

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

**Influência da Temperatura de Cura no Comportamento Mecânico
de Misturas Areia-Cinza Volante-Cal**

Porto Alegre
2013

CARINA SILVANI

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS AREIA-
CINZA VOLANTE-CAL**

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

Porto Alegre
2013

CARINA SILVANI

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS AREIA-
CINZA VOLANTE-CAL**

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, 04 de Março de 2013

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

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Pedro Domingos Marques Prietto (UPF)
D.Sc. pelo PPGEC-UFRGS

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

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

Dedico este trabalho meu namorado Marcos e a meus pais
pela compreensão durante o período de seu desenvolvimento
e por acreditarem que eu seria capaz.

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar os meus agradecimentos as seguintes pessoas e instituições: Primeiramente a minha família, meus pais Jacir e Justina e minha irmã pelo amor, incentivo e apoio incondicional dispensado em todos os momentos da minha vida. Ao meu namorado Marcos, por nunca me deixar desistir e por sempre estar do meu lado nas horas boas e ruins da minha vida.

Ao meu orientador Nilo Cesar Consoli pela confiança que depositou em mim, dedicação, amizade e empenho com que me orientou além do exemplo de caráter e profissionalismo. Aos professores Antônio Thomé, Pedro Prietto, Francisco Dalla Rosa, Lucas Festugato e Adriana Silveira pelo interesse, incentivo, amizade e conhecimentos transmitidos.

A todos os meus queridos colegas do LEGG/ENVIRONGEO. Muito obrigado pela troca de ideias, (relacionadas ou não com a pesquisa), pela ajuda na realização dos ensaios e pelas dicas de como executá-los com mais precisão, pelas risadas e pela amizade. Obrigado por nos dias mais triste me fazerem ver que havia esperança, mesmo tendo que refazer uma batelada de ensaios.

Em especial, agradeço aos bolsistas Guilherme Masuero e Eduardo Braun por me ajudarem a executar os corpos de prova e por me fazerem rir! Sem vocês eu não teria terminado os ensaios.

À colega Daniela Rosa, que juntamente com os bolsistas acima citados me ajudaram a desmontar e remontar o triaxial varias vezes, iniciar vários ensaios e não terminar nenhum. Valeu agora conhecemos como ele funciona, somente falta fazer funcionar.

Aos colegas do mestrado pelo apoio, a amizade e por compartilhar minhas aflições se não pessoalmente, via internet. A minha colega de apartamento e Maiga Dias por dividir contas, aflições e brigadeiros comigo.

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

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

À Companhia Tractebel Energia SUEZ pela disponibilização da cinza volante da Usina Termelétrica de Charqueadas. A CAPES pelo auxílio proporcionado com a bolsa de estudos que possibilitou minha total dedicação aos estudos e ao desenvolvimento desta pesquisa.

Lute com determinação, abrace a vida com paixão, perca a classe e vença com ousadia, por que o mundo pertence a quem se atreve e a vida é muito para ser insignificante.

Charles Chaplin

RESUMO

SILVANI, C. **Influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas areia-cinza volante-cal**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O solo é base de praticamente todas as obras de Engenharia Civil e em algumas situações não apresenta condições de suportar o carregamento imposto, tal problema pode ser solucionado com técnicas de estabilização. A estabilização com cal é uma técnica clássica porém não apresenta um método racional de dosagem. Entretanto este quadro vem alterando-se por meio de pesquisas que buscam utilizar o coeficiente porosidade/teor volumétrico de cal para dosar solo-cal. Assim, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a influência do coeficiente $\eta/(L_{iv})$ na variação de resistência à compressão simples e à tração na compressão diametral de misturas solo- cinza volante-cal para diferentes temperaturas, devido a natureza endotérmica das reações de hidratação da cal. Para isso foram realizados ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral em corpos de prova com 3, 5 e 7 % de cal (em peso), com peso específica aparente seca de 14, 15 e 16 kN/m³, curados a 20, 27, 35 e 50°C por 28 dias e com 25% de cinza volante. Os resultados encontrados demonstram que ambas as resistências estudadas aumentam linearmente com o aumento da quantidade de cal e exponencialmente com a redução da porosidade. A relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado por um coeficiente $[\eta/(L_{iv})^{0,3}]$ mostrou-se adequada na previsão da resistência a tração e compressão para todas as temperaturas estudadas. A temperatura mostrou ter grande influência em ambas as resistências estudadas, sendo que até uma dada temperatura, representada por 35°C para tração e 27°C para compressão, a relação $\frac{q}{\left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}}\right]^{-3}}$ com a temperatura é linear, após esta temperatura torna-se uma assíntota. A razão entre a resistência a tração e a compressão foi de 0,18, 0,14, 0,20 e 0,19 para as temperaturas de 20, 27, 35 e 50°C, respectivamente.

Palavras-chave: solo-cinza-cal; relação porosidade /teor volumétrico de cal; temperatura.

ABSTRACT

SILVANI, C. **Influence of Curing Temperature in the Mechanical Behavior of Sand- Fly Ash-Lime Mixtures** 2013. M.Sc. Dissertation – Department of Civil Engineering, UFRGS, PortoAlegre.S.,

Soil is the base of most civil engineering constructions, and when it cannot support the construction loads, such problem can be solved through the use of soil stabilization technique. Lime stabilization is a classical technique, but there are still no dosage methods of these mixtures based on more rational criteria. This situation has been changed with researches using the porosity/lime ratio to dose soil-lime. Thereby this research aims to evaluate the influence of the quotient $\eta/(L_{iv})$ in the assessment of splitting tensile and unconfined compressive strength at different temperatures, due to the endothermic nature of the reactions of lime hydration. For this research splitting tensile tests and unconfined compression tests were carried out with cylindrical specimens with diameter and height equal to 50 and 100mm, respectively, with lime contents varying from 3% to 7%, dry unit weight ranging from 14kN/m³ to 16kN/m³, time curing period of 28 days and fly ash content of 25%. The results show the unconfined compressive and the splitting tensile strength increasing linearly with the increase of lime amount and exponentially with the reduction of its porosity. The porosity/lime ratio, defined as the ratio of the compacted mixture porosity and the lime volumetric content, adjusted by an exponent, proves to be an appropriate parameter to estimate the unconfined compressive and the splitting tensile strength of the soil-fly ash-lime studied. The temperature has influence in both resistances studied. For a given curing time period, the relation $\frac{q}{\left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}}\right]^{-3}}$ versus T is shown to vary linearly up to a threshold, 35°C for the splitting tensile strength and 27°C for the unconfined compressive strength, when becomes an asymptote. Finally, the q_t/q_u relationship is not unique for the mixture studied, being 0,18, 0,14, 0,20 e 0,19 for the temperatures 20, 27, 35 e 50°C, respectively.

Key-words: soil-ash-lime; porosity/lime ratio; temperature.

Sumário

1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral.....	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.2.3	Organização da dissertação.....	17
2.	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	ESTABILIZAÇÃO COM CAL	19
2.2	ALTERAÇÕES DAS PROPRIEDADES DOS SOLOS COM A ADIÇÃO DE CAL	23
2.2.1	Granulometria	23
2.2.2	Limites de Atterberg	24
2.2.3	Características de Compactação	24
2.2.4	Resistência a Compressão.....	24
2.2.5	Resistência a Tração	26
2.2.6	Resistência ao Cisalhamento	27
2.3	DOSAGEM DA QUANTIDADE DE CAL POR MÉTODOS CLÁSSICOS.....	28
2.4	VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS SOLO-CINZA-CAL	29
2.4.1	Efeito da Cal	29
2.4.2	Efeito da Cinza.....	29
2.4.3	Efeito da peso específico seco e compactação.....	30
2.4.4	Efeito do tempo de cura	31
2.4.5	Efeito da temperatura de cura	32
2.4.6	Efeito da relação entre porosidade e teor volumétrico de cal	38
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	PROGRAMA DE PESQUISA	42
3.1.1	Experimento Principal	42
3.1.2	Experimento Secundário	44
3.2	MATERIAIS	45
3.2.1	Cal.....	45
3.2.2	Solo	46
3.2.3	Cinza Volante	47
3.2.4	Água.....	48
3.3	MÉTODOS DO EXPERIMENTO PRINCIPAL	49
3.3.1	Amostragem do Solo	49
3.3.2	Determinação do Teor Mínimo de Cal	50
3.3.3	Ensaio de Compactação	51

3.3.4 Definição das Variáveis	51
3.3.5 Preparação das Misturas, Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova para Ensaio de Tração e Ensaio a Compressão Simples	55
3.3.7 Resistência a Tração na Compressão Diametral	56
3.3.8 Ensaio de Compressão Simples.....	58
3.3.9 Medidas de Sucção	58
3.4 MÉTODOS DO EXPERIMENTO SECUNDÁRIO	61
4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	62
4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	62
4.1.1 Amostras curadas a 20°C	62
4.1.2. Amostras curadas a 27°C	64
4.1.3. Amostras curadas a 35°C	65
4.1.4. Amostras curadas a 50°C	68
4.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES	70
4.2.1 Amostras curadas a 20°C	71
4.2.2 Amostras curadas a 27°C	72
4.2.3 Amostras curadas a 35°C	73
4.2.4 Amostras curadas a 50°C	74
4.3MODOS DE RUPTURA DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES.....	79
4.3 MODO DE RUPTURA DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDO À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	80
4.5 MEDIDAS DE SUCCÃO MATRICIAL	80
4.6 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA	82
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	83
5.1 EFEITO DO TEOR DE CAL.....	83
5.2 EFEITO DA POROSIDADE	84
5.3 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMETRICO DE CAL	85
5.4 EFEITO TEMPERATURA DE CURA	90
5.5 RAZÃO TRAÇÃO/ COMPRESSÃO	93
5.6 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA	94
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
6.1 CONCLUSÕES.....	99
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mecanismo de flocculação do solo devido a troca catiônica.....	20
Figura 2- Mecanismos da estabilização solo-cal.	21
Figura 3- efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias.	25
Figura 4- Variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal das amostras com 20% de umidade.....	26
Figura 5-Variação da resistência a tração com o variação da porosidade.	27
Figura 6 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão.	31
Figura 7- Resistência a Compressão Simples para diferentes misturas de resíduo de rolagem de pedras preciosas, solo com características lateríticas e cal para diferentes temperaturas.	33
Figura 8- Gráfico RCS x Idade com teor de cal dolomítica de 6%.	34
Figura 9- Relação entre os dias de cura e a porcentagem de cal utilizada.	34
Figura 10- Difratoograma de raios X da mistura metacaulim/cal curada a 60°C por 60 meses.....	35
Figura 11- Resistência a Compressão Simples da mistura argila e cal curada a 20°C.	36
Figura 12- Resistência a Compressão Simples da mistura argila e cal curada a 50°C.	36
Figura 13- Difratoograma de Raios X da mistura contendo 20% e cal curada a 20°C.....	37
Figura 14- Difratoograma de Raios X da mistura contendo 20% e cal curada a 50°C.....	38
Figura 15– Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 28 dias de cura.	39
Figura 16– Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 90 dias de cura	40
Figura 17- Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura.	41
Figura 18- Fluxograma do experimento principal.	43
Figura 19 - Curva granulométrica da areia de Osório.	47
Figura 20- (a) Usina Termoelétrica de Charqueadas RS (b) Aspecto da cinza volante.	49
Figura 21- Curva Granulometrica da Cinza Volante.....	49
Figura 22- Determinação do teor mínimo de cal.	51
Figura 23-Curva de Compactação da Mistura.	52
Figura 24- Pesos Específicos investigados.	53
Figura 25- Corpo de prova moldado.....	55
Figura 26- Sistema de cura a temperatura de 35 e 50°C.(a)-Disposição dos equipamentos. (b)- Corpos de prova em processo de cura.	57
Figura 27- Ruptura típica do ensaio de tração na compressão diametral.	57
Figura 28- Ensaio de Tração na Compressão Diametral.	58
Figura 29- Ensaio de Compressão Simple.....	59
Figura 30- Amostras preparadas para o ensaio de sucção.	61
Figura 31- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 20°C.....	63
Figura 32- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à porosidade das amostras curadas a 20°C.	63
Figura 33-Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a tração na compressão diametral para os corpos de prova curados a 20°C.	64
Figura 34-Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 27 °C.....	65
Figura 35- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à porosidade das amostras curadas a 27°C	66

Figura 36-Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a tração na compressão diametral para os corpos de prova curados a 27°C.	66
Figura 37- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 35 °C.	67
Figura 38- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à porosidade das amostras curadas a 35 °C.	67
Figura 39-Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a tração na compressão diametral para os corpos de prova curados a 35°C	68
Figura 40- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 50 °C.	69
Figura 41- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à porosidade das amostras curadas a 50 °C.	69
Figura 42-Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a tração na compressão diametral para os corpos de prova curados a 50°C.	70
Figura 43- Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 20°C.	71
Figura 44- Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade dos corpos-de-prova s curadas a 20°C.	72
Figura 45- Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados a 20°C.	73
Figura 46- Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 27°C.	74
Figura 47- Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 27°C.	75
Figura 48- Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados a 27°C.	76
Figura 49- Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 35°C	76
Figura 50- Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras curadas a 35°C.	77
Figura 51- Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples para os corpos-de-prova curados 35°C.	77
Figura 52- Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 50°C	78
Figura 53- Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 50°C	78
Figura 54- Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados a 50°C	79
Figura 55-Corpos-de-prova submetidos à compressão simples (b) Plano de ruptura típico.	79
Figura 56- (a) Corpos-de-prova submetidos à tração por compressão diametral (b) Parte do corpo-de-prova.	80
Figura 57- Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras.	81
Figura 58- Avaliação do aumento da resistência a tração na compressão diametral com tempo de cura.	82
Figura 59- Mudança de resistência à tração por compressão diametral pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 20°C.	86
Figura 60- Mudança de resistência à tração por compressão diametral pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 27°C.	87
Figura 61- Mudança de resistência à tração por compressão diametral pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 35°C.	87

Figura 62-Mudança de resistência à tração por compressão diametral pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 50°C.	88
Figura 63-Mudança de resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 20°C.	88
Figura 64-Mudança de resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 27°C.	89
Figura 65-Mudança de resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 35°C.	89
Figura 66-Mudança de resistência a compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 50°C.	90
Figura 67- Mudança na resistência a tração na compressão diametral pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para todas a temperaturas.	91
Figura 68-Mudança na resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para todas a temperaturas.	92
Figura 69- Variação da resistência à tração por compressão diametral ajustada com a temperatura.	92
Figura 70-Variação da resistência à compressão simples ajustada com a temperatura.....	93
Figura 71-Mudanças na resistência à tração na compressão diametral e à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 20°C.....	94
Figura 72-Relação entre a resistência á tração por compressão diametral e à resistência a compressão simples para a temperatura 20°C.	95
Figura 73- Mudanças na resistência à tração na compressão diametral e à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 27°C.....	95
Figura 74-Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples para a temperatura 27°C.	96
Figura 75- Mudanças na resistência à tração na compressão diametral e à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 35°C.....	96
Figura 76-Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples para a temperatura 35°C.	97
Figura 77- Mudanças na resistência à tração na compressão diametral e à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 50°C	97
Figura 78-Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e à resistência a compressão simples para a temperatura 50°C.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Porcentagem de solo passante para um solo mole.....	23
Tabela 2 - Propriedades da cal.....	46
Tabela 3: Índices físicos da areia de Osório.....	48
Tabela 4-Granulometria da Cinza Volante.....	50
Tabela 5- Variáveis Investigadas no Programa Experimental.....	52
Tabela 6- Variáveis Fixadas no Programa Experimental	53
Tabela 7- Variáveis de Ruído no Programa Experimental:.....	54
Tabela 8- Saturação e sucção mátrica das amostras	81

LISTA DE ABREVIATURAS, SIMBOLOS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM: American Society for Testing and Materials

L_{iv} : teor de volumétrico de cal, expresso em porcentagem do volume total

C_u : coeficiente de uniformidade

D_{10} : diâmetro efetivo

e : base do logaritmo neperiano (2,7183)

e : índice de vazios

ENVIRONGEO: Laboratório de Resíduos, Novos Materiais e Geotecnia Ambiental

LEGG: Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

LL: limite de liquidez

LP: limite de plasticidade

NBR: Norma Brasileira

PCA: Portland Cement Association

q_u : resistência à compressão simples

q_t : resistência a tração na compressão diametral

S : grau de saturação de moldagem.

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

TRB: Transportation Research Board

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

γ_d : massa específica aparente seca

η : porosidade

ω : teor de umidade

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

R^2 : coeficiente de determinação

ϕ' : ângulo de atrito efetivo

L: teor de cal

η/L_{iv} :coeficiente porosidade/teor volumétrico de cal

T: Temperatura

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As obras de engenharia em sua totalidade são sustentadas pelo solo, porém este, em alguns casos, não apresenta as características necessárias. Usualmente os carregamentos das obras são transferidos ao solo sob a forma de cargas de compressão, entretanto materiais quando comprimidos na extremidade superior apresentam tração na face inferior.

Os solos naturais, em alguns casos, não apresentam resistência à tração e à compressão para suportar os carregamentos impostos, contudo esta propriedade pode ser melhorada com a adição de um agente cimentante, cal e cimento, que confere coesão à mistura.

A cal é utilizada desde a antiguidade, há exemplos encontrados ao sul da Itália, na Via Apia, entre a Posta Capena-Capua-Brindisi, construída no ano 312 a.C.. A cal interage com as partículas de argila por meio de reações endotérmicas, promovendo uma série de transformações de natureza físico-química que resultam em maior estabilidade, face à ação da água, e maior capacidade de suporte. Devido à natureza endotérmica das reações quanto maior a temperatura do meio mais rapidamente a melhoria das propriedades do solo ocorre.

Solos que não apresentam fração argilosa, ou que a possuem em quantidade baixa, não apresentam melhoras significativas com adição de cal. Nestes solos a cal deve ser utilizada em associação com adições reativas (argilas, cinza volante, pó de pedra) para que sejam conseguidas as melhoras esperadas. O uso de cinza volante, material muito reativo, favorece o ganho de resistência e ainda incorpora a variável sustentável, por se tratar-se de um resíduo.

O estudo da aplicação da cal no aumento da resistência a tração e à compressão solos, para pavimentação e fundações superficiais, tem sido realizados em diversas pesquisas, demonstrando sua eficiência no aumento da capacidade de suporte e na redução de recalques.

A dosagem solo-cal tradicionalmente baseia-se em técnicas empíricas simples incapazes de prever o comportamento do material bem como otimizar seu custo benefício. Este cenário está modificando-se com pesquisas recentes (LOPES JUNIOR, 2007; DALLA ROSA, 2009; LOPES JUNIOR, 2011) que estabeleceram relações racionais entre o coeficiente porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples da mistura.

Um dos motivos da não aplicação de cal como aglomerante em obras deve-se a lentidão das reações pozolânicas responsáveis pelo aumento da resistência, como estas reações são

endotérmica o aumento da temperatura favorece a agilização do ganho de resistência viabilizando assim obras com períodos de cura mais curtos.

Neste contexto, o presente trabalho visa avaliar influencia da temperatura na aplicabilidade do coeficiente porosidade/teor volumétrico de cal na previsão do comportamento da mistura solo cal à compressão e à tração.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar influencia da temperatura na aplicabilidade do coeficiente porosidade/teor volumétrico de cal na previsão do comportamento da mistura solo-cal à tração e à compressão.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Obter a influência da temperatura de cura nas oscilações da resistência à tração na compressão diametral e da resistência à compressão simples quando a variação do teor de cal;
- Avaliar os efeitos da temperatura nas mudanças da resistência à tração na compressão diametral e da resistência à compressão simples mediante a variação da porosidade.
- Investigar a aplicabilidade da relação porosidade/ teor volumétrico de cal na previsão da resistência à tração e à compressão da mistura solo-cinza volante- cal curadas a diferentes temperaturas.
- Determinar a relação entre a resistência à compressão e à tração de misturas areia, cinza e cal;
- Analisar a influência da temperatura a vários tempos de cura.

1.2.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos. O capítulo 1, denominado introdução, apresenta a problemática e a justificativa para a realização da pesquisa, juntamente com os objetivos gerais e específicos.

O capítulo 2 constitui-se de uma revisão da literatura que aborda os princípios de estabilização solo cal, a influência da temperatura de cura no ganho de resistência, os métodos de dosagem clássicos de solo-cal e os métodos baseados no coeficiente porosidade/teor volumétrico de cal para dimensionamento de misturas solo-cal à compressão e à tração.

O capítulo 3 contempla a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa e a descrição detalhada dos procedimentos adotados.

O capítulo 4 apresenta os resultados do programa experimental com uma análise inicial dos mesmos. Os resultados são discutidos detalhadamente e comparados com dados da literatura no capítulo 5.

Por fim, a dissertação é encerrada com o capítulo 6 onde são exibidas as conclusões, obtidas a partir da análise dos dados. Nesta seção são expostas também sugestões para pesquisas futuras em áreas que não foram totalmente esclarecidas pela presente pesquisa.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Estabilização de solos é a denominação normalmente utilizada para misturas de solo e aditivo que desenvolvem elevadas resistências (especialmente à tração) e que apresentam grande durabilidade. Já melhoramento de solos se refere àquelas misturas que, devido ao pequeno teor de estabilizante, não desenvolvem resistências elevadas, mas experimentam melhorias em outras propriedades, tais como plasticidade e potencial de expansão/contração.

2.1 ESTABILIZAÇÃO COM CAL

A cal tem pouco efeito em solos altamente orgânicos e também em solos com pouca ou nenhuma quantidade de argila. É mais eficiente em solos argilosos, podendo ser mais efetiva que o cimento em pedregulhos argilosos (INGLES; METCALF, 1972).

Segundo Daimond e Kinter (1972) alguns tipos de reações químicas ocorrem quando a cal é misturada com solos de granulometria fina. Estas reações podem ser classificadas em dois estágios relativamente bem definidos: um processo rápido (minutos a dias, podendo atingir meses), na qual há uma melhora na plasticidade do material, mas é desenvolvida pouca resistência permanente; e um processo lento (semanas a anos) de desenvolvimento de resistência, com a formação de produtos cimentantes.

As reações necessitam de e água para que tenham início. O primeiro evento é a dissociação da molécula de hidróxido de cálcio segundo as seguintes reações:



Após a dissipação da cal o meio fica com uma grande quantidade Ca^{++} e Ca(OH)^+ livre o que desencadeia o processo de troca catiônica. A troca catiônica é a permutação dos cátions Na^+ , K^+ , Ca^{++} e Mg^{++} existentes na superfície das partículas, pelo Ca^{++} da cal. Segundo Grim (1953), assumindo igual concentração, a ordem de adsorção preferencial de cátions comuns associados é dada pela seguinte série: $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{++} < \text{Mg}^{++}$. Cátions da direita tendem a substituir cátions da esquerda e cátions monovalentes são geralmente substituídos por cátions multivalentes. A

adsorção de cátions adicionais resulta da aglomeração das partículas de argilas (floculação). O efeito dessas duas reações pode ser observado inclusive visualmente, pois solos argilosos tornam-se mais friáveis (HERRIN & MITCHELL, 1961). A Figura 1 ilustra o processo de floculação do solo, este processo ocorre rapidamente, porem somente melhora as características de trabalhabilidade do solo.

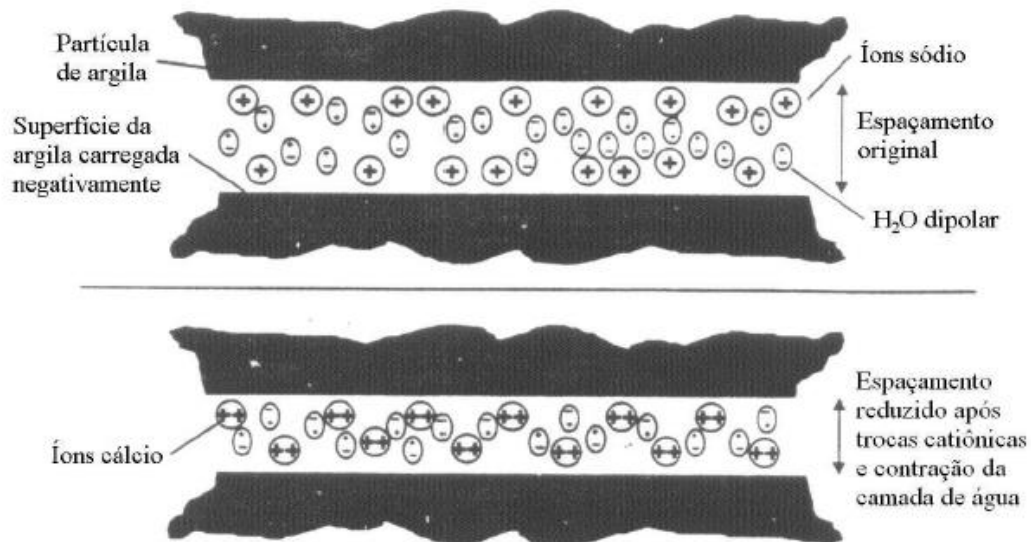


Figura 1- Mecanismo de floculação do solo devido a troca catiônica.

(Fonte: PRUSINSKI e BHATTACHARJA, 1999).

As reações capazes de aumentar a resistência são as que se processam lentamente e são denominadas reações pozolânicas. As reações pozolânicas ocorrem com materiais que contém sílica e alumina e que, estando finamente divididos em presença de água, reagem com a cal. Para que ocorram as reações pozolânicas, é necessário que a sílica e a alumina sejam solubilizadas. Alexander et al. (1954 apud MALLMANN, 1996) realizaram estudos da solubilidade da sílica amorfa e verificaram que a mesma ocorre a valores de pH maiores que 11. Não só a sílica, mas também a alumina, tem sua solubilidade aumentada em valores altos de pH (TRB, 1987).

Inglês e Metcalf (1972) explicaram que os efeitos da estabilização dependem do ataque de um produto químico como a cal, junto a um argilo-mineral do solo para formar uma mistura cimentante. As reações pozolânicas, responsáveis pelo efetivo aumento de resistência da mistura, iniciam com o aumento do pH pela hidroxila disponibilizada pela cal, que permite a dissolução da sílica e alumina do solo, criando géis de silicato. Ainda, afirmam que os géis de silicato resultantes da reação imediatamente cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios. Os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio

bem definidos. Esta reação só ocorre em presença de água, que tem a função de carregar os íons cálcio e hidroxila para a superfície da argila. Este mecanismo é mostrado na Figura 2.

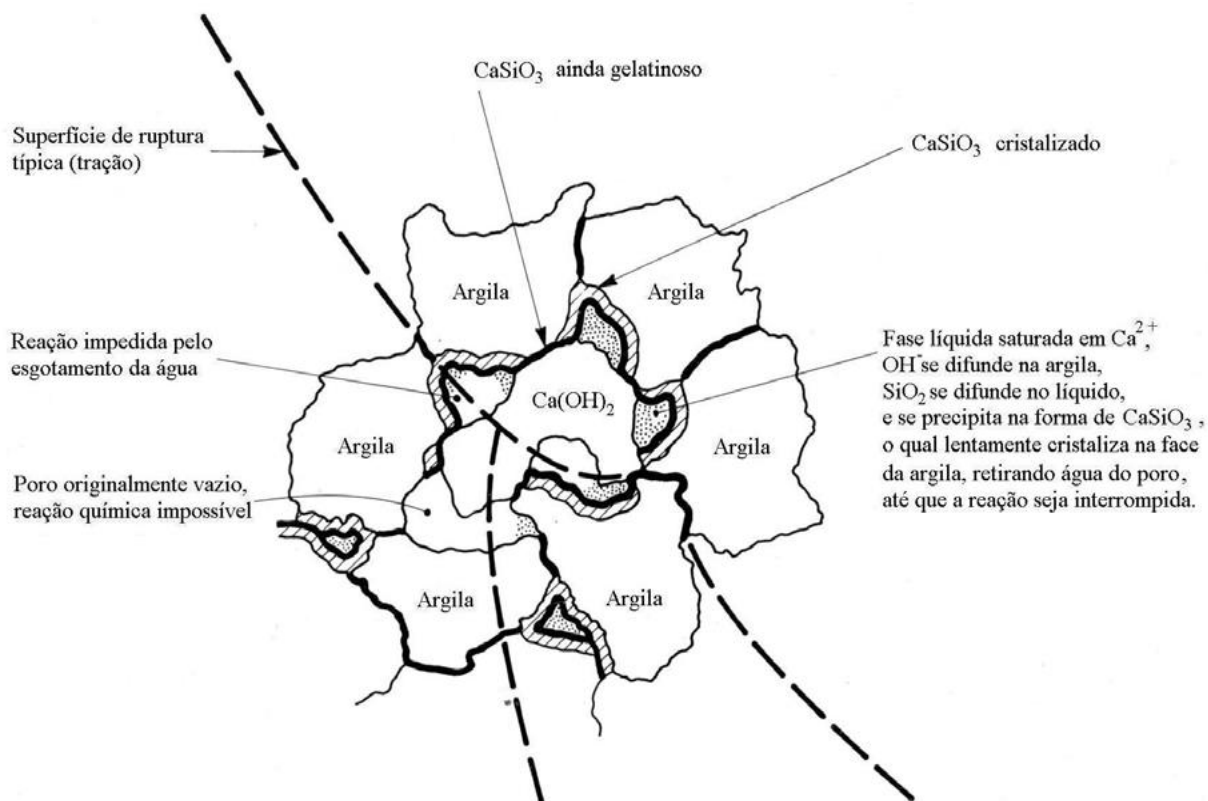
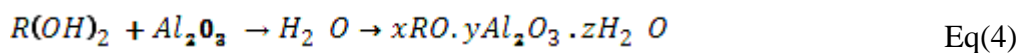
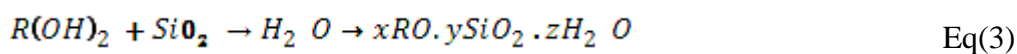


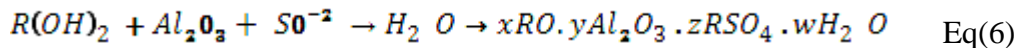
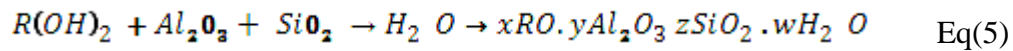
Figura 2- Mecanismos da estabilização solo-cal.

(Adaptado de: INGLES E METCALF, 1972)

Uma forma de potencializar a estabilização com a cal, quando o solo não possui argila suficiente ou esta não é suficientemente reativa, é através da substituição do solo por materiais pozolânicos, como a cinza volante de carvão mineral e a cinza da casca de arroz, entre outros. De acordo com Pinto (1971 *apud* THOMÉ, 1994), o uso de cinza volante misturada com cal, para estabilização de solos arenosos iniciou na década de 40 nos Estados Unidos, onde parte de uma auto-estrada de New Jersey foi executada com este tipo de mistura.

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





Onde: R representa os íons Ca⁺⁺ ou Mg⁺⁺, ou ainda, uma combinação entre eles.

Obviamente, as reações descritas anteriormente estão resumidas. As reações químicas entre a cal e as cinzas volantes ou pesadas são muito complexas, não somente pelo número de reações possíveis, mas também porque há uma grande variedade de produtos nestas reações. Além disso, existem muitas reações que podem não ocorrer à temperatura ambiente (MATEOS, 1964)

Minnick (1967) sugere que os principais compostos cimentantes formados em misturas contendo cal e cinza são, provavelmente, membros da família da tobermorita (silicato de cálcio hidratado) e, possivelmente, da etringita (sulfato de cálcio e alumínio hidratado), que é nocivo por ser potencialmente expansivo.

A cal, também, é capaz de reagir com dióxido de carbono (CO₂) existente no ar. O dióxido de carbono reage com o hidróxido de cálcio [Ca (OH)₂] da cal e forma o carbonato de cálcio (CaCO₃). Estes carbonatos são cimentos fracos e detêm as reações pozolânicas, sendo, portanto, indesejáveis (HARTY; THOMPSON, 1973).

O estudo de Dalla Rosa (2009), para um solo residual da formação arenito Botucatu, cinza volante e cal, encontrou ganho de resistência maior para solo-cinza-cal do que para solo-cal.

Behak (2007) estudou a adição de cal e cinza de casca de arroz em solo sedimentar arenoso e constatou a produção de um material significativamente mais resistente e durável e menos deformável que o solo natural.

