrica
				Limite de plasticidade
				Limite de liquidez
				Análise química
				Compactação
		Cal de Carbureto	Caracterização*	Massa específica
				Análise química
				Perda ao fogo
Óxido de cálcio disponível				
2ª Fase	Programa de ensaios de resistência à tração, resistência à compressão e durabilidade	Misturas de cinza volante e cal de carbureto	Definição da temperatura de cura	
			Definição do teor de cal	
			Definição da porosidade	
3ª Fase	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	Misturas de cinza volante e cal de carbureto	Moldagem	
			Compactação	
			Cura	
			Rompimento	
4ª Fase	Ensaio de resistência compressão simples	Misturas de cinza volante e cal de carbureto	Moldagem	
			Compactação	
			Cura	
			Rompimento	
5ª Fase	Ensaio de durabilidade	Misturas de cinza volante e cal de carbureto	Moldagem	
			Compactação	
			Cura	
			Ciclos de molhagem, secagem e escovação.	

Fonte: adaptado de De Paula (2016).

3.3 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

Sendo parte da primeira fase do programa experimental, neste item serão detalhados os métodos utilizados para coleta, preparação e ensaios de caracterização da cinza volante e da cal de carbureto utilizadas na pesquisa. Com exceção do ensaio de compactação e das propriedades da amostra de cal de carbureto, todos os ensaios de caracterização foram obtidos a partir de De Paula (2016), uma vez que se trabalhou com os mesmos materiais.

3.3.1 Coleta de amostras

O resíduo industrial cinza volante foi coletado diretamente dos reservatórios dos equipamentos da empresa Braskem, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. O material foi armazenado e transportado em tonéis plásticos vedados até o laboratório.

A cal de carbureto, adquirida na empresa White Martins Gases Industriais S.A., também em quantidade suficiente para os ensaios, foi retirada das bacias de decantação do processo produtivo do gás acetileno e armazenada em tonéis plásticos vedados.

3.3.2 Preparação das amostras

Para os ensaios de caracterização e moldagem dos corpos-de-prova, os procedimentos de secagem ao ar, destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica das amostras de cinza volante seguiram o estabelecido na NBR 6457/86.

O excesso de água foi retirado após a decantação da cal nos tonéis e após este procedimento a cal ainda apresentava teor de umidade elevado. Assim, a cal passou por secagem em estufa a 60°C por 24 horas e após este processo foram possíveis o destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica conforme os procedimentos preconizados na NBR 6457 (ABNT, 1986A).

3.3.3 Ensaios de Caracterização

Para a caracterização tanto da cinza volante quanto da cal de carbureto foram realizados os ensaios de granulometria, análise química elementar, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade e determinação do teor de umidade conforme procedimentos e normas

listados na Tabela 7. Os ensaios foram realizados nos laboratórios da CIENTEC, LEGG e LACER.

Tabela 7 - Caracterização e procedimentos empregados para os materiais utilizados

Caracterização	Procedimento
Determinação do teor de umidade	NBR 6457/86
Massa específica dos grãos (cinza)	NBR 6508/84
Massa específica da cal	NM 23/2001
Óxido de cálcio disponível na cal	NBR 6473/2003
Análise granulométrica	NBR 7181/84 (c/ defloculante)
Análise química elementar (cinza e cal)	Fluorescência de raio X
Perda do fogo	NBR NM 18/2004
Determinação de LL (cinza)	NBR 6459/84
Determinação de LP (cinza)	NBR 7180/84

Fonte: adaptado de Saldanha (2014).

3.3.4 Ensaio de compactação

Nesta pesquisa foi realizado o ensaio de compactação dinâmica, – Proctor – NBR 7182/86 (ABNT, 1986B) para a determinação dos pesos específicos aparentes secos e umidades utilizadas nesta pesquisa. Foi utilizado um molde cilíndrico de 10 cm de diâmetro, onde foi colocada cinza volante com uma determinada umidade que resultasse em 200g de material úmido.

O material foi compactado com o auxílio de um soquete padronizado pela norma, com diferentes forças (golpes) para cada tipo de energia (normal, intermediária e modificada). Na sequência o corpo de prova era retirado do cilindro e tinha sua altura, diâmetro e peso medidos. Posteriormente, o corpo de prova era desmanchado e dele era retirado uma fração do material para a determinação da umidade. Para uma mesma energia, foram realizados ensaios com a cinza em diferentes umidades na tentativa de verificar o comportamento do massa específica aparente seco frente à variação da umidade da cinza compactada. Por fim, o corpo-de-prova era desmanchado e, através de uma porção do material retirado dele, determinava-se a umidade.

Com uma mesma energia e diferentes umidades foram realizados ensaios com a cinza na tentativa de verificar o comportamento do peso específica aparente seco relacionado à variação

da umidade da cinza compactada. Os valores máximos de peso específico aparente seco, para cada energia de compactação, foram estabelecidos com o auxílio de uma linha ótima. Foram fixados para esta pesquisa os valores de 12,6 kN/m³, 11,6 kN/m³ e 10,6 kN/m³ e respectivos teores de umidade de 25%, 31,3% e 36,6%, estes resultados são apresentados na Figura 17.

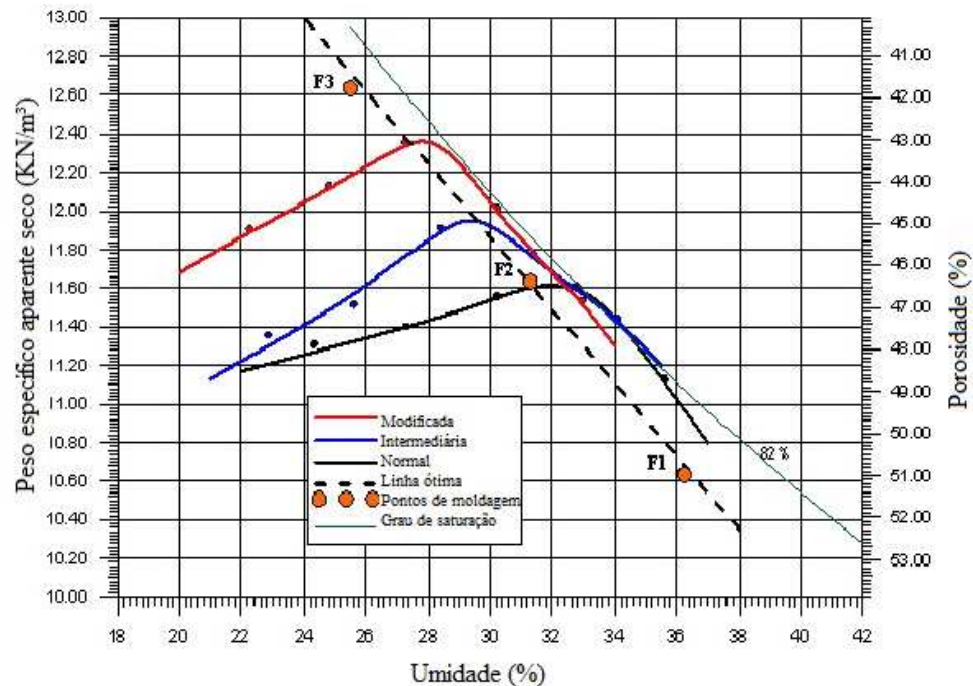


Figura 17 - Ensaio de compactação e pontos de moldagem

3.4 MATERIAIS DA MISTURA

Neste item serão abordados os materiais utilizados nesta pesquisa. As características físicas e químicas da cinza volante e cal de carbureto foram obtidas por De Paula (2016) pelos métodos de caracterização apresentados no item anterior (3.3).

3.4.1 Cinza volante

A cinza volante que foi utilizada nesta pesquisa é proveniente da empresa Braskem, fabricante de resinas termoplásticas, situada no município de Triunfo no Rio Grande do Sul. A empresa conta com unidade de geração de vapor através de câmara de combustão do carvão mineral. O

vapor produzido é utilizado na movimentação das turbinas para a produção de energia elétrica da fábrica, o restante do vapor é utilizado nos processos produtivos. A cinza volante gerada no processo é apresentada na Figura 18.

Algumas propriedades físicas da cinza volante proveniente da Braskem são apresentadas na sequência, os ensaios foram realizados nos laboratórios da UFRGS (LEGG e LACER) e da CIENTEC. A cinza volante do estudo foi considerada como não-plástica, sua massa específica real dos grãos é equivalente a $2,17 \text{ g/cm}^3$ e o diâmetro médio das partículas de é de $19,23 \mu\text{m}$. A curva granulométrica é apresentada na Figura 19 e o ensaio de difratometria de raios-X realizado para verificação da fração amorfa, a qual propicia as reações pozolânicas com a presença da cal, é apresentado na Figura 20. O resultado da difratometria de raios-X foi analisado pela CIENTEC e, através do método de Rietveld conclui-se que o percentual amorfo (fase vítrea) desta cinza volante é de 69,95% da sua composição.



Figura 18 – Cinza volante gerada pela Braskem

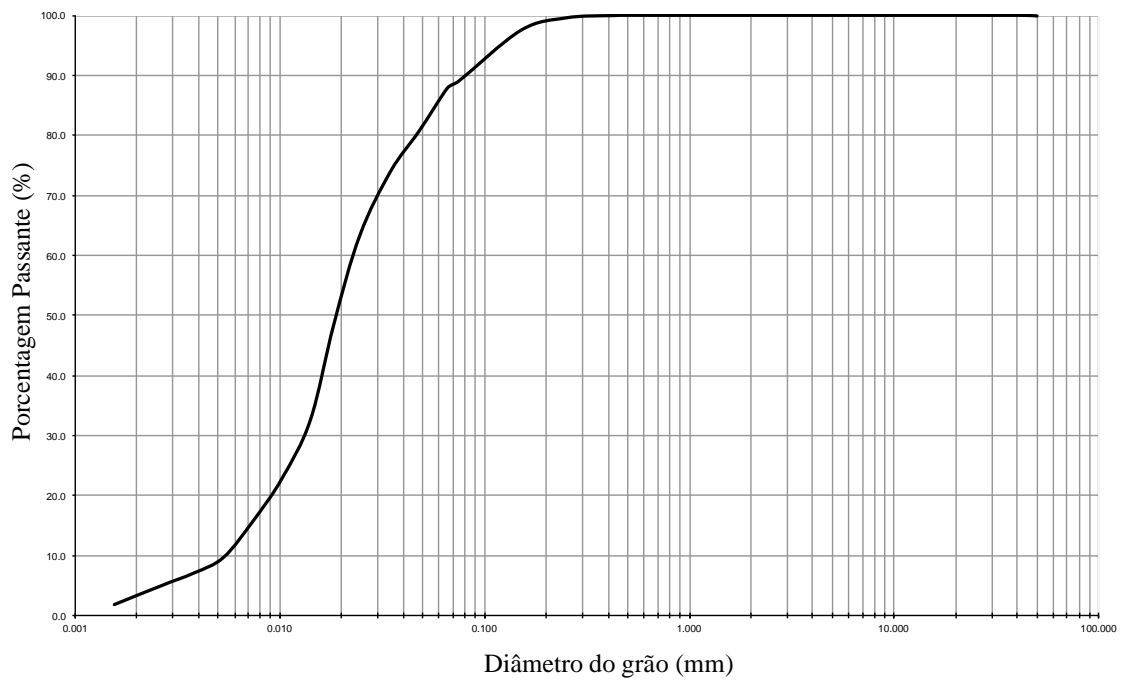


Figura 19 – Granulometria da cinza volante da Braskem. Fonte: De Paula (2016)

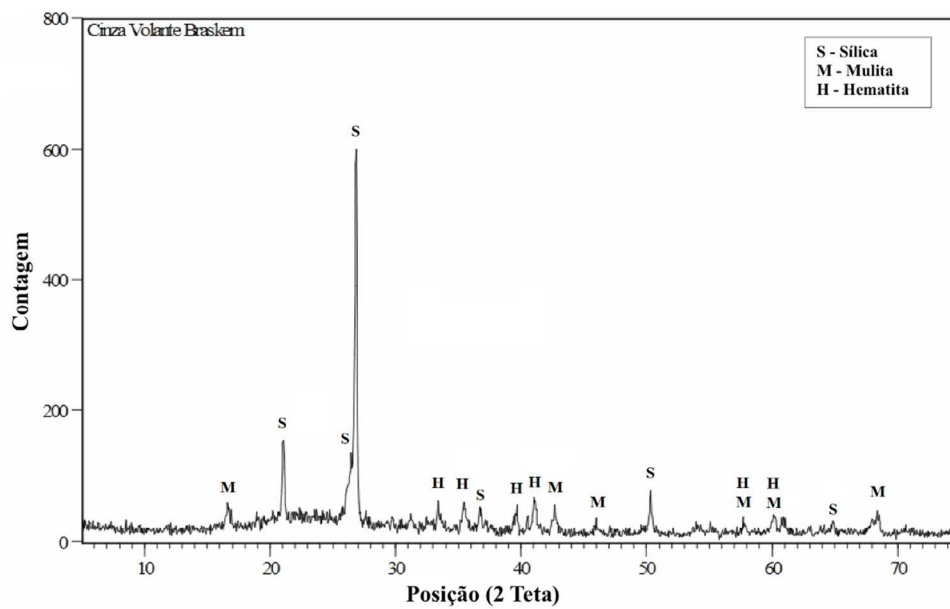


Figura 20 - Difratometria de Raios-X da cinza volante da Braskem. Fonte: De Paula (2016)

A análise da composição química da cinza volante utilizada nesta pesquisa revela que o óxido de silício (SiO_2), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) representam uma quantia superior a 90% do total dos óxidos componentes e são considerados elementos imprescindíveis para a ocorrência das reações pozolânicas. Esta análise é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Análise química da cinza volante

Características químicas	Valores (%)
SiO_2	66,4
Al_2O_3	18,2
Fe_2O_3	6,5
CaO	2,15
K_2O	1,41
MgO	0,88
TiO_2	0,8
Na_2O	0,34
C	0,14
S	0,09

Fonte: De Paula (2016)

3.4.2 Cal de carbureto

A cal de carbureto utilizada nesta pesquisa é proveniente da unidade da empresa White Martins Gases Industriais S. A., localizada na região metropolitana, no município de Esteio, RS. A empresa gera mais de 2000 toneladas/ano deste resíduo. Na Figura 21 é apresentado o armazenamento e o aspecto da cal de carbureto após a secagem e a Tabela 9 traz as propriedades da cal de carbureto.