2.2 ALTERAÇÕES DAS PROPRIEDADES DOS SOLOS COM A ADIÇÃO DE CAL

As propriedades físicas de um solo são afetadas pelas reações químicas que ocorrem quando se adiciona cal ao mesmo. Em geral, os solos finos apresentam redução na plasticidade, melhoria na trabalhabilidade e maior estabilidade volumétrica quando são tratados com cal, porém nem todos os solos apresentam ganhos de resistência e de durabilidade. O tipo de solo, tipo de cal, a percentagem usada e o tempo de cura, são algumas variáveis importantes que influem no comportamento dos solos tratados com cal. Serão resumidas, a seguir, algumas alterações das propriedades físicas do solo.

2.2.1 Granulometria

Devido ao fenômeno de floculação, que ocorre imediatamente após a adição da cal ao solo, um aumento do diâmetro dos aglomerados dos grãos do solo é esperado. Metcalf, 1960 *apud* Ingles e Metcalf, 1972 encontrou para um solo mole percentagem retidas maiores depois da adição de cal, que na caracterização do solo natural como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1: Porcentagem de solo retidas para um solo mole

Peneiras(mm)	Porcentagem de solo retido	
	Não tratado	Tratado com 5% de cal
50,8	80	83
25,4	40	50
12,7	17	28
6,35	7	19
3,17	4	15

(Adaptado de: INGLES E METCALF,1972)

Os resultados de Argelim (2005), para um solo laterítico, mostram que a mesma tendência pois mesmo com o uso de defloculante, a percentagem passante em todas as peneiras das misturas solo-cal foi menor que a percentagem passante do solo natural. Isso indica que o defloculante não é suficientemente capaz de separar todas as partículas da cal aderidas à superfície das partículas do solo.

2.2.2 Limites de Atterberg

Nos solos muito expansivos e de alta plasticidade, a cal diminui o limite de liquidez e aumenta o limite de plasticidade, resultando em um decréscimo no índice de plasticidade. Solos de baixa plasticidade e pouco expansivos, apresentam um aumento no limite de liquidez e também acréscimos no limite de plasticidade quando misturados com cal. O limite de contração sempre aumenta com adição da cal aos solos (HERRIN; MITCHELL, 1961).

Guimarães (1998) afirma que a adição de cal em argilas com ou sem cátions trocáveis aumenta o índice de plasticidade, tornando o solo portador de minerais com esse predicado mais facilmente adaptado a trabalhos e construções, pelo efeito aglomerante da troca iônica.

Angelin (2005) estudou a adição de cal a um solo fino laterítico e concluiu que a adição de cal hidratada diminuiu os índices de plasticidade em relação ao do solo natural, sendo mais acentuada a redução nas situações em que a cal foi adicionada diluída na água de compactação. O limite de liquidez foi mais influenciado que o de plasticidade pela adição da cal hidratada ao solo, reduzindo seu valor de 48 para um valor médio de 39.

2.2.3 Características de Compactação

Quando compactadas com o mesmo esforço, as amostras solo-cal têm pesos específicos secos mais baixos que a amostra de solo puro. Se a quantidade de cal da mistura cresce, o peso específico seco decresce mais. A umidade ótima cresce com a adição de cal ao solo e com o aumento da percentagem de cal usada na mistura (HERRIN; MITCHELL, 1961).

Os resultados da peso específico seco máximo para as amostras de solo estabilizadas com cal foram inferiores ao da densidade obtida com o solo natural (sem cal). Atribui-se este comportamento ao maior teor de umidade para a obtenção da respectiva massa específica seca máxima das amostras de solo-cal e às partículas de cal, que substituem uma parcela dos grãos do solo de massa específica superior (ANGELIN, 2005).

2.2.4 Resistência a Compressão

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

(Figura 3). Estudos mais recentes (DALLA ROSA, 2006, LOPES JUNIOR 2007) mostram que para períodos de cura maiores o aumento do teor de cal aumenta a resistência linearmente. Os resultados apresentados por Ingles e Metcalf provavelmente divergem por trabalharem com tempos de cura baixos onde não há reações pozolânicas.

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

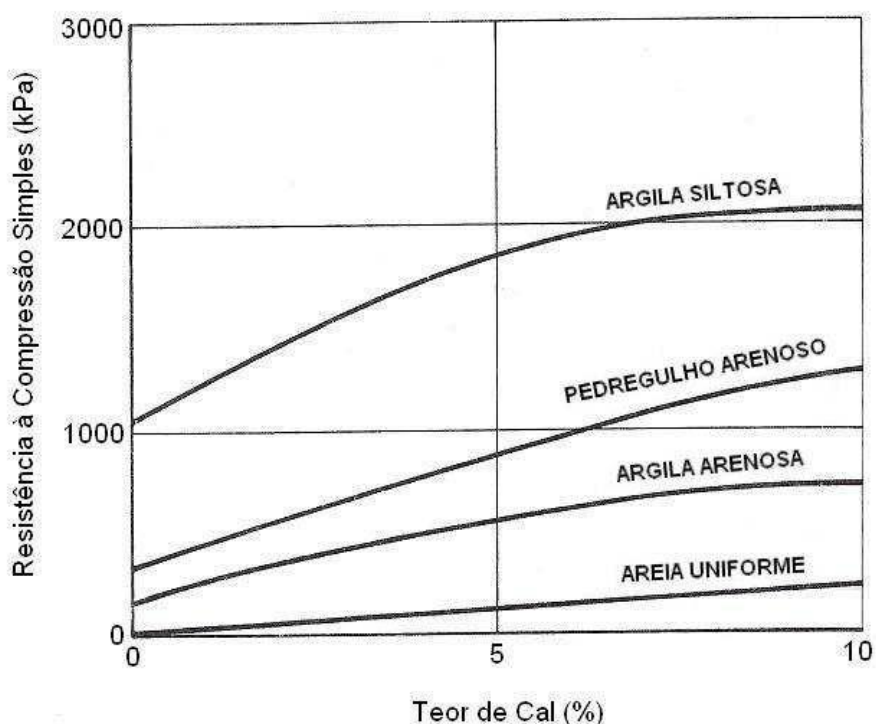


Figura 3- efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias.

(Adaptado: INGLÊS e METCALF, 1972)

O fenômeno que garante resistência a compressão são as reações pozolânicas pois Segundo Chu et al.(1955), citados por Carraro (1995), a resistência a compressão simples de misturas de solo, cinza e cal devida a carbonatação é insignificante.

2.2.5 Resistência a Tração

Cargas de tração em pavimentos podem ser oriundas de tensões de tração na base da placa carregada ou por tensões de natureza térmica.

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

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

Consoli *et al.* (2012) em trabalho realizado com mistura de caulim com 3%, 5%, 7% e 9% de cal com 20% umidade demonstrou que a resistência à tração aumenta linearmente com o aumento do teor de cal e a taxa de ganho da resistência à tração aumenta com o aumento da massa específica aparente seca do solo compactado, tal fato pode ser observado na Figura 4.

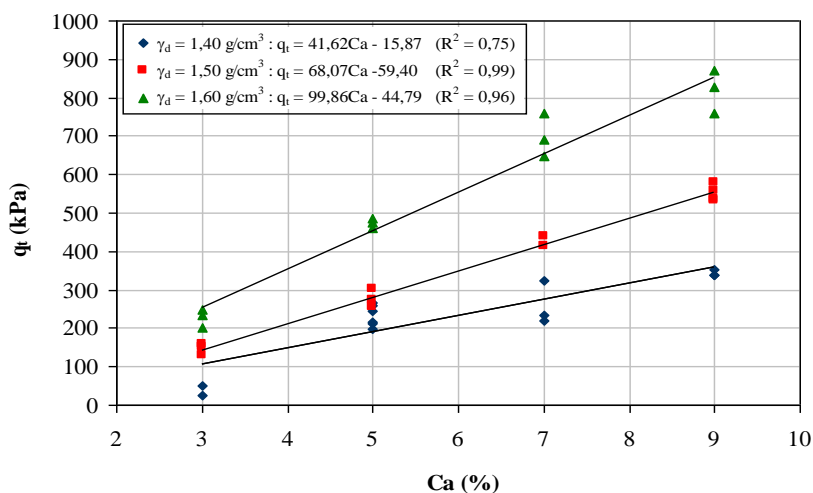


Figura 4- Variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal das amostras com 20% de umidade.

Fonte: (CONSOLI *et al.*, 2012)

Isso ocorre devido a uma maior efetividade da compactação das amostras com maior massa específica aparente seca, promovendo uma maior “união” das partículas de solo-cal.

Consoli *et al.* (2012) observaram ainda que a redução da porosidade da mistura compactada promove o aumento da resistência à tração do solo-cal. Independente do teor de cal utilizado, a redução da porosidade promove ganhos na resistência à tração das amostras. Foi observado também que a resistência à tração aumenta exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada, o que indica que a diminuição na porosidade promove um maior intertravamento entre as partículas, uma melhor cimentação e, conseqüentemente, um aumento na resistência, como pode ser verificado na figura 5. Os resultados obtidos para a resistência à tração nesta pesquisa correspondem a aproximadamente 15% da resistência à compressão simples obtida por Dalla Rosa (2009) para as mesmas misturas.

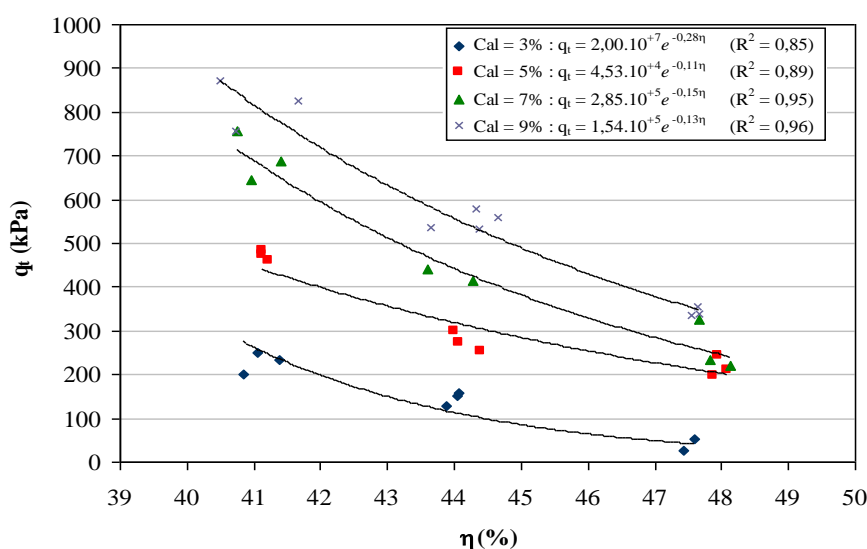


Figura 5-Variação da resistência a tração com o variação da porosidade.

Fonte: (CONSOLI *et al.*,2012)

2.2.6 Resistência ao Cisalhamento

O principal efeito na resistência ao cisalhamento de um solo fino reativo é o de produzir um substancial aumento da coesão; sendo o aumento do ângulo de atrito bem menos expressivo.

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

Consoli et al (2001), ao verificar o comportamento de um solo silte-arenoso tratado com 4% de cal de carbureto, observaram um acréscimo na coesão de 10kN/m² para 42kN/m² e um acréscimo no ângulo de atrito de 35° para 38°, em relação ao solo natural.

2.3 DOSAGEM DA QUANTIDADE DE CAL POR MÉTODOS CLÁSSICOS

A dosagem visa selecionar a quantidade de cal a ser adicionada ao solo que fornecerá a resistência e a durabilidade adequadas ao uso que o material se destina. O procedimento de dosagem é feito através de baterias de testes de laboratório (INGLES e METCALF, 1972). Os métodos mais conhecidos e utilizados são:

- I. Método do pH (EADES e GRIM, 1966) – consiste na determinação do teor mínimo de cal que produza um aumento no valor de pH para 12,4.
- II. Método do ICL (Initial Consumption of Lime) – proposto por Rogers *et al* (1997), é uma variação do método do pH, onde o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor constante (máximo);
- III. Método do Lime Fixation Point (Hilt & Davidson, 1960) – baseado no limite de plasticidade, que determina o teor de cal máximo que proporciona melhoria na trabalhabilidade, sem ganhos significativos de resistência;
- IV. Método de Thompson (1966) – que define como reativo um solo que apresente um aumento de resistência à compressão simples de pelo menos 345 kPa quando estabilizado com cal.

Analisando os métodos citados a cima pode-se concluir que a dosagem pelos métodos I, II e III, dá-se pela análise de parâmetros secundários, trabalhabilidade e pH, não permitindo assim a análise da quantidade de cal necessária para que a resistência e durabilidade pretendida sejam alcançadas.

Outro problema encontrado nos métodos citados é sua não adequação a uso em solos tropicais que apresentam evolução pedológica diferenciada de solos de regiões subtropicais. Nuñez (1991), que estudou solo residual de arenito com baixa quantidade de finos e Thomé (1994) que analisou um solo classificado como Gley Húmico não encontraram concordância entre a dosagem de cal que resultou máxima resistência à compressão simples e a quantidade de cal calculado pelo método I.

2.4 VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS SOLO-CINZA-CAL

A adição de cal e de cinza volante em um solo altera suas propriedades. Os parâmetros que controlam a mudança sofrida pelos solos serão detalhados a seguir.

2.4.1 Efeito da Cal

Quando pequenas quantidades de cal são adicionadas ao solo somente ocorrem reações rápidas, logo há apenas ganhos na trabalhabilidade do solo. Quantidade de cal maior permite ganhos de resistência consideráveis devido às reações pozolônicas. (INGLES e METCALF, 1972).

Guimarães (1998) afirma que, de modo geral, a cal afeta favoravelmente certas propriedades dos solos, o que se reflete em variações das características físicas seguintes: granulometria, plasticidade, contração e retração, umidade de campo, peso específico seco, trabalhabilidade, desintegração, compactação, resistência e condutividade hidráulica.

Porém solos arenosos sem fração fina, como o caso do material estudado, não apresentam reações secundárias não aumentando consideravelmente sua resistência somente com a adição de cal. A adição concomitante de cinza volante e cal ao solo permite que ocorram reações pozolônicas em solos arenosos pois disponibiliza sílica amorfa. Consoli *et al* (2001), ao estudarem um solo arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, verificaram que para uma mesma tensão confinante, o aumento da quantidade de cal provoca aumento da resistência de pico e diminuição da deformação na qual o pico é atingido.

2.4.2 Efeito da Cinza

A adição concomitante de cinza volante e cal ao solo permite que ocorram reações pozolônicas em solos arenosos, pois disponibiliza sílica amorfa. Dalla Rosa (2009), para um solo arenoso com baixo teor de finos encontrou valores de resistência consideravelmente maiores em amostra executadas em solos-cinza-cal que em amostra de solo-cal.

Kaniraj & Havanagi (1996) argumentam que, à medida que o teor de cinza volante presente aumenta, em misturas contendo solo, cinza volante e cal hidratada, observa-se uma redução do

máximo peso específico aparente seco e um aumento da umidade ótima, fixado um determinado esforço de compactação.

Os mesmos autores acrescentam que o aumento da quantidade de cinza volante presente implica também na redução do peso específico real dos grãos das misturas. Além disso, amostras compactadas nas condições de umidade ótima e máximo peso específico aparente seco, para um específico esforço de compactação, apresentam aumento da porosidade e do índice de vazios, em teores crescentes de cinza volante.

2.4.3 Efeito da peso específico seco e compactação

De similar importância à quantidade de cal é o peso específico seco no qual a mistura é compactada. Com o aumento da densidade, a resistência aumenta, a condutividade hidráulica diminui até um valor mínimo, próximo da umidade ótima, depois começa a aumentar novamente (INGLES & METCALF, 1972). Um aumento na compactação aproxima as partículas remove ar do sistema, tornando-o menos suscetível às mudanças de volume.

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

O fenômeno acima descrito ocorre, pois as partículas do solo, quando adicionada cal, se tornam mais floculadas, devido à substituição dos íons sódio monovalentes da argila por íons cálcio divalentes. Devido à floculação, a quantidade de vazios e o tamanho dos vazios no solo aumentam. Esta estrutura floculada é forte o suficiente para resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios mais alto, reduzindo assim o γ_d do solo. Quanto mais vazios houver, mais água será necessária para preenchê-los, o que resultará em uma umidade ótima maior, e uma curva de compactação mais achatada (SIVAPULLAIAH et al., 1998 apud LOPES JUNIOR 2007).

Em um estudo comparativo Kennedy et al. (1987 apud BHATTACHARJA et al., 2003) estudou a resistência a compressão simples de corpos de prova compactados na energia de Proctor normal e modificada para solo argiloso com um IP de 36. Neste estudo demonstrou um aumento do esforço de compactação quadruplica a resistência de compressão não confinada.

O mesmo fenômeno foi observado por Mallmann (1996). Segundo este autor, grande parte deste aumento ocorreu devido, provavelmente, a um maior número de reações pozolânicas que se desenvolveram com a aproximação das partículas devido ao aumento da energia.

Cristelo (2001), estudando solos graníticos com diferentes matrizes, observou que solos com matrizes mais densas atingem maiores resistências.

2.4.4 Efeito do tempo de cura

Inglês e Metcalf (1972) apresentam um estudo sobre a influência do tempo de cura em diferentes tipos de solos, observaram taxas de ganhos de resistência maiores em pedregulhos arenosos, conforme a Figura 6.

Lopes Junior (2007) observou, para corpos de prova de arenito com adição de rocha basáltica curados por de 90 dias, em média, resistências em torno de 50% mais altas de que os corpos de prova curados 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação volume de vazios/volume de cal. Dalla Rosa (2009) encontrou resultados semelhantes, com aumento da resistência com o aumento do tempo de cura, para o mesmo solo porem com adição de 25% de cinza volante.

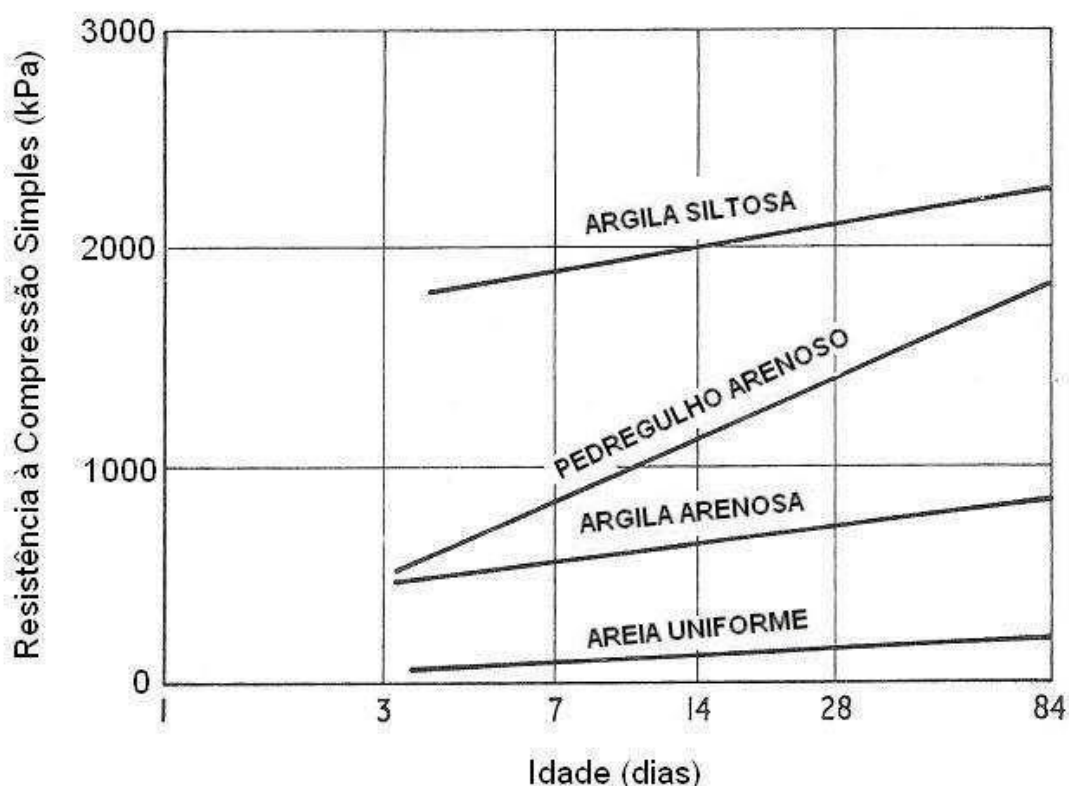


Figura 6 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão.

Adaptado de : (INGLES E METCALF, 1972)

A explicação para esse comportamento consiste em que as reações pozolânicas, as quais proporcionam ganhos efetivos de resistências às misturas compactadas de solo e cal ou solo,

argilo minerais e cal, são lentas, estendendo-se por anos e só se iniciam certo tempo depois da compactação.

2.4.5 Efeito da temperatura de cura

Quando a temperatura é aumentada aceleram-se as reações pozolânicas. Por se tratarem de reações endotérmicas, a taxa de desenvolvimento da resistência será maior quanto maior a temperatura de cura. Thompson, (1966) relata a resistência observada para corpos de prova curados por horas a 48,9 ° C foi aproximadamente equivalente a 30 dias de cura em 21,1 ° C. Um ponto negativo do aumento da temperatura é que a solubilidade do Ca (OH)₂ diminui à medida que a temperatura aumenta. Mateos (1964) e Arabi and Wild (1989) encontraram resultados semelhantes para diferentes tipos de solo.

Dumbleton and Ross (1960, apud BHATTACHARJA *et al*, 2003), para areia tratada com cal, encontraram uma reação linear entre o aumento da temperatura de cura e o aumento da resistência à compressão.

Um caso de obra interessante é citado por Rohfes Junior (1996). Ele descreve as fundações da Usina de Força de Canton, no estado americano de Illinois, onde um solo siltoso foi estabilizado usando 3% de cal hidratada e de 2 à 5% de cinza volante. Após 4 dias de cura a 38°C, observou-se uma resistência a compressão simples entre 1 a 1,4 Mpa.

Dalla Rosa e Thomé (2002), que estudaram um mistura de solo, classificado pela HRB como um A-7-5 e pela UCS como um CH (Argila muito plástica), cal e resíduo da rolagem de pedras preciosas curadas a temperaturas de 5°C, 20°C, 30°C e 40°C. Encontraram para todas as misturas aumento da resistência com o aumento da temperatura de cura, como pode ser observado na figura 7. Pela figura 7 também pode-se observar que temperaturas muito baixas limitam as reações pozolânicas.

Este mesmo solo foi estudado também por Serrafini (2002), com o objetivo de verificar o ganho de resistência à compressão simples de misturas de solo-cal em três diferentes teores de cal (9%, 12% e 15%), em função do tempo de cura (3, 7, 14, 28, 60, 120 e 180 dias) e da temperatura de cura (10°C, 20°C, 30°C e 40°C). O resultado encontrado foi idêntico ao estudo de Dalla Rosa e Thomé, 2002. Serrafini (2002) verificou também que o ganho de resistência à tração de misturas de solo-cal em três diferentes teores (9%, 12% e 15%), em função do tempo de cura (28 dias) e da temperatura de cura (10°C, 20°C, 30°C e 40°C). Este estudo mostrou 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.

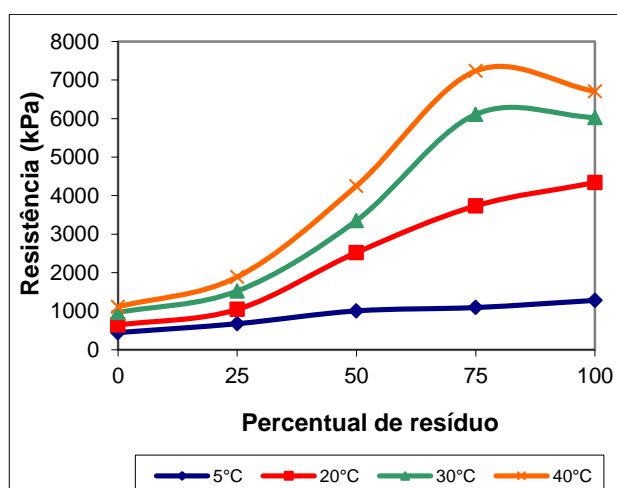


Figura 7- Resistência a Compressão Simples para diferentes misturas de resíduo de rolagem de pedras preciosas, solo com características lateríticas e cal para diferentes temperaturas.

Fonte:(DALLA ROSA e THOMÉ, 2002)

Cronst (2010) estudou um solo pertencente à formação Serra Geral granulometricamente classificado como argila, de acordo com a TRB (Transportation Research Board) classifica-se como um solo A-7-5 e conforme a SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) é um silte de alta compressibilidade, com adição de cal calcítica e dolomítica, nos teores de 6% e 12% curados a temperatura de 5°C, 25°C e 45°C por 7,28 e 96 dias. Concluiu que para condições idênticas os corpos de prova executados com cal calcítica atingiram maior resistência a compressão simples, devido possivelmente a maior pureza deste tipo de cal. Para ambos os tipos de cal encontrou uma tendência de aumento de resistência com o aumento da temperatura, como pode ser observado na Figura 8 e com o aumento da quantidade de aglomerante.

Uma mistura de metacaulim e cal na proporção de 1:1 em peso foi estudado por Rojas e Cabrera (2001) para variados tempos de cura a temperaturas de 20°C e 60°C, com relação água/aglomerante de 2,37. A taxa de reação foi medida com base na quantidade de hidróxido de cálcio não consumido. O quantidade de hidróxido de cálcio foi calculado pela perda de peso pela devido à desidroxilação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (a cerca de 400-500 ° C) e de descarbonatação do CaCO_3 (cerca de 600-750°C). Os resultados de consumo de cal em função do tempo estão apresentados na Figura 9. Uma tendência diferente é encontrada para cada temperatura. Nas amostras curadas

a 60 ° C, a cal é rapidamente consumida durante as primeiras 120 h (Figura 9) e entre 5 e 9 dias a quantidade de cal transformado, a 60 ° C, é aproximadamente 65% mais elevada do que a 20° C. A Figura 9 nos permite concluir que o aumento da temperatura acelera as reações pozolânicas da cal.

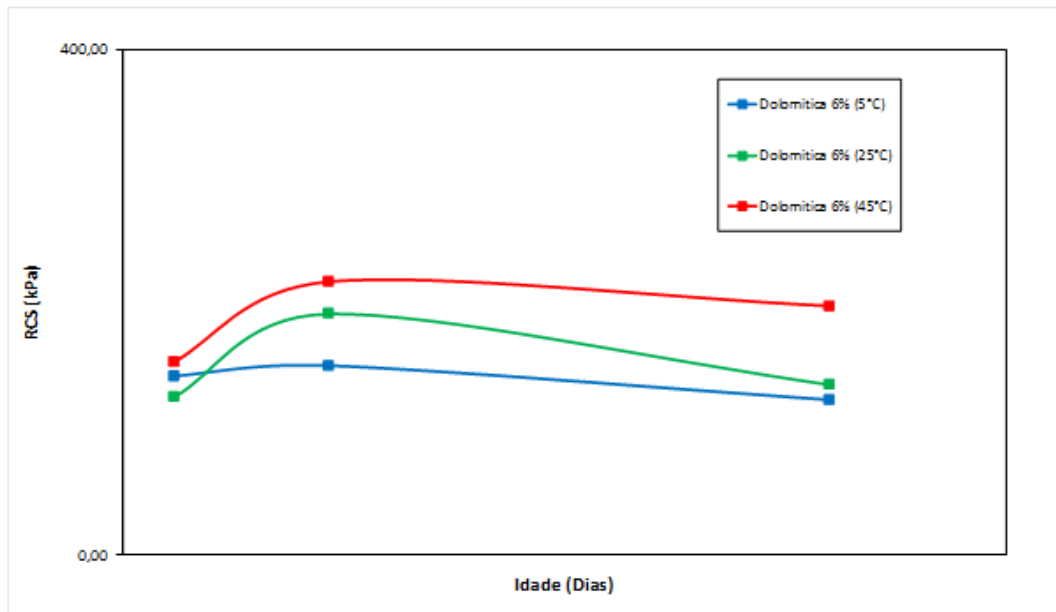


Figura 8- Gráfico RCS x Idade com teor de cal dolomítica de 6%.

Fonte: (CROST, 2010)

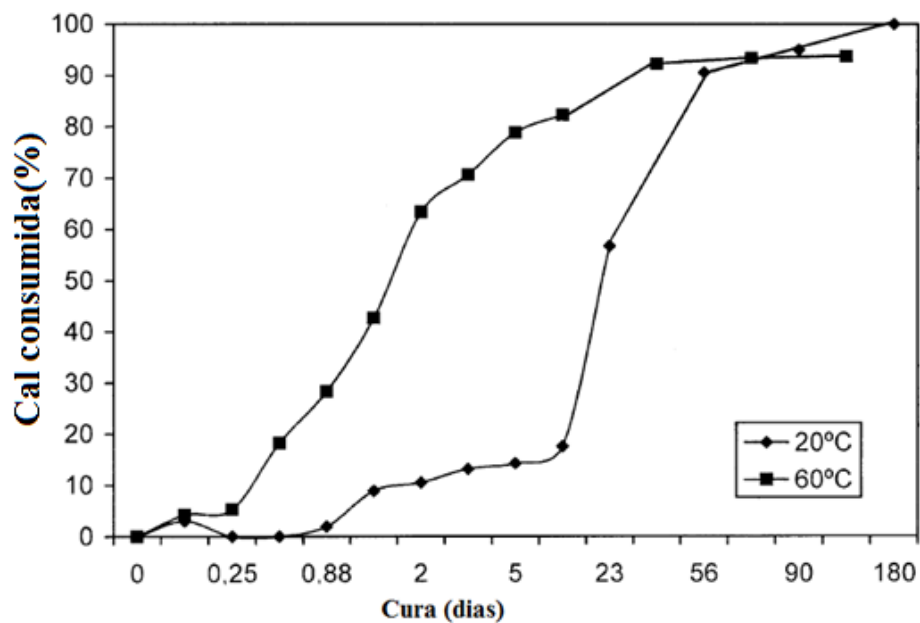


Figura 9- Relação entre os dias de cura e a porcentagem de cal utilizada.

Adaptado de; (ROJAS E CABRERA, 2001).

Rojas (2006), em artigo que continua os estudos citados no parágrafo anterior, usando assim o mesmo material após 60 meses de cura a 60 graus, analisou a composição da massa com base em difratograma de raio X e encontrou os resultados da Figura 10. Pode-se perceber a presença de stralíngito e katoito cristalino nesta estrutura.

Comparando os resultados de Al-Mukhtar et al. (2010) a e b onde os autores estudaram uma mistura de argila chamada de Impersol com 2,4, 6,8,10 e 20% de cal curada por 1,7,28 e 90 dias a temperaturas de 20 e 50°C. Percebe-se que um grande aumento na resistência à compressão simples é obtido pelo tratamento de cal, principalmente devido às reações pozolânicas. Aumentar temperatura de cura de 20 ° a 50 °, não alterou consideravelmente a resistência das misturas com 4 e 6% devido a baixa oferta de aglomerante, entrando para teores maiores, 10 e 20, a resistência dobrou de valor, como pode ser observado na Figura 11 e 12. Logo pode-se obter altas resistências com tempos de cura razoavelmente curtos.

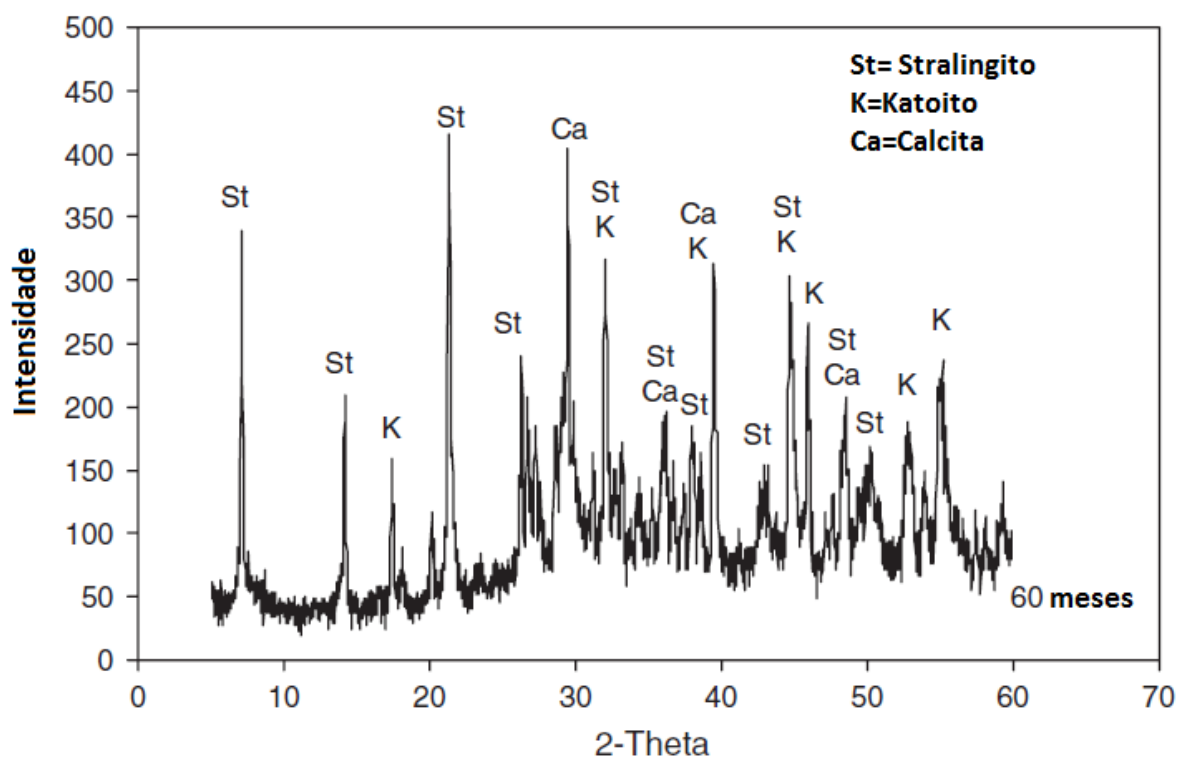


Figura 10- Difratograma de raios X da mistura metacaulim/cal curada a 60°C por 60 meses.

Adaptado de:(ROJAS, 2006).

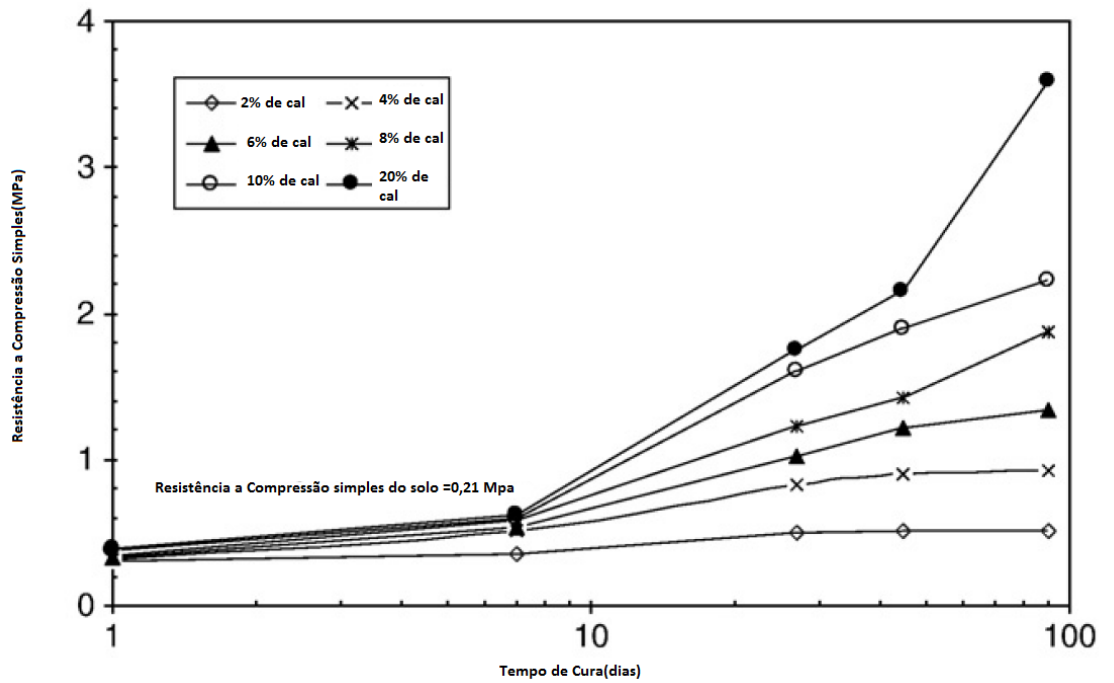


Figura 11- Resistência a Compressão Simples da mistura argila e cal curada a 20°C.

Adaptado de: (AL-MUKHTAR *et.al*,2010(a))

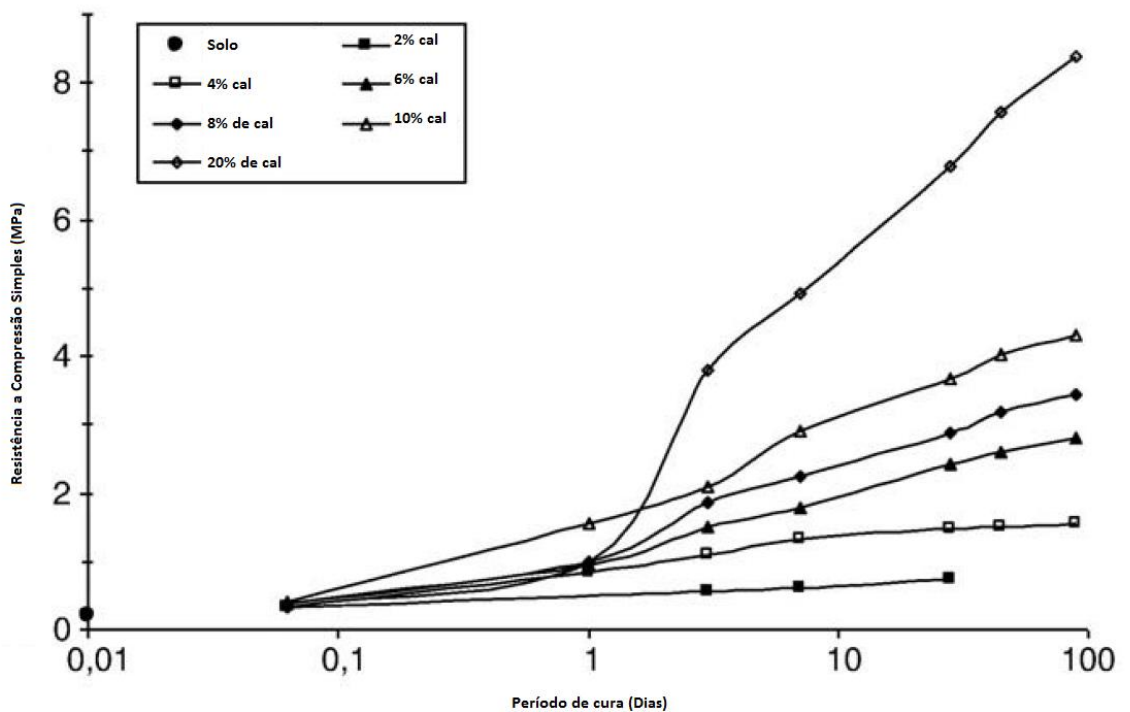


Figura 12- Resistência a Compressão Simples da mistura argila e cal curada a 50°C.

Adaptado de: (AL-MUKHTAR *et.al*,2010(b)) Período

Os artigos acima citados ainda apresentam o difratograma de raios X das mistura contendo 20% de cal, que podem ser observados nas Figuras 13 e 14. Quando curada a 50°C, a mistura

apresenta picos de cal somente nas amostras curadas por 1 dias, entretanto existem picos de hidróxido de cálcio no solo curado a 20°C até a sétimo dia, fato este que evidencia a ocorrência mais rápida das reações que consomem cal. Resultados próximos foram encontrados por Morsy (2005) para uma mistura de metacaulim, sílica ativa e cal curados a 20 e 60°C.

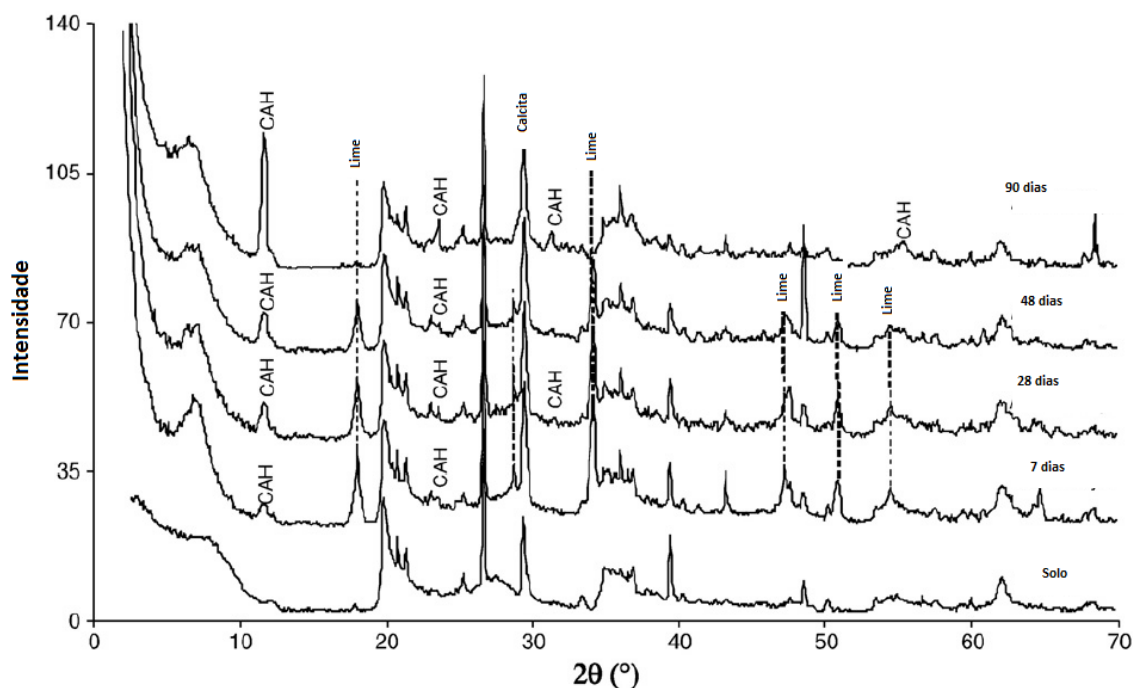


Figura 13- Difratoograma de Raios X da mistura contendo 20% e cal curada a 20°C.

Adaptado de: (AL-MUKHTAR *et.al*,2010(a))

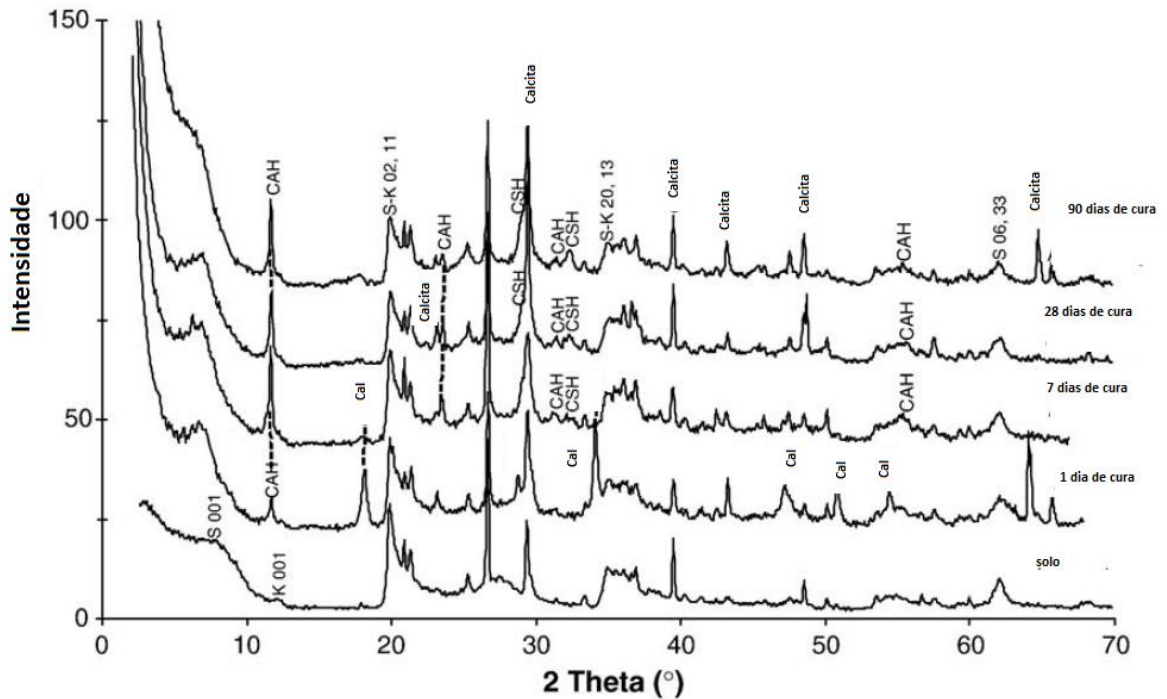


Figura 14- Difratoograma de Raios X da mistura contendo 20% e cal curada a 50°C.

Adaptado de:(AL-MUKHTAR *et.al*,2010(b))

2.4.6 Efeito da relação entre porosidade e teor volumétrico de cal

Os primeiros estudos utilizando a relação porosidade/teor volumétrico de aglomerante apresentado na Equação 7, foram realizadas para solo-cimento, devido à inapropriação do uso do fator água/cimento, utilizado em concreto. Este fator não é adequado para as misturas de solo devido a não preenchimento total dos vazios dos solos estabilizados durante a compactação

$$\frac{\eta}{L_v} = \frac{\text{Porosidade}}{\text{Teor volumetrico de cal}} \quad \text{Eq.(7)}$$

Quando a resistência de solos estabilizados é plotada pela relação vazios/aglomerante, encontra-se uma curva exponencial com um coeficiente de ajuste empírico, que permite assim previsões das demais resistências. Esta tendência foi encontrada por Larnach (1960), Foppa, (2005), Cruz (2006) Lopes Junior (2007), para solos estabilizados com cimento e por Lopes Junior (2007), Dalla Rosa (2009) e Consoli (2012) para solos estabilizados com cal.

Lopes Junior (2007), estudou a relação vazios/cal tratando um solo arenoso com resíduo de britagem e as proporções de 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cimento e de cal em relação ao peso de solo seco. Para cada porcentagem de cal foi feita uma série de ensaios de compressão simples

moldadas a diferentes teores de umidade e pesos específicos aparente seco, ambos determinados a partir das curvas de compactação das misturas de solo, resíduo e cimento. As Figuras 15 e 16 apresentam os resultados dos ensaios de compressão simples das amostras tratadas com cal e com 28 e 90 dias de cura respectivamente. Verifica-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/cal (η/C_{av}) (ajustados por um fator 0,06).

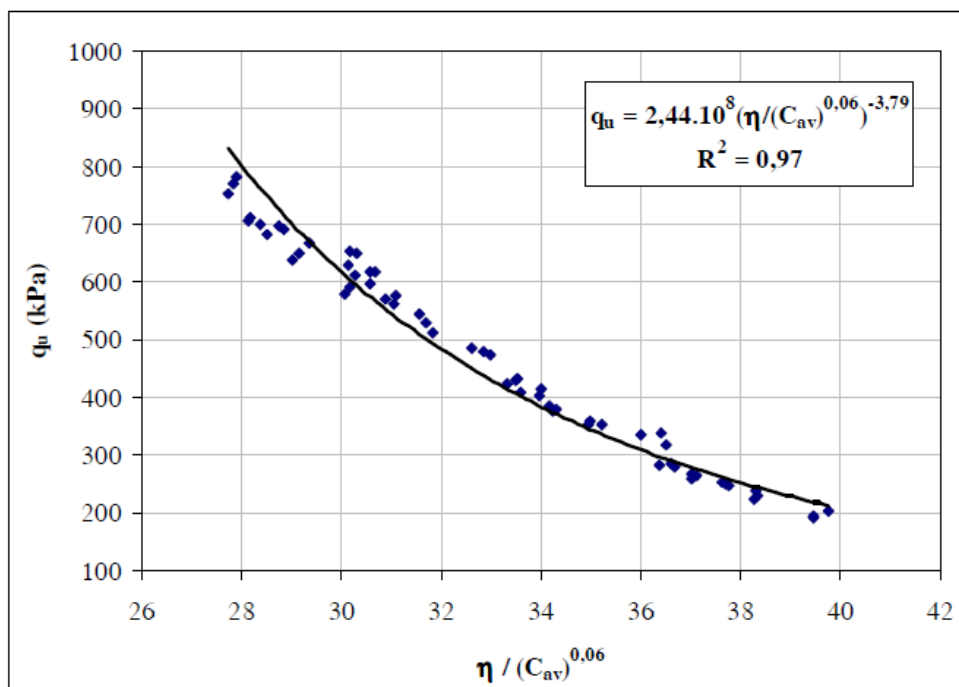


Figura 15– Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 28 dias de cura.

Fonte: (LOPES JUNIOR, 2007)

Dalla Rosa (2009), estudando um arenito da formação Botucatu com adição de 0%,12,5% e 25% de cinza volante, 3%,5%,7% e 9% de cal e tempos de cura de 28, 60, 90 dias encontrou que a relação vazios/cal, apesar de apresentar uma correlação razoável com os valores obtidos para a resistência à compressão simples, tanto para amostras com 0% de cinza volante como pra amostras com 12,5% e 25% de cinza volante, não constitui-se na melhor forma de representar o fenômeno, pois assume que dada uma variação no volume de vazios, uma variação proporcional no volume de agente estabilizante seria suficiente para contrabalançar a perda ou ganho na resistência. Um melhor ajuste dos dados experimentais foi obtido para uma relação vazios/cal expressa em termos da porosidade da mistura compactada e do teor de agente cimentante volumétrico ajustado por um expoente igual a 0,12, qual seja: $[\eta / (C_{av})^{0,12}]$, para as amostras com 0% de cinza volante e 90 dias de cura, e também para as amostras com 12,5% e 25% de cinza

volante com 28, 60 e 90 dias de cura. A Figura 17 mostra os dados plotados exponencialmente para 25% de adição de cinza volante curados por 28 dias.

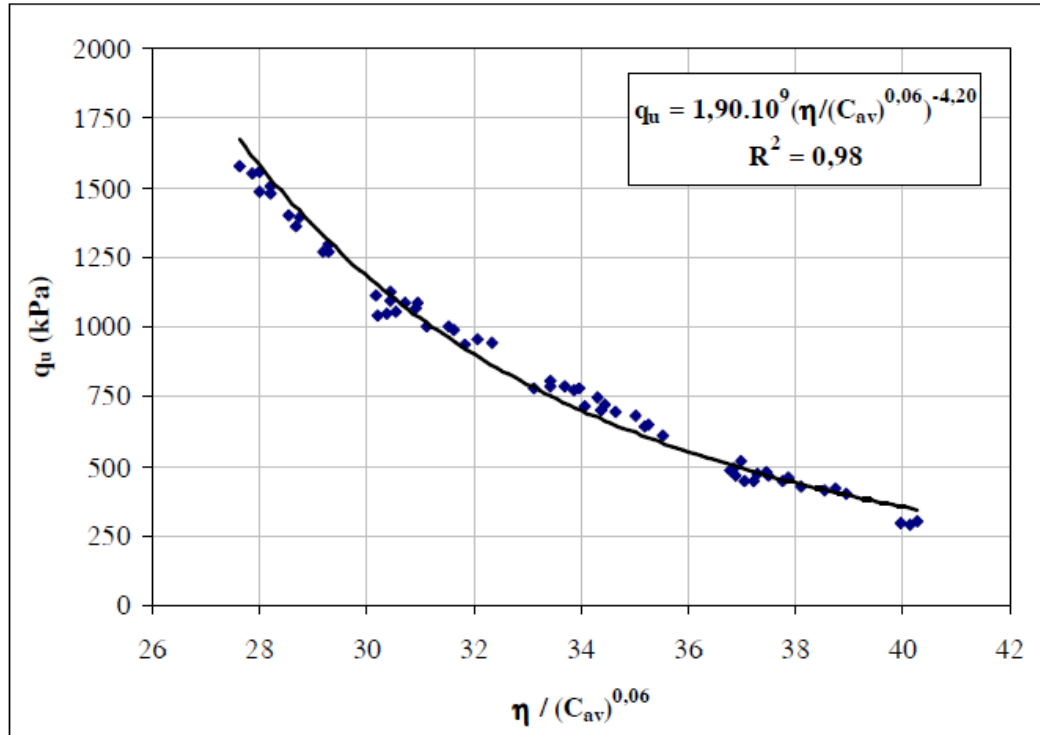


Figura 16– Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 90 dias de cura

Fonte: (LOPES JUNIOR, 2007)

Com base na pesquisa acima citada, Dalla Rosa(2009) concluiu que, para se atingir a resistência desejada, pode-se aumentar a quantidade de cal ou aumentar a energia de compactação ou ainda aumentar o tempo de cura. A dosagem pode ser realizada através da Eq.8 e Eq.9 de maneira interativa.

$$L_v = \frac{100 \left(\frac{\left[\frac{\gamma_d V_s}{1 + \left(\frac{L}{100} \right)} \right] \left(\frac{L}{100} \right)}{\gamma_{sL}} \right)}{V_s} \quad \text{Eq. (8)}$$

$$\eta = \frac{100 \left\{ \left(\frac{\left[\frac{\gamma_d V_s}{1 + \left(\frac{L}{100} \right)} \right] \left(\frac{S}{100} \right)}{\gamma_{sS}} \right) + \left(\frac{\left[\frac{\gamma_d V_s}{1 + \left(\frac{L}{100} \right)} \right] \left(\frac{FA}{100} \right)}{\gamma_{sFA}} \right) + \left(\frac{\left[\frac{\gamma_d V_s}{1 + \left(\frac{L}{100} \right)} \right] \left(\frac{L}{100} \right)}{\gamma_{sL}} \right) \right\}}{V_s} \quad \text{Eq. (2.9)}$$

Onde γ_d = Peso específico do solo seco;

V_s = Volume de sólido;

L = teor de cal;

γ_{sL} = peso específico real da cal;

S = teor de solo;

FA = teor de cinza volante;

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

γ_{sL} = peso específico real do solo.

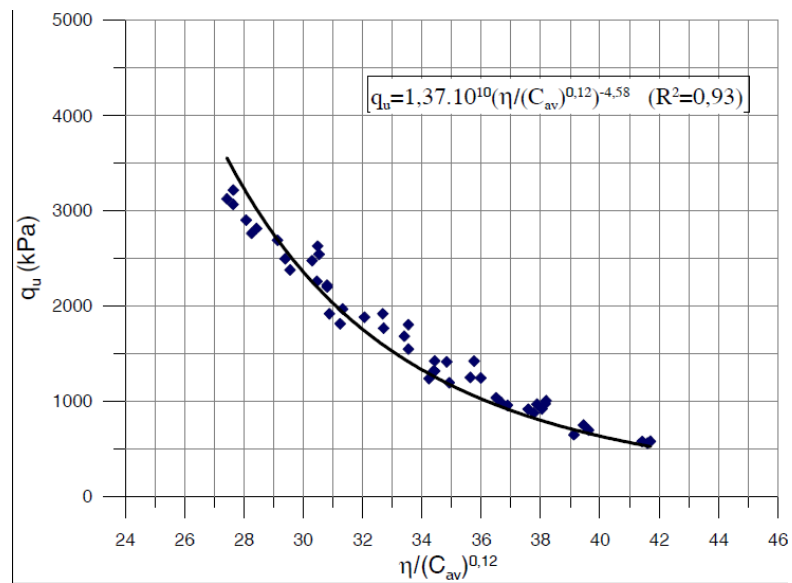


Figura 17- Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura.

Fonte: (DALLA ROSA, 2009)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROGRAMA DE PESQUISA

3.1.1 Experimento Principal

Para o desenvolvimento do trabalho, o estudo realizou-se em três etapas, conforme o fluxograma apresentado na Figura 18, que representa a estrutura metodológica da pesquisa, contemplando todos os passos e a ordem de execução do trabalho proposto.

Na sequência, é apresentada uma breve descrição de cada etapa da pesquisa:

Etapa 1: Elaboração do projeto de pesquisa

- Revisão de literatura: nesta etapa buscou-se o embasamento teórico em bibliografias clássicas, normas e materiais recentes, tendo como objetivo de consolidar teoricamente o estudo e estabelecer um panorama do estado da arte da área sobre a estabilização solo-cal;
- Definição de materiais a serem utilizados: nesta etapa, foram definidos, o solo, o resíduo industrial e o tipo de cal que foram empregados na pesquisa, tendo como critério básico a representatividade dos materiais comuns no Rio Grande do Sul;
- Definição de variáveis a serem analisadas: nesta etapa, a partir da revisão bibliográfica, foram definidas as variáveis que foram investigadas na pesquisa, bem como aquelas que serão fixadas, as de ruído e as de resposta;

Etapa 2: Programa experimental

- Coleta de amostras no campo: nesta etapa o solo foi coletado de maneira deformada na jazida na cidade de Osório;
- Determinação do Teor Mínimo de Cal: nesta etapa foi obtida o teor mínimo de cal para a estabilização da mistura, através do método do ICL (Initial Consumption of Lime), proposto por Rogers et al. (1997 apud THOMÉ,1999);
- Ensaio de Compactação: nesta etapa foram realizados ensaios de compactação, na energia Normal e Modificada seguindo a NBR 7182(ABNT 1986);

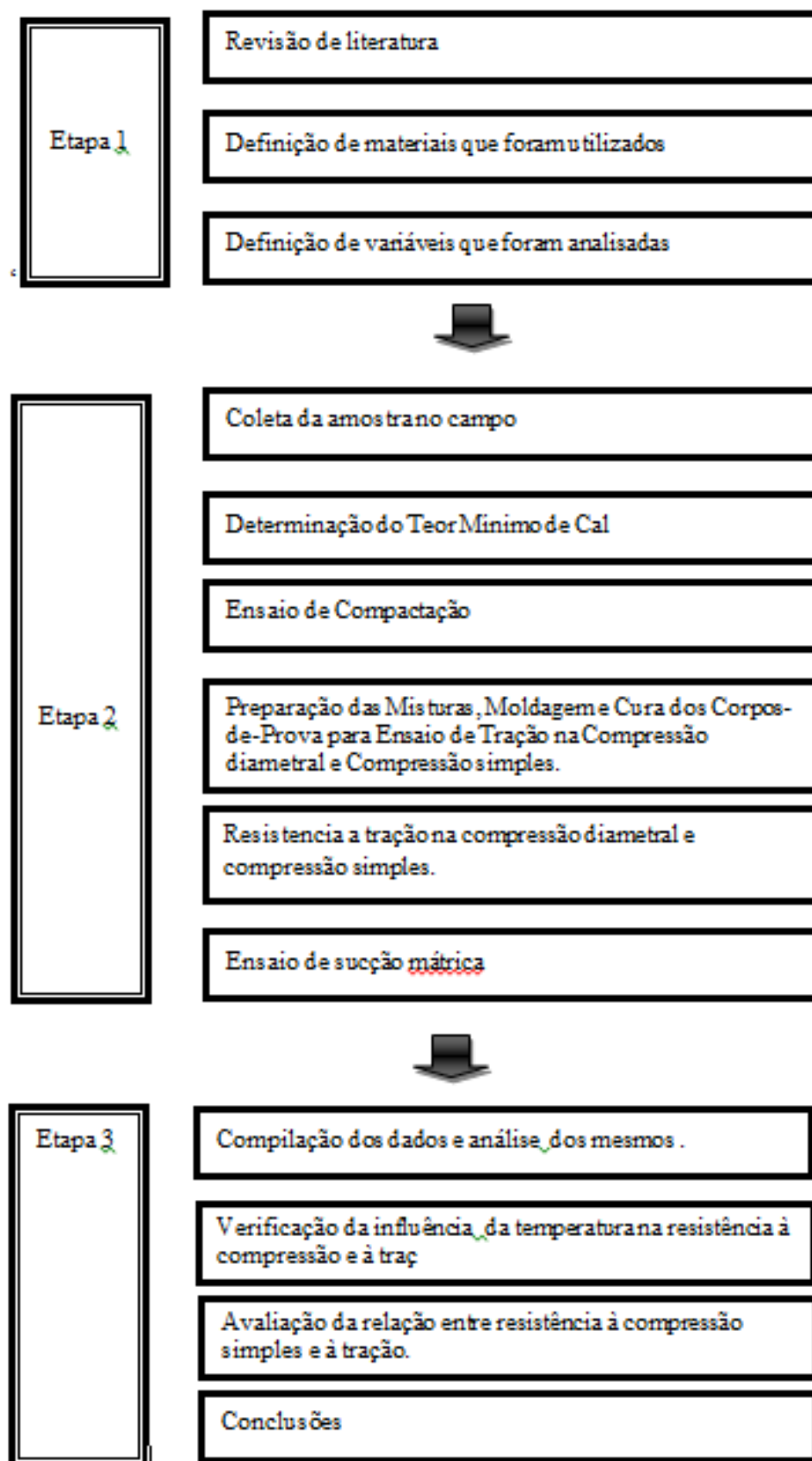


Figura 18- Fluxograma do experimento principal.

- Preparação das Misturas, Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova para Ensaio de Tração na Compressão diametral e Compressão Simples: nesta etapa foram moldados corpos de prova, segundo as instruções da NBR 12770 (ABNT, 1992), e posteriormente estes foram imersos, protegidos por sacos plásticos, em recipientes com água aquecida por resistências elétricas, para que a temperatura pode-se ser controladas.
- Resistência a Tração na Compressão Diametral ,Resistência a Compressão Simples: nesta fase a resistência à tração e a resistência à compressão dos corpos de prova foi medida em ensaios de tração na compressão diametral e compressão simples, repectivamente;
- Ensaio de Sucção Mátrica: sucção mátrica será medida pela técnica do papel filtro em corpos de prova curados a 20°C e 50°C .

Etapa 3: Discussão e Análise dos Resultados

- Compilação e análise dos dados: nesta etapa a partir dos dados que foram obtidos foi realizada análise para avaliar a influencia das variáveis.
- Verificação da influência da temperatura na resistência a compressão e à tração: a partir dos dados de compressão simples e diametral, foi determinada a lei que controla o aumento da resistência devido o aumento da temperatura.
- Avaliação da relação entre a resistência à compressão e à tração: com base nos resultados dos ensaios, foi obtida a relação entre a resistência a compressão simples e a tração.
- Conclusões: nesta etapa, com base nas variáveis de resposta , forma obtidas as conclusões do trabalho.

3.1.2 Experimento Secundário

Dados secundário foram conseguidos por meio de um experimento secundário, realizado em duas etapas descritas abaixo:

Etapa 1: Programa experimental

- Definição de variáveis a serem analisadas: nesta etapa, foram definidas as variáveis que foram investigadas na pesquisa, bem como aquelas que serão fixadas, as de ruído e as de resposta;

- Coleta de amostras no campo: nesta etapa o solo foi coletado de maneira deformada na jazida na cidade de Osório;
- Preparação das Misturas, Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova para Ensaio de Tração na Compressão Diametral: nesta etapa foram moldados corpos de prova, segundo as instruções da NBR 12770 (ABNT, 1992), e posteriormente estes foram imersos, protegidos por sacos plásticos, em recipientes com água aquecida por resistências elétricas, para que a temperatura pode-se ser controladas.
- Resistência a Tração na Compressão Diametral : nesta fase a resistência à tração dos corpos de prova foi medida em ensaios de tração na compressão diametral;

Etapa 3: Discussão e Análise dos Resultados

- Compilação e análise dos dados: nesta etapa a partir dos dados que foram obtidos foi realizada análise para avaliar a influencia das variáveis.
- Verificação da influência tempo de cura para as temperaturas estudadas: a partir dos dados de compressão diametral buscou-se compreender a influencia da temperatura no aumento da resistência estudada.
- Conclusões: nesta etapa, com base nas variáveis de resposta , forma obtidas as conclusões do trabalho.

3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados nos dois experimentos realizados são apresentados a seguir.

3.2.1 Cal

A cal utilizada no trabalho é do tipo hidratada dolomítica, comercialmente chamada de “Primor Extra”, produzida na cidade de Caçapava do Sul - RS. A Tabela 2 apresenta os resultados de ensaios de caracterização da cal utilizada, fornecidos pelo fabricante, comparando com as exigências da NBR 7175(ABNT, 1986) principais propriedades da cal.

Tabela 2 - Propriedades da cal

Propriedades	Limites da NBR 7175	Análise
Perda ao Fogo	-	23,30%
Resíduo Insolúvel	-	4,70%
CO ₂ (anidrido carbônico)	5%	2,20%
Óxidos Totais	88% (mínimo)	94,80%
Óxidos não Hidratados 15%	15%	11%
CaO	-	44,80%
MgO -	-	27,90%
Umidade	1,50%	0,60%
Resíduo na peneira 0,600 mm	0,50%	0,00%
Resíduo na peneira 0,075 mm	15%	8,00%

Fonte: Fabricante

3.2.2 Solo

O solo utilizado foi areia proveniente do Município de Osório/RS, por ser um material vastamente estudado no LEGG/ENVIRONGEO. Essa areia possui várias propriedades semelhantes às das areias utilizadas em pesquisas na prática internacional. É classificada como uma areia fina quartzosa, proveniente de depósitos praias marinhos e eólicos e de retrabalhamento eólico atual da região costeira do estado do Rio Grande do Sul, pertencendo ao Sistema Laguna-Barreira III. (SPINELLI, 1999).