Figura 21 - Armazenamento (a) e cal de carbureto após a secagem (b)

Tabela 9 – Propriedades da cal de carbureto

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

Fonte: Saldanha (2014).

3.5 PROGRAMA DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DE DURABILIDADE

Este item está inserido na segunda fase do programa experimental. A Tabela 10 apresenta as variáveis e os níveis estabelecidos e a Tabela 11 os itens constantes, na sequência deste item (3.5) serão apresentados os motivos por tais escolhas.

Tabela 10 – Variáveis e níveis estabelecidos

Variáveis	Valores
Peso específico aparente seco	10,6 kN/m ³
	1,16 kN/m ³
	1,26 kN/m ³
Teores de cal	5%
	8%
	11%

Tabela 11- Itens constantes

Constantes	Valores
Temperatura	23° C (± 3°C)
Tempo de cura	28 dias

3.5.1 Definição dos teores de cal

Os valores estabelecidos para a adição de cal de carbureto em relação a massa de cinza seca, foram definidos a fim de criar um ambiente que possibilitasse o desenvolvimento das reações pozolânicas. Isto para que altos valores de resistência e baixa perda de massa fossem atingidos.

O mínimo teor de cal foi estabelecido através do método ICL (Initial Consumption of Lime), proposto por Rogers et al. (1997). Este método é baseado na execução de medidas do pH da mistura, nesta situação de cinza volante e cal de carbureto. O valor mínimo indicado a ser utilizado na mistura é o percentual no qual o pH atinge um valor máximo e constante. Este teor mínimo do agente cimentante representa o mínimo teor para que as reações iniciais (troca catiônica) ocorram.

Conforme pode ser visualizado na Figura 22, para os materiais utilizados nesta pesquisa o teor de cal de carbureto mínimo é equivalente a 3%. Porém, para que se tivesse uma segurança maior quanto ao valor adotado, estabeleceu-se utilizar 5% de teor de cal como valor mínimo. O valor máximo de pH atingido pela mistura foi de 12,69, acima do valor de 12,4 recomendado pela ASTM D 6276 como sendo o mínimo.

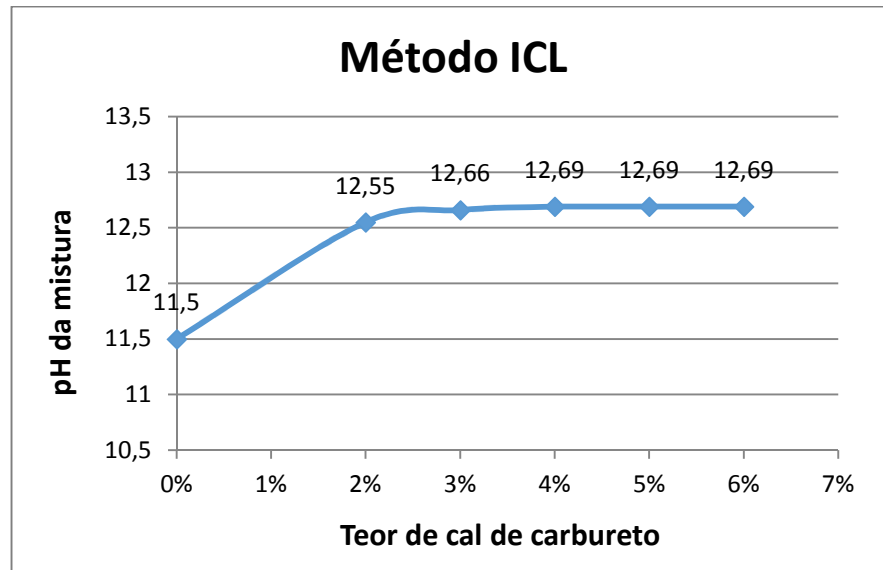


Figura 22 – Definição do mínimo teor de cal de carbureto pelo método ICL

Determinar um valor máximo de teor de cal também é bastante importante. A partir de um certo valor, o acréscimo de agente cimentante nem sempre representa ganho de resistência. Na pesquisa de Saldanha (2014), realizada com cal de carbureto proveniente da mesma empresa que a cal empregada nesta pesquisa, é possível observar que a variação no ganho de resistência à compressão simples, para cura de 14 dias a 23°C, entre as misturas com 10% e 15% de cal foram pequenos para todos as massas específicas aparentes secas avaliadas.

Na pesquisa de Saldanha (2014), recentemente citada, é possível visualizar que as maiores variações de resistência encontram-se entre os teores de 5 e 10%. A partir destas informações determinou-se o teor de 11% de cal de carbureto como o máximo para aplicação nesta pesquisa e os teores adotados foram 5, 8 e 11% de cal de carbureto em relação a massa seca de cinza volante.

3.5.2 Definição da porosidade

A porosidade de compactação foi definida a partir do ensaio de compactação dinâmica anteriormente apresentado pelo presente trabalho (Item 3.3.4 e Figura 15). A partir do ensaio, baseado na linha ótima, foram definidos os valores de 10,6 kN/m³, 11,6 kN/m³ e 12,6 kN/m³

como sendo os três pesos específicos aparentes secos utilizados neste trabalho. Os pontos de moldagem são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Pontos de moldagem

Variáveis	Valores (γ_d)	Porosidade (η)	Umidade ótima (ω)
	10,6 kN/m ³	51,10%	36,6%
Peso específico aparente seco	1,16 kN/m ³	46.48 %	31,3%
	1,26 kN/m ³	41.87 %	25,0%

3.5.3 Definição do tempo e temperatura de cura

Quando a cura não é acelerada e a temperatura é a ambiente, o tempo de cura deve ser estendido para que ocorra o processo de cimentação. Definiu-se que os corpos de prova seriam curados a temperatura ambiente ($23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$) em câmara úmida (Figura 23) por um período de 28 dias.

Aos 27 dias todos os corpos de prova referentes aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de resistência à compressão simples foram retirados da câmara úmida e imersos em água a temperatura ambiente para garantir maior saturação, logo, minimizando sucção (Figura 24). Os corpos de prova moldados para os ensaios de durabilidade foram retirados aos 28 dias e o ensaio teve início conforme prevê a norma ASTM D 599/2003.



Figura 23 – Câmara úmida da CIENTEC



Figura 24 – Corpos-de-prova moldados para ensaios de resistência à tração imersos em água

3.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nesta pesquisa foi utilizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. O mesmo é executado através do carregamento de amostras cilíndricas no sentido de seu diâmetro, dando início à terceira fase da pesquisa. É um ensaio de fácil execução e amplamente utilizado no meio científico.

3.6.1 Moldagem dos corpos de prova

Os ensaios utilizaram corpos-de-prova com dimensões de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura. A confecção dos mesmos deu-se através da pesagem de cada um dos itens, mistura, compactação, desmoldagem, colocação em sacos plásticos e posterior acondicionamento para cura.

A pesagem de todos os componentes deu-se com uma resolução de 0,01g e os primeiros materiais a serem misturados foram a cinza volante e a cal, fazendo o uso de uma espátula metálica os componentes foram misturados até que a mistura adquirisse coloração uniforme. Por fim, se adicionou água e passou-se ao processo de mixagem até que a homogeneidade fosse obtida.

A mistura foi compactada em uma camada única no interior de um molde de ferro fundido de modo que se obtivesse o peso específico aparente seco definido, o molde e a prensa utilizados são apresentados nas Figuras 25 e 26. Na sequência, o corpo-de-prova era extraído do molde por meio de sistema extrator mecanizado adaptado à prensa, e tinha sua massa e dimensões medidas. A colocação em sacos plásticos foi feita para evitar variações no teor de umidade e contato com a água, já que as amostras foram curadas em câmara úmida (Figuras 27 e 28).



Figura 25 – Molde utilizado para confecção dos corpos-de-prova



Figura 26 – Prensa utilizada

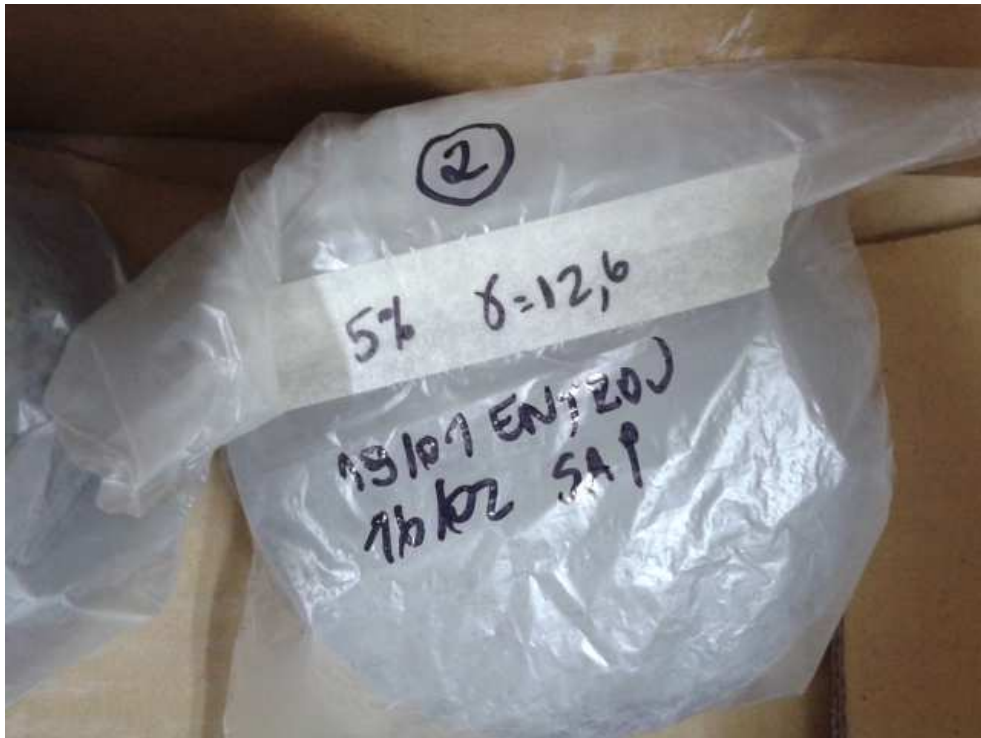


Figura 27 - Corpo-de-prova embalado



Figura 28 – Corpos-de-prova durante a cura em câmara úmida

Os corpos-de-prova aceitos atenderam aos seguintes critérios de tolerância:

- 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.
- Teor de umidade (ω): valor especificado $\pm 0,5$ pontos percentuais, logo para uma das umidades adotadas ($\omega = 25\%$) são aceitos valores compreendidos entre 24,5% e 25,5%).
- Dimensões: diâmetro 100 ± 1 mm e altura $50 \pm 0,5$ mm.

3.6.2 Ensaio de resistência à tração na compressão diametral

Os ensaios de tração na compressão diametral seguiram a norma NBR NM 8 (ABNT, 1994), a ruptura típica deste tipo de ensaio é apresentada na Figura 29. Para tanto, foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 600 kN (Figura 30), a velocidade de deformação destes ensaios foi de 1,14 mm por minuto. A resistência a tração foi calculada pela Equação 14. Para aceitação do ensaio, estipulou-se que as resistências individuais de três corpos-de-prova não deveriam diferir em mais de 10% da resistência média do grupo.

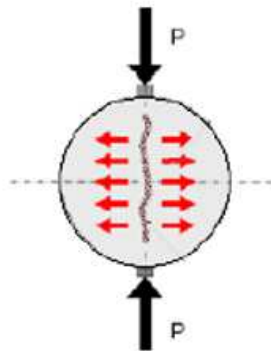


Figura 29 – Ruptura típica do ensaio de tração na compressão diametral.
Fonte: ABNT (1994)

$$q_t = \frac{2.P}{\pi.D.H} \quad \text{Eq(14)}$$

Onde:

P = Carga aplicada no momento da ruptura.

D = diâmetro do corpo-de-prova;

H = altura do corpo de prova



Figura 30 - Ensaio de resistência à tração na compressão diametral

3.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A maioria dos programas experimentais encontrados na literatura utiliza ensaios de compressão simples para avaliar se a estabilização com cal é efetiva. O grande ponto a favor deste tipo de ensaios, além da facilidade, rapidez de execução e baixo custo é a experiência acumulada nestes ensaios fazendo uso de concretos.

3.7.1 Moldagem dos corpos-de-prova

Para estes ensaios o equipamento de moldagem foi o mesmo, diferindo nas dimensões do molde de ferro fundido com extrator mecanizado adaptado, neste caso os corpos-de-prova possuíam 5cm de diâmetro e 10cm de altura (Figura 31) e nessa situação os espécimes foram moldados em três camadas e realizada a escarificação na interface entre as camadas. Foram utilizadas as mesmas proporções como critérios de aceitação, descritos para os ensaios de compressão diametral.



Figura 31 – Molde utilizado para os corpos-de-prova dos ensaios de resistência à compressão simples

3.7.2 Ensaio de resistência à compressão simples

A diferença entre os ensaios de resistência à compressão simples e à tração na compressão diametral dá-se pelo posicionamento dos corpos de prova no momento do ensaio, que para compressão simples são posicionados de pé (Figura 32).

Neste caso foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 100 kN, com anel dinamométrico calibrados com capacidade de 10 kN e resolução de 0,005 kN (0,5 kgf) (Figura 32). A velocidade de deformação destes ensaios foi de 1,14 mm por minuto, mesma utilizada nos ensaios de resistência à tração na compressão diametral. O procedimento dos ensaios de compressão simples seguiram a norma americana ASTM D 5102/1996.



Figura 32 – Posicionamento e prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão simples

3.8 ENSAIOS DE DURABILIDADE

Os procedimentos adotados para a realização do ensaio foram baseados na norma da ASTM, D 559/2003. A norma prescreve o método para a determinação de perda de massa, variação de umidade e variação de volume produzidas por ciclos de molhagem e secagem de corpos-de-prova de misturas solo-cimento.

3.8.1 Moldagem dos corpos de prova

Neste ensaio os corpos-de-prova tinham as dimensões de 100mm de diâmetro e 120mm de altura (Figura 33), atendendo ao que prevê a norma americana (volume de $944 \pm 11 \text{ cm}^3$). Os procedimentos adotados para a confecção dos corpos-de-prova foram idênticos aos utilizados para as amostras moldadas para os ensaios de resistência à tração na compressão diametral: pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, colocação em sacos plásticos e posterior acondicionamento para cura.

O que difere estas amostras das executadas para os ensaios de resistência à tração na compressão diametral é que estas foram compactadas em três camadas dentro do molde de ferro

fundido, cada uma com 40mm de altura, para que ao final se atingisse o peso específico aparente seco definido. Entre uma camada e outra era realizada a escarificação para aumentar a integração entre as camadas superpostas. As amostras eram retiradas do molde com o auxílio de extrator mecanizado adaptado à prensa (Figura 34).



Figura 33 – Corpo-de-prova após moldagem (100mm x 120mm)



Figura 34 - Amostra retirada com auxílio do extrator

Concluído o processo de moldagem, o corpo-de-prova era imediatamente extraído do molde, sua massa e medidas (diâmetro e altura) devidamente anotados com resolução de 0,01g e 0,1mm respectivamente. Ao final as amostras eram ensacadas com sacos plásticos e devidamente identificadas antes de irem à cura por 28 dias em câmara úmida (Figura 35).

Foram adotados os mesmos critérios de aceitação anteriormente citados (amostras moldadas para os ensaios de resistência à tração na compressão diametral) nas amostras para os ensaios de durabilidade. Neste caso as dimensões aceitas foram de diâmetro 100 ± 1 mm e altura 120 ± 12 mm.



Figura 35 – Corpos-de-prova dos ensaios de durabilidade ensacados e curando em câmara úmida

3.8.2 Programa de ensaio de durabilidade

Após a retirada das amostras da câmara úmida, os dois corpos-de-prova moldados para cada tipo de mistura foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem, sendo um deles submetido à escovação e o outro destinado a obter a variação de umidade e a variação de volume durante o ensaio. Conforme previsto pela norma da ASTM D 559/2003, cada um dos 12 ciclos teve duração de 48 horas, distribuídas da seguinte maneira:

- 5 horas de imersão em água (Figura 36);
- 42 horas de secagem em estufa a 71 °C (Figura 37);
- 1 hora de intervalo para escovação e pesagem a fim de avaliar a perda de peso (Figura 38).

As variações de peso e umidade foram avaliadas durante cada um dos 12 ciclos.



Figura 36 – Imersão em água



Figura 37 – Secagem em estufa a 71°C

Segundo a norma utilizada, as amostras devem ser escovadas através de 20 passadas da escova, distribuídas em 2 vezes a uma força de 13,3 N. Ao término do 12º ciclo as amostras devem ser colocadas na estufa a uma temperatura de 110°C até que a massa dos espécimes seja constante.



Figura 38 – Escovação

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão abordados os resultados do ensaio de resistência à tração na compressão diametral, do ensaio de resistência à compressão simples e do ensaio de durabilidade e as respectivas análises pertinentes ao presente trabalho. Os resultados serão separados por tipo de ensaio e serão analisados os seguintes aspectos: efeito do teor de cal; efeito da porosidade; e efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal. Será apresentada, ainda, uma relação resistência à tração/resistência à compressão simples para a mistura estudada.

4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Tabela A.1 do apêndice “A” traz as características de todos os corpos-de-prova que foram submetidos ao ensaio de tração na compressão diametral, curados a uma temperatura de 23°C. Pode-se visualizar, na tabela, que os dados foram agrupados a cada três linhas, pois correspondem às três repetições para um mesmo ponto de moldagem.

4.1.1 Efeito do teor de cal

A partir dos dados constantes na Tabela A.1, foi elaborada a Figura 39, a qual apresenta a variação da resistência à tração na compressão diametral em relação à quantidade de cal. Os dados apresentados na Figura 39 mostram que a resistência à tração por compressão diametral cresce de modo linear com o aumento da quantidade de cal na faixa de teores estudados, sendo os ganhos mais significativos para as amostras com maior peso específico aparente seco. Isto comprova o que foi dito por Silvani (2013) em sua pesquisa, pequenas adições de cal já são suficientes para propiciar ganhos na resistência. A diferença na inclinação das retas resultantes referentes aos efeitos da cal representa a interação entre as variáveis estudadas.

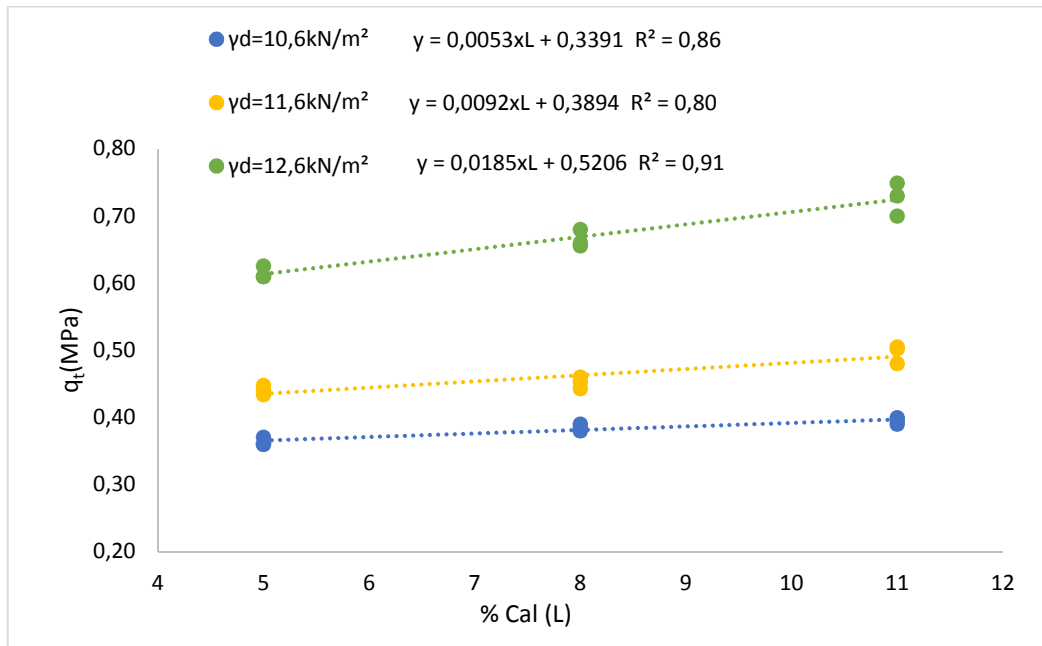


Figura 39 - Variação da resistência à tração na compressão diametral em relação à quantidade de cal

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

Tabela 13 - Resistência à tração na compressão diametral e ganho de resistência para variação de cal.

γ_d (kN/m^3)	RT 5% (média - MPa)	Ganho (%)	RT 8% (média - MPa)	Ganho (%)	RT 11% (média - MPa)
10,60	0,36	10,35	0,40	5,67	0,42
11,60	0,41	10,45	0,45	17,02	0,53
12,60	0,51	26,74	0,65	15,23	0,75

4.1.2 Efeito da Porosidade

Os incrementos na resistência à tração por compressão diametral em função da porosidade nas amostras estudadas são apresentados na Figura 40. Cada uma das curvas é ajustada e formada por dados com mesmo teor de cal.

O que pode ser constatado neste quesito é que a diminuição da porosidade das misturas compactadas leva a um aumento de resistência à tração na compressão diametral das amostras de cinza volante-cal carbureto, independente do teor de cal adotado.

A redução de pouco mais de 7% na porosidade promove o aumento da resistência final em, em média, 1,8 vezes se comparado à resistência inicial, resultado bastante semelhante ao encontrado por Silvani (2013) em sua pesquisa com corpos de prova curados a 20°C também por 28 dias.

Segundo Lopes Júnior (2011), a diminuição da porosidade proporciona uma maior capacidade de distribuição de tensões no interior da amostra, do mesmo modo que a maior capacidade de mobilização de atrito nas porosidades mais baixas também contribuem para o ganho de resistência à tração do material. A melhor maneira de caracterizar esta variação foi através de uma curva exponencial, através dela se obtiveram os maiores valores de coeficiente de determinação (R^2).

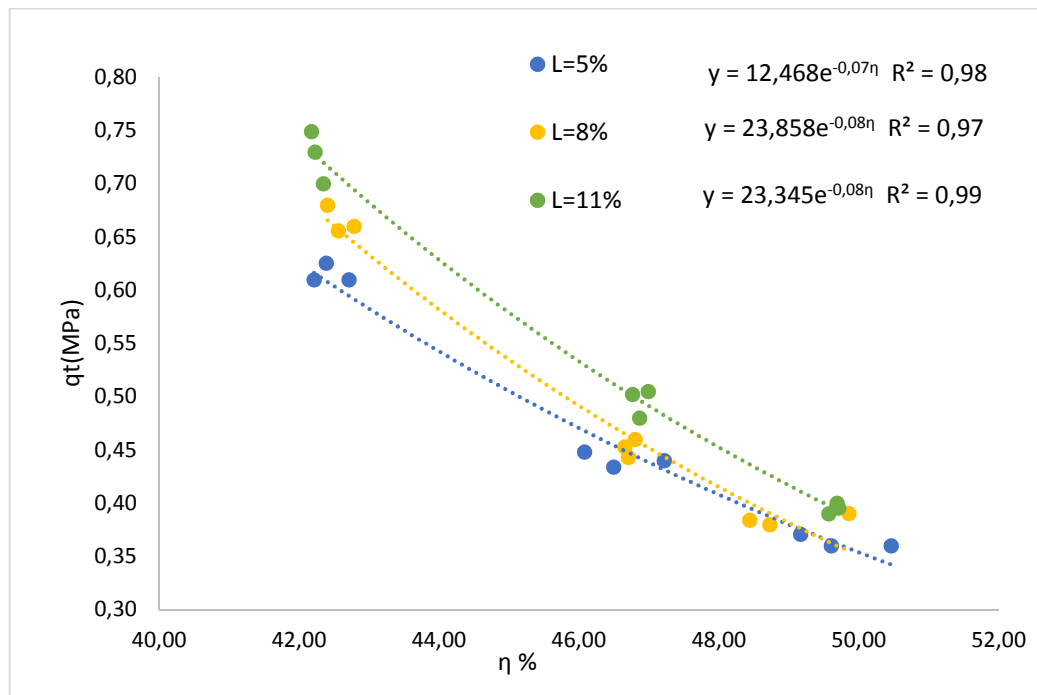


Figura 40 - Variação da resistência à tração na compressão diametral em relação à porosidade

4.1.3 Efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal

A Figura 41, apresenta as curvas de ajuste da variação da resistência à tração por compressão diametral em função da porosidade pelo teor volumétrico de cal. Conforme pode ser visualizado, não existe uma única relação capaz de ajustar a variação de resistência à tração com o coeficiente η/L_v . Cada uma das curvas foi construída a partir de espécimes com mesmo teor de cal.

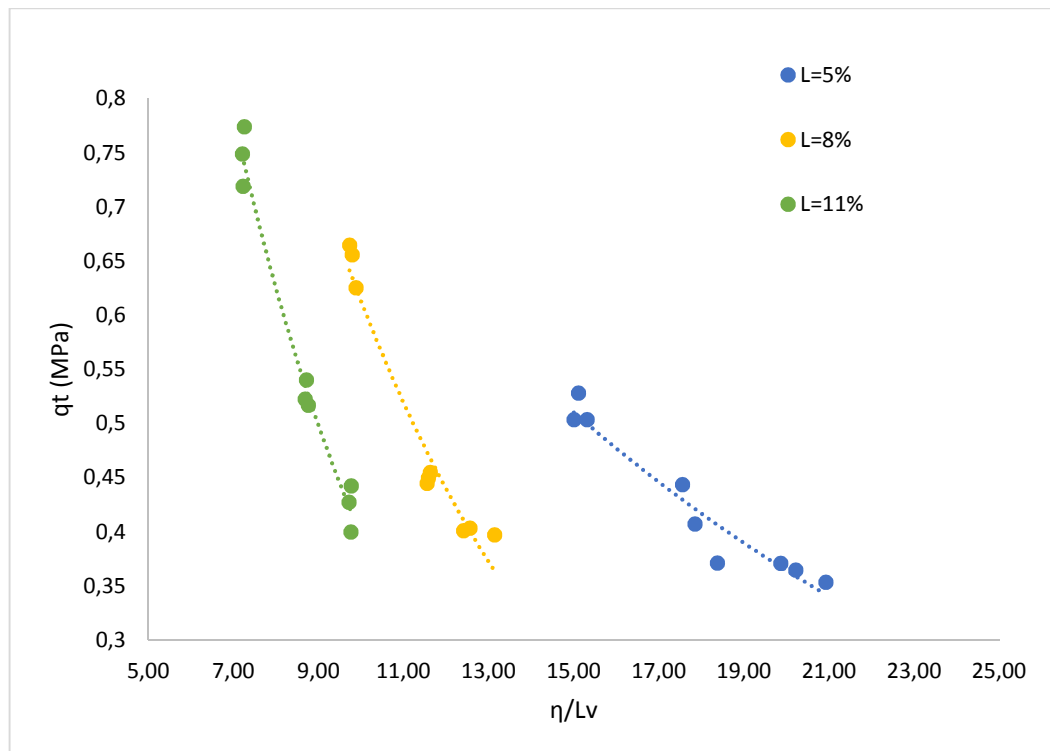


Figura 41 - Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à tração na compressão diametral

Seguindo a linha de diversos autores foi adotado um expoente de ajuste para o teor volumétrico de cal (Lopes Junior, 2007; Dalla Rosa, 2009; Silvani, 2013; Saldanha, 2014; De Paula, 2016). Como o expoente varia de acordo com o material empregado na mistura, optou-se por utilizar o valor de 0,11, mesmo valor utilizado por Saldanha (2014) em seus estudos com cinza volante e cal de carbureto.