De acordo com Tomazelli & Villwock (2005), a Laguna-Barreira III encontra-se muito bem reservada no presente e seu desenvolvimento foi responsável pela implantação final da Lagoa dos Patos. Os depósitos correlacionáveis à Barreira III estendem-se, de maneira quase contínua, ao longo de toda a planície costeira, desde Torres até o Chuí. Os sedimentos praias são compostos por areias quartzosas claras, finas, bem selecionadas, com estratificações bem desenvolvidas. As areias eólicas de cobertura apresentam uma coloração avermelhada e um aspecto maciço, sendo que algumas vezes apresentam-se bioturbadas por raízes e, comumente, intercalam níveis centimétricos de paleossolos. Em vários locais ao longo da Barreira III, a

remoção da cobertura vegetal - por processos naturais ou antrópicos - possibilitou a reativação dos processos eólicos. O Sistema Lagunar III envolveu um complexo de ambientes deposicionais instalados na região de retrobarreira. Nesse contexto, as fácies aí acumuladas são representadas principalmente por areias finas, siltico-argilosas, pobremente selecionadas, de coloração creme, com laminação plano-paralela e, frequentemente, incluindo concreções carbonáticas e ferruginosas.

Segundo Casagrande (2005), esse material caracteriza-se por ser uma areia fina (NBR 6502 – ABNT, 1995), limpa e de granulometria uniforme que, conforme Spinelli (1999), tem o quartzo como material correspondente a 99% da sua composição mineralógica, sendo o restante composto por glauconita, ilmenita, turmalina e magnetita. Não sendo observada a presença de matéria orgânica. A Tabela 3 apresenta algumas informações importantes ao desenvolvimento do trabalho e a Figura 19 apresenta a curva granulométrica da areia de Osório.

3.2.3 Cinza Volante

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

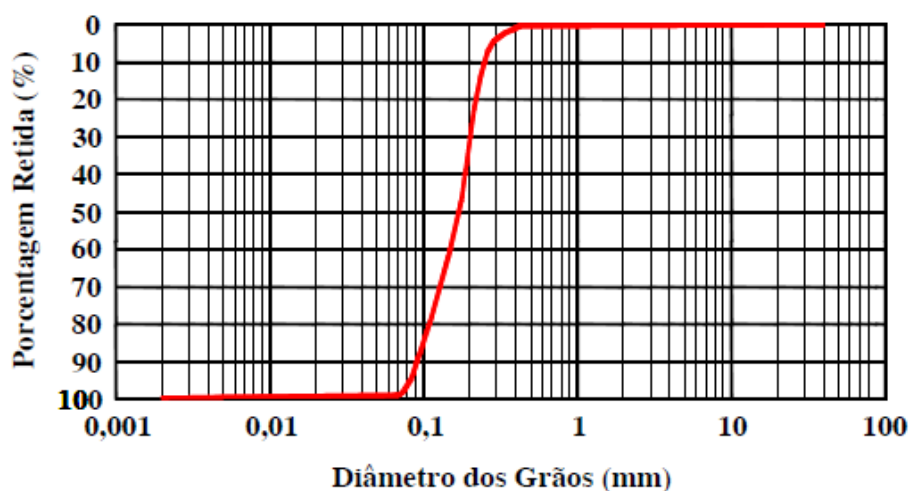


Figura 19 - Curva granulométrica da areia de Osório.

Adaptado de: (CASAGRANDE, 2005)

Tabela 3: Índices físicos da areia de Osório.

Índices Físicos	
Densidade dos grãos (G)	2,63
Coefficiente de uniformidade, C_u	2,1
Coefficiente de curvatura, C_c	1
Diâmetro efetivo, $D_{10} (mm)$	0,09
Diâmetro médio, $D_{50} (mm)$	0,16
Índice de vazios, $e_{mínimo}$	0,6
Índice de vazios, $e_{máximo}$	0,9

Adaptado de: (CASAGRANDE, 2005)

A cinza volante utilizada nesta pesquisa é oriunda da Usina Termelétrica Charqueadas (Figura 20(a)), a qual pertence à Companhia Tractebel Energia SUEZ, localizada no município de Charqueadas no Estado do Rio Grande do Sul. O combustível utilizado na sua operação é o carvão mineral, sendo que a cinza volante oriunda desse processo possui coloração cinza e textura fina (Figura 20(b)), possuindo propriedades pozolânicas e sendo praticamente sílica amorfa. Segundo a companhia, a produção média anual de cinza volante é de 100.000 a 150.000 toneladas, sendo totalmente vendida para as cimenteiras Votoran e Cimpor.

A Figura 21 apresenta a curva granulométrica da cinza volante obtida com uso de defloculante. E a Tabela 4 apresenta as frações granulométricas, bem como, os demais resultados obtidos dos ensaios de caracterização da cinza volante.

Os ensaios de massa específica da cinza volante seguiram as recomendações da NBR N23(ABNT,2001). Obteve-se, a partir de três determinações o valor médio de 2,49 g/cm³.(DALLA ROSA, 2009.)

3.2.4 Água

Foi utilizada água destilada para a realização dos ensaios em laboratório que assim exigirem, e água potável, proveniente da rede pública, para moldagem dos corpos de prova.



Figura 20- (a) Usina Termoeletrica de Charqueadas RS (b) Aspecto da cinza volante.

Fonte: (DALLA ROSA, 2009).

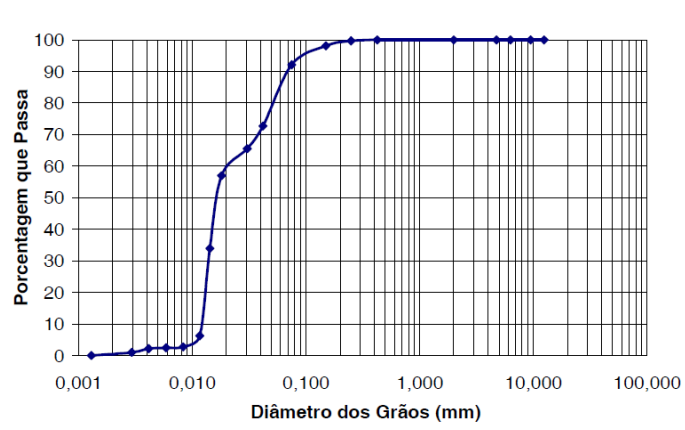


Figura 21- Curva Granulometrica da Cinza Volante.

Fonte: (DALLA ROSA, 2009).

3.3 MÉTODOS DO EXPERIMENTO PRINCIPAL

Os procedimentos experimentais descritos a seguir foram realizados no LEGG/ENVIRONGEO.

3.3.1 Amostragem do Solo

As amostras foram coletadas de maneira deformada de acordo com as recomendações gerais da NBR 9604 (ABNT, 1986), e armazenadas em recipientes plásticos, posteriormente, secadas ao ar.

Tabela 4-Granulometria da Cinza Volante

Propriedades	Valores	Norma
Limite de Liquidez (LL)	-	NBR 6459/84 -
Limite de Plasticidade (LP)	-	NBR 7180/84
Índice de Plasticidade (IP)	Não plástico	
Densidade Real dos Grãos (γ)(kN/m ³)	22,8	NBR 6508/84 -
% de Areia Média (0,2< ϕ >0,6 mm)	1	NBR 6502/95(com defloculante)
% de Areia Fina (0,06< ϕ >0,2 mm)	7	
% de Silte (0,002< ϕ >0,06 mm)	90	
% de Argila (ϕ <0,002 mm)	2	
Diâmetro Efetivo (D10)	0,012 mm	NBR 6502/95
Coefficiente de Uniformidade (Cu)	2	NBR 6502/95

(Fonte DALLA ROSA, 2009)

3.3.2 Determinação do Teor Mínimo de Cal

A determinação da quantidade mínima de cal nas misturas foi executada através do método do ICL (Initial Consumption of Lime), proposto por Rogers et al. (1997). Este método é uma variação do método proposto por Eades e Grim (1966), o qual consiste em adicionar cal à mistura e realizar medidas do pH da mesma. Pelo método do ICL, o teor mínimo é aquele que leva a um valor máximo de pH. O procedimento consiste em:

- misturar aproximadamente 100g de material (solo +cinza volante) com cal, sendo que todos devem ser passados na peneira n° 40 (0,42mm). As percentagens de cal em relação ao peso seco da mistura foram : 0%, 2%, 4%, 6%, 8%,10%, 12% e 14% ;
- colocar 20g desta mistura em um recipiente de vidro, onde deve ser adicionada água para obter a relação água/material seco igual à unidade;
- agitar a solução com ajuda de um bastão de vidro por 30 segundos e em seguida deixar em repouso;

- repetir a agitação a cada 10 minutos, por 30 segundos, e ao final de 1 hora, medir o pH.

A Figura 22 apresenta a variação do pH em função do teor de cal para a mistura contendo 75% de areia de Osório e 25% de cinza volante. Verifica-se que, segundo o método descrito acima o teor mínimo de cal para satisfazer as reações iniciais (troca iônica) é 3%.

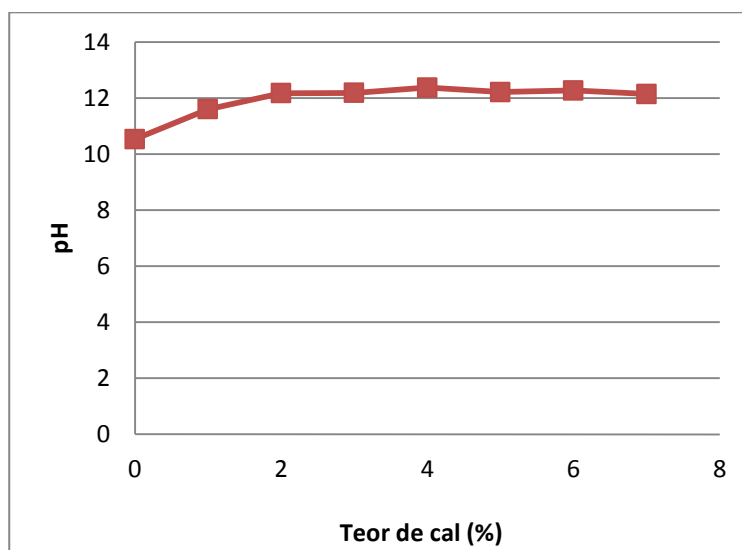


Figura 22- Determinação do teor mínimo de cal.

3.3.3 Ensaio de Compactação

A determinação do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima da mistura solo/cinza volante foi realizado por meio de ensaios de compactação na energia Proctor Normal e Modificado, conforme a NBR 7182(ABNT 1986). Os resultados do ensaio de compactação, para as energias já citadas, estão apresentados na Figura 23. Para a energia de Proctor normal, a umidade ótima foi de 14% e a densidade aparente seca máxima foi 16,8 g/cm³. O ensaio realizado na energia de Proctor Modificado encontrou como umidade ótima foi de 10% e a densidade aparente seca máxima foi 18,5g/cm³.

3.3.4 Definição das Variáveis

As variáveis, que cercam o problema da pesquisa, foram divididas em quatro categorias, conforme o tratamento que será dado a elas.

- Variáveis Investigadas:

As variáveis que terão seus níveis variados a fim de encontrar respostas sobre sua participação no mecanismo de aumento de resistência à tração e à compressão da mistura estão listadas na Tabela 5.

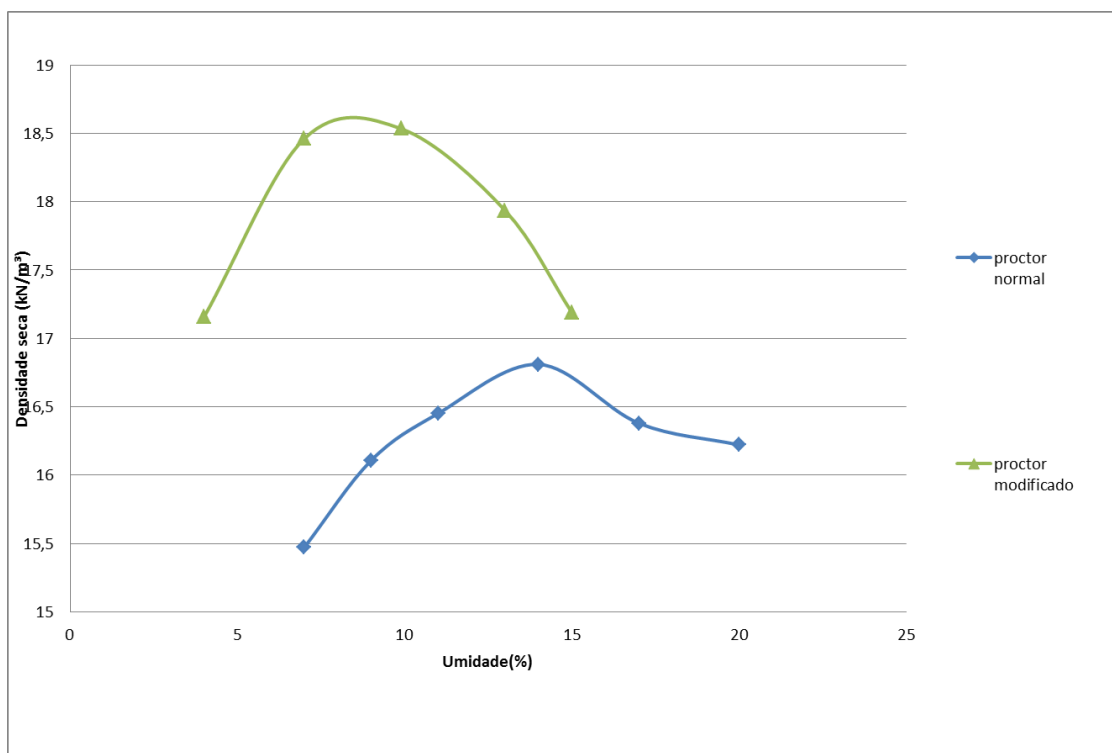


Figura 23-Curva de Compactação da Mistura.

O teor inicial de cal adotado foi o encontrado no ensaio de ICL, já descrito. A temperatura de cura inicial foi a condição ambiente no verão. A partir destes pontos iniciais adotaram-se mais dois níveis na busca pela sua tendência de comportamento.

O peso específico seco de compactação foi decidido a partir do ensaio de proctor da mistura sem adição de cal. A Figura 24 mostra os pontos ensaiados. Adotou-se os valores de 14, 15 e 16 kN/m³ para que fossem exequíveis na umidade previamente estabelecida de 14%, tendo em vista que a adição de cal diminui a peso específico seco do solo.

Tabela 5- Variáveis Investigadas no Programa Experimental

Variável	Unidades de Medição	Níveis Adotados
Teor de Cal	%	3,5,7
Temperatura de cura	°C	20,27,35 e 50
Peso específico de	kN/m ³	14 ,15,16

Compactação		
-------------	--	--

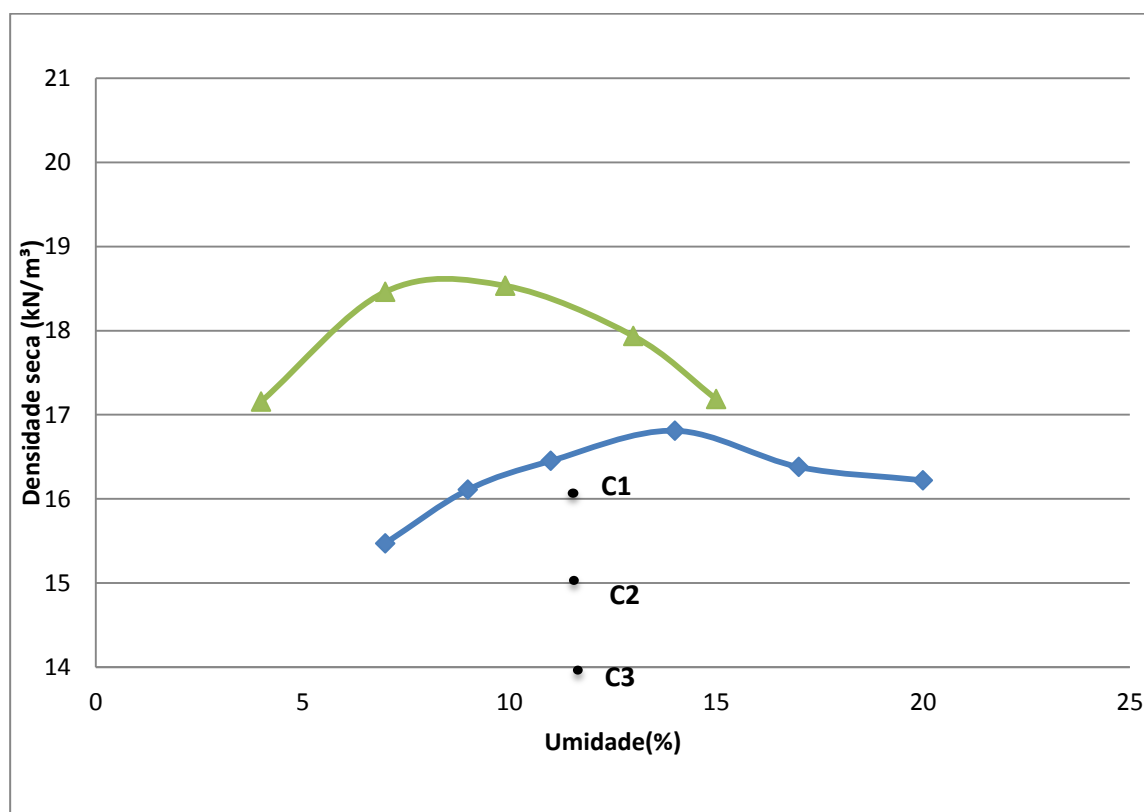


Figura 24- Pesos Específicos investigados.

- Variáveis Fixadas:

As variáveis da tabela 6 foram mantidas fixas ao longo de todo o experimento.

Adotou-se uma matriz com areia de Osório, por se tratar de um material com fácil reprodução. Porém como este material é composto quase que totalmente por quartzo em sua forma cristalina, se fez necessário a adição de uma material para fornecer sílica e alumina amorfa para as reações pozolânicas. Optou-se pela utilização de cinza volante, por se tratar de um resíduo com alto teor de sílica, sua dosagem foi baseada no trabalho realizado por Carraro(1997) que encontrou como teor ótimo de cinza como sendo de 25% da massa do solo.

Tabela 6- Variáveis Fixadas no Programa Experimental

Variável	Unidades de Medição	Nível Adotado
Composição da Matriz	%	75% areia de Osório e 25% cinza volante
Tipo de Aditivo	-	Cal dolomítica hidratada

Tempo de cura	dias	28
Umidade de compactação	%	14 %

Apesar do conhecimento que cal cálcica apresenta melhores resultados que cal dolomítica, utilizou-se a última devido não disponibilidade de cal cálcica no mercado do centro sul brasileiro. O tempo de cura foi escolhido com base no tempo mínimo necessário para que haja reações entre a cal e os argilo-minerais. A umidade adotada baseou-se nas curvas Proctor, sendo adotado um valor que garante que haverá água para as reações pozolânicas.

- Variáveis de Ruído:

Estes são fatores ligados ao meio ambiente e aos equipamentos usados, que podem ser minimizados, mas dificilmente eliminados, podendo assim gerar distorções nas variáveis de resposta. A Tabela 7 lista as variáveis de ruído. A estratégia geral para controle dos fatores de ruído foi a aleatorização completa da ordem de realização dos ensaios.

- Variáveis de Resposta:

As variáveis que foram medidas no experimento, visando o estabelecimento de relações causais no processo de aumento de resistência do material, foi a resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral.

Tabela 7- Variáveis de Ruído no Programa Experimental:

Variável	Medida de controle
Variações na Temperatura de Cura	Minimizada pela imersão dos corpos de prova, protegidos por sacos por 4 dias, em água com temperatura mantida constante com o auxílio de termostato.
Equipamento e operador	Utilização de um único equipamento com um único operador
Homogeneidade do resíduo	Uso de uma amostra retirada de uma única vez a empresa.
Sucção matricial	Homogeneização do valor da sucção através da submersão em água por 24 horas antes da ruptura. Medição da sucção em algumas amostras curadas a 20 e 50°C pela técnica do papel filtro.

3.3.5 Preparação das Misturas, Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova para Ensaio de Tração e Ensaio a Compressão Simples

Os ensaios utilizaram corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Para tanto, a confecção dos corpos-de-prova foi realizada através da pesagem, mistura, compactação, desmoldagem e acondicionamento.

Os materiais (solo, cal e água) foram pesados com precisão de 0,01g. O procedimento iniciou-se com a mistura da cal ao solo e posterior adição de água. A amostra foi, então, compactada estaticamente em três camadas no interior de um molde de ferro fundido tripartido, de maneira de cada camada chegasse o peso específico aparente seco definido.

Concluído este processo, o corpo-de-prova era extraído do molde, sendo medida sua massa e suas dimensões, e acondicionado em dois sacos plásticos para evitar variações significativas de teor de umidade ou contato com a água onde as amostras foram curadas. A Figura 25 mostra o aspecto final de corpo de prova moldados segundo o procedimento descrito anteriormente.



Figura 25- Corpo de prova moldado

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

- Peso específico aparente seco (γ_d): grau de compactação de 99% a 101%, sendo o grau de compactação definido como o valor de γ_d efetivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de γ_d definido como meta. (Exemplo: para $\gamma_d = 16,0 \text{ kN/m}^3$ consideram-se aceitáveis corpos-de-prova que apresentarem valores de γ_d compreendidos entre 15,84 e 16,16 kN/m^3).
- Teor de umidade (ω): valor especificado $\pm 0,5$ pontos percentuais, logo para a umidade adotada ($\omega = 14\%$) são aceitos valores compreendidos entre 13,5% e 14,5%).
- Dimensões: diâmetro $50 \pm 0,5 \text{ mm}$ e altura $100 \pm 1 \text{ mm}$.

Devido à dispersão característica dos ensaios de compressão simples e de tração na compressão diametral, foram moldados corpos-de-prova em triplicata para cada ponto de obtendo-se assim, uma maior confiabilidade dos resultados.

3.3.6 Cura

A cura foi de 28 dias em todos os corpos de prova do programa principal. Esta deu-se em recipientes contendo água aquecida por resistência elétrica, cuja temperatura era controlada por termostato com precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$. O mecanismo de cura é mostrado na Figura 26. Os corpos de prova foram embalados em dois sacos plásticos para que não houve-se contato com a água. Os espécimes curados a 35 e 50 °C foram executados de duas formas, uma batelada segundo o método acima descrito e outra foi submetidos a cura submersa, ou seja após 3 dias de cura, tempo necessário para se tornarem resistentes a inundação, tinham os sacos perfurados. Os resultados de ambas as bateladas foram próximos, logo somente uma bateria de ensaio vou usada nas análises. Aos 27 dias todos os corpos de prova foram imerços em água a temperatura ambiente para garantir maior saturação, logo minimização sucção.

3.3.7 Resistência a Tração na Compressão Diametral

Os ensaios de tração na compressão diametral seguiram a norma NBR NM 8 (ABNT, 1994), sendo que a ruptura típica deste tipo de ensaio é apresentada na Figura 27. Para tanto, foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 100 kN, além de anel dinamométrico calibrados com capacidade de 10 kN e resolução de 0,005 kN que pode ser observada na Figura 28. A velocidade de deformação destes ensaios foi de 1,14 mm por minuto. A resistência a tração foi calculada pela Eq.10. Como critério de aceitação para o ensaio, estipulou-se que as resistências individuais de três corpos-de-prova não deveriam se afastar mais de 10% da resistência média desse conjunto.

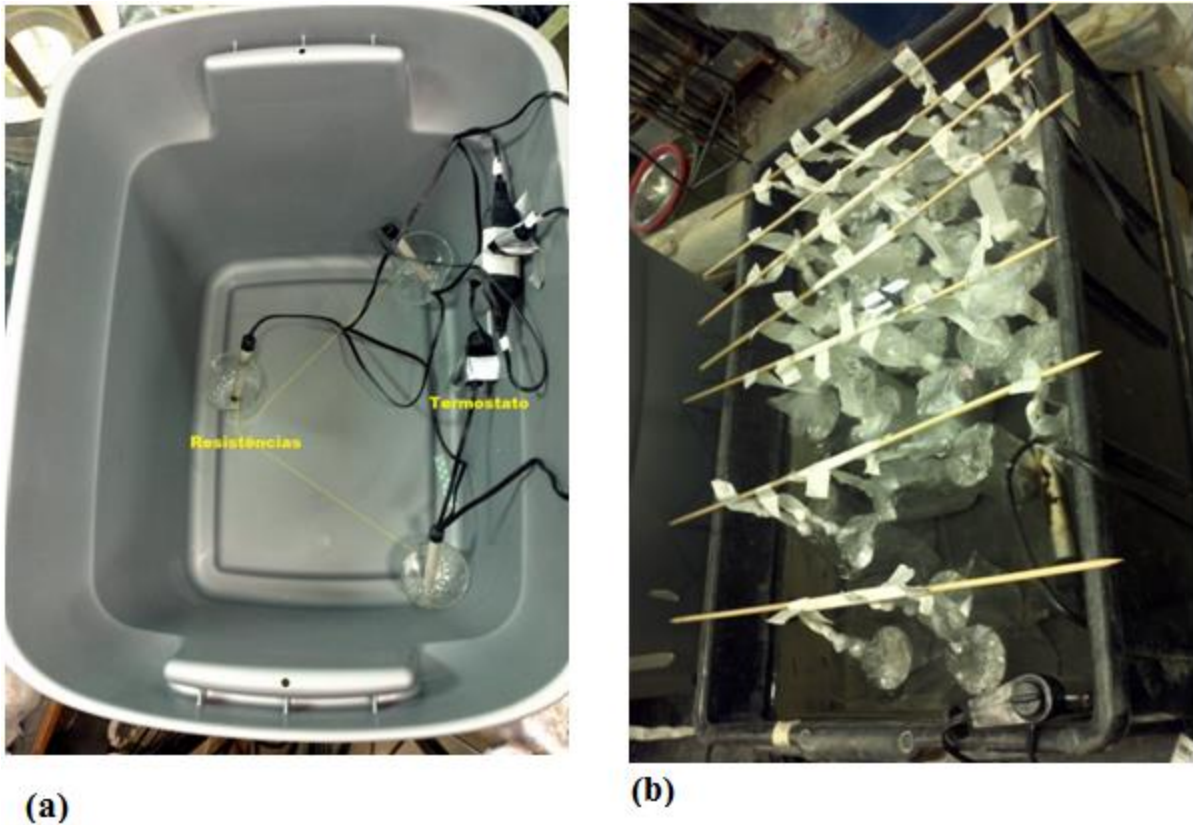


Figura 26- Sistema de cura a temperatura de 35 e 50°C.(a)-Disposição dos equipamentos. (b)-Corpos de prova em processo de cura.

$$q_t = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad \text{Eq(10)}$$

Onde :P = Carga aplicada no momento da ruptura.

D= diâmetro do corpo-de-prova;

H = altura do corpo de prova;

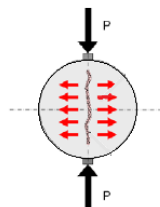


Figura 27- Ruptura típica do ensaio de tração na compressão diametral.

Fonte: ABNT(1994)



22

Figura 28- Ensaio de Tração na Compressão Diametral.

3.3.8 Ensaio de Compressão Simples

Ensaio de compressão simples têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade da estabilização com cal ou acessar aspectos relativos à importância de fatores influentes sobre a resistência de solos tratados. Uma das razões para tal é a experiência acumulada com este tipo de ensaio na área de concretos, além de ser um ensaio de simples e rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido no meio técnico.

Para estes ensaios foram utilizados os mesmos equipamentos, procedimentos de ensaio e critérios de aceitação descritos para os ensaios de compressão diametral, diferindo-se unicamente pelo posicionamento dos corpos de prova no momento do ensaio, como pode ser observado na Figura 29.

3.3.9 Medidas de Sucção

Como todos os corpos-de-prova do programa de ensaios, no teor de umidade de moldagem, encontram-se na condição não-saturada, logo um determinado nível de sucção está

presente. As medidas de sucção neste trabalho têm o objetivo de verificar qual sua magnitude e se esta apresenta variação significativa entre os corpos-de-prova curados a temperaturas diferentes.



Figura 29- Ensaio de Compressão Simple

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

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

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

As equações acima citadas foram desenvolvidas para solos brasileiros naturais, mas a experiência tem mostrado, Feuerharmel (2003), Foppa (2005), Lopes Junior (2007) e Dalla Rosa(2009), que são adequados a solos estabilizados.

A medida de sucção foi executada após a realização do ensaio de compressão simples. Retirou-se do corpo de prova rompido, com o auxílio de uma espátula, uma pequena amostra cilíndrica, de aproximadamente 5 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura. Além da amostra para sucção, através de raspagem do corpo-de-prova ensaiado, retirava-se uma amostra para determinação do teor de umidade. Sobre a amostra é colocado um pedaço de papel filme do tamanho deste. Sobre este papel filtro, que impedirá que os papéis usados na determinação da sucção fiquem impregnados de solo mascarando os resultados de sucção, dois pedaços de papel filtro, com área de aproximadamente 2 cm^2 . O papel filtro era utilizado diretamente da caixa, na condição seco ao ar. O manuseio do papel filtro durante todo o ensaio foi realizado com o auxílio de uma pinça metálica para evitar qualquer alteração nas características originais do papel. Após, cada conjunto (papel filtro + amostra) era protegido por filme plástico de PVC (Figura 30) e embalado em um saco plástico selado para garantir que o fluxo ocorra somente entre o solo e o papel, sem interferência do ambiente externo.

As amostras já embrulhadas e identificadas eram, então, colocadas em uma caixa de isopor com tampa por um período de 14 dias, necessário para que o equilíbrio de sucção entre o solo e o papel filtro fosse alcançado.

Depois de alcançado o equilíbrio, os papéis filtro eram removidos rapidamente da amostra e colocados em recipientes plásticos numerados e com tampa. Essa operação era realizada dentro de 3 a 5 segundos. O peso dos dois conjuntos (papel filtro úmido + recipiente) era determinado usando uma balança com resolução de 0,0001 g. Depois de obtido o peso úmido de cada conjunto, os papéis eram retirados dos recipientes, colocados em tampas de cápsula (previamente identificada com a mesma numeração do recipiente) e levados a uma estufa de 60°C durante 48 horas. Após secagem, cada papel filtro era retirado da estufa e rapidamente recolocado no mesmo recipiente utilizado para obtenção do peso úmido. Determinava-se, então o peso seco de cada conjunto. Após a obtenção do peso seco, os papéis filtro eram descartados e os recipientes pesados. Através desses dados, o teor de umidade de cada papel filtro era calculado. Com o teor de umidade e a correspondente equação de calibração, obteve-se a sucção do papel filtro, e a média dos dois valores considerada igual à sucção existente na amostra.



Figura 30- Amostras preparadas para o ensaio de sucção.

3.4 MÉTODOS DO EXPERIMENTO SECUNDÁRIO

Visando a avaliação do aumento da resistência à tração com o tempo, corpos de prova com características intermediárias, ou seja, 5% de cal e 15kN/m^2 de peso específico seco foram curados em diferentes tempos de cura, 1,3,7 e 14 dias para todas as temperaturas estudadas. O processo de cura foi o mesmo descrito no item 3.3.6 e ruptura seguiu a técnica descrita no item 3.3.7.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

As Tabelas A.1 a B.1 do apêndice “A” apresentam as características de todos os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de tração na compressão diametral, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. A tabela A.1 apresenta os corpos-de-prova curados a 20°C, a Tabela A.2 apresenta os as amostras submetidas à cura a 27°C. Os espécimes curados a 35°C podem ser encontradas na Tabela A.3 e os corpos-de-prova curados a 50°C são apresentados na Tabela A.4.

Pode-se observar nestas tabelas que os dados foram agrupados a cada três linhas pois correspondem às três repetições para um mesmo ponto de moldagem (mesmo teor de umidade, porosidade, teor de cal e teor de cinza volante).