O expoente adotado forneceu um melhor ajuste entre ganho de resistência devido à redução da porosidade com o ganho proporcionado pelo teor volumétrico adicionado de cal de carbureto (Figura 42). Assim como para os autores supracitados, a curva do tipo potência foi a que melhor se ajustou, gerando melhores coeficientes de correlação (R^2).

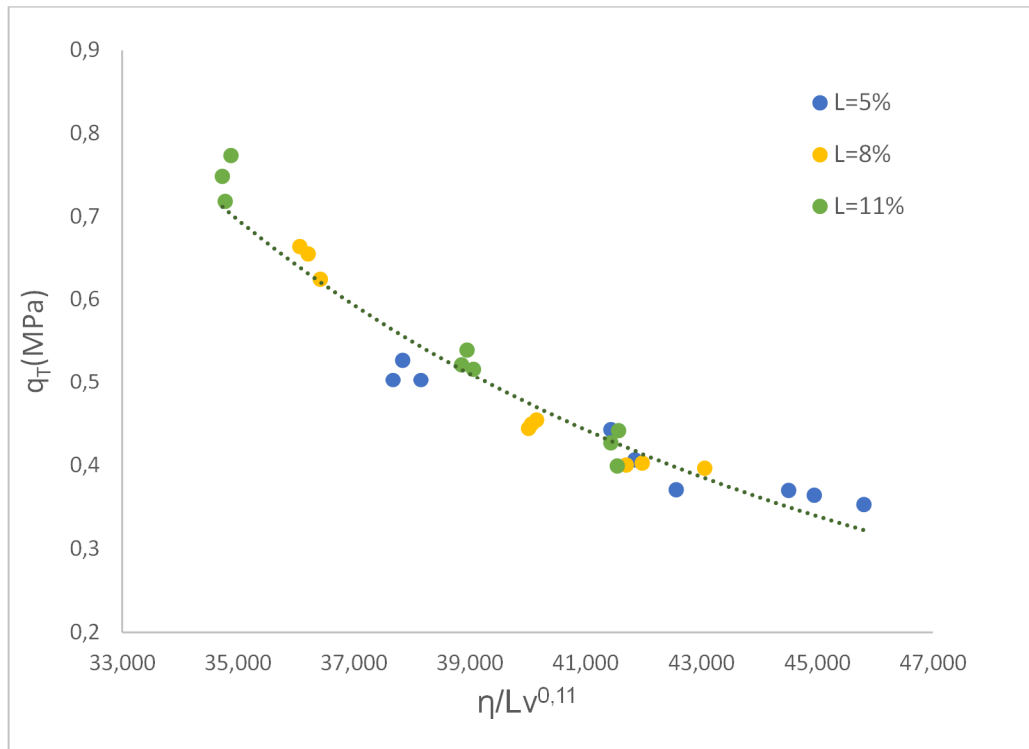


Figura 42 – Efeito de ajuste

Para uma melhor análise do comportamento da relação porosidade/ teor volumétrico foi utilizado um mesmo expoente (-3,0) para a curva potência utilizada $\left([\eta/L_v^{0,11}]^{-3}\right)$ (Figura 43). A equação citada é válida para uma cinza volante e cal de carbureto com características físicas e químicas similares às estudadas nesta pesquisa.

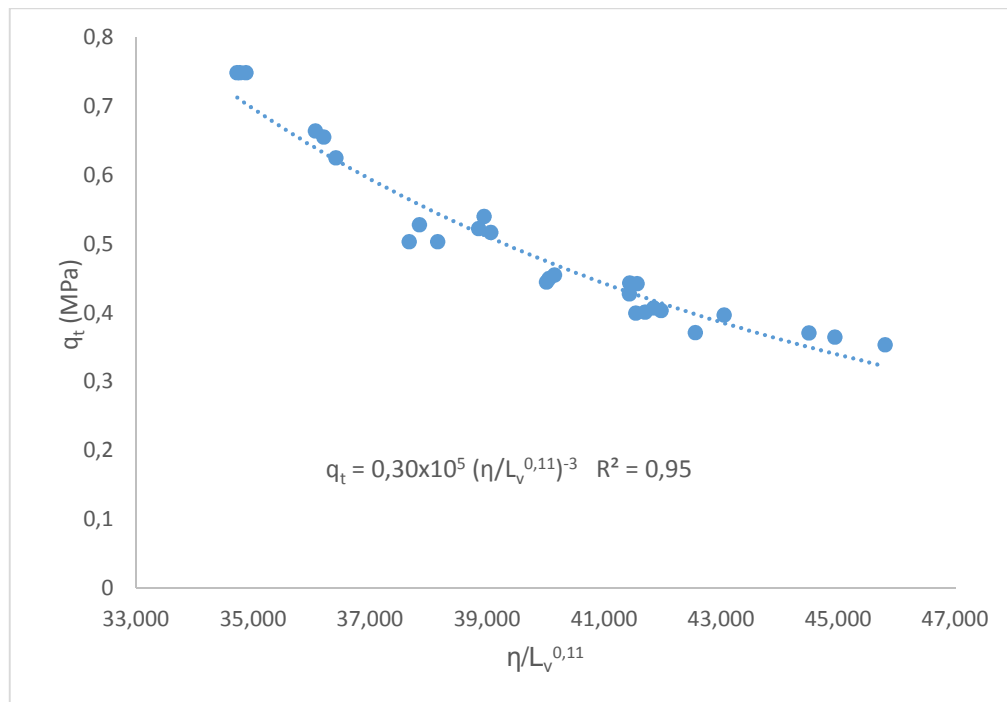


Figura 43 – Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para todas as amostras

4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os corpos de prova ensaiados à compressão simples têm suas características demonstradas na Tabela B.1 Apêndice “B”. Pode-se visualizar, na tabela, que os dados foram agrupados a cada três linhas, pois correspondem às três repetições para um mesmo ponto de moldagem.

4.2.1 Efeito do teor de cal

De uma maneira simplificada, pode-se dizer que o ganho de resistência à compressão simples deu-se conforme era aumentado o teor de cal da mistura, para um mesmo peso específico aparente seco, fato que pode ser observado a partir da Figura 44. A diferença nas inclinações das retas obtidas na avaliação dos efeitos da cal representa a interação entre as variáveis estudadas.

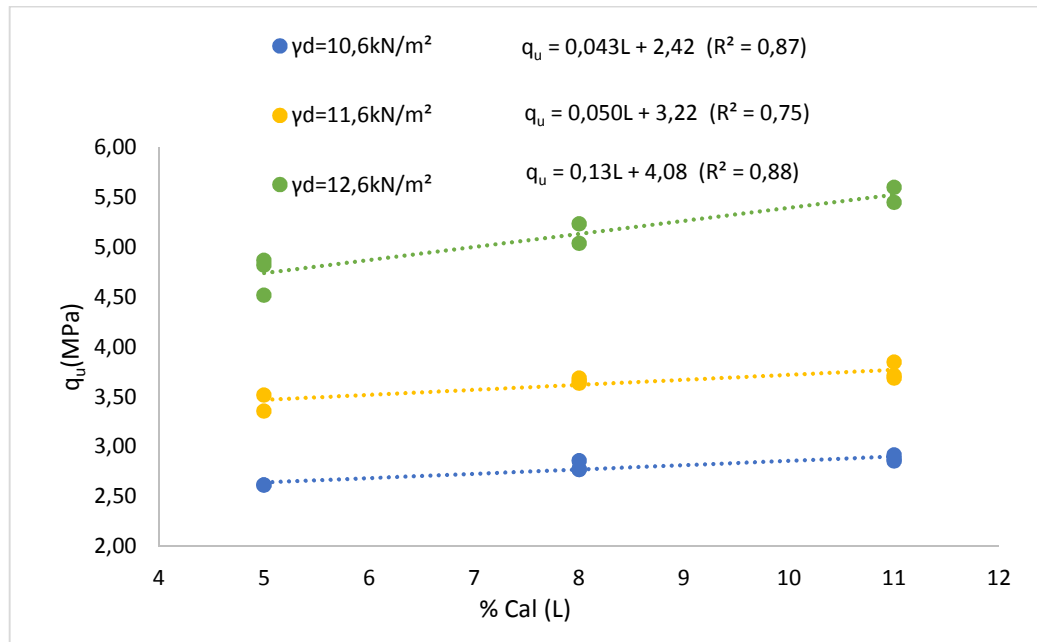


Figura 44 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal

Na Tabela 14 são apresentados os resultados de ganho de resistência conforme a variação do teor de cal na mistura.

Tabela 14 - Resistência à compressão simples e ganho de resistência para variação de cal.

γ_d (kN/m ³)	RT 5% (média - MPa)	Ganho (%)	RT 8% (média - MPa)	Ganho (%)	RT 11% (média - MPa)
10,60	2,57	9,23	2,81	2,91	2,89
11,60	3,44	6,48	3,66	2,42	3,75
12,60	4,85	5,99	5,14	7,53	5,53

4.2.2 Efeito da Porosidade

Do mesmo modo que para o incremento na quantidade de cal, a variação na porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a resistência a compressão simples da mistura cinza-cal. A partir dos resultados obtidos (Figura 45) podemos observar que a diminuição no percentual de porosidade do material promove ganhos de resistência. Em média a redução de

aproximadamente 7% da porosidade proporciona um aumento de 1,8 vezes na resistência à compressão simples da cinza-cal, mesmo comportamento visualizado para os ensaios de resistência à tração na compressão diametral e ensaios da pesquisa de Silvani (2013) e Saldanha (2014). O material utilizado pelo último autor tratava-se também de cinza volante misturada com cal de carbureto.

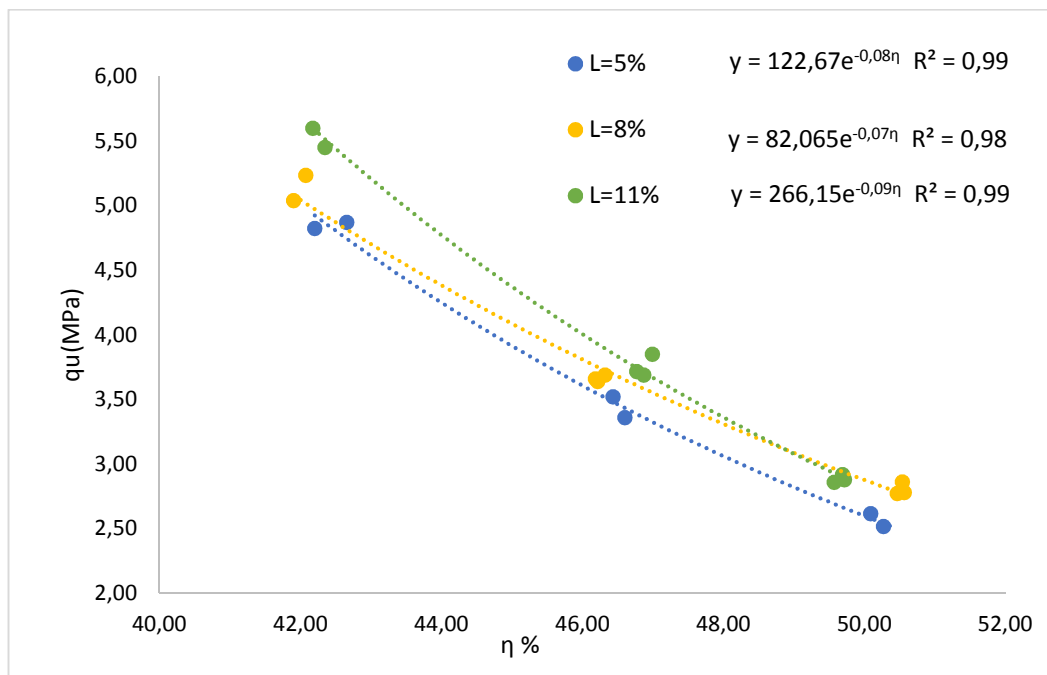


Figura 45 - Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade

4.2.3 Efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal

Assim como para os ensaios de resistência à tração na compressão diametral, os ensaios de resistência à compressão simples não apresentam uma correlação única entre as resistências obtidas e a relação porosidade/teor volumétrico de cal. Para explicar o efeito da relação entre porosidade e teor volumétrico de cal foram utilizadas curvas de tendência exponencial, uma vez que estas forneceram um coeficiente de determinação (R^2) mais elevado (Figura 46).

De acordo com os estudos de Foppa (2005), a taxa de variação de resistência entre volume de vazios e a taxa de variação de resistência do inverso do volume de agente cimentante não seguem a mesma proporção. Para tal, o autor sugere a inserção de expoente um expoente equivalente a 0,28 no volume de agente cimentante. Segundo o mesmo autor, isto gera uma nova curva ajustada e que pode ser utilizada na estimativa da resistência à compressão simples

para solos artificialmente cimentados. Nos anos seguintes Lopes Junior (2007), Dalla Rosa (2009), Silvani (2013), Saldanha (2014) e De Paula (2016) fizeram a mesma constatação em suas pesquisas, sendo os expoentes de correção de 0,06, 0,12, 0,30, 0,11 e 0,07, respectivamente, para o teor volumétrico de agente cimentante. Este expoente varia em função dos materiais empregados na mistura.

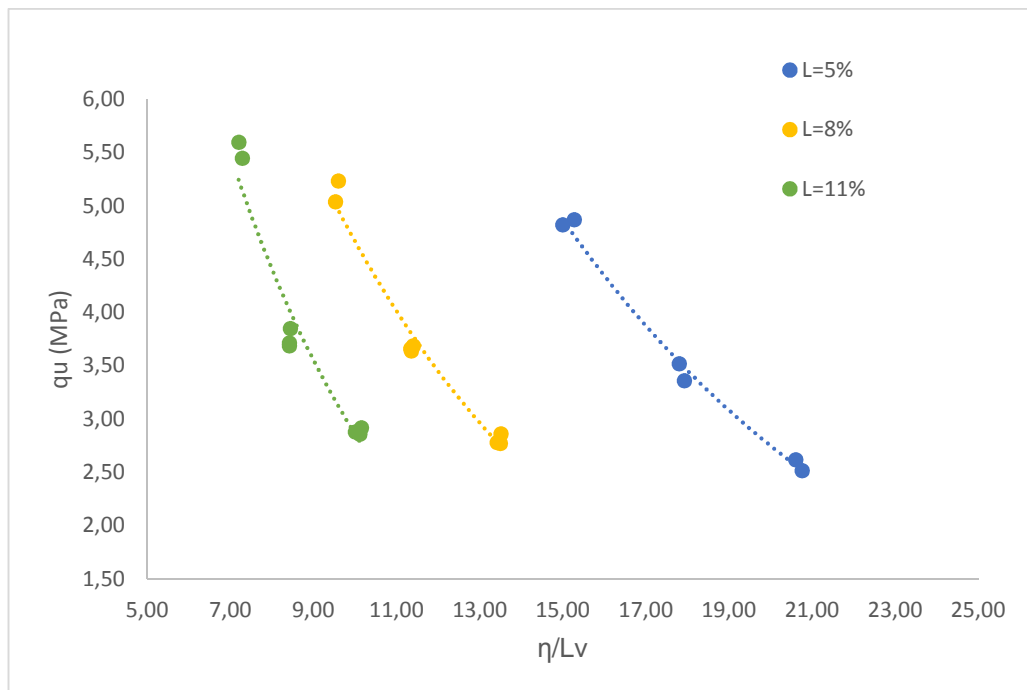


Figura 46 - Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples

Para a cinza volante e cal de carbureto utilizada na presente pesquisa o expoente de ajuste utilizado foi equivalente a 0,11 no teor volumétrico de cal, mesmo valor adotado por Saldanha (2014), uma vez que os materiais eram bastante semelhantes em sua caracterização.

O expoente adotado forneceu um melhor ajuste entre ganho de resistência devido à redução da porosidade com o ganho proporcionado pelo teor volumétrico adicionado de cal de carbureto, como mostrado nas Figura 47 e 48.

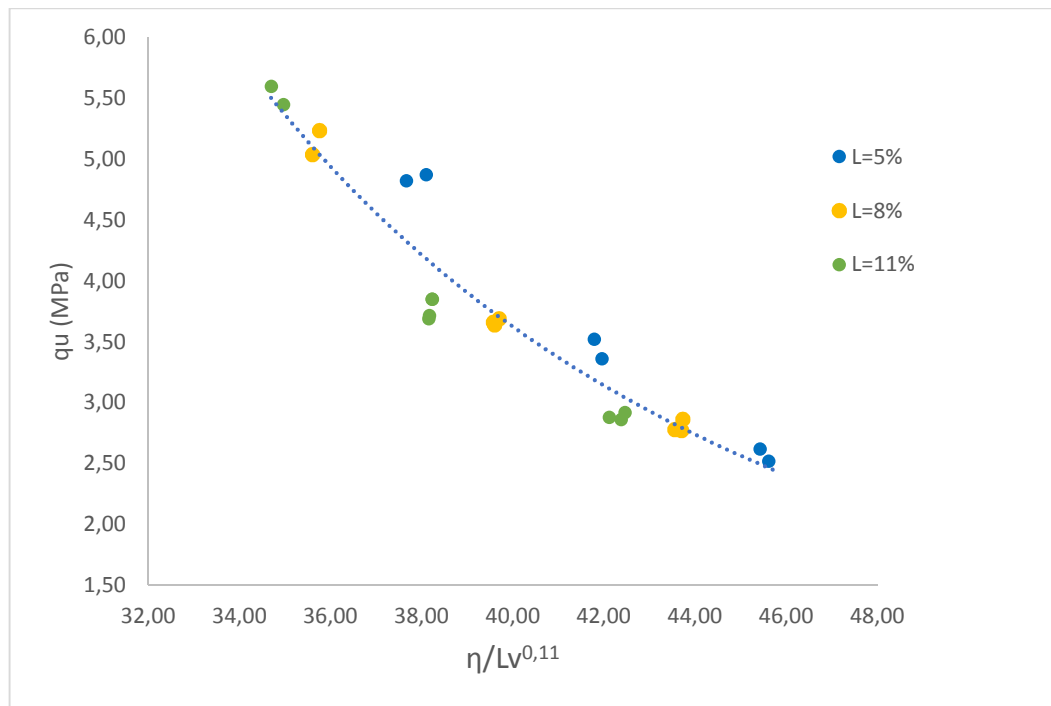


Figura 47 - Efeito de ajuste

Do mesmo modo que ocorreu nos ensaios de resistência à tração, foi utilizado um mesmo expoente (-3) para a curva potência utilizada $\left([\eta/L_v^{0,11}]^{-3}\right)$. A equação citada é válida para uma cinza volante e cal de carbureto com características físicas e químicas similares às estudadas nesta pesquisa.

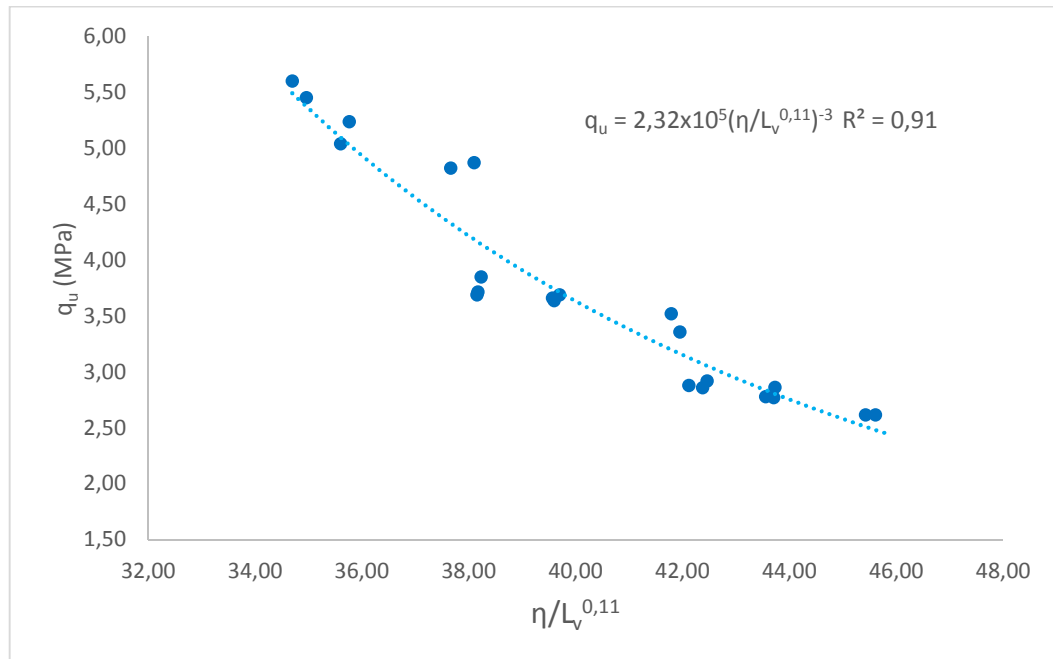


Figura 48 - Fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para todas as amostras

4.3 ENSAIOS DE DURABILIDADE

A Tabela C.1, do apêndice “C”, apresenta as características de todos os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de durabilidade com ciclos de molhagem e secagem, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. Pode-se visualizar na tabela que os dados foram agrupados a cada duas linhas, pois correspondem às duas repetições para um mesmo ponto de moldagem, um espécime submetido à escovação e outro ao controle de umidade.

4.3.1 Efeito do teor de cal

São apresentadas as curvas de variações da perda de massa acumulada (PMA) a cada ciclo nas Figuras 49 a 51. Cada uma das três curvas de cada gráfica corresponde a um teor de cal diferente, todas os espécimes de cada gráfico possuem mesmo peso específico aparente seco e mesma umidade.

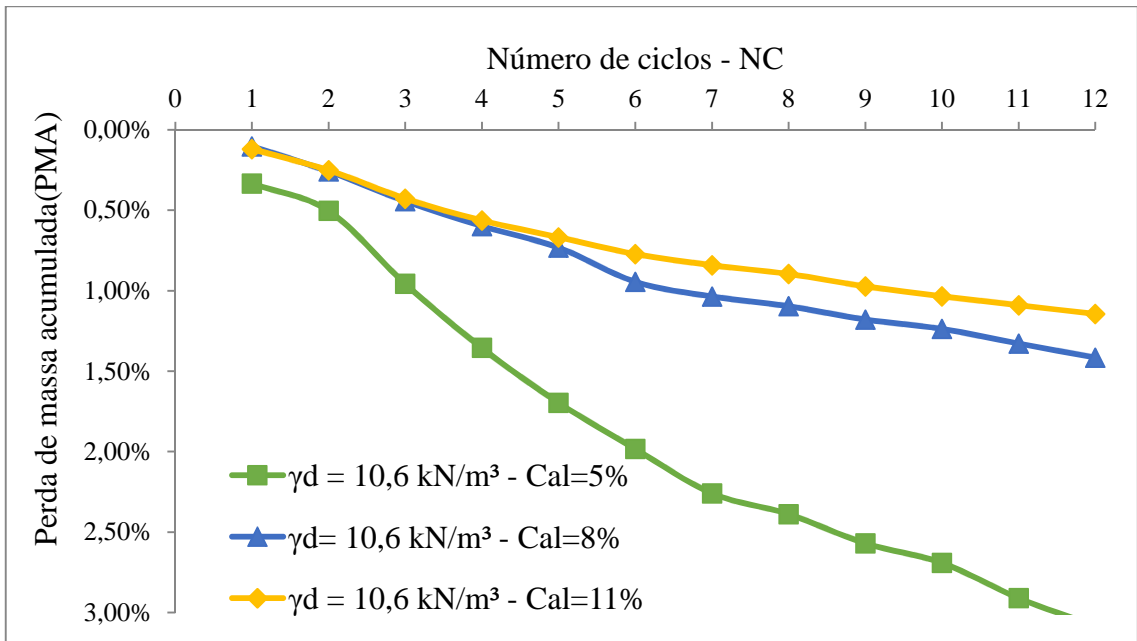


Figura 49 – Perda de massa acumulada versus número de ciclos em função do teor de cal ($\gamma_d = 10,6 \text{ kN/m}^3$ para todos os espécimes)

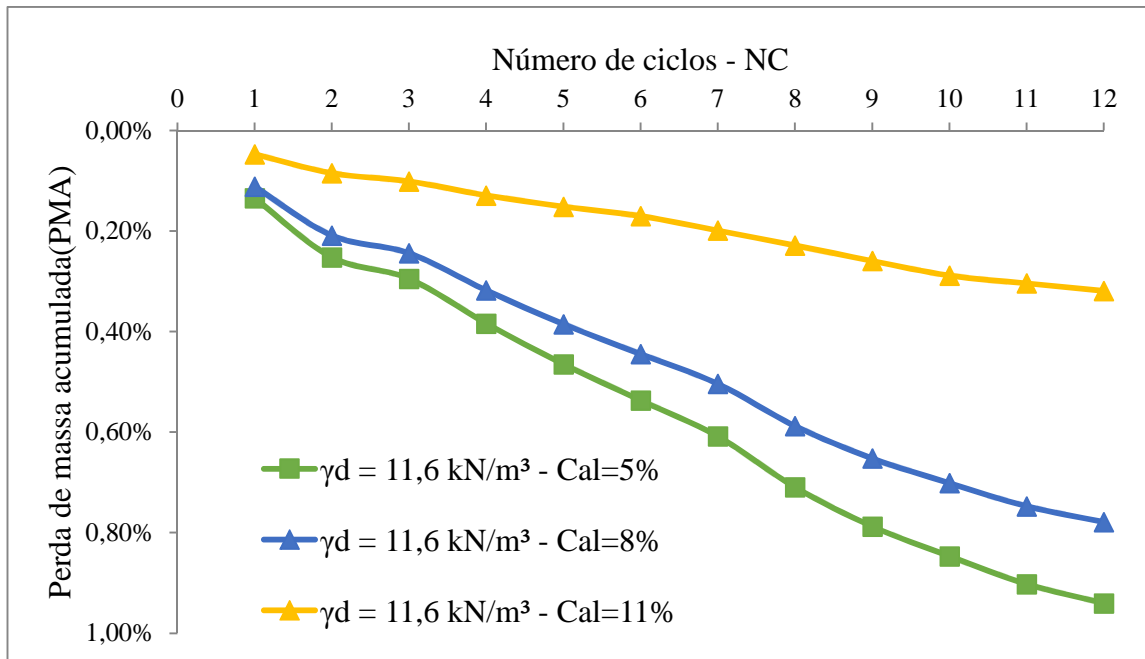


Figura 50 - Perda de massa acumulada versus número de ciclos em função do teor de cal ($\gamma_d = 11,6 \text{ kN/m}^3$ para todos os espécimes)

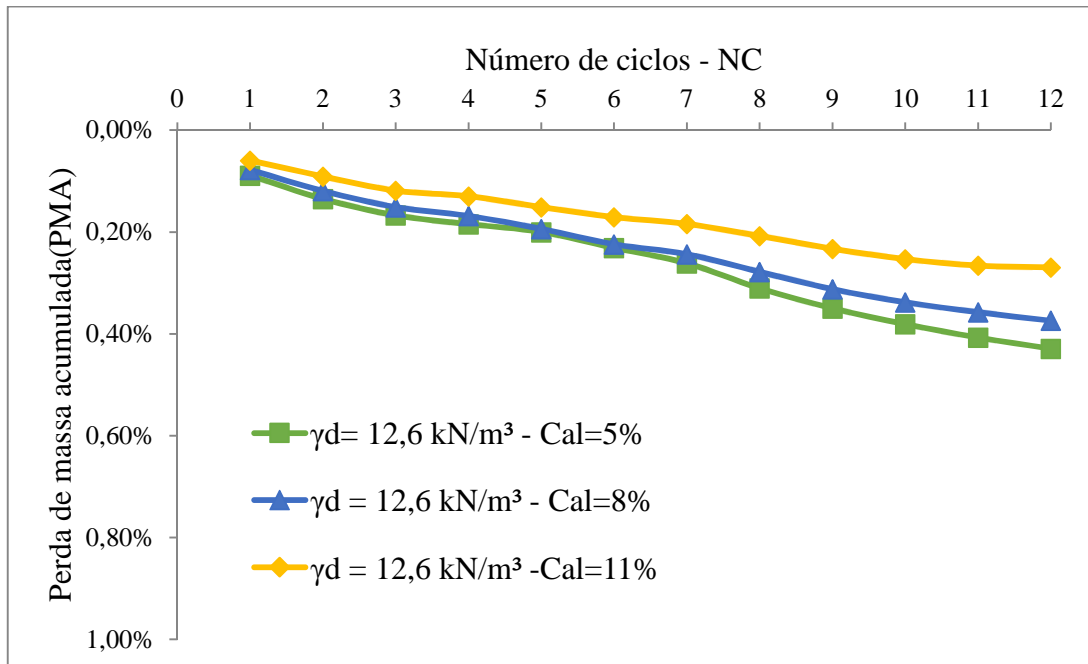


Figura 51 - Perda de massa acumulada versus número de ciclos em função do teor de cal ($\gamma_d = 12,6 \text{ kN/m}^3$ para todos os espécimes)

Para os espécimes com peso específico aparente seco equivalente a $10,6 \text{ kN/m}^3$ a diminuição da perda de massa acumulada com a adição do teor de cal é, em proporções, significativa. Se compararmos os 3,1% de perda acumulada para corpos-de-prova com 5% de cal adicionado com os 1,4% obtidos quando há adição de 8% de cal, temos a metade da perda de massa acumulada. A partir de 8% de adição de cal a diferença é reduzida, sendo esta de 1,1% para uma adição de 11% de cal de carbureto à mistura.