4.1.1 Amostras curadas a 20°C

A partir dos dados constantes nas Tabelas A.1, foram elaboradas as Figuras 31 a 32. A Figura 33, apresenta as curvas de ajuste da variação da resistência à tração por compressão diametral em função da porosidade dividida pelo teor volumétrico de cal. Cada curva, isoladamente, possui a mesma pesp específico aparente seca.

Os dados apresentados na Figura 31 permitem verificar que, para as amostras curadas a 20°C, a resistência a tração por compressão diametral aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cal na faixa de teores estudados. Mesmo pequenas adições de cal são suficientes para gerar ganhos de resistência. A variação de resistência a tração por compressão diametral em função da porosidade corpos-de-prova é apresentada na Figura 32, juntamente com suas curvas de ajuste: cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal. Esta figura nos permite observar que a redução na porosidade da mistura compactada promove o aumento da resistência à tração na compressão diametral do solo-cal, independentemente da quantidade de cal utilizado. A redução, em média, de 8% da porosidade promove um aumento de cerca 1,8 vezes na resistência estudada. A partir da Figura 32 ainda pode-se observar ainda que a resistência a tração por compressão diametral aumenta exponencialmente com a redução da porosidade da mistura.

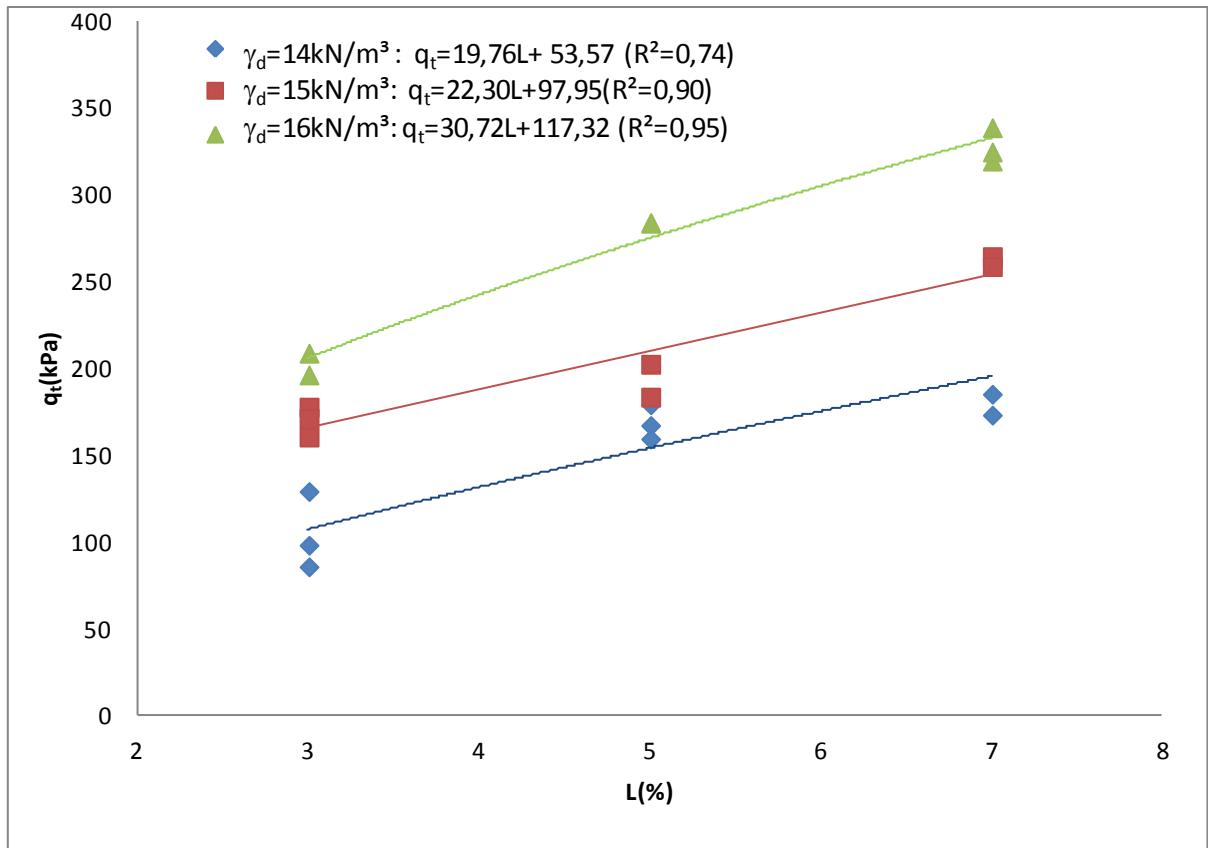


Figura 31- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 20°C.

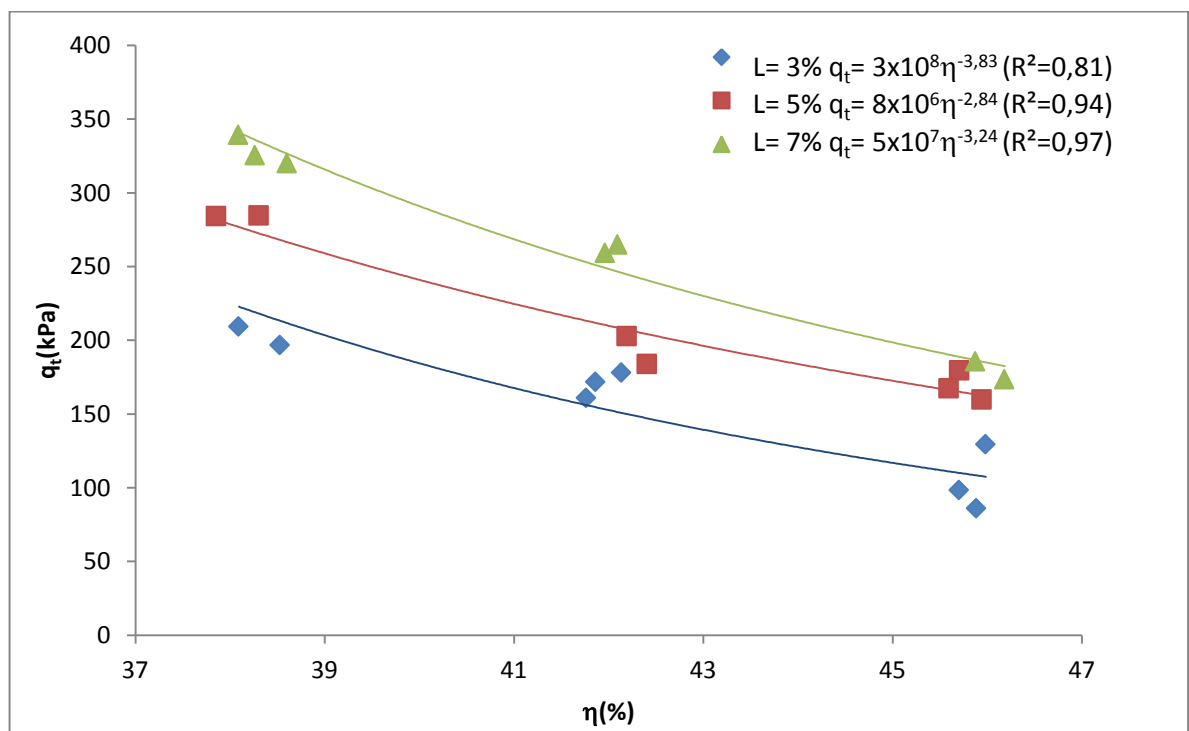


Figura 32- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à porosidade das amostras curadas a 20°C.

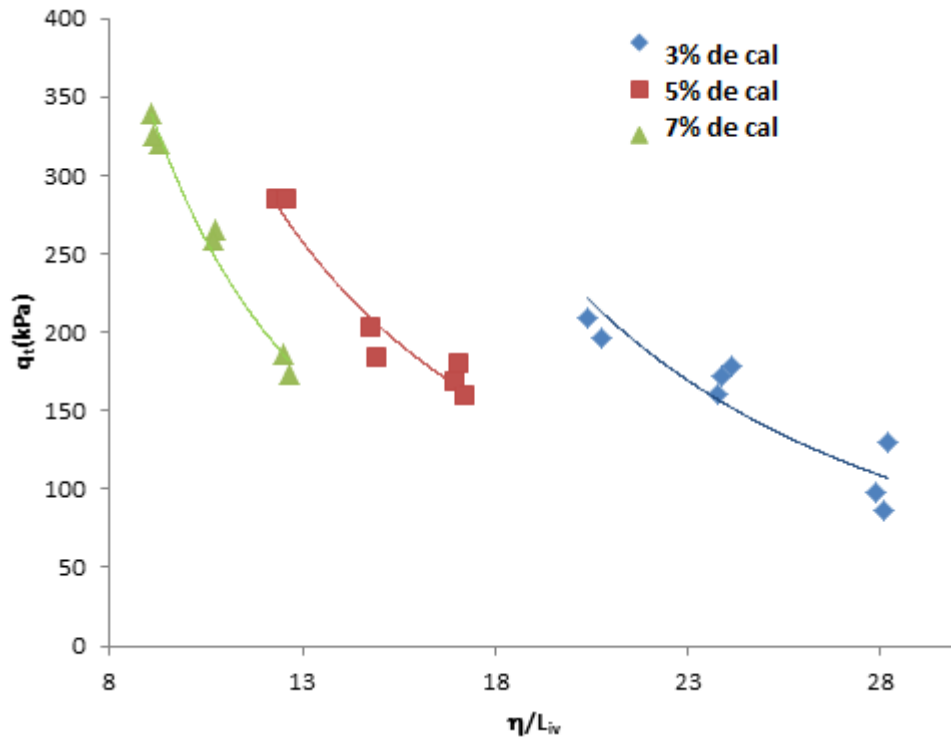


Figura 33-Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a tração na compressão diametral para os corpos de prova curados a 20°C.

Outra forma de apresentar os resultados é mostrada na Figura 33, onde é apresentada a variação da resistência no ensaio brasileiro pela variação da relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}). Os corpos de prova da Figura 33 possuem quantidades de cal e porosidades variadas.

Pode-se observar que não há uma relação única entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à tração na compressão diametral da mistura areia de Osório, cinza volante e cal.

4.1.2. Amostras curadas a 27°C

A representação gráfica dos dados da Tabela A.2 resultaram nas Figuras 34 a 36. A Figura 36 é composta por três curvas sendo que os pontos de cada uma delas apresentam a mesma peso específico aparente seco. A Figura 34 representa a variação da resistência a tração por compressão diametral com a variação do teor de aglomerante, pode-se observar que o comportamento é semelhante aos corpos de prova curados a 20°C.

A Figura 35 mostra a variação de resistência à tração por compressão diametral em função da porosidade dos corpos-de-prova, juntamente com suas curvas de ajuste. Cada curva apresentada possui pontos com o mesmo teor de aglomerante. Esta figura nos permite observar

que a resistência a tração por compressão diametral aumenta exponencialmente com a redução da porosidade para todos os teores de cal estudados.

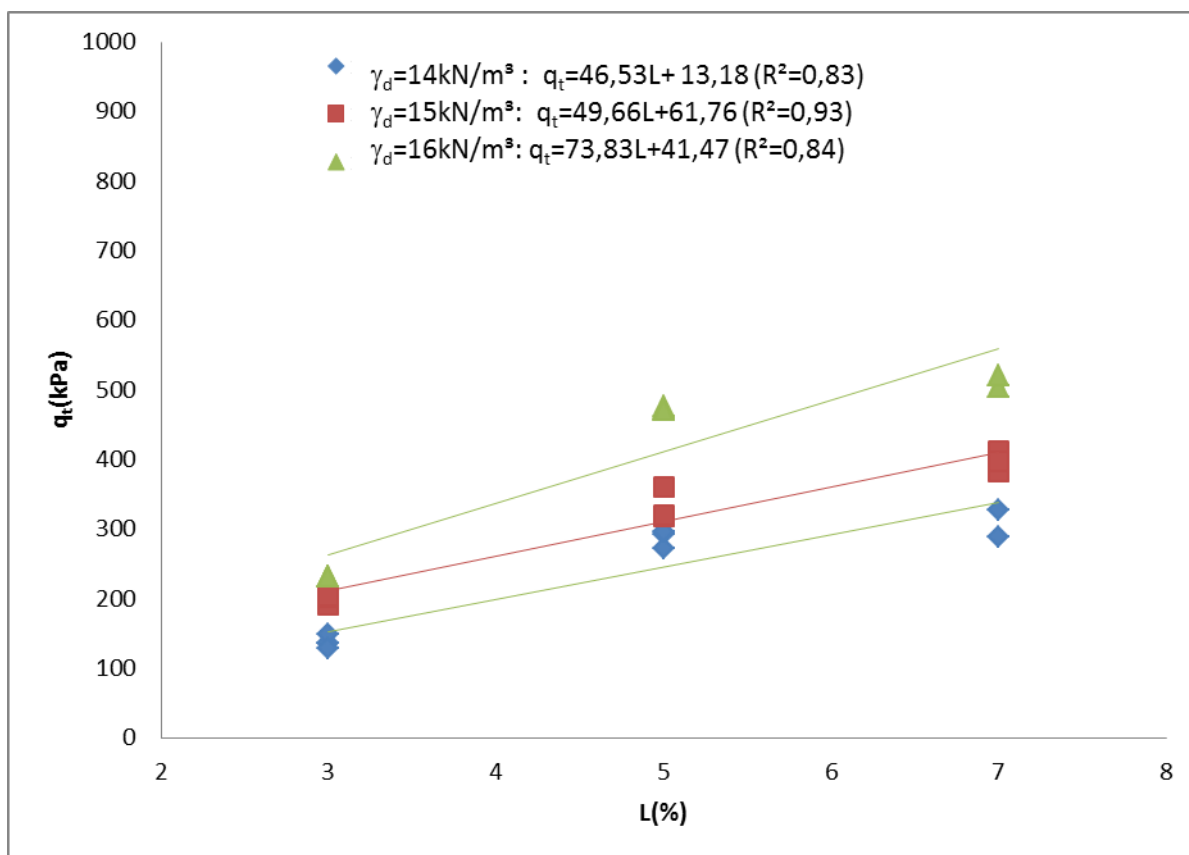


Figura 34-Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 27 °C.

A Figura 36 mostra que representando a variação da resistência à tração por compressão diametral pela variação de porosidade/teor volumétrico de cal não obtemos uma tendência única.

4.1.3. Amostras curadas a 35°C

As Figuras 37 a 39 foram elaboradas a partir dos dados da Tabela A.3. A Figura 37, mostra a relação entre a resistência à tração do ensaio brasileiro pela quantidade de cal para cada uma dos pesos específicos estudados. A partir da Figura 37 pode-se constatar que, para os teores de aglomerante utilizados, o aumento do teor de cal aumenta a resistência estudada.

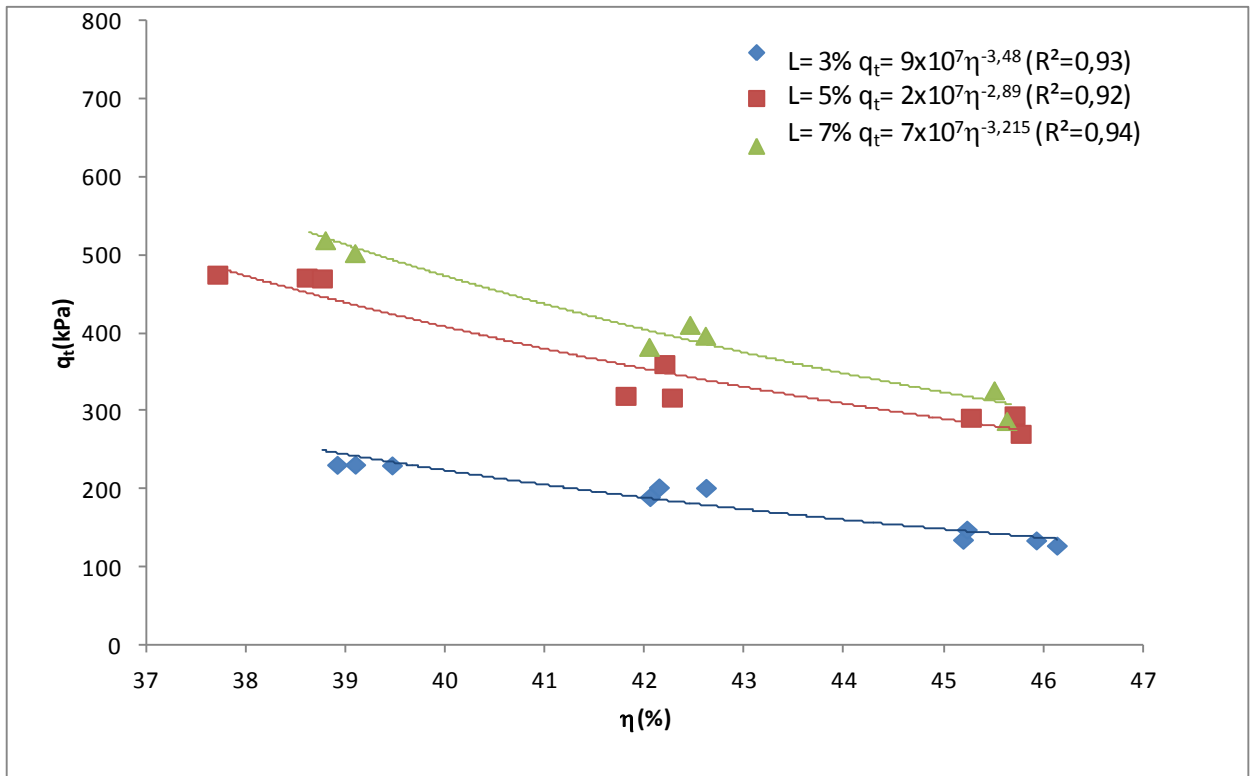


Figura 35- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à porosidade das amostras curadas a 27°C

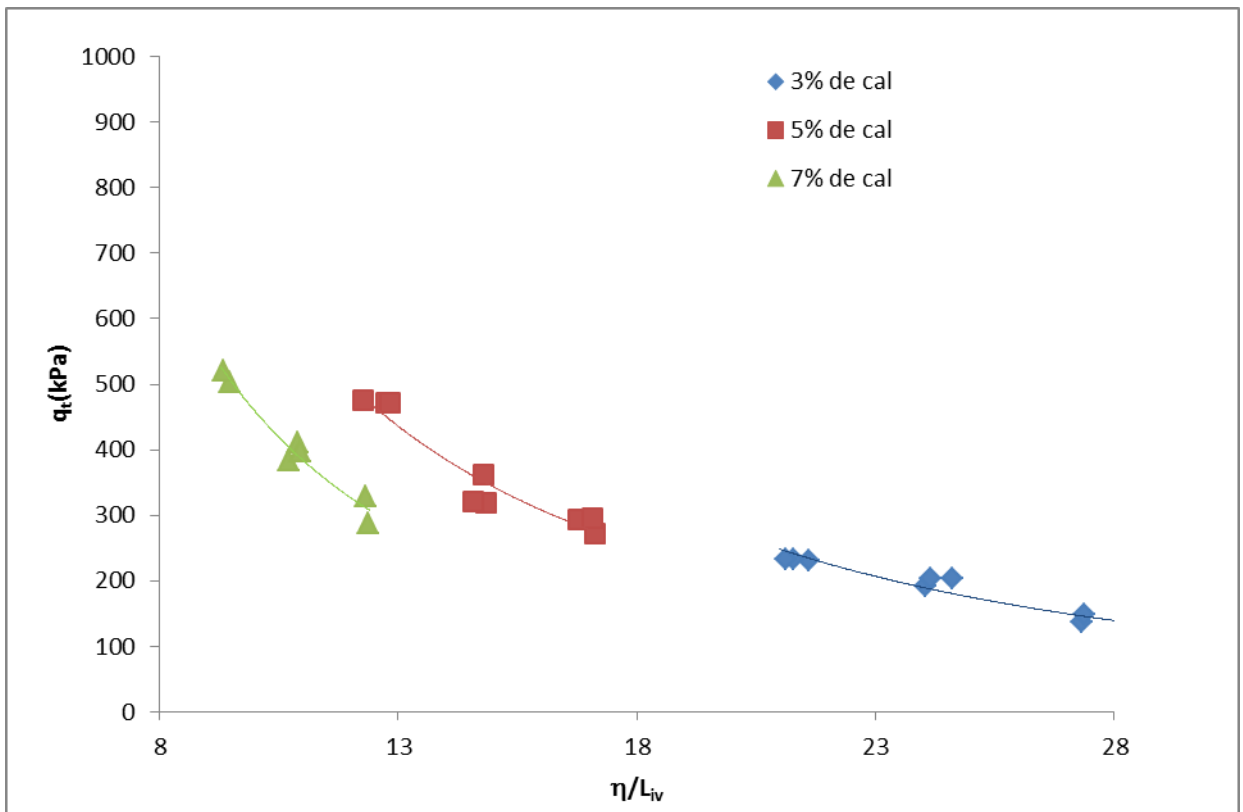


Figura 36-Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a tração na compressão diametral para os corpos de prova curados a 27°C.

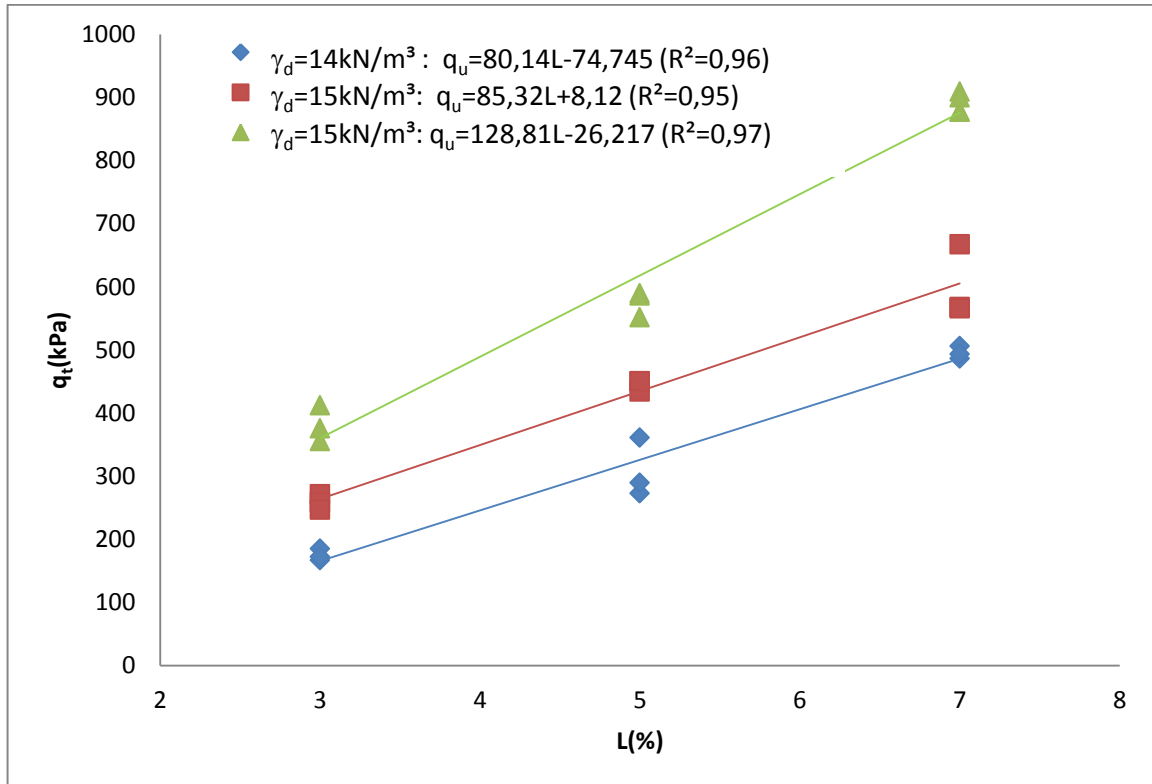


Figura 37- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 35 °C.

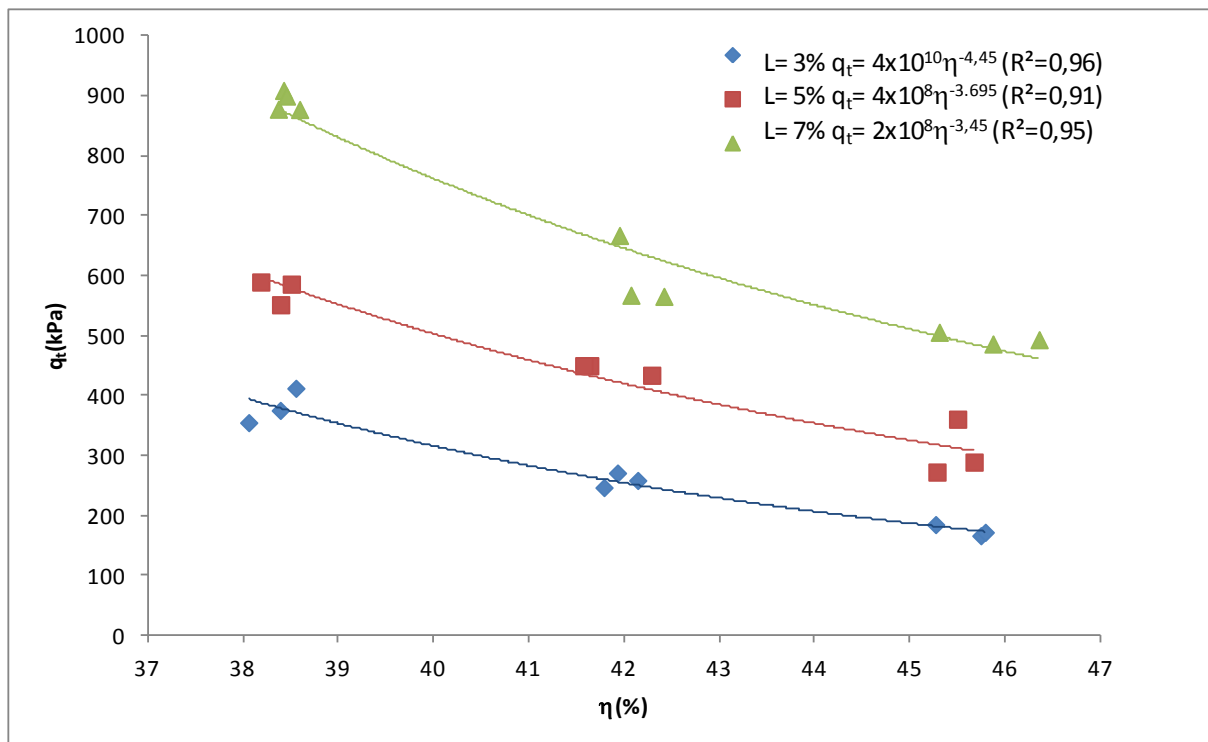


Figura 38- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à porosidade das amostras curadas a 35 °C.

A Figura 38 demonstra o comportamento da resistência à tração por compressão diametral quando há variação da porosidade dos corpos-de-prova, sendo que, cada curva possui pontos com o mesmo teor de aglomerante. Esta figura demonstra que, quando a porosidade é diminuída, há um aumento na resistência à tração por compressão diametral, independentemente da quantidade de aglomerante.

A Figura 39 exibe a variação de resistência à tração por compressão diametral em função de η/L_{iv} . Pode-se notar que não há uma relação única entres estas variáveis.

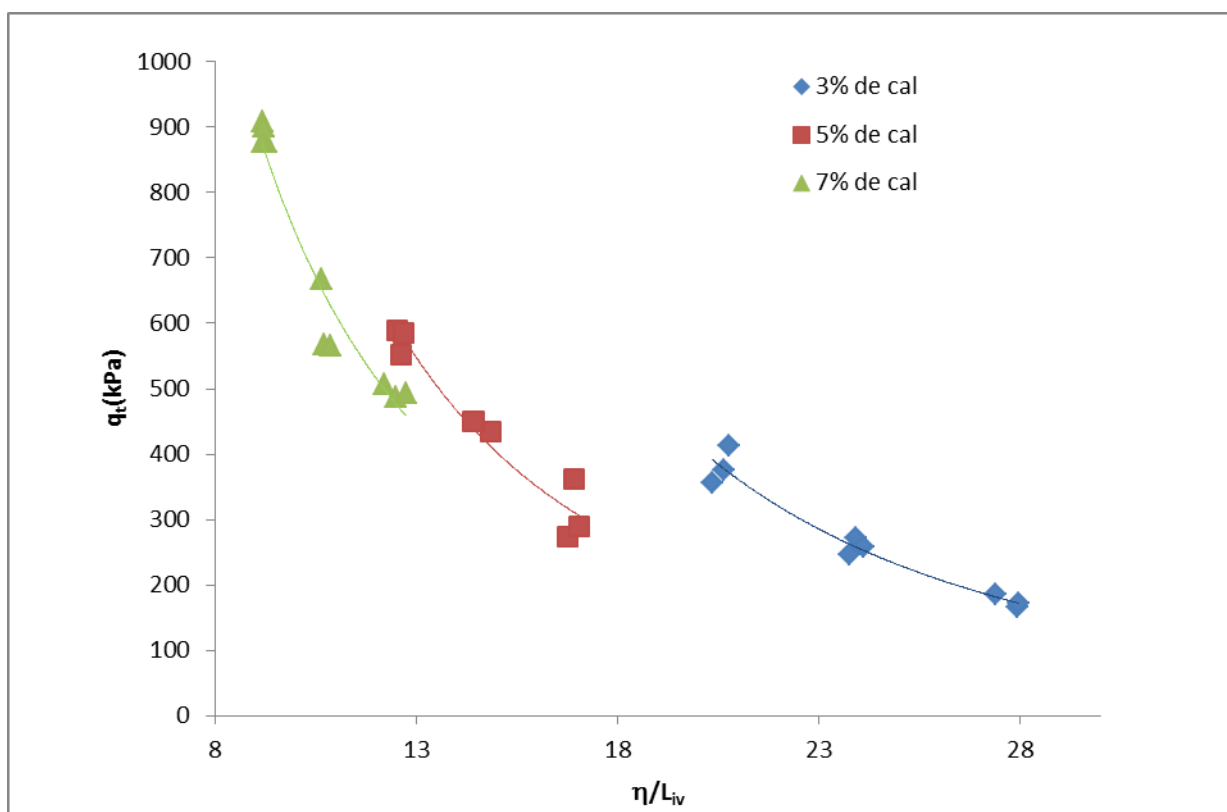


Figura 39-Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a tração na compressão diametral para os corpos de prova curados a 35°C

Os corpos de prova Figura 39 possuem diferentes porosidade e teores de aglomerante.

4.1.4. Amostras curadas a 50°C

As Figuras 40 a 42 foram elaboradas a partir dos dados da Tabela A.4. A exposição do comportamento da resistência à tração por compressão diametral quando a quantidade de cal é variada é exposta na Figura 40. Esta é composta por três curvas, sendo que cada curva possui um peso específico seco. O comportamento da resistência dos espécimes curados a 50°C é o mesmo das demais temperaturas testadas.

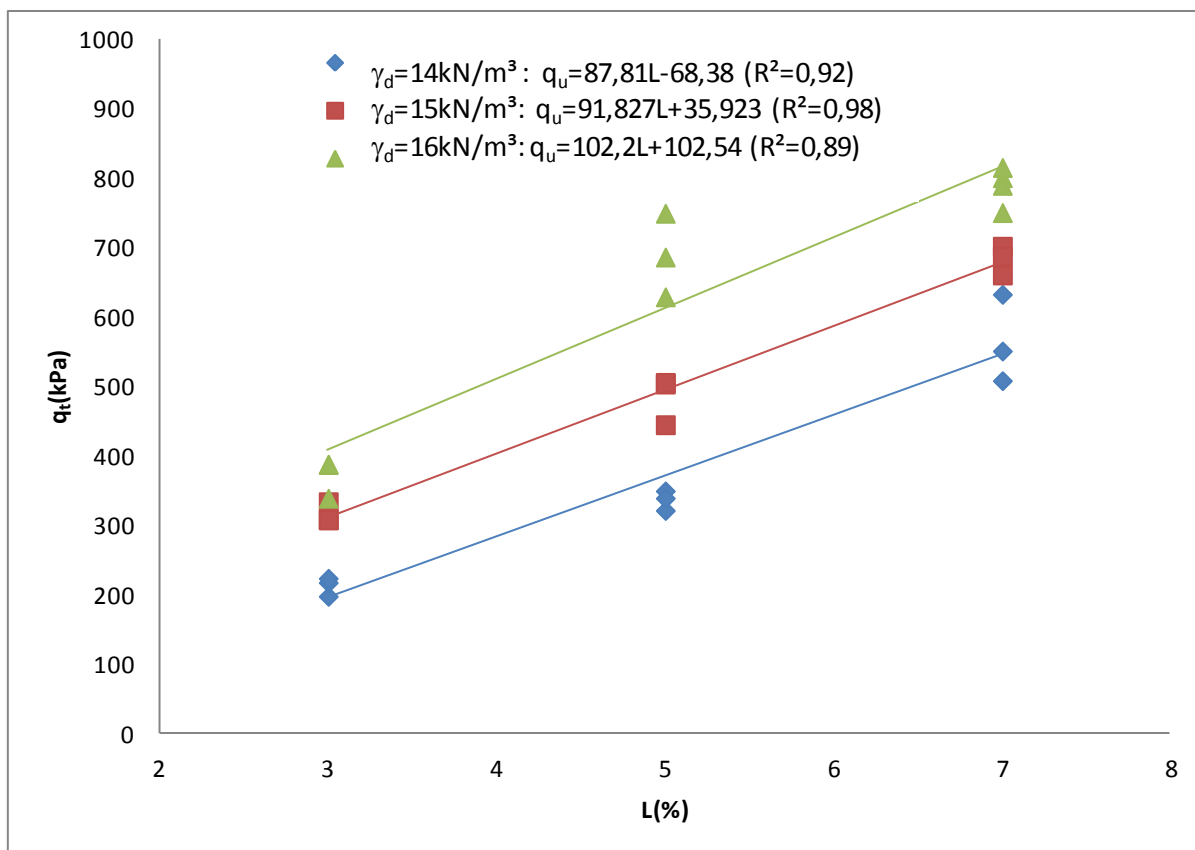


Figura 40- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 50 °C.