Para os espécimes moldados com pesos específico aparente secos superiores, as perdas de massa são números inferiores a 1%, com exceção do espécime moldado com $\gamma_d = 11,6 \text{ kN/m}^3$ e 5% de cal, chegando a um mínimo de 0,27% para a mais compactada e com maior teor de cal ($\gamma_d = 12,6 \text{ kN/m}^3$ e 11% de cal). Os resultados finais são apresentados na Tabela 15 e expostos analogamente na Figura 52.

Tabela 15 – Perda de massa acumulada no 12º ciclo.

Perda de massa acumulada (%)		
γ_d	10.6 kN/m ³	
Cal	5%	3,08%
	8%	1,42%
	11%	1,14%
γ_d	11.6 kN/m ³	
Cal	5%	1,36%
	8%	0,78%
	11%	0,32%
γ_d	12.6 kN/m ³	
Cal	5%	0,43%
	8%	0,44%
	11%	0,27%

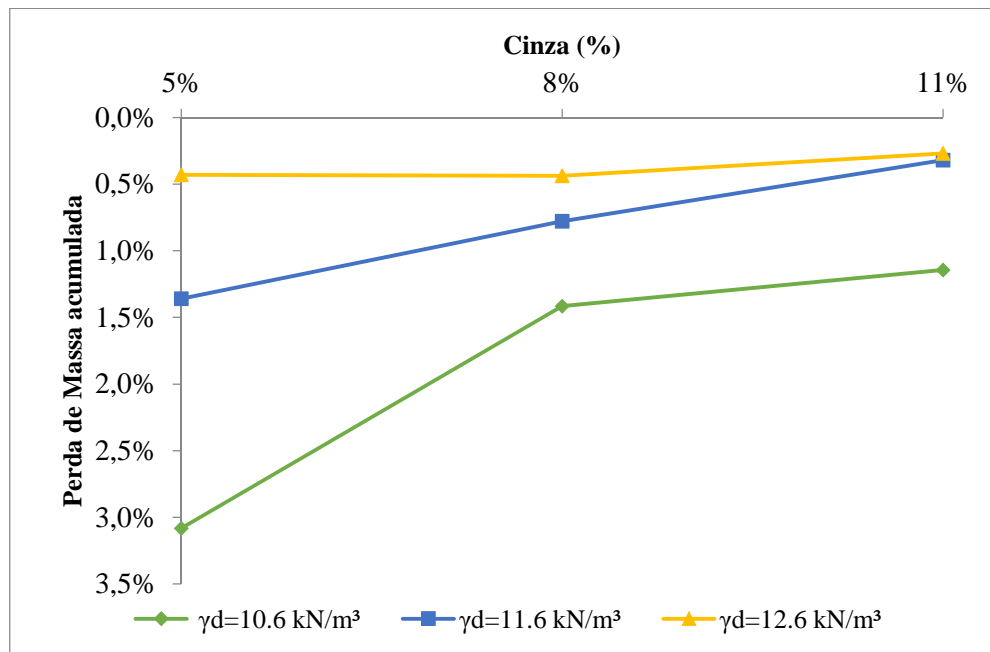


Figura 52 – Perda de massa acumulada no 12º ciclo em função do teor de cinza

4.3.2 Efeito da Porosidade

A variação de perda de massa acumulada (PMA) em função da porosidade nas amostras estudadas é apresentada na Figura 53. Cada uma das curvas é formada por dados com mesmo teor de cal.

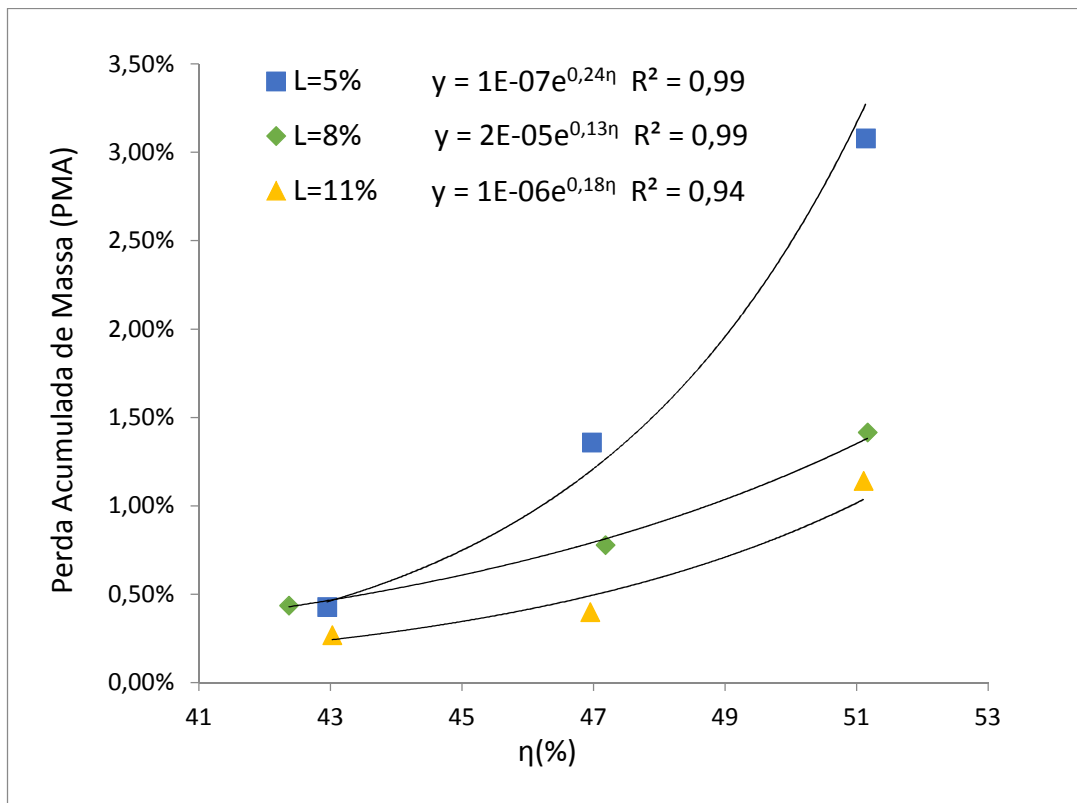


Figura 53 - Variação da perda de massa acumulada em relação à porosidade

Com a diminuição da porosidade ocorre uma diminuição da perda de massa acumulada, isto para todos os teores de cal estudados nesta pesquisa. Sendo todas as perdas de massa acumuladas pequenas em valores absolutos, é a partir da análise das proporções que podemos visualizar as vantagens devido à diminuição da porosidade.

Para os espécimes com 5% de teor de cal a diminuição de 8% da porosidade acarreta um perda de massa acumulada 7 vezes menor. Nos espécimes com 8 e 11% a redução é menor, sendo 3 vezes menor com a diminuição da porosidade em 9% e 4 vezes menor para a diminuição de 8% da porosidade, respectivamente. A melhor maneira de caracterizar esta variação foi através de uma curva exponencial, através dela se obtiveram os maiores valores de coeficiente de determinação (R^2), todos próximos a 1.

4.3.3 Efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal

A Figura 54 apresenta os resultados obtidos para a perda de massa acumulada versus o fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado nas misturas de cinza volante e cal de carbureto utilizadas nesta pesquisa no 3º, 6º, 9º e 12º ciclo de molhagem e secagem.

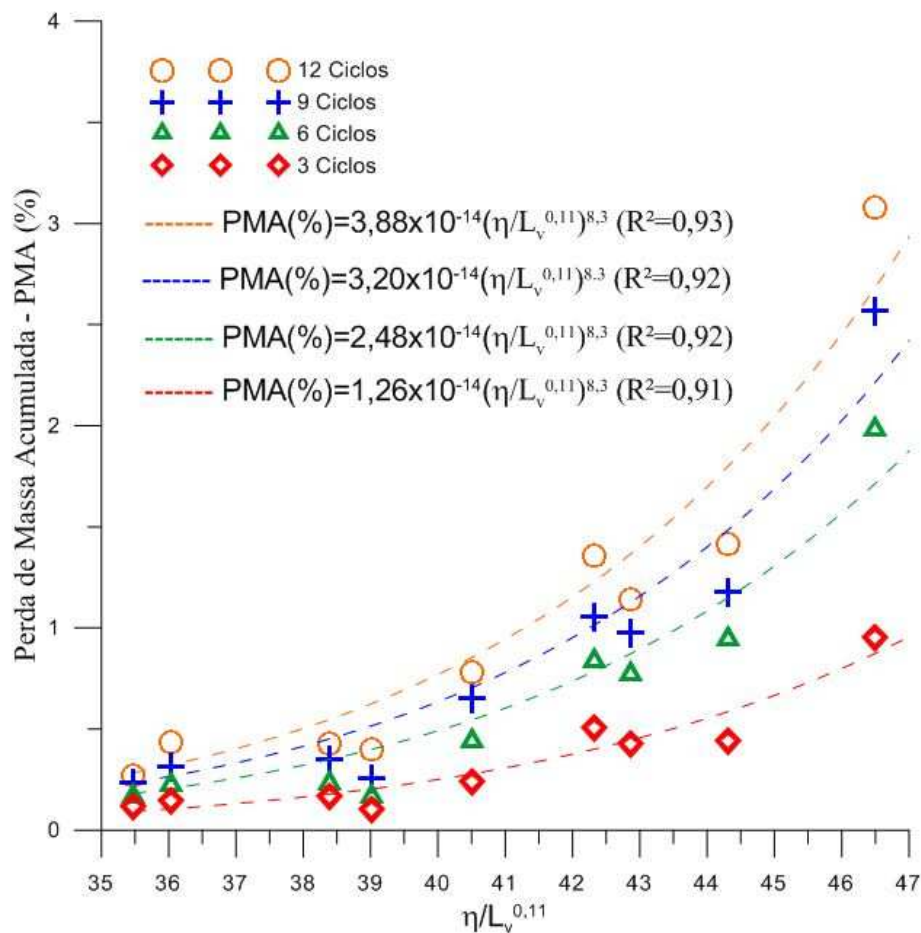


Figura 54 – Perda de massa acumulada versus porosidade/teor volumétrico de cal ajustado para 3, 6, 9 e 12 ciclos de molhagem e secagem

Para normalizar os resultados de durabilidade da mistura, os resultados da perda de massa acumulada (PMA) no 3º, 6º, 9º e 12º ciclo foram divididos pelo respectivo número do ciclo. Este valor versus o fator porosidade/teor volumétrico de cal ajustado está apresentado na Figura 55.

A partir disto, foi possível a obtenção de uma relação única da perda de massa acumulada/número de ciclos pelo fator $[\eta/L_v^{0,11}]$ e pode-se ver que o fator porosidade/teor

volumétrico de cal ajustado controla, também, a durabilidade de misturas de cinza volante e cal de carbureto compactadas.

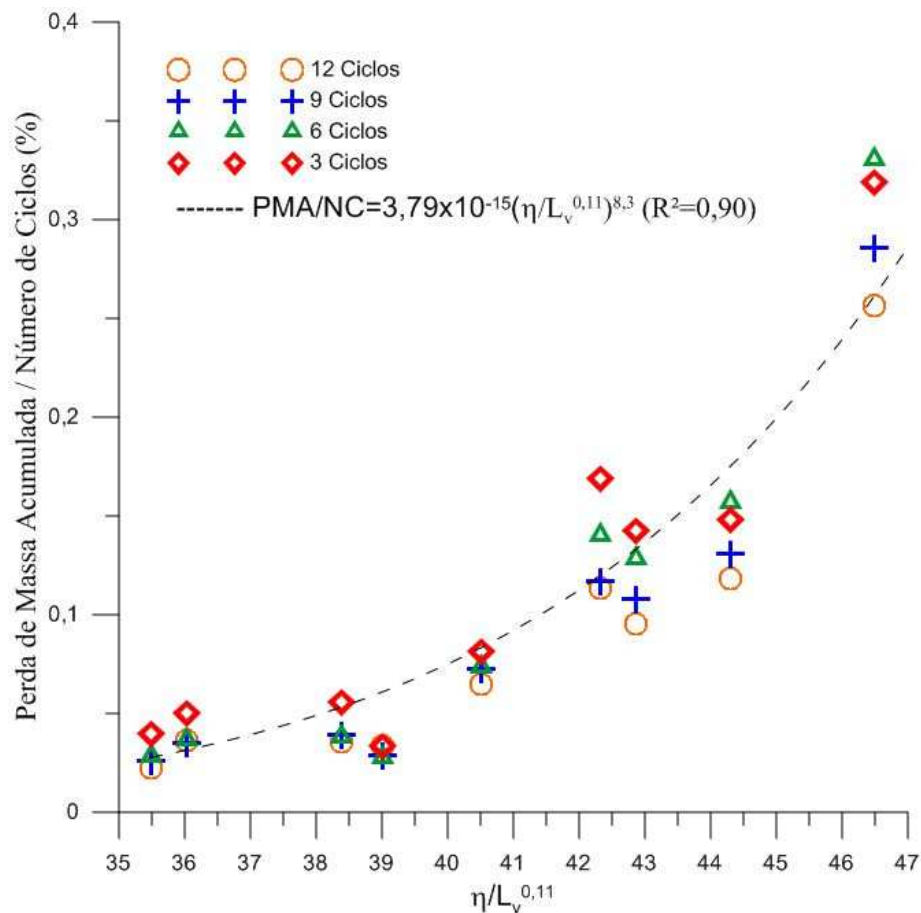


Figura 55 - Perda de massa acumulada/número de ciclos versus porosidade/teor volumétrico de cal ajustado