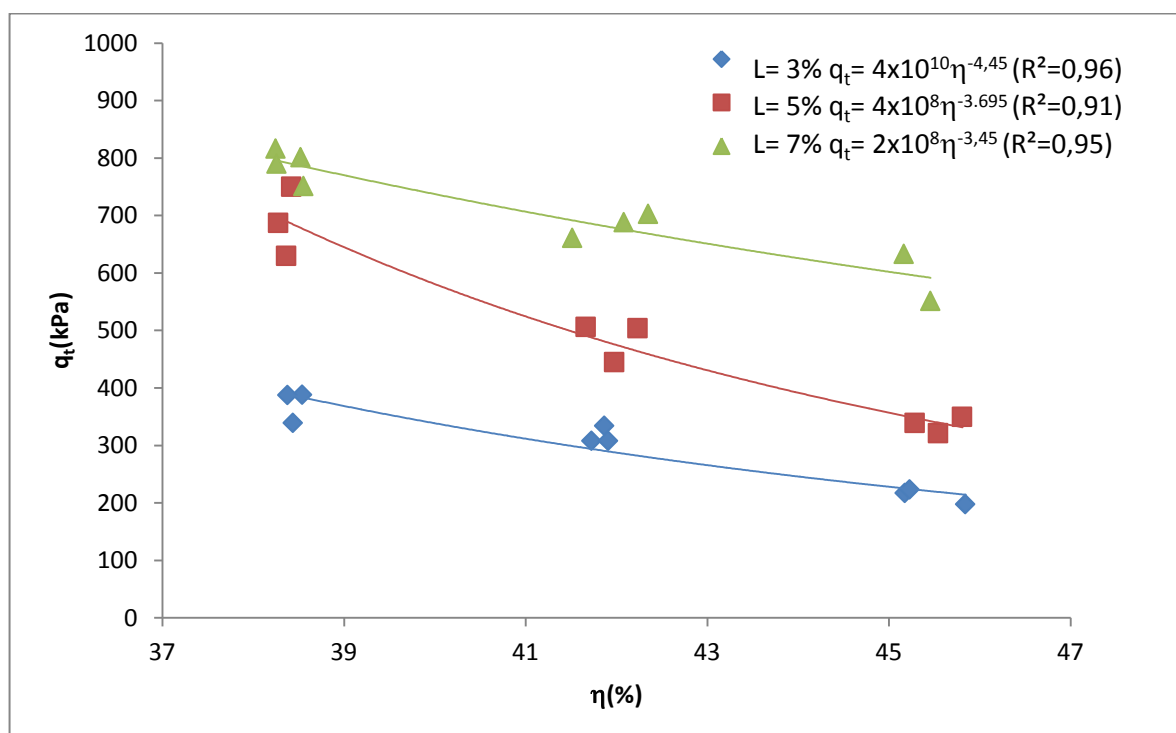


Figura 41- Variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à porosidade das amostras curadas a 50 °C.

Cada uma das curvas da Figura 41 possui um teor de cal, esta figura mostra o comportamento da resistência à tração por compressão diametral quando há variação da porosidade dos corpos-de-prova. Esta figura demonstra, quando há redução da porosidade, dá-se aumento da resistência à tração por compressão diametral, independentemente da quantidade de aglomerante.

A variação da resistência à tração por compressão diametral em relação ao coeficiente porosidade/teor volumétrico de cal é apresentada na Figura 42. Pode-se notar que não há uma relação única equação única capaz de ajustar a variação de resistência à tração com o coeficiente η/L_{iv} . Os corpos de prova Figura 42 possuem diferentes porosidade e teores de aglomerante.

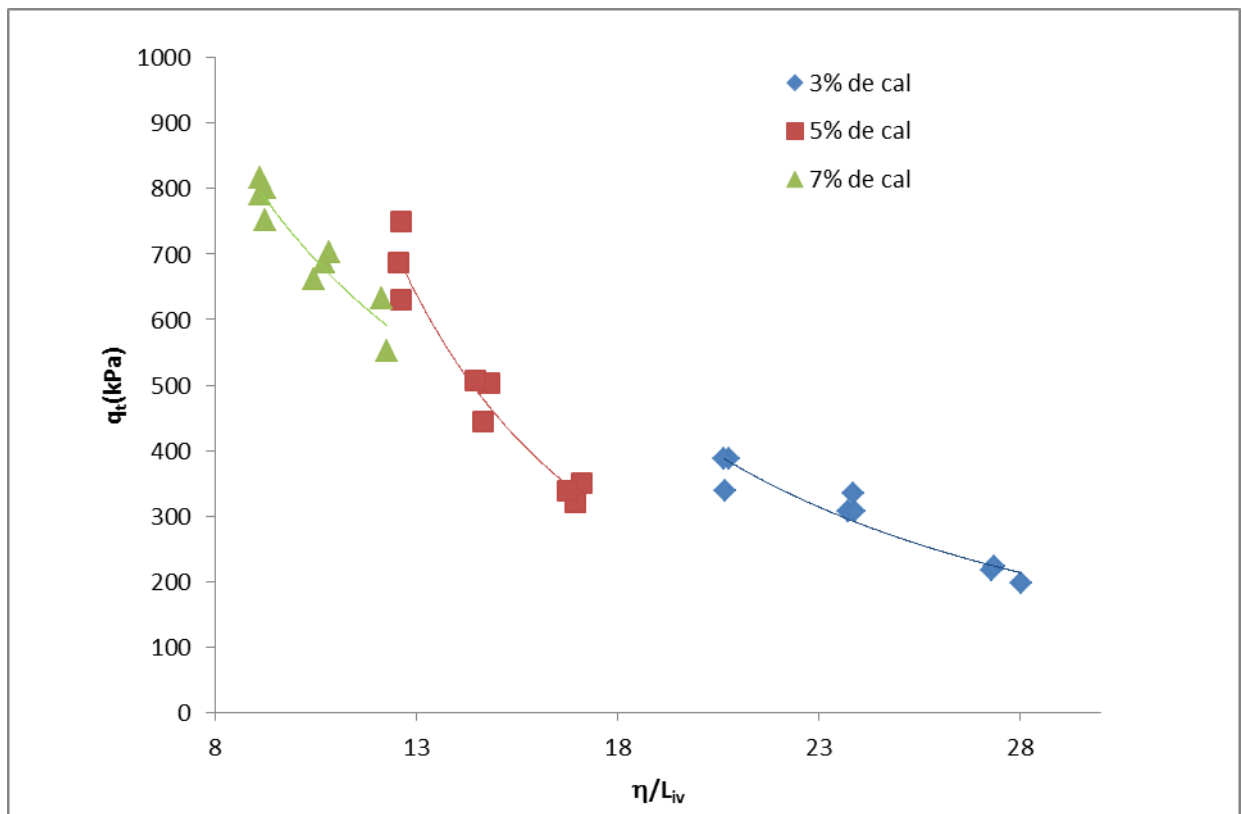


Figura 42-Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a tração na compressão diametral para os corpos de prova curados a 50°C.

As figuras 33, 36, 39 e 42 serão discutidas e analisadas com maior detalhe no capítulo 5.

4.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Os corpos de prova ensaiados à compressão simples têm suas características demonstradas nas Tabelas B.1 a B.5 do Apêndice “B”. A ordem de apresentação é: Tabela B.1 mostra os espécimes curados a 20°C, Tabela B.2 apresenta os as amostras submetidas à cura a

27°C, Tabela B.3 expõe as corpos-de-prova curadas a 35°C, por fim as amostras curadas a 50°C são apresentados na Tabela B.4.

Pode-se observar nestas tabelas que os dados foram agrupados a cada três linhas, pois correspondem às três repetições para um mesmo ponto de moldagem (mesmo teor de umidade, porosidade, teor de cal e teor de cinza volante).

4.2.1 Amostras curadas a 20°C

Baseados nos dados que compõem a B.1, formulou-se as Figuras 43 a 45. A Figura 43 apresenta as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco.

Os dados exibidos na Figura 43 permitem verificar que, para as amostras curadas a 20°C, a resistência à compressão tem comportamento semelhante ao da resistência à tração por compressão diametral, ou seja, quanto maior o teor de cal maior a resistência a compressão simples e esta variação é linear, dentro dos teores estudados.

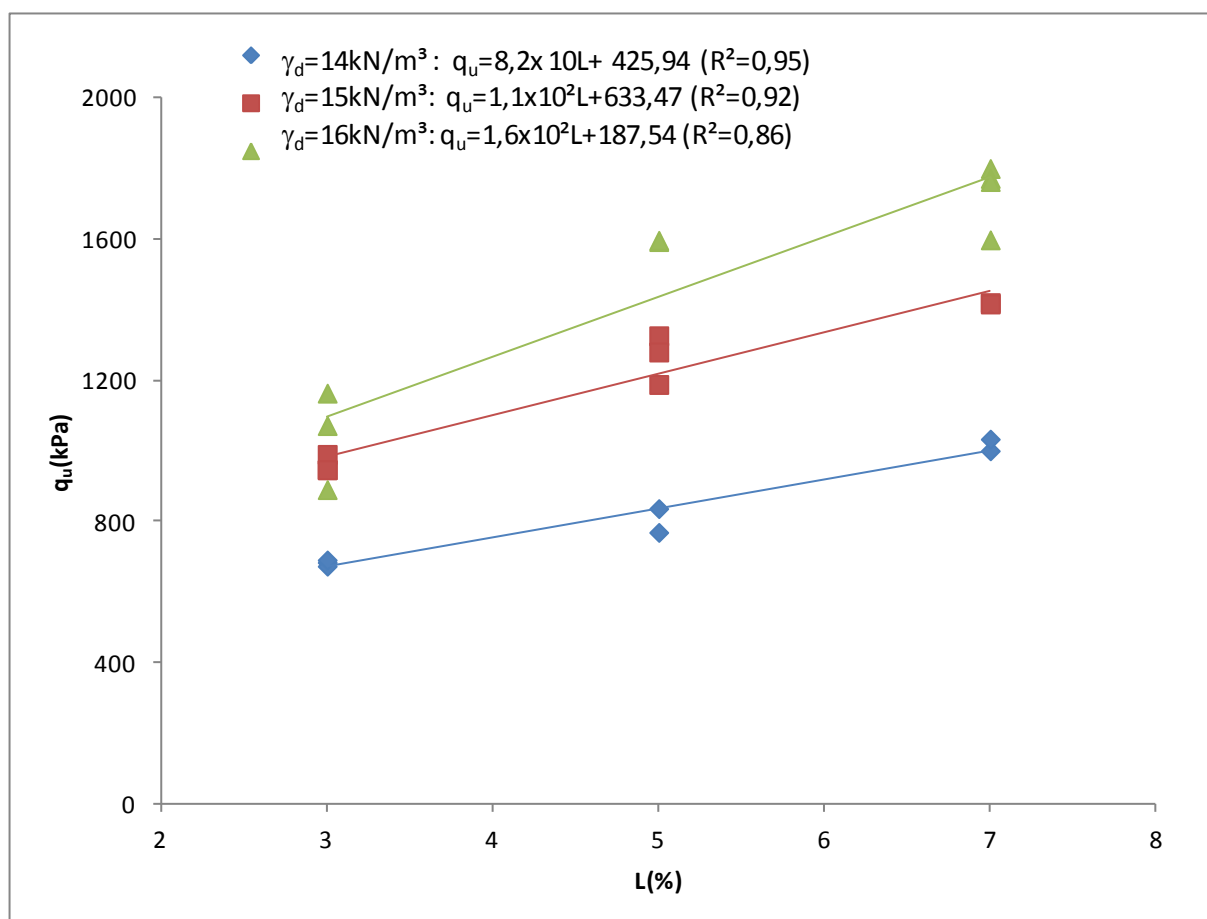


Figura 43- Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 20°C.

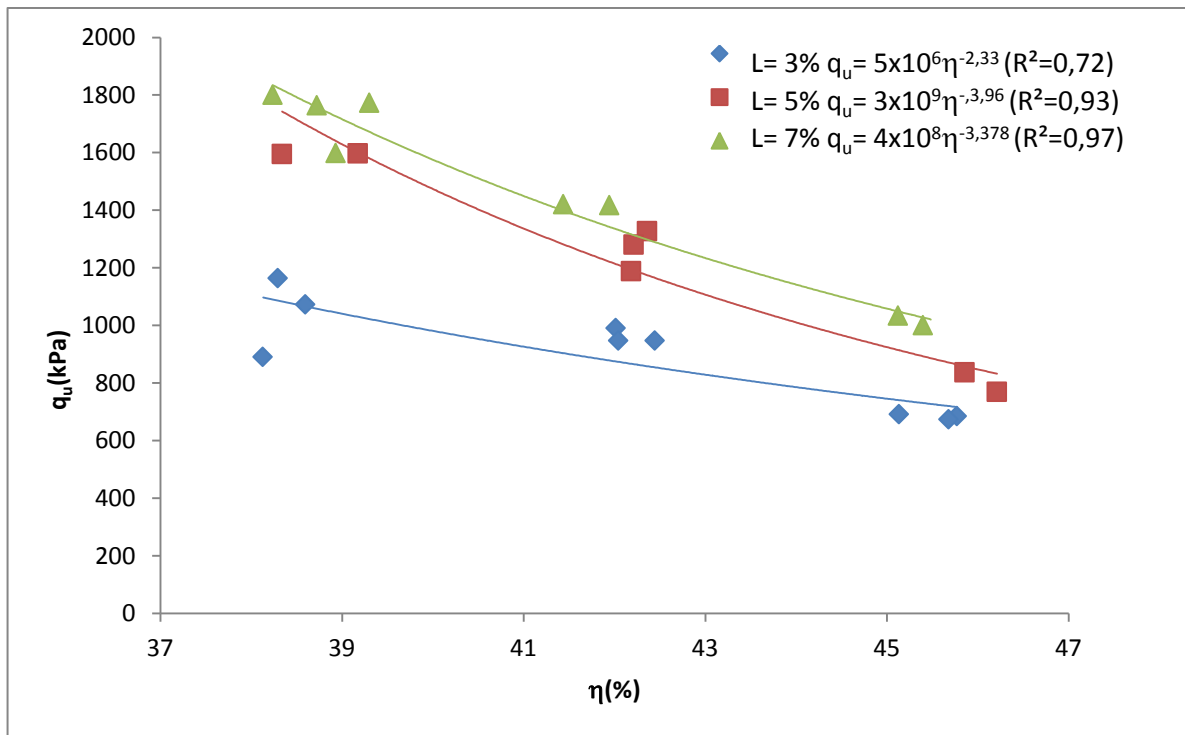


Figura 44- Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade dos corpos-de-prova s curadas a 20°C.

A Figura 44 expõe a variação da resistência à compressão simples devido a variação porosidade dos corpos de prova. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal. Esta figura nos permite observar que a redução na porosidade da mistura compactada promove o aumento da resistência à compressão simples do solo-cal estudado, independentemente da quantidade de cal utilizado. A redução, em média, de 8% da porosidade promove um aumento de cerca 1,8 vezes na resistência estudada. A partir da Figura 44 ainda pode-se observar que a resistência à compressão simples apresenta comportamento semelhante à resistência à tração na compressão diametral.

Quando juntados os dados da resistência a compressão simples com a variação da relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}), observa-se, como na resistência a tração, que não há uma tendência única de comportamento, como pode ser observado na Figura 45.

4.2.2 Amostras curadas a 27°C

Os dados da Tabela B.2 são expostos graficamente nas as Figuras 46 a 48. A Figura 46. expõe a variação de resistência à compressão simples da amostras curadas a 27°, cada uma das curvas da figura possui um peso específico seco.

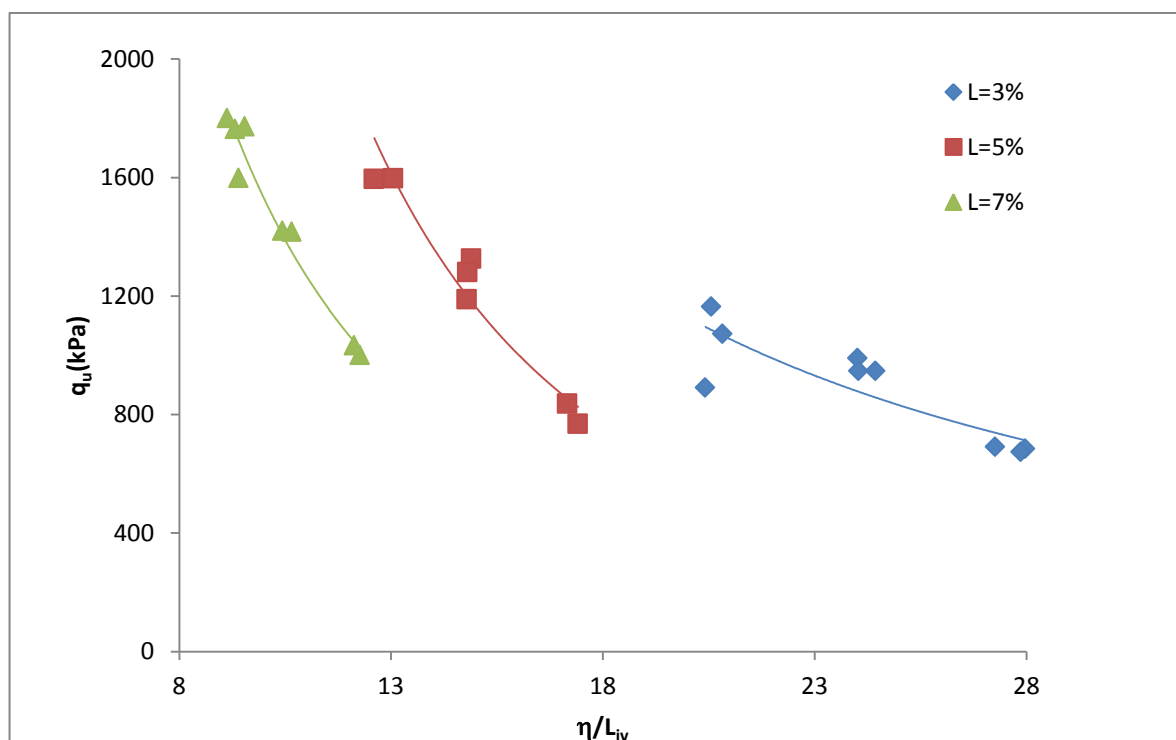


Figura 45- Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples para os corpos de prova curados a 20°C.

A resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento do teor de cal adicionada na mistura, para os teores estudados. Este fato pode ser observado na Figura 46.

A variação da resistência à compressão simples devido à mudança porosidade dos corpos de prova é exibida na Figura 47. Nesta figura cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal. Analisando a Figura 47 pode-se observar que a resistência à compressão simples comporta-se como a resistência à tração na compressão diametral quando a porosidade é alterada.

A Figura 48 expõe a variação da resistência à compressão simples pela variação da relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}). Baseando-se na Figura 48 pode-se observar que corpos de prova curados a 27°C, com diferentes teores de cal e pesos específicos secos, não apresentam um comportamento único que pode se ajustado por uma curva do tipo potencia assim como acontece com os corpos de prova a tração.

4.2.3 Amostras curadas a 35°C

As Figuras 49 a 51 são representações gráficas da Tabela B.2. O comportamento da resistência à compressão simples quando há variação do teor de cal é apresentada na Figura 49. Cada uma das curvas da figura possui um peso específico seco. Fundamentado na Figura 49

pode-se observar que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento do teor de cal adicionado.

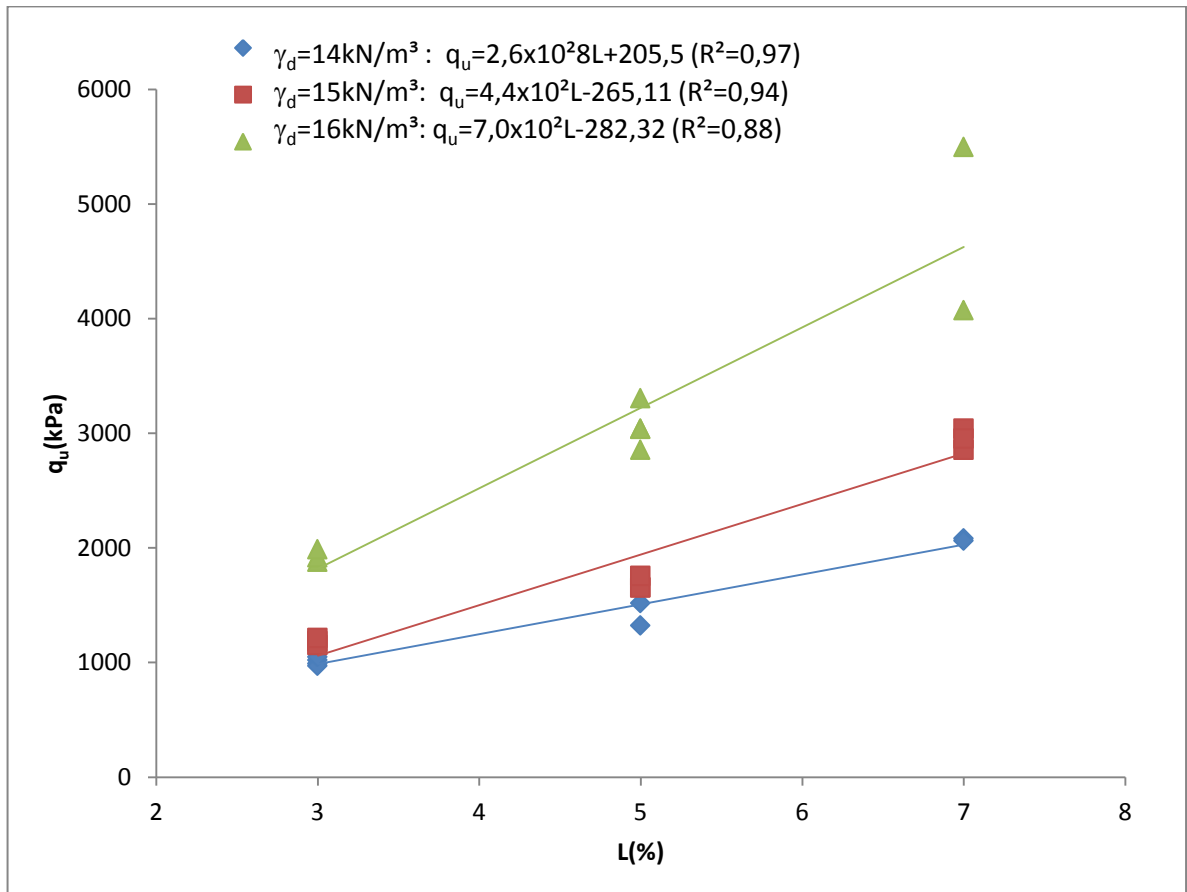


Figura 46- Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 27°C.

A Figura 47 mostra que, quando diminuída a porosidade da mistura, a resistência a compressão simples aumenta exponencialmente, da mesma maneira que ocorre com a resistência à tração por compressão diametral.

Os corpos de prova nas porosidades e teores de cal estudados apresentam um não comportamento único quando se trata da resistência à compressão simples pela a variação da relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/Liv), como exposta na Figura 48.

4.2.4 Amostras curadas a 50°C

Os dados constantes na Tabela B.4 são expostos graficamente na Figura 52. Na Figura 52 são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco. Verifica-se que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cal.

A Figura 53 apresenta as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade do solo-cinza-cal compactado para corpos-de-prova curados a 50°C. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal. A partir desta figura pode-se verificar que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a resistência a compressão simples do solo-cinza-cal. Pode-se observar também que a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

A Figura 54 mostra a variação da resistência à compressão simples pela variação da relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}). Baseando-se na Figura 54 pode-se observar que os corpos de prova curados a 50°C, não apresentam um comportamento único, como os corpos de prova a tração.

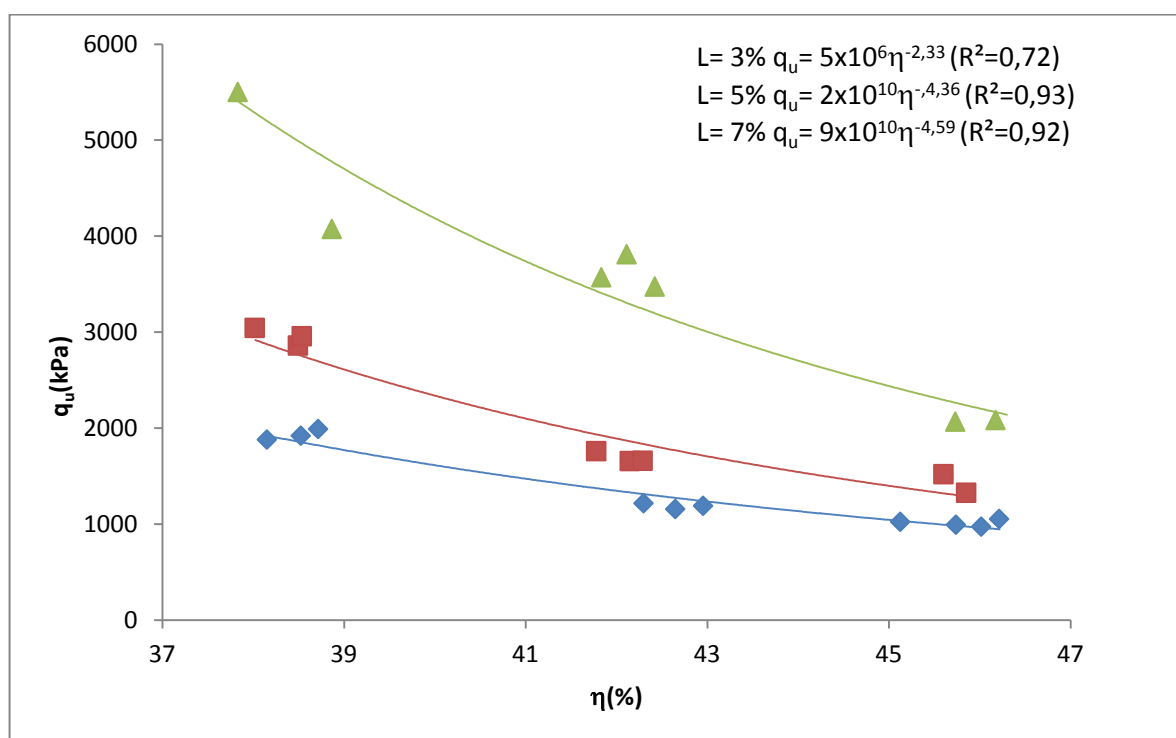


Figura 47- Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 27°C.

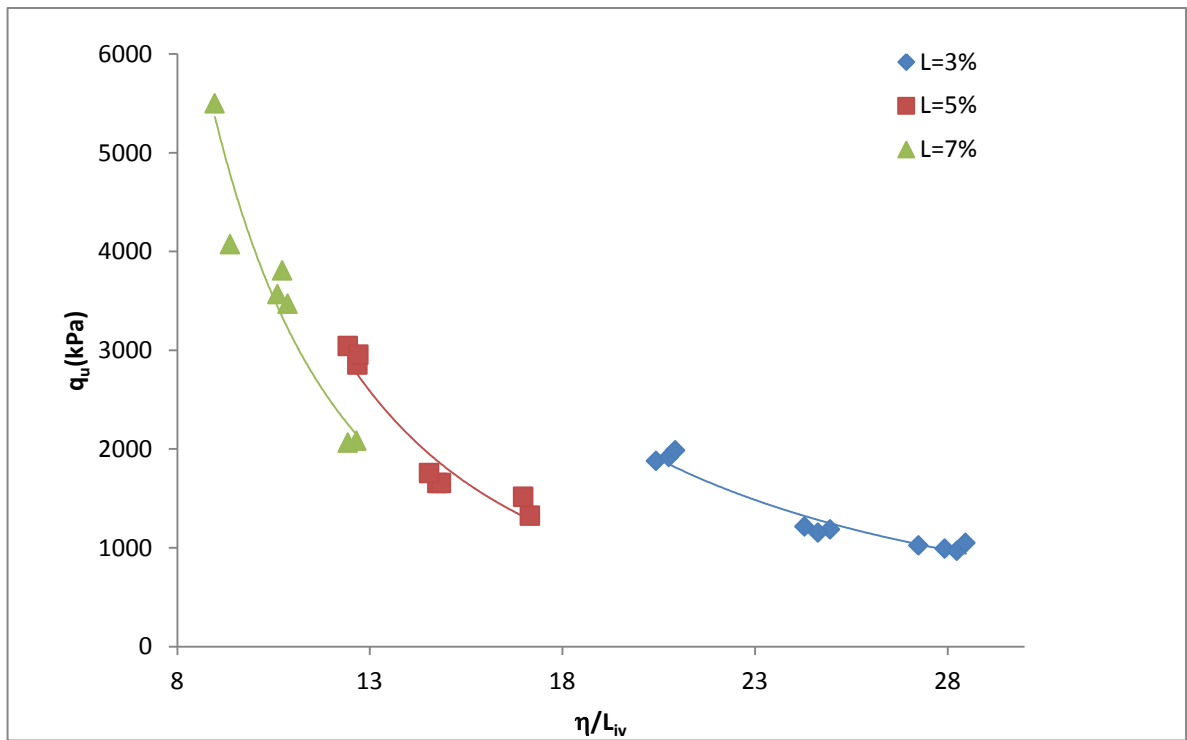


Figura 48- Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados a 27°C.