4.4 RELAÇÃO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO/RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Figura 56 mostra o comportamento da resistência à tração por compressão diametral e compressão simples curados a 23°C em câmara úmida por um período de 28 dias. A Equação 15 mostra que dividindo a equação obtida para a resistência à tração pela equação obtida para a resistência à compressão obtemos uma constante equivalente a 0,13. Isto indica que a relação entre a resistência à tração na compressão diametral e a resistência à compressão simples é independente da relação porosidade/teor volumétrico de cal. O mesmo quociente também é

encontrado a partir da média da divisão entre q_t e q_u e pela inclinação da reta de ajuste quando traçamos a relação entre a resistência à tração na compressão diametral e a resistência à compressão simples, conforme mostrado na Figura 57.

$$\frac{q_t}{q_u} = \frac{0,30 \times 10^5 (\eta/L_V^{0,11})^{-3}}{2,32 \times 10^5 (\eta/L_V^{0,11})^{-3}} = 0,13 \quad \text{Eq.(15)}$$

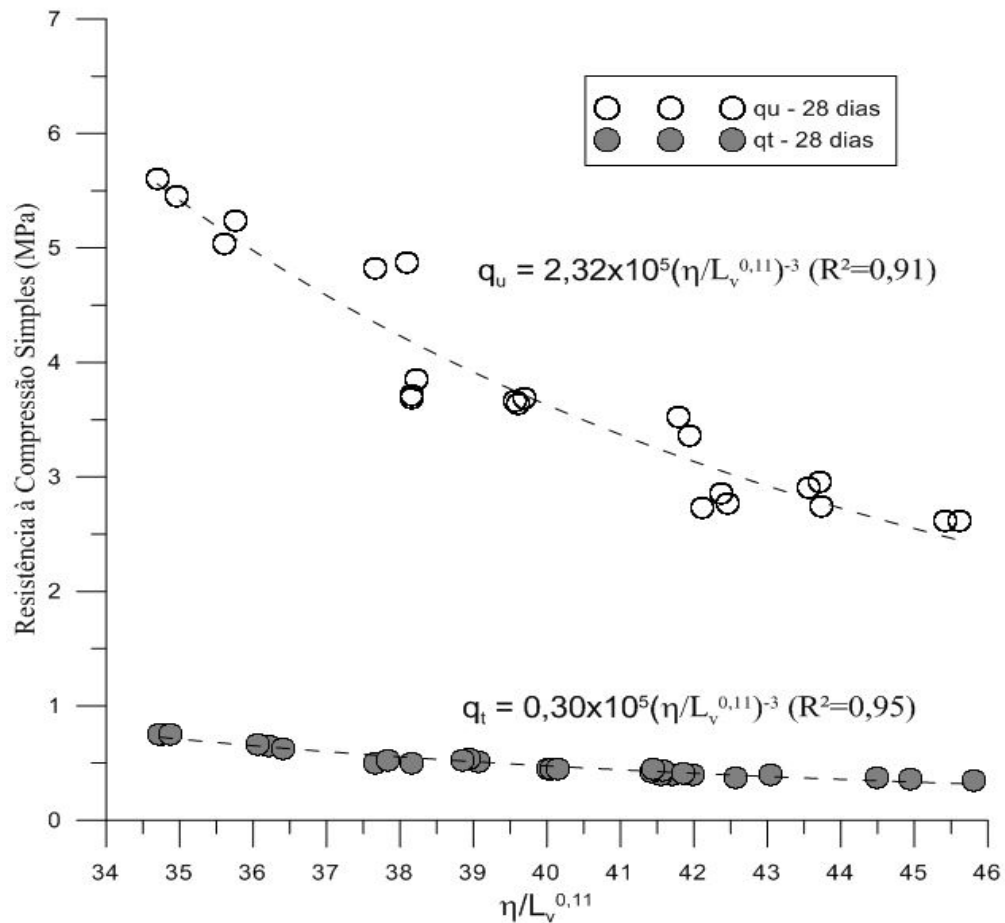


Figura 56 - Mudanças na resistência à tração na compressão diametral e à compressão simples pela variação da relação $(\eta/L_V)^{0,11}$

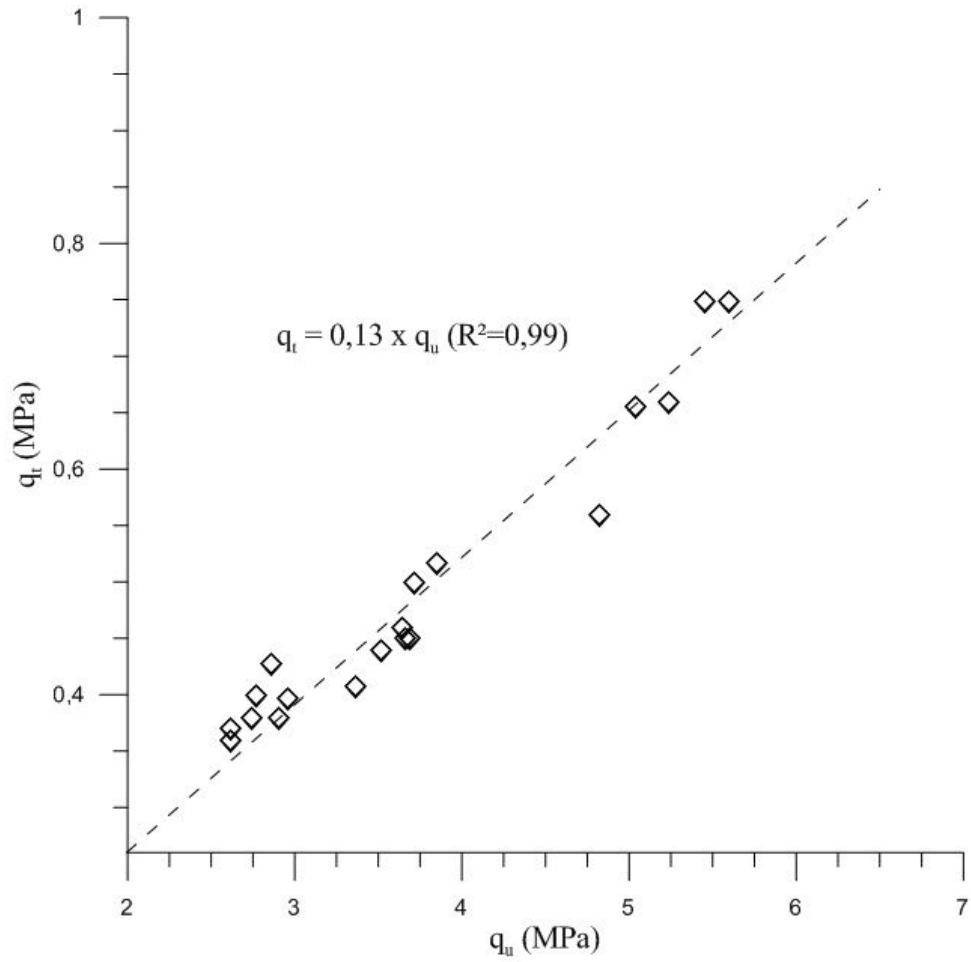


Figura 57 - Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A partir da análise, discussão dos resultados e da avaliação da influência dos fatores controláveis (quantidade de cal e porosidade) sobre a resistência mecânica de uma mistura compactada de cinza volante e cal de carbureto foram estabelecidas, dentro das condições e limites específicos deste estudo, as seguintes conclusões:

a) Quanto à influência da quantidade de cal:

Para todas as amostras estudadas pode-se perceber a influência da quantidade de cal sobre a durabilidade. A perda de massa acumulada é tanto menor quanto maior a quantidade de cal. As resistências estudadas também respondem satisfatoriamente ao incremento de cal, ambas são acrescidas linearmente.

b) Quanto à influência da porosidade:

Ambas as resistências estudadas ampliam-se exponencialmente com a redução da porosidade e a perda de massa acumulada diminui quando da diminuição da porosidade, também de forma exponencial. Tais fatos são devidos, provavelmente, ao acréscimo da efetividade das ligações entre as partículas.

É possível, a partir da variação do teor de cal ou do peso específico aparente seco, que o projetista opte pela opção mais viável ao projeto. Por exemplo, a resistência requerida de projeto pode ser obtida através da escolha de um teor maior de cal ou de uma maior compactação.

c) Quanto à influência do fator porosidade/teor volumétrico de cal:

A relação da porosidade da mistura compactada e do teor volumétrico de cal ajustado por um expoente igual a 0,11, qual seja: $\eta/(L_v)^{0,11}$, mostrou-se a maneira mais eficaz na obtenção de uma correlação única que permita a previsão de comportamento de ambas as resistências estudadas e da perda de massa acumulada das amostras em questão. De modo que, de acordo com os requisitos de resistência exigidos, o projetista pode estabelecer a relação porosidade/teor volumétrico de cal necessário para o projeto de terraplenagem. No caso da durabilidade, a escolha da que relação entre porosidade e teor volumétrico de cal se dá de acordo com o critério máximo para a perda de massa acumulada na situação.

d) Quanto à relação entre a resistência à tração e à compressão:

A razão entre a resistência à tração e à compressão é equivalente a 0,13 (independente do fator porosidade/teor volumétrico de cal) com um coeficiente de determinação (R^2) = 0,99.

5.2 SUGESTÃO 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:

- Verificação do desenvolvimento de resistência à tração na compressão diametral, resistência à compressão simples e durabilidade em maiores tempos de cura para as misturas de cinza volante com cal de carbureto estudadas. Podendo então, determinar o tempo necessário para que as reações pozolânicas da mistura cessem;
- Ensaio de medida de rigidez inicial através da técnica de ondas ultrassônicas, visando a determinação do módulo cisalhante elástico (G_0), possibilitando o cálculo de outros parâmetros elásticos através das formulações de elasticidade;
- Para as mesmas variáveis desta pesquisa, utilizar uma cinza volante com características diferentes para determinar a influência da cinza na relação porosidade/teor volumétrico de cal.;
- Verificar a intervenção da temperatura nesta e em outras cales como a cal calcítica e a dolomítica.

REFERÊNCIAS

AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION. **Coal combustion product (CCP) production and use survey report**. Farmington Hills: ACAA, 2013. Disponível em: < <http://www.acaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/2013ReportFINAL.pdf>>. Acesso em 08 julho 2016.

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 559**: Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures. Philadelphia, 2003.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6473**: Cal virgem e cal hidratada - Análise química. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6508**: Solo – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. 1984.

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

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 12653**: materiais pozolânicos – especificações. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR NM 8**: Concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 6p

BEN- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – Ministério das Minas e Energia – 2010. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompleatas.aspx> > , consultado em Junho de 2016.

BEN- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – Ministério das Minas e Energia – 2015. Disponível em < https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf > , consultado em Junho de 2016.

BENETTI, M. **Comportamento hidráulico e mecânico de um solo residual tratado com cal**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

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

BROWN, M. T. **Caracterização petrológica e química dos carvões utilizados em usinas termelétricas brasileiras e as cinzas geradas no processo de combustão**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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

CANON, R. W. **Proportioning fly ash concrete mixes for strength and economy.** ACI Journal Proceedings, Detroit, v.65, n. 11, p. 969-979, Nov. 1968.

CERATTI, J. A. P. **Efeitos da adição de cal e cinza volante nas propriedades de um solo residual compactado.** 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

CLARKE, Lee B. **Applications for coal-use residues.** London: IEACR, 1992. 406 p., il.

CONSOLI, N.C. **Processamento e utilização geotécnica de resíduos.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL – REGEO, 2003, [S.I]. **Anais...** [S.I.]: [s.n.], 2003. P. 497-510.

CONSOLI, N. C., ROCHA, C. G., AND MAGHOUS, S. (2016). **“Strategies for developing more sustainable dosages for soil–coal fly ash–lime blends.”** J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001648

CONSOLI, N. C., DALLA ROSA, A., AND SALDANHA, R. B. (2011a). **“Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures.”** J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000186, 432–440

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. **Key parameters for strength control of artificially cemented soils.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.133, n.2, p.197-205, 2007.

CONSOLI, N. C.; JONANN, A.D. R.; GAUER, E.A. ; SANTOS, V. R.; MORETTO, R. L.; CORTE, M. B. **Key Parameters for Tensile and Compressive Strength of Silt-Lime Mixtures.** Géotechnique Letters, v. 2, p. 81-85fi, 2012.

CONSOLI, N. C., LOPES, L. S., JR., PRIETTO, P. D. M., FESTUGATO, L., AND CRUZ, R. C. (2011b). **“Variables controlling stiffness and strength of lime-stabilized soils.”** J. Geotech. Geoenviron. Eng., 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000470, 628–632.

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

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2009.

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

DE PAULA, T.M. **Misturas de cinza volante com cal de carbureto: Comportamento da resistência à compressão simples frente a moagem da cinza.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

DEPOI, F. S., **Desenvolvimento de métodos analíticos para a caracterização dos carvões brasileiros e suas cinzas.** Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, p. 1-7, 2007.

EUROPEAN COAL COMBUSTION PRODUCTS ASSOCIATION. **Production.** Essen, Alemanha, 2010. Disponível em: <<http://www.ecoba.com/ecobaccputil.html;jsessionid=89CE2268187D0EEFF5BC76FAB54E341F>>. Acesso em 08 junho 2015.

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

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

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados.** 2005. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

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

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

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

HERRIN, M. i MITCHELL, H. **Lime-soil-mixtures.** Highway Research Board Bulletin, Washington, n.304, p.99-121, 1961.

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

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

HORPIBULSUK, S.; PHETCHUAY, C. **Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash.** 2012. American Society of Civil Engineers. Vol. 24, No. 2, February 1, 2012.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization – principles and practice.** Sidney: Butterworths, 1972. 374p.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** São Paulo: IBRACON, 2007. 2v.

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

KANAZAWA, N. M. **Durabilidade, rigidez e análise do ciclo de vida de um solo dispersivo estabilizado com cal.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

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

Kempala, A., Horpibulsuk, S., Prongmanee, N., and Chinkulkijniwat, A. (2014). **“Influence of wet-dry cycles on compressive strength calcium carbide residue-fly ash stabilized clay.”** J.Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000853, 633–643.

KIHARA, Y. **O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: origem, característica e qualidade.** São Paulo: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 1983. Tese de Doutorado.

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

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

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

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

MALLMAN, J.E.C. **Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante**. 1996. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

MARCON, A. **Durabilidade e módulo de elasticidade de misturas areis-cal-cinza volante**. Tese (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro. 1977.

MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization of iowa soils with lime and fly ash**. PhD Thesis (Iowa University). 1961.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

Mourão, J. (Junho/Julho 2009), **Para um habitação ambientalmente mais sustentável (I)**, Recursos ambientais em risco, Nº 48 Pág 26

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NÚÑEZ, W. P. **Notas de Aula de Estabilização de Solos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

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

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

ROBNETT, Q. L. e THOMPSON, M. R. **Soil stabilization literature reviews.** Civil Engineering Studies. **Highway Engineering Series N° 34**, Urbana, Illinois. 1969.

ROHDE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N. I. W.. **Cinzas de carvão fóssil no brasil. aspectos técnicos e ambientais.** V.I., CIENTEC, Porto Alegre. 2006.

RUSHAD, TABIN S.; KUMAR, ABHISHEK ; DUGGAL S. K; MEHTA P. K. **Experimental studies on lime-soil-fly ash bricks.** INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL AND STRUCTURALP ENGINEERING.Vol.1, n.4, 2011

SALDANHA, R.B. **Misturas cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples para cura acelerada.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SERAFINI, L. **Estabilização de solos com o uso da cal hidratada.** 2002. Trabalho de Conclusão – Curso de Engenharia Civil, UPF, Passo Fundo.2002

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** 2006, 164. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós- Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

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

SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. **Delay in compaction and importance of the lime fixation point on the strength and compaction characteristics of soil.** Ground Improvement, n.2, p.27-32. 1998.

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

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.

THOMPSON, M. R. **Shear strength and elastfc properties of limesoil mfxtures.** Highway Research Record, Washington, 11.139, p.1- 14, 1966.

THOMPSON, M.R. **Soil-lime mixtures for construction of low-volume roads.** Transportation Research Board Special Report, n. 160, pp. 149-165, Washington, D.C., 1975.

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

WCED. **World Comission on Environment and Development. Our Commom Future.** Oxford and New York: Oxford University Press, 1987.

**APÊNDICE A - DADOS DOS CORPOS-DE-PROVA ENSAIADOS À
TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL**

Tabela A 1 – Dados gerais dos corpos de provas submetidos à tração

CP	% cal	ω (%)	yd seco (g/cm ³)	e	η	GS	Lv (%)	η/Lv	$\eta/(Lv^{0,11})$	qt (MPa)
J19	5	36,20	1,04	1,09	52,10	72,15	2,33	22,34	47,464	0,353451
J20	5	36,20	1,07	1,03	50,85	75,86	2,39	21,25	46,191	0,370767
J21	5	36,20	1,06	1,05	51,27	74,57	2,37	21,61	46,624	0,364656
J22	8	36,39	1,05	1,05	51,33	74,76	3,68	13,93	44,469	0,397151
J23	8	36,39	1,08	1,01	50,23	78,11	3,77	13,33	43,412	0,403362
J24	8	36,39	1,08	1,00	49,95	79,00	3,79	13,19	43,143	0,40107
J25	11	36,42	1,06	1,05	51,16	75,26	4,94	10,35	42,917	0,399925
J26	11	36,42	1,06	1,04	51,05	75,61	4,95	10,30	42,809	0,427427
J27	11	36,42	1,06	1,05	51,19	75,19	4,94	10,36	42,940	0,442323
J10	5	31,55	1,16	0,86	46,29	79,35	2,61	17,70	41,647	0,4073
J11	5	31,55	1,17	0,85	45,87	80,70	2,64	17,41	41,234	0,443469
J12	5	31,55	1,15	0,89	47,02	77,07	2,58	18,23	42,364	0,371277
J13	8	31,80	1,16	0,87	46,65	78,77	4,04	11,55	40,014	0,444902
J14	8	31,80	1,15	0,88	46,70	78,61	4,03	11,58	40,062	0,449915
J15	8	31,80	1,15	0,88	46,80	78,31	4,03	11,62	40,151	0,454928
J16	11	31,73	1,15	0,88	46,71	78,39	5,39	8,66	38,806	0,516808
J17	11	31,73	1,16	0,87	46,58	78,78	5,41	8,62	38,692	0,540144
J18	11	31,73	1,16	0,87	46,48	79,10	5,42	8,58	38,601	0,522538
J1	5	25,40	1,25	0,74	42,48	74,53	2,80	15,17	37,934	0,503635
J2	5	25,40	1,26	0,72	41,98	76,08	2,82	14,86	37,449	0,503635
J3	5	25,40	1,25	0,73	42,16	75,53	2,82	14,97	37,620	0,527974
J4	8	25,27	1,25	0,73	42,10	75,27	4,38	9,61	35,786	0,65576
J5	8	25,27	1,26	0,72	41,94	75,76	4,39	9,55	35,642	0,664631
J6	8	25,27	1,25	0,73	42,33	74,58	4,37	9,70	35,995	0,625331
J7	11	25,22	1,26	0,72	41,77	76,13	5,89	7,09	34,364	0,719
J8	11	25,22	1,26	0,72	41,71	76,30	5,90	7,07	34,315	0,749
J9	11	25,22	1,26	0,72	41,88	75,76	5,88	7,12	34,467	0,774

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

Tabela B 1 – Dados gerais dos corpos de provas submetidos à compressão simples

CP	% cal	ω (%)	yd seco	e	η	GS	Lv (%)	η/Lv	η/Lv	$\eta/Lv^{0,11}$	q_u (MPa)
19,00	5	36,27154	1,08	1,01	50,27	77,78	2,42	20,76	20,76	45,61	2,518
20,00	5	36,27154	1,08	1,00	50,08	78,36	2,43	20,61	20,61	45,42	2,618
21,00	5	36,27154	1,07	1,02	50,46	77,19	2,41	20,92	20,92	45,80	
22,00	8	36,65032	1,07	1,02	50,53	77,71	3,74	13,50	13,50	43,70	2,772
23,00	8	36,65032	1,07	1,02	50,56	77,63	3,74	13,51	13,51	43,73	2,863
24,00	8	36,65032	1,07	1,02	50,38	78,19	3,76	13,41	13,41	43,56	2,78
25,00	11	36,92561	1,07	1,03	50,68	77,81	4,99	10,15	10,15	42,46	2,92
26,00	11	36,92561	1,07	1,02	50,58	78,10	5,00	10,11	10,11	42,37	2,86
27,00	11	36,92561	1,08	1,01	50,31	78,97	5,03	10,00	10,00	42,12	2,88
10,00	5	31,51977	1,16	0,87	46,60	78,29	2,60	17,92	17,92	41,95	3,36
11,00	5	31,51977	1,16	0,87	46,60	78,29	2,60	17,92	17,92	41,95	
12,00	5	31,51977	1,16	0,87	46,43	78,82	2,61	17,80	17,80	41,79	3,521
13,00	8	31,29771	1,17	0,86	46,18	79,02	4,07	11,34	11,34	39,57	3,661
14,00	8	31,29771	1,16	0,86	46,32	78,58	4,06	11,40	11,40	39,70	3,689
15,00	8	31,29771	1,17	0,86	46,21	78,92	4,07	11,35	11,35	39,60	3,64
16,00	11	31,48103	1,17	0,85	46,08	79,76	5,46	8,44	8,44	38,23	3,85
17,00	11	31,48103	1,17	0,85	45,99	80,05	5,47	8,41	8,41	38,15	3,689
18,00	11	31,48103	1,17	0,85	46,01	79,98	5,46	8,42	8,42	38,17	3,717
1,00	5	25,20961	1,25	0,74	42,48	76,93	2,80	15,17	15,17	37,93	4,51
2,00	5	25,20961	1,24	0,74	42,65	76,38	2,79	15,28	15,28	38,10	4,872
3,00	5	25,20961	1,25	0,73	42,20	77,81	2,81	15,00	15,00	37,66	4,823
4,00	8	25,5327	1,26	0,72	41,90	79,69	4,40	9,53	9,53	35,60	5,04
Rachado	8	25,5327	1,26	0,72	41,90	79,69	4,40	9,53	9,53	35,60	
6,00	8	25,5327	1,25	0,73	42,07	79,13	4,38	9,60	9,60	35,76	5,236
Rachado	11	25,51822	1,24	0,74	42,51	77,93	5,82	7,31	7,31	35,03	
8,00	11	25,51822	1,25	0,73	42,14	79,13	5,86	7,20	7,20	34,69	5,6
9,00	11	25,51822	1,25	0,74	42,44	78,16	5,83	7,29	7,29	34,96	5,45

**APÊNDICE C – DADOS DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS À
ENSAIOS DE DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM**

Tabela C 1 – Dados gerais dos corpos de provas de durabilidade no 12º ciclo

12º CICLO										
CP	% cal	Teor de umidade	yd seco	e	porosd.	grau satu.	Lv (%)	Poros./Lv	Fator:	0,11
									η/Lv	Perda de massa Acumulada
J13	5	0,3528	1,06	1,05	51	0,73	2,38	21,50	46,5	3,08%
J15	8	0,3556	1,06	1,05	51	0,74	3,70	13,84	44,3	1,42%
J18	11	0,36	1,06	1,05	51	0,75	4,95	10,33	42,9	1,14%
J7	5	0,30	1,15	0,89	47	0,75	2,58	18,19	42,3	1,36%
J10	8	0,318	1,14	0,89	47	0,77	4,00	11,80	40,5	0,78%
J12	11	0,3082	1,15	0,88	47	0,75	5,37	8,74	39,0	0,40%
J1	5	0,243	1,24	0,75	43	0,70	2,78	15,46	38,4	0,43%
J3	8	0,2465	1,25	0,74	42	0,73	4,36	9,71	36,0	0,44%
J6	11	0,24	1,23	0,76	43	0,69	5,77	7,46	35,5	0,27%

Tabela C 2 – Dados gerais dos corpos de provas de durabilidade no 9º ciclo

9º CICLO										
CP	% cal	Teor de umidade	yd seco	e	porosd.	grau satu.	Lv (%)	Poros./Lv	Fator:	0,11
									η/Lv	Perda de massa
J13	5	0,3528	1,06	1,05	51	0,73	2,38	21,50	46,5	2,57%
J15	8	0,3556	1,06	1,05	51	0,74	3,70	13,84	44,3	1,18%
J18	11	0,36	1,06	1,05	51	0,75	4,95	10,33	42,9	0,97%
J7	5	0,30	1,15	0,89	47	0,75	2,58	18,19	42,3	1,05%
J10	8	0,318	1,14	0,89	47	0,77	4,00	11,80	40,5	0,65%
J12	11	0,3082	1,15	0,88	47	0,75	5,37	8,74	39,0	0,26%
J1	5	0,243	1,24	0,75	43	0,70	2,78	15,46	38,4	0,35%
J3	8	0,2465	1,25	0,74	42	0,73	4,36	9,71	36,0	0,31%
J6	11	0,24	1,23	0,76	43	0,69	5,77	7,46	35,5	0,23%

Tabela C 3 – Dados gerais dos corpos de provas de durabilidade no 6º ciclo

6º CICLO											
CP	% cal	Teor de umidade	yd seco	e	porosd.	grau satu.	Lv (%)	Poros./Lv	Fator: 0,11		
									η/Lv	Perda de massa	
J13	5	0,3528	1,06	1,05	51	0,73	2,38	21,50	46,5	1,98%	
J15	8	0,3556	1,06	1,05	51	0,74	3,70	13,84	44,3	0,94%	
J18	11	0,36	1,06	1,05	51	0,75	4,95	10,33	42,9	0,77%	
J7	5	0,30	1,15	0,89	47	0,75	2,58	18,19	42,3	0,84%	
J10	8	0,318	1,14	0,89	47	0,77	4,00	11,80	40,5	0,44%	
J12	11	0,3082	1,15	0,88	47	0,75	5,37	8,74	39,0	0,17%	
J1	5	0,243	1,24	0,75	43	0,70	2,78	15,46	38,4	0,23%	
J3	8	0,2465	1,25	0,74	42	0,73	4,36	9,71	36,0	0,22%	
J6	11	0,24	1,23	0,76	43	0,69	5,77	7,46	35,5	0,17%	

Tabela C 4 – Dados gerais dos corpos de provas de durabilidade no 3ºciclo

3º CICLO											
CP	% cal	Teor de umidade	yd seco	e	porosd.	grau satu.	Lv (%)	Poros./Lv	Fator: 0,11		
									$\eta/Lv^{0,11}$	Perda de massa	
J13	5	0,3528	1,06	1,05	51	0,73	2,38	21,50	46,5	0,96%	
J15	8	0,3556	1,06	1,05	51	0,74	3,70	13,84	44,3	0,44%	
J18	11	0,36	1,06	1,05	51	0,75	4,95	10,33	42,9	0,43%	
J7	5	0,30	1,15	0,89	47	0,75	2,58	18,19	42,3	0,51%	
J10	8	0,318	1,14	0,89	47	0,77	4,00	11,80	40,5	0,24%	
J12	11	0,3082	1,15	0,88	47	0,75	5,37	8,74	39,0	0,10%	
J1	5	0,243	1,24	0,75	43	0,70	2,78	15,46	38,4	0,17%	
J3	8	0,2465	1,25	0,74	42	0,73	4,36	9,71	36,0	0,15%	
J6	11	0,24	1,23	0,76	43	0,69	5,77	7,46	35,5	0,12%	