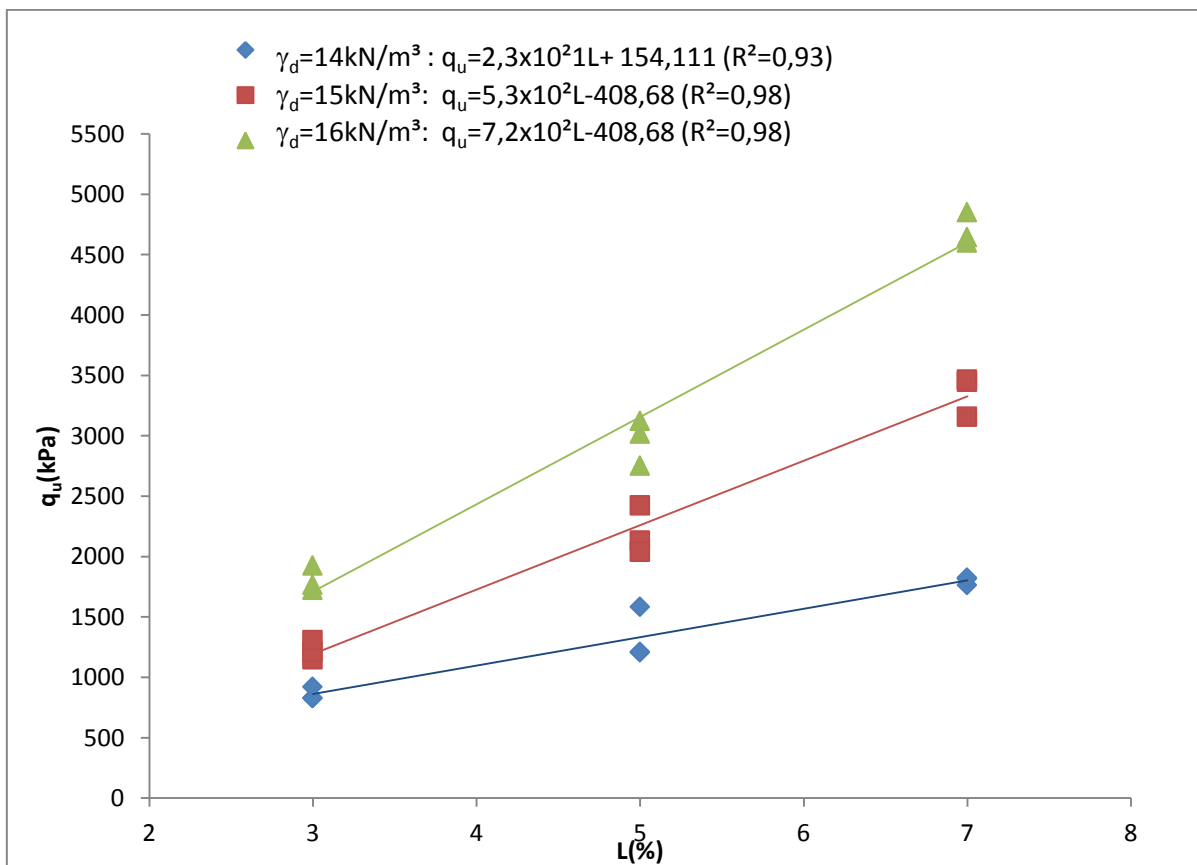


Figura 49- Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 35°C

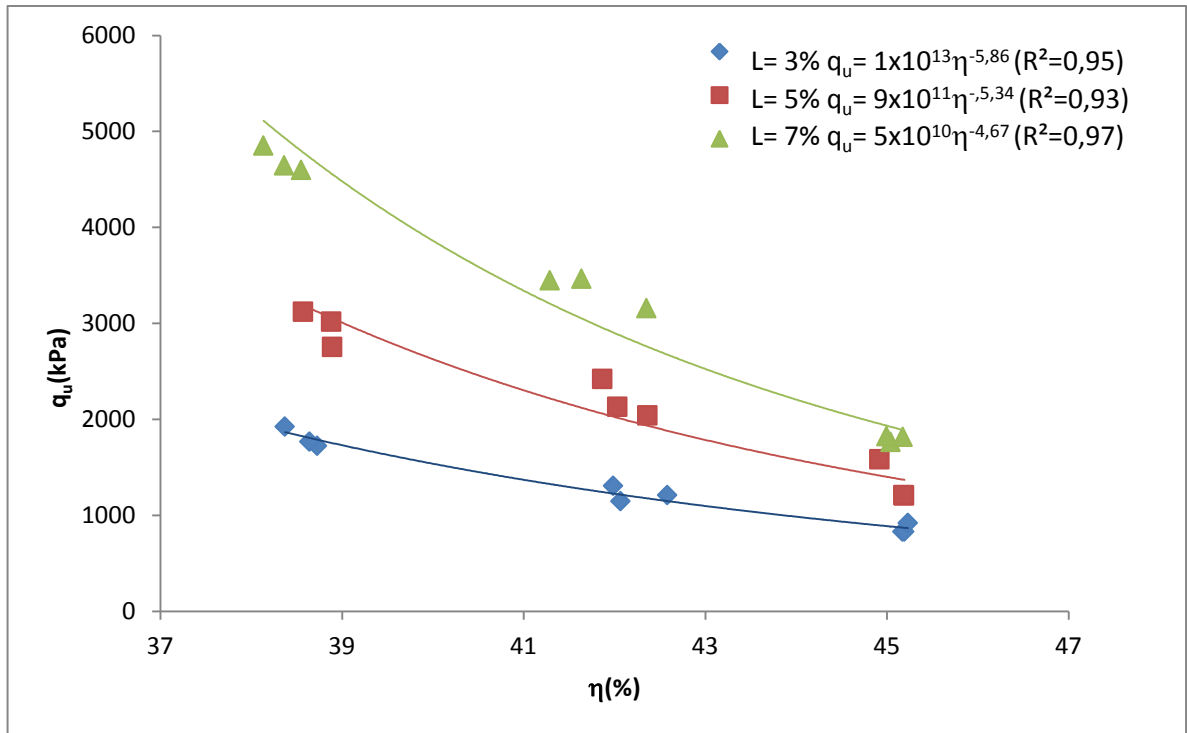


Figura 50- Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras curadas a 35°C.

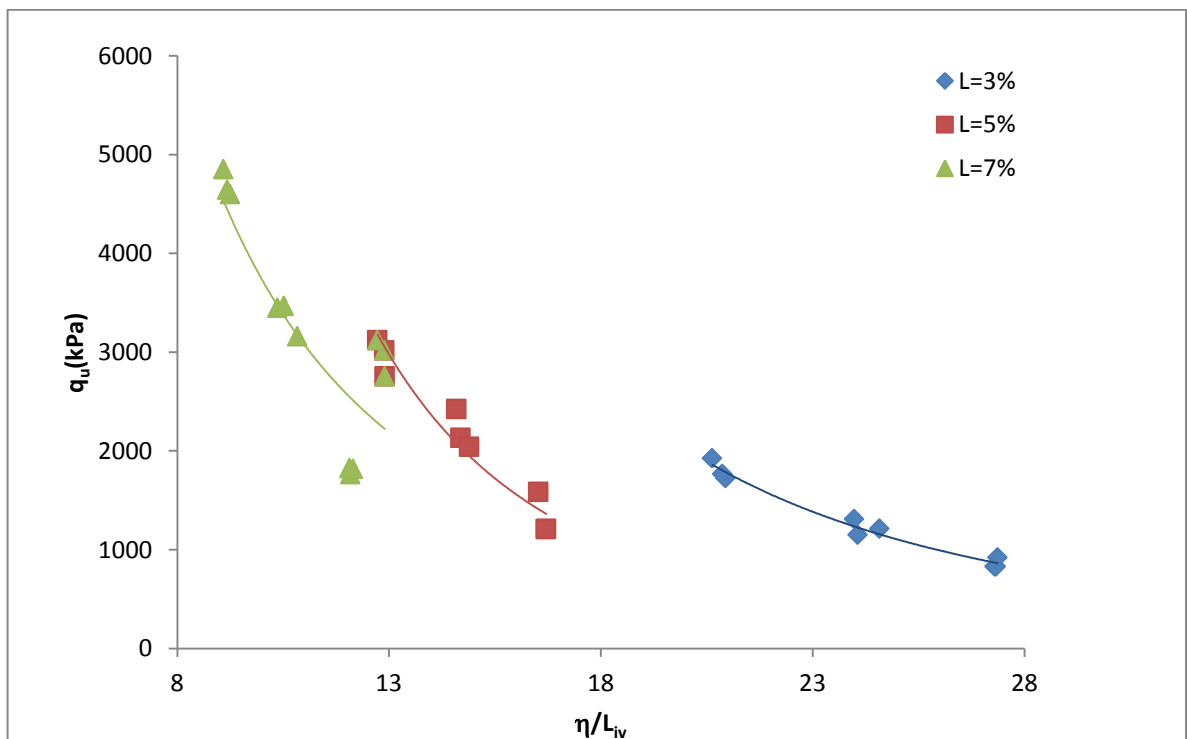


Figura 51- Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples para os corpos-de-prova curados 35°C.

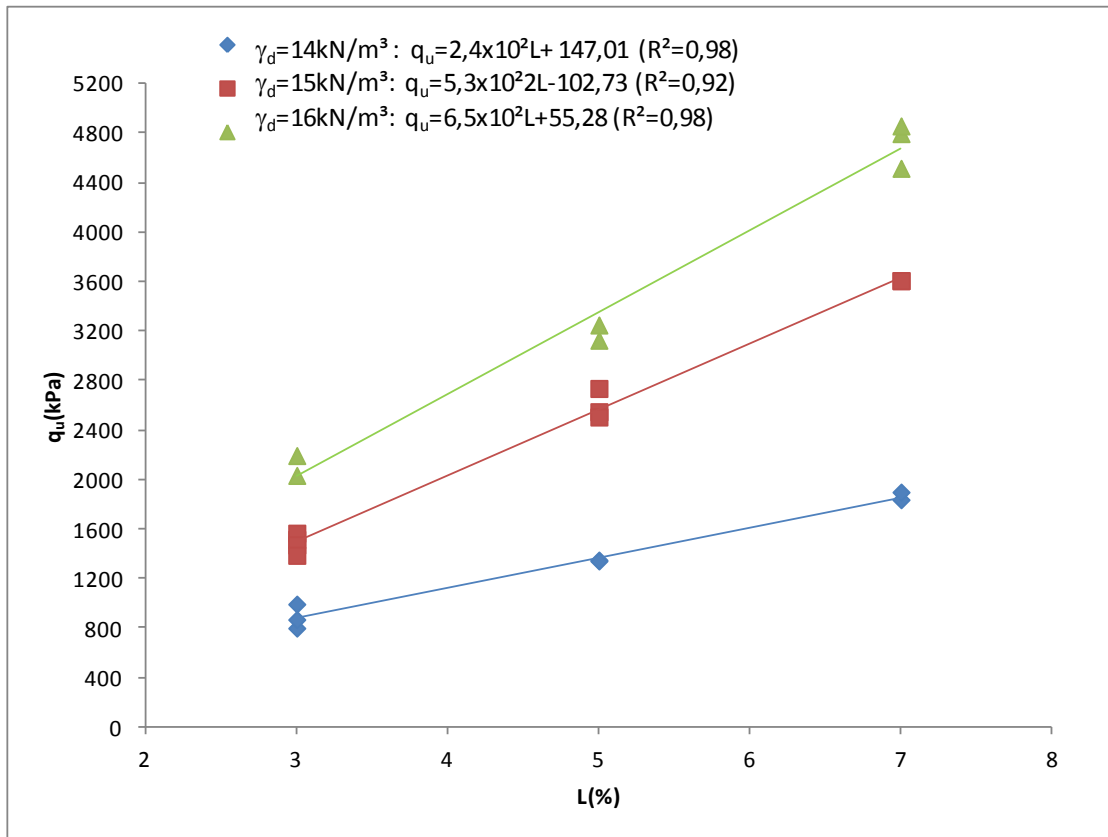


Figura 52- Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 50°C

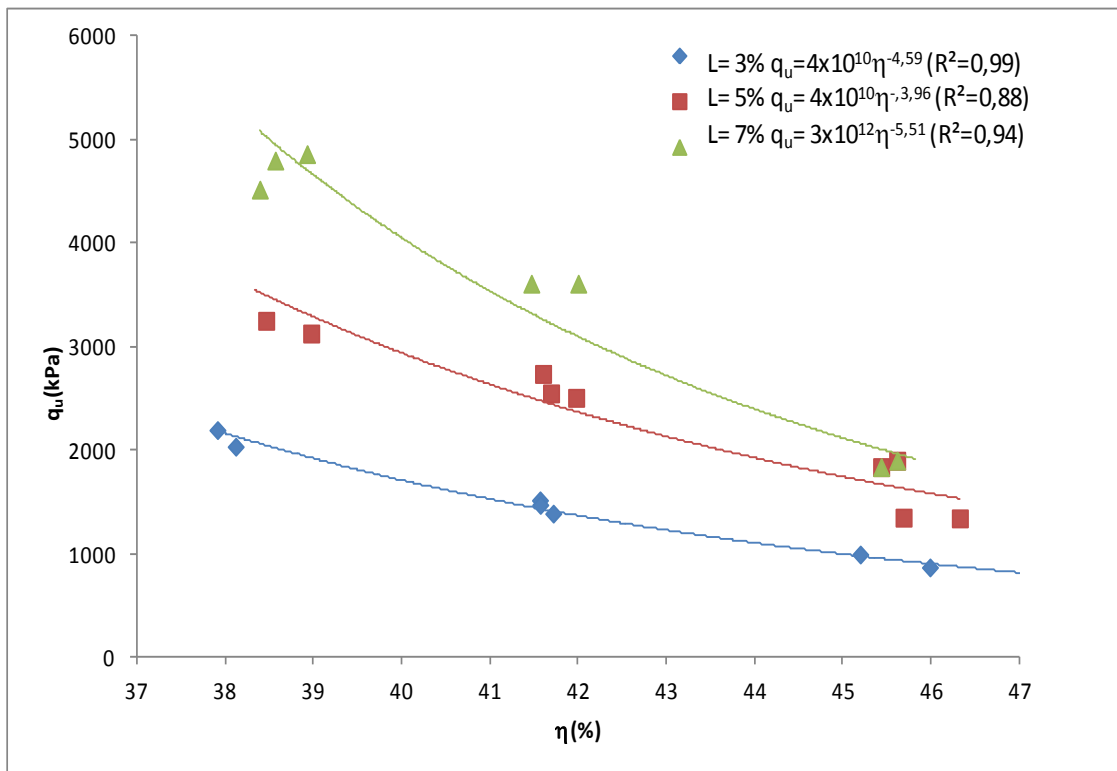


Figura 53- Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 50°C

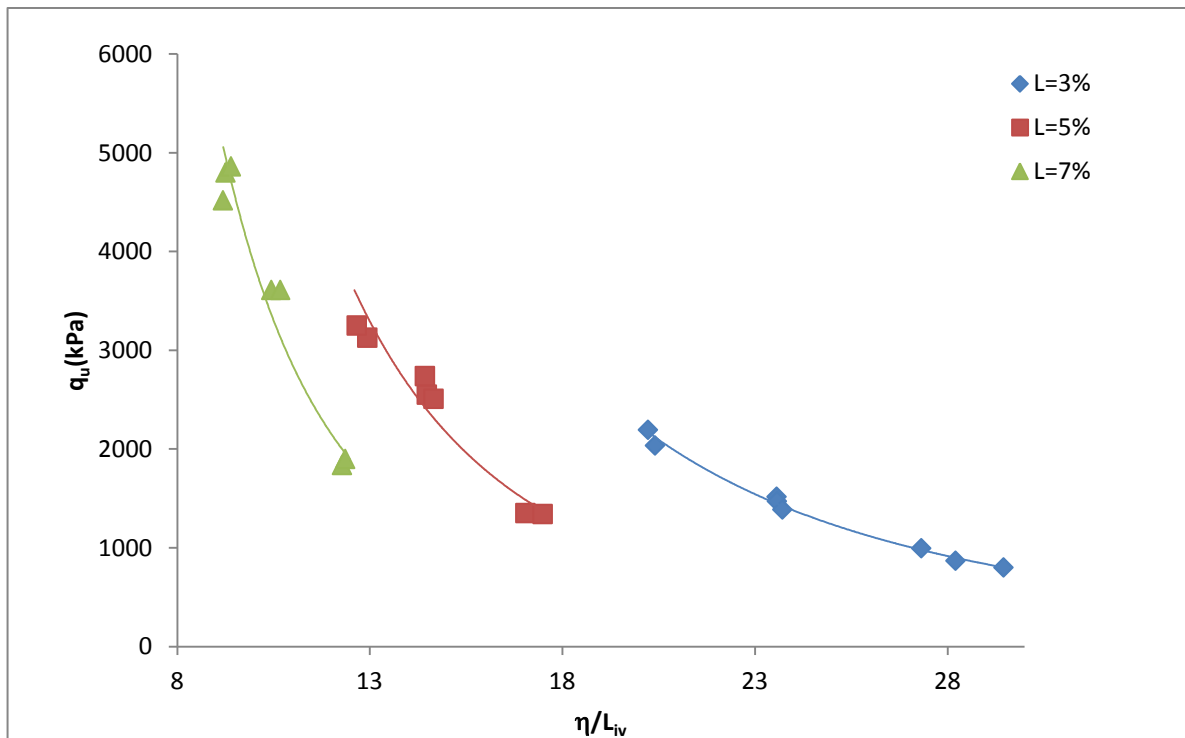


Figura 54- Relação entre porosidade/teor volumétrico de cal e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados a 50°C

As Figuras 45, 48, 51 e 54 serão discutidas em detalhes no capítulo 5.

4.3 MODOS DE RUPTURA DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES

A Figura 55(a) apresenta um corpo de prova da mistura areia de Osório/cinza volante/ cal submetido à compressão simples.

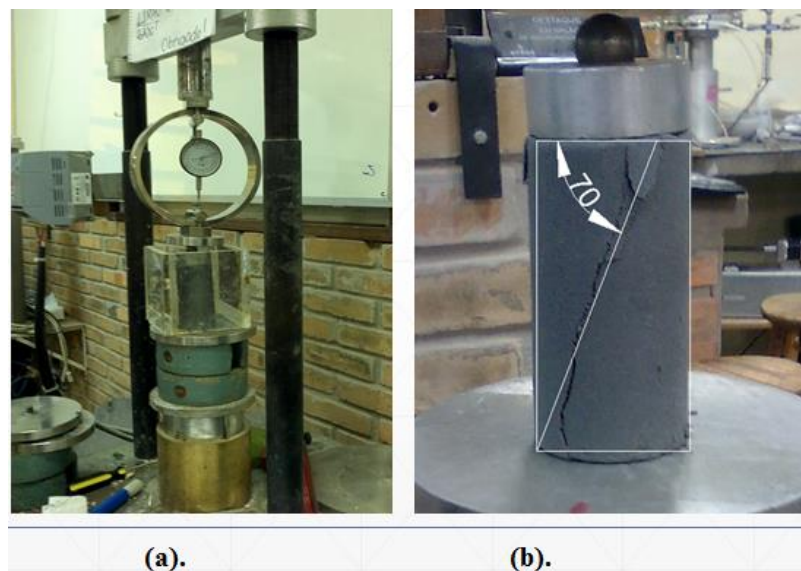


Figura 55-Corpos-de-prova submetidos à compressão simples (b) Plano de ruptura típico.

Na maioria dos ensaios de compressão simples realizados, observou-se um modo de ruptura frágil com a formação de um ou mais planos de ruptura bem definidos, sendo que para os corpos-de-prova curados a maior temperatura a ruptura foi mais frágil, ocorrendo às vezes o “estilhaçamento” do corpo-de-prova. Em geral, o ângulo formado entre o plano de ruptura e o plano onde atua a tensão principal maior foi de aproximadamente 70° (figura 55b). Não foram notadas diferenças significativas entre o tipo de ruptura apresentado por corpos-de-prova com mesma relação vazios/cal. Esse comportamento foi verificado também nos resultados obtidos por Lopes Junior (2007), Dalla Rosa (2009) e Lopes Junior (2011).

4.3 MODO DE RUPTURA DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDO À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL.

Todos os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de tração na compressão diametral apresentaram ruptura frágil com a formação de um único plano de ruptura, como mostrado na Figura 56(a), que divide o corpo de prova em duas partes iguais. A Figura 56 (b) mostra as faces do corpo-de-prova depois da ruptura. O modo de ruptura clássico deste ensaio mostrado na Figura 27.

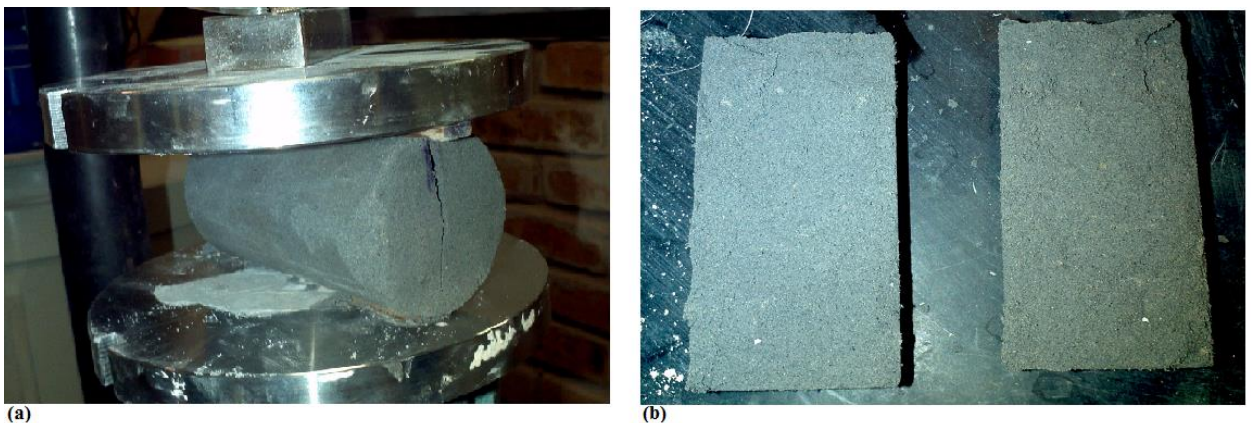


Figura 56- (a) Corpos-de-prova submetidos à tração por compressão diametral (b) Parte do corpo-de-prova.

4.5 MEDIDAS DE SUCCÃO MATRICIAL

As medidas de umidade após a imersão e de sucção mátrica são apresentadas na Tabela 8 onde:

L = teor de cal

S_i = grau de saturação de moldagem;

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

ω_i = teor de umidade de moldagem;

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

Tabela 8- Saturação e sucção mátrica das amostras

Nome	L(%)	γ_d (kN/m ³)	Temperatura (°C)	ω_i	ω_f	S_i (%)	S_f (%)	Sucção (kPa)
3-15-50	3	15	50	0,1405	0,2430	50,78	87,81	9,78
3-15-50	3	15	50	0,1391	0,2657	50,87	97,17	11,31
5-15-50	5	15	50	0,1416	0,2634	51,55	95,88	8,73
7-14-50	7	14	50	0,1431	0,2925	44,71	91,39	11,43
3-15-20	3	15	20	0,1474	0,2474	52,91	88,81	6,59
3-15-20	3	15	20	0,1405	0,2386	50,37	85,55	6,78
5-15-20	5	15	20	0,1423	0,2386	50,75	85,11	5,81
5-15-20	5	15	20	0,1435	0,2623	5,07	9,26	4,36
7-14-20	7	14	20	0,1421	0,2623	44,46	82,06	2,11
7-14-20	7	14	20	0,1461	0,2462	46,23	77,89	6,67

Através da Tabela 8 verifica-se que o grau de saturação de moldagem variou de 44,46% até 52,91%. Após a imersão por 24 horas, o grau de saturação obtido foi cerca de 90% para todos os corpos-de-prova. O valor médio obtido para a sucção mátrica foi de 7 kPa.

Na Figura 57 é apresentada a variação da resistência à compressão simples pela relação entre a sucção e a resistência à compressão simples (em porcentagem). Nota-se também, na figura 57, que a influência da sucção não passa de 1% da resistência à compressão simples, logo a mesma não tem influência significativa nos resultados deste trabalho e foi descartada em todas as amostras, fato semelhante foi encontrado por Dalla Rosa (2009).

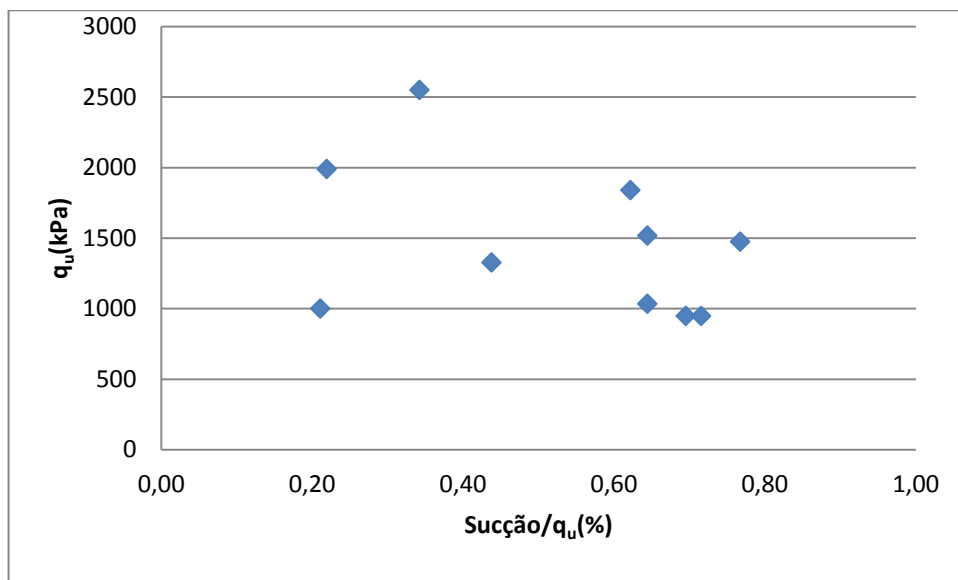


Figura 57- Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras.

4.6 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA

Os corpos-de-prova do experimento secundário foram analisados separadamente, pois todos possuem a porosidade de 41,5 % e 5% de cal. A Figura 58 mostra a variação da resistência a tração com o aumento dos dias de cura. Ajustou-se os pontos através de curvas logarítmicas, por representarem melhor o comportamento.

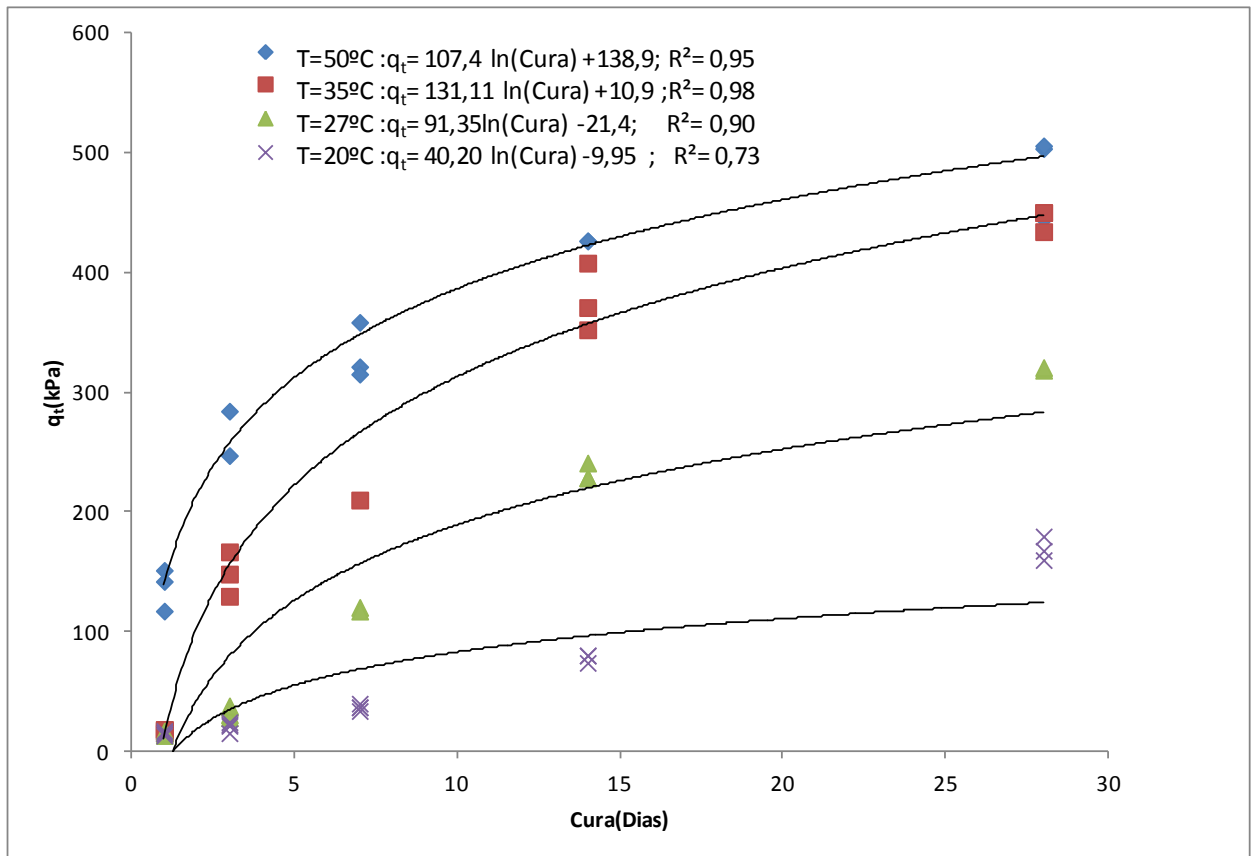


Figura 58- Avaliação do aumento da resistência a tração na compressão diametral com tempo de cura.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 EFEITO DO TEOR DE CAL

A análise detalhada das Figuras 31, 34, 37 e 40 relacionadas com a resistência a tração por compressão diametral e das Figuras 43, 46, 49 e 52 que mostram o comportamento da resistência a compressão simples permite que se verifique que a adição de cal, mesmo em pequenas quantidades, promove ganhos substanciais de resistência no material estudado. O crescimento dá-se nas duas resistências estudadas e em todas as temperaturas de cura. O aumento da resistência com a adição de cal é um aspecto reportado por grande parte dos trabalhos consultados (INGLES E METCALF, 1972; NÚÑEZ, 1994; LOVATO, 2004, DALLA ROSA, 2009, LOPES JUNIOR, 2007 e 2011).

A estabilização química com cal é caracterizada por duas etapas distintas: uma etapa inicial rápida (que dura de horas a dias), e outra mais lenta, que pode levar meses a anos. Alguns fenômenos que podem originar a etapa rápida no processo da interação da cal com um solo fino são: troca catiônica, floculação-aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, adsorção de cal e reações químicas. A fase lenta é caracterizada pelas reações pozolânicas, que proporcionam um aumento da resistência, devido à formação de produtos cimentantes e pela carbonatação, que é uma reação prejudicial. Estas reações são descritas em detalhes no item 2.1.

Os resultados da presente pesquisa mostram, que na faixa de teores de cal e nas temperaturas de cura estudadas, que a resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral aumentaram linearmente com o aumento da quantidade de cal.

Pode ser observado nas Figuras 31, 34, 37 e 40 que a taxa de crescimento da resistência a tração na compressão diametral devido ao acréscimo de cal, representada pela inclinação da reta, aumenta com a elevação da temperatura de cura até ao 35°C, entre 35°C e 50°C não há diferenças significativas, devido provavelmente a extinção das reações pozolânicas. O aumento da resistência observado deve-se ao fato que as reações pozolânicas são endotérmicas e, quando estas recebem calor do meio, a taxa de reação é aumentada. A maior rapidez das reações pozolânicas é mostrada no item 2.4.5, sendo que a Figura 9 mostra claramente que quando há elevação da temperatura a cal é consumida muito mais rapidamente, ou seja, o crescimento da resistência é mais acelerado. Outro aspecto observado nas Figuras 31, 34, 37 e 40, é que a taxa de aumento da resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, em geral aumenta com o aumento do peso específico aparente seco do solo-cinza-cal compactado para todas as temperaturas estudadas. Esse fato indica que a efetividade da cimentação é maior nas misturas

mais compactas, devido ao maior número de contatos entre as partículas. Este fenômeno foi observado para misturas solo-cal também por Clough *et al* (1981), Núñez (1991), Lopes Junior (2007 e 2011) e Dalla Rosa (2009).

As Figuras 43, 46, 49 e 52 demonstram que o a resistência a compressão simples segue o mesmo comportamento da resistência à tração por compressão diametral acima descrito, diferenciando-se por ser cerca de 6,6% vezes maior que a resistência à tração por compressão diametral e pelo fato que o aumento de resistência devido ao aumento da temperatura parar de ser significativo acima dos 27°C. Comportamento semelhante foi observado por Consoli *et al*(2012), para um solo siltoso.

5.2 EFEITO DA POROSIDADE

As Figuras 32, 35, 38 e 41 quando avaliadas permitem verificar que a diminuição da porosidade gera grandes benefícios à resistência à tração por compressão diametral. Independentemente da quantidade de cal utilizada e da temperatura de cura, a redução na porosidade do material promove ganhos consideráveis de resistência à tração por compressão diametral. Em média, a redução de 4 pontos percentuais na porosidade do material aumentou cerca de 1,7 vezes a resistência à tração a compressão diametral do solo-cal testado para todas as temperaturas de cura.

Analisando as Figuras 44, 47, 50 e 53 observa-se que a diminuição da porosidade favorece também o aumento da resistência a compressão simples, pois para um mesmo teor de cal amostras 4% menos porosas apresentaram resistência a compressão em media 2 vezes maiores.

Logo se verifica que ambas as resistências aumentarm exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada. O efeito benéfico em termos de aumento de resistência com a diminuição da porosidade foi observado em Núñez (1991), Lopes Junior (2007 e 2011) e Dalla Rosa (2009) para resistências á compressão simples. Lopes Junior (20011), estudando amostras de solo-cal, atribui o efeito do ganho de resistência com a redução na porosidade, em termos de resistência à compressão simples, à existência de um maior número de contatos entre as partículas existentes, tornando a cimentação mais efetiva. Além desse aspecto, a maior capacidade de distribuição de tensões no interior da amostra, bem como a maior capacidade de mobilização de atrito nas porosidades mais baixas também contribuem para o ganho de resistência à tração do material. As melhorias na resistência à tração na compressão diametral foram reportadas Consoli *et. al.* (2012) para uma mistura de solo siltoso com cal e por Moore

et.al. (1970). Chang e Woods(1992)mostraram, para uma mistura de areia cimento, por miscroscopia eletrônica que o quanto menor a porosidade maior a efetividade das ligações entre as partículas.

5.3 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMETRICO DE CAL

As Figuras 33, 36, 39 e 52 apresentam as curvas de variação da resistência à tração na compressão diametral em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal e as Figuras 45, 49, 51 e 54 mostram a variação da resistência à compressão simples pela relação η/L_{iv} .

Pode-se observar que não existe uma correlação única entre as resistências estudadas e a relação porosidade/teor volumétrico de cal. Nota-se ainda que iguais valores de porosidade/teor volumétrico de cal, obtidos de diferentes combinações de cal e porosidades, apresentam distintas resistências.

Lopes Junior (2007) estudando misturas de arenito Botucatu com resíduo de britagem e teores de 3% a 11% de cal, avaliou separadamente a relação das grandezas volume de vazios (V_v) e inverso do volume de cal ($1/V_{ca}$) com a resistência à compressão simples. O autor verificou que a taxa de variação da resistência em relação a cada uma dessas grandezas são substancialmente diferentes. O mesmo foi encontrado por Dalla Rosa 2009 para uma mistura de arenito Botucatu e cinza volante com adição de cal. A maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas utilizada pelos autores foi aplicar uma potência sobre o teor volumétrico de cal, que no caso do arenito Botucatu mais adições foi 0,12. O material da presente pesquisa apresentou melhores resultados quando ajustado com expoente 0,3 no teor volumétrico de cal.

As Figuras 59, 60, 61 e 62 apresentam, respectivamente, os mesmos dados das Figuras 33, 36, 39 e 42 porem utilizando o expoente 0,3 no teor volumétrico de cal. Os dados das Figuras 45, 48, 51 e 54 são expostos em função da porosidade pelo teor volumétrico de cal elevado 0,3 nas Figuras 63, 64, 65 e 66. Nestas figuras pode-se observar, pela qualidade dos ajustes, que a tendência de comportamento é a mesma tanto à tração quanto à compressão e para todas as temperaturas estudadas. Baseando-se nestes dados, pode-se perceber ainda que a influência do coeficiente porosidade/teor volumétrico de cal é a mesma para todos os casos estudados somente variando o escalar da equação, referindo-se a ordem de grandeza das resistências.

As equações que representam o aumento da resistência à tração na compressão diametral para as temperaturas de 20, 27, 35 e 50°C são apresentadas nas Equações 11, 12, 13 e 14

respectivamente. As Equações 15, 16, 17 e 18 representam as relações únicas para a resistência à compressão simples para as amostras curadas a 20, 27, 35 e 50°C, respectivamente.

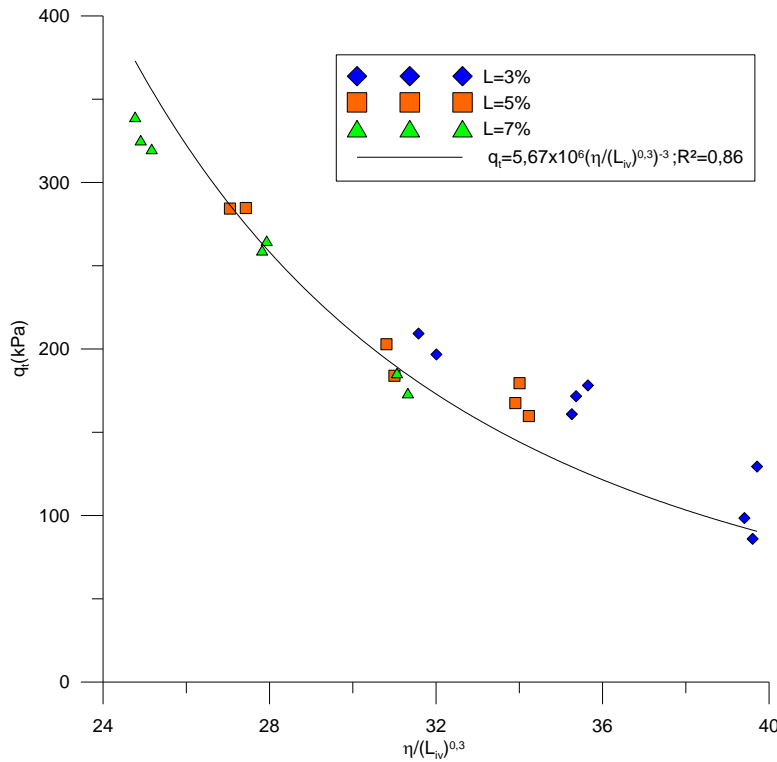


Figura 59- Variação de resistência à tração por compressão diametral pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 20°C

$$q_t = 5,67x10^6 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}} \right]^{-3} \quad \text{Eq.(11)}$$

$$q_t = 9,12x10^6 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}} \right]^{-3} \quad \text{Eq.(12)}$$

$$q_t = 1,31x10^7 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}} \right]^{-3} \quad \text{Eq.(13)}$$

$$q_t = 1,34x10^7 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}} \right]^{-3} \quad \text{Eq.(14)}$$

$$q_u = 3,14x10^7 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}} \right]^{-3} \quad \text{Eq.(15)}$$

$$q_u = 6,63x10^7 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}} \right]^{-3} \quad \text{Eq.(16)}$$

$$q_u = 6,50x10^7 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}} \right]^{-3} \quad \text{Eq.(17)}$$

$$q_u = 7,03x10^7 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}} \right]^{-3} \quad \text{Eq.(18)}$$

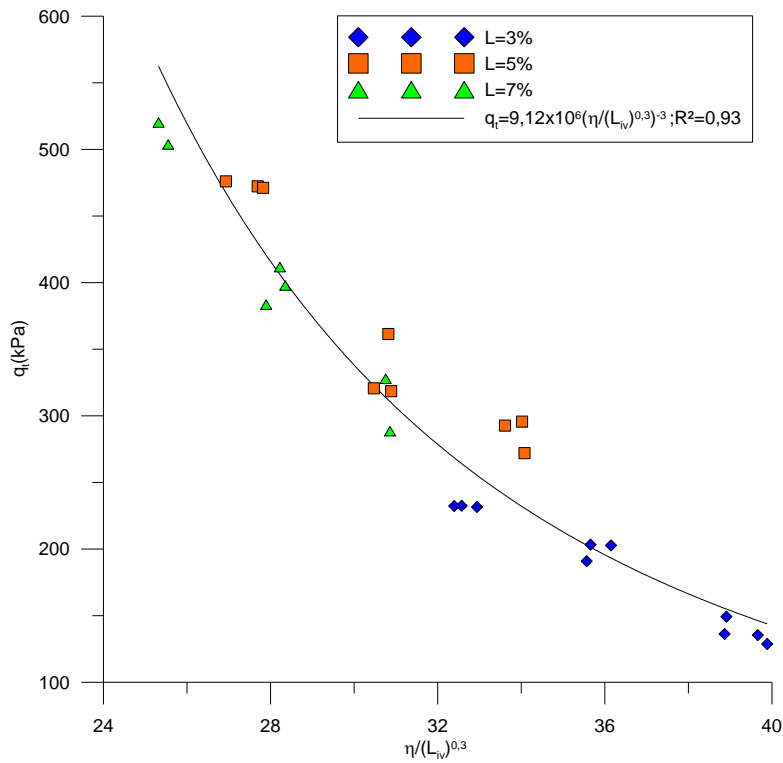


Figura 60- Variação da resistência à tração por compressão diametral pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 27°C.

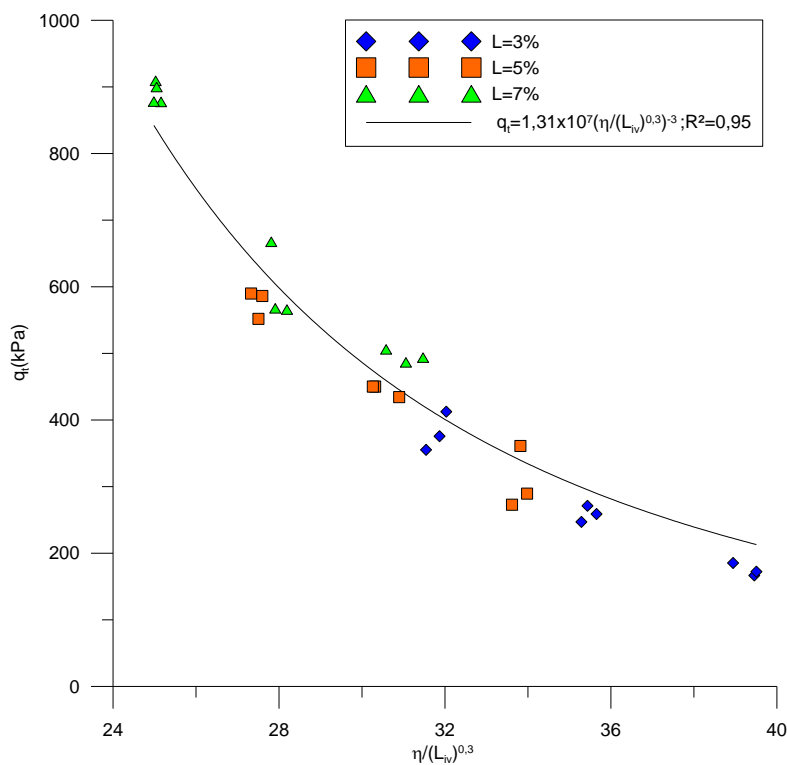


Figura 61-Variação da resistência à tração por compressão diametral pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 35°C.

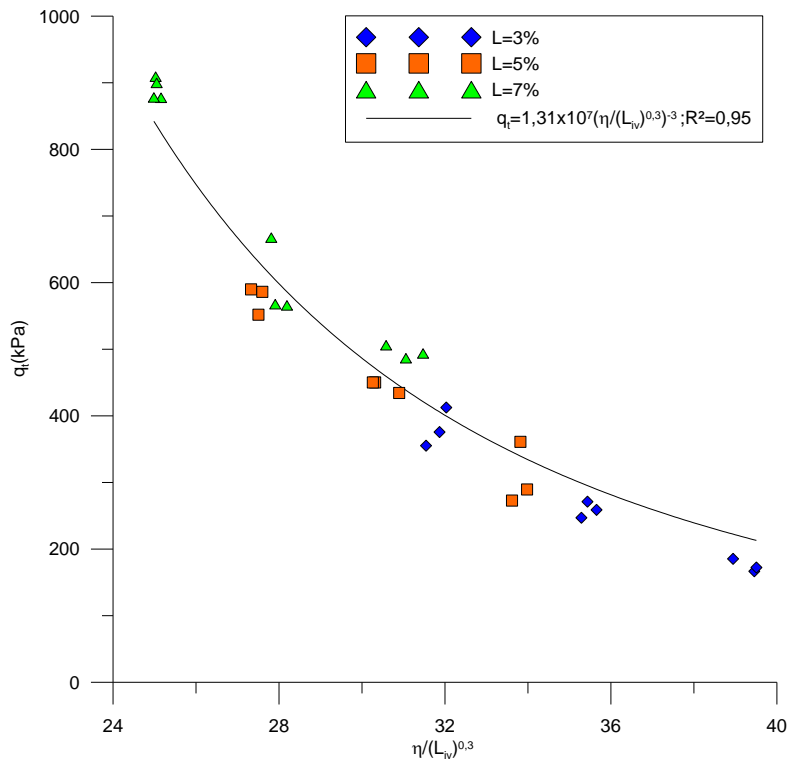


Figura 62-Varição da resistência à tração por compressão diametral pela variação da relação $\eta / (L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 50°C.

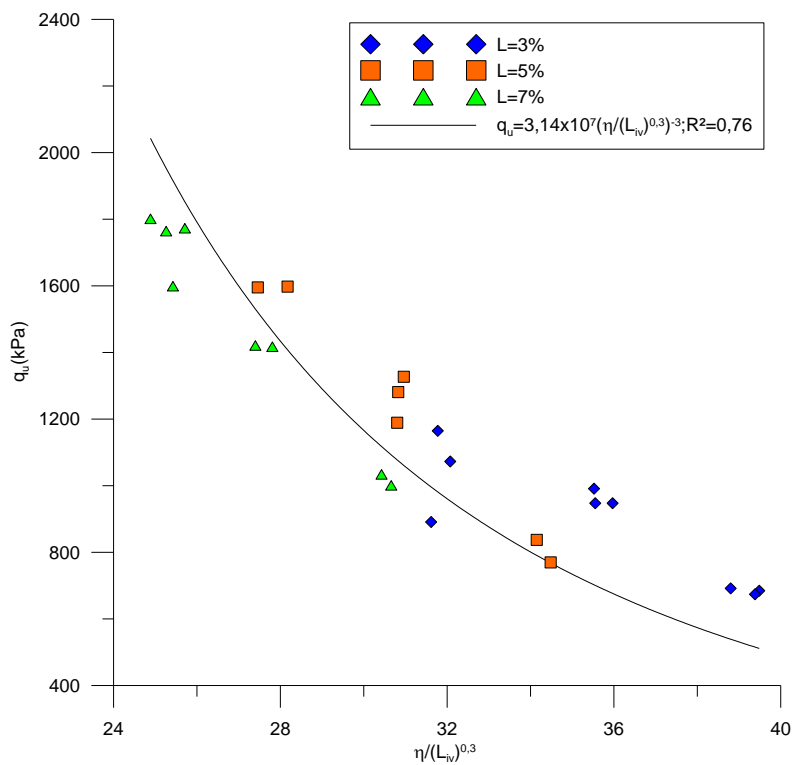


Figura 63-Varição da resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta / (L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 20°C.

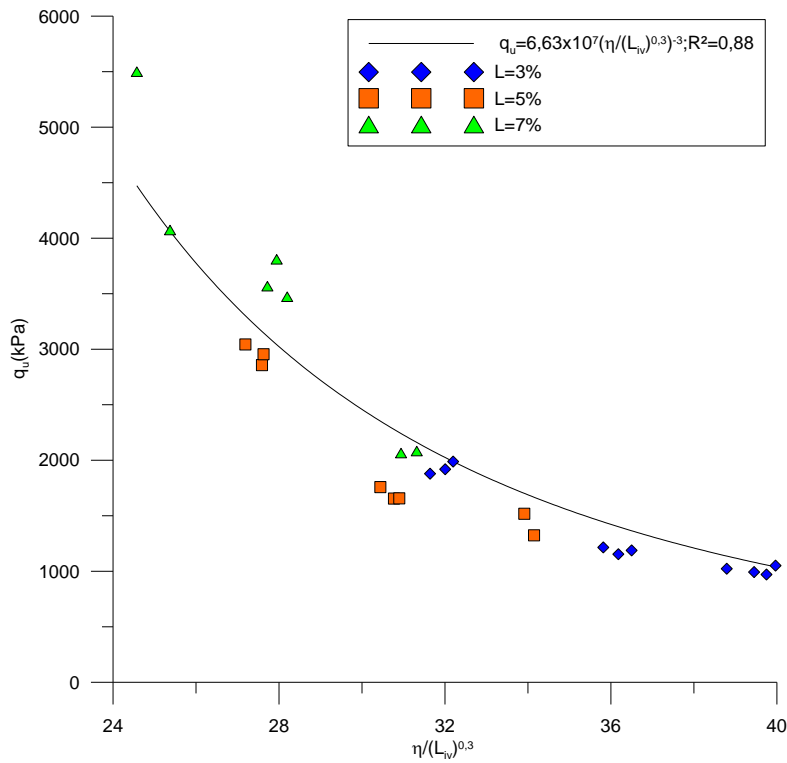


Figura 64-Variação da resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta / (L_v)^{0,3}$ para a temperatura de 27°C.

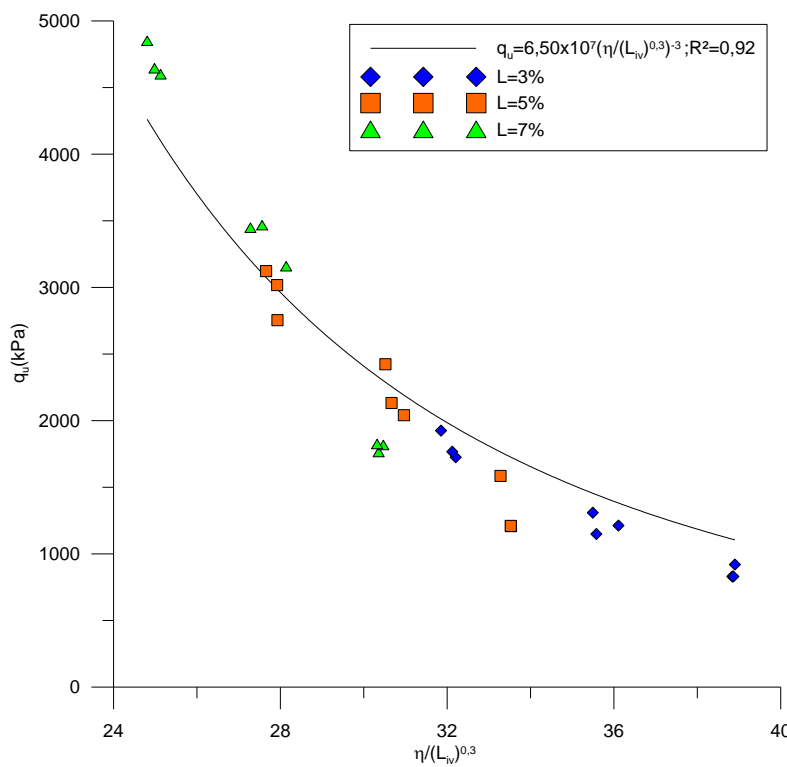


Figura 65-Variação da resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta / (L_v)^{0,3}$ para a temperatura de 35°C.

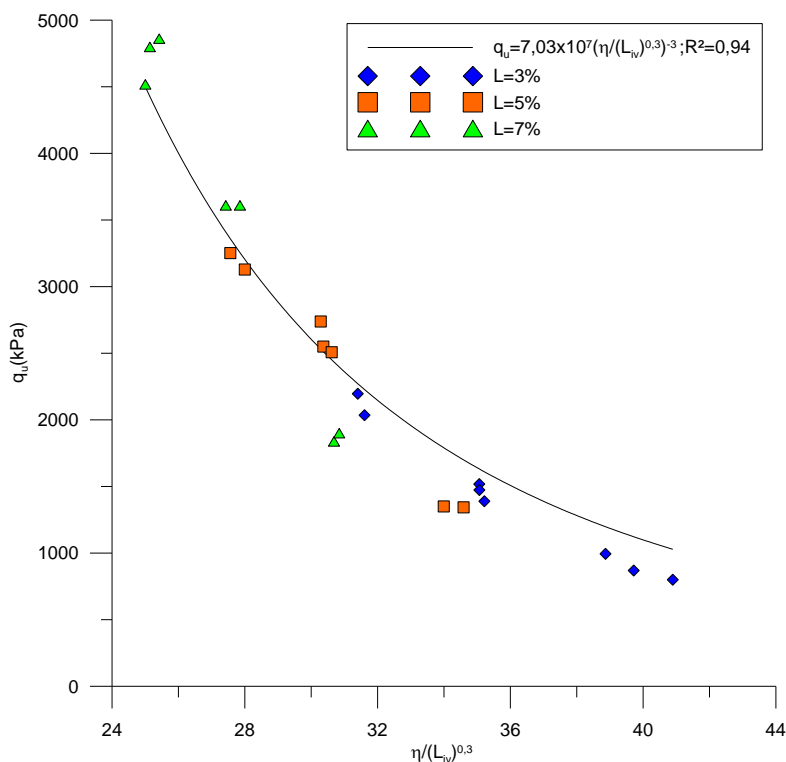


Figura 66-Variação da resistência a compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 50°C.

5.4 EFEITO TEMPERATURA DE CURA

A Figura 67 apresenta os resultados das relações η/L_{iv} (ajustados) pela resistência à tração na compressão diametral das amostras curadas com 20, 27, 35 e 50°C por 28 dias. Pode ser observado que as curvas que definem a relação η/L_{iv} (ajustados), apresentadas na Figura 67, têm a mesma tendência exponencial.

A Figura 67 mostra que a variação de temperatura de cura 20°C para 27° aumenta a resistência à tração na compressão diametral 1,6 vezes. A elevação da temperatura de cura de 27°C para 35°C, torna a resistência estudada 1,4 vezes maior. Pode-se observar também que não há acréscimo relevante quando a temperatura é varia de 35°C para 50°C, provavelmente devido a extinção das reações pozolânicas. Estas podem extinguir-se pela falta de um componente. Analisando a Figura 70 pode-se observar que para a mistura estudada curada por 28 dias nas temperaturas de 20, 27, 35 e 50°C existe uma relação única da resistência à tração na compressão diametral com a porosidade, o teor volumétrico de cal e a temperatura, até a temperatura de 35°C à relação $\frac{q_t}{\left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}}\right]^{-3}}$ com a temperatura é linear e pode ser expressa pela Equação 19, após esta temperatura torna-se uma assíntota.

As mudanças na resistência à compressão simples devido a variação na temperatura de cura são exibidas na figura 68. Nesta pode-se observar que somente ocorre aumento significativo na resistência, cerca de 2vezes, quando a temperatura de cura é elevada de 20°C para 27°C e a partir desta não há aumento significativo de resistência à compressão simples com o aumento da temperatura de cura, provavelmente devido a extinção das reações entre a cal e a cinza volante. Pode-se concluir ainda analisando a Figura 70 que para a mistura estudada curada por 28 dias a temperaturas de 20, 27, 35 e 50°C existe uma relação única da resistência à compressão simples com a porosidade, o teor volumétrico de cal e a temperatura. Até a temperatura de 27°C, à relação $\frac{q_t}{\left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}}\right]^{-3}}$ com a temperatura é linear e pode ser expressa pela Equação 20, após esta temperatura torna-se uma assíntota.

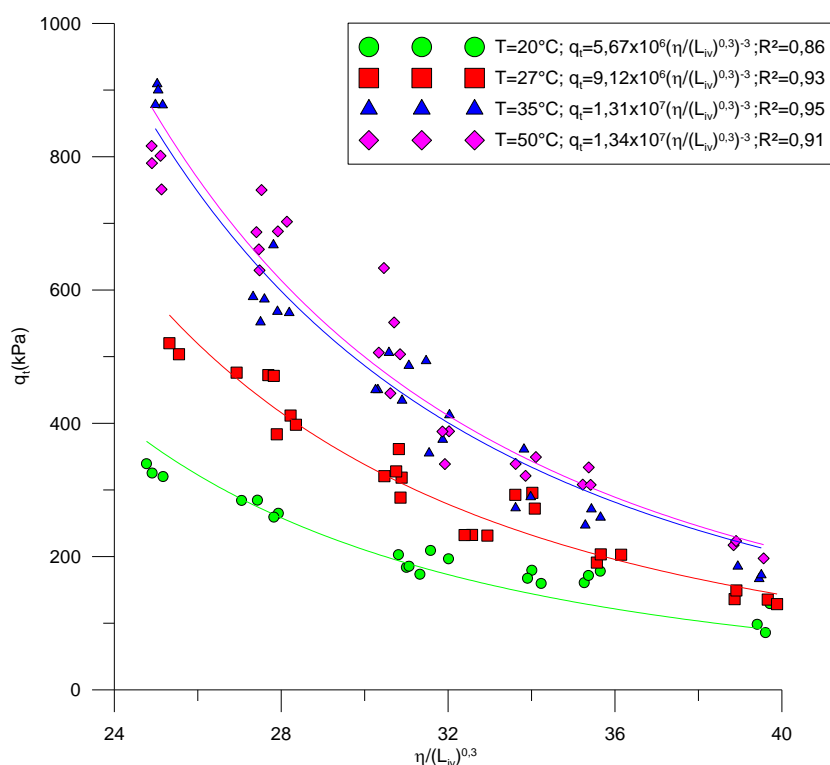


Figura 67- Mudança na resistência a tração na compressão diametral pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para todas a temperaturas.

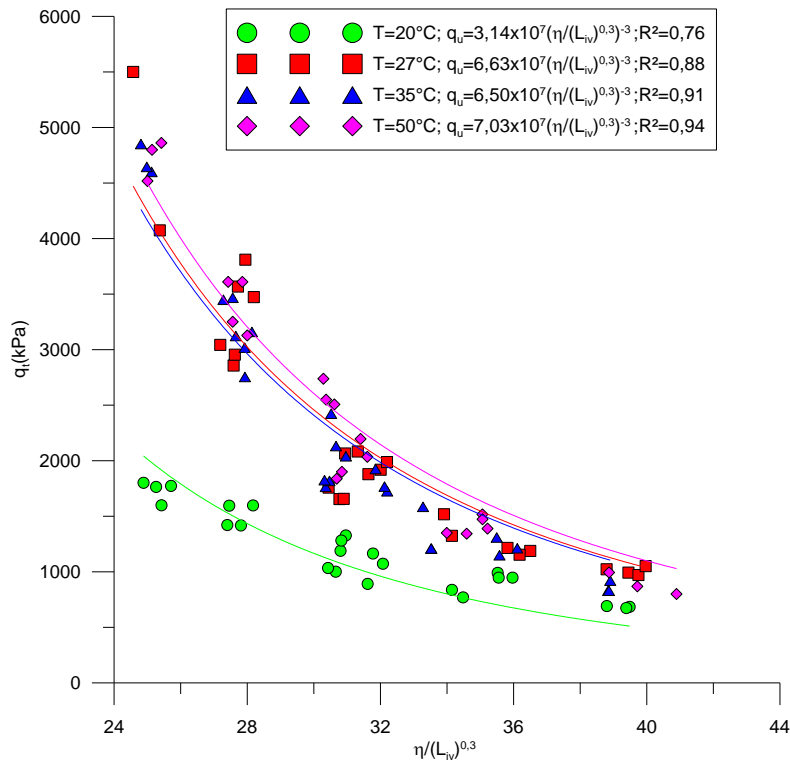


Figura 68-Mudança na resistência à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para todas a temperaturas.

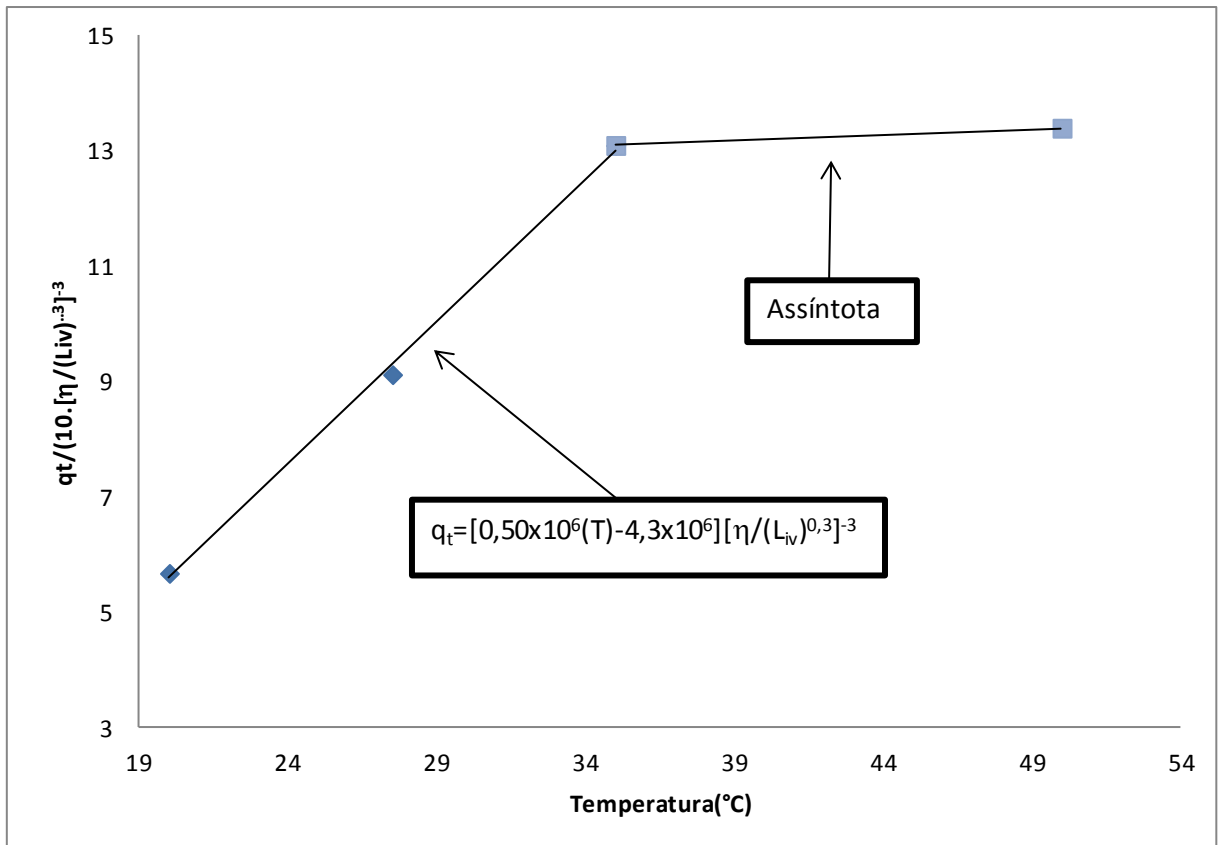


Figura 69- Variação da resistência à tração por compressão diametral ajustada com a temperatura.

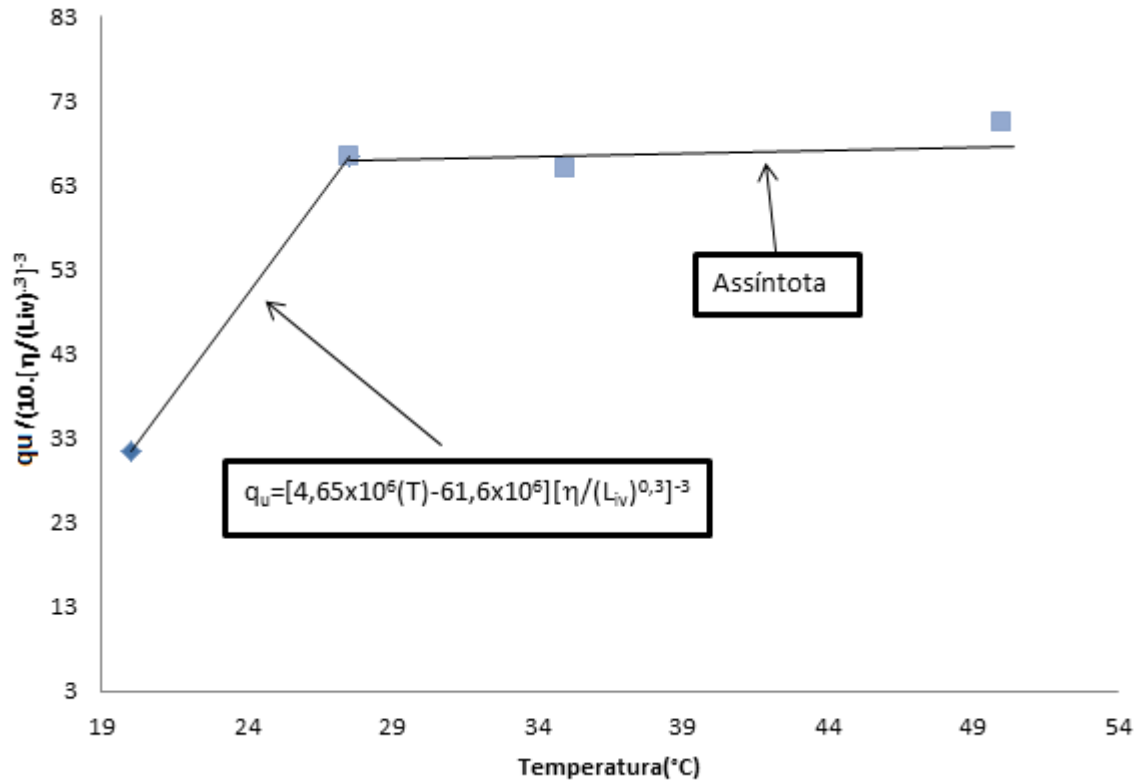


Figura 70-Variação da resistência à compressão simples ajustada com a temperatura

$$q_t = [0,50 \times 10^6 (T) - 4,3 \times 10^6] \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}} \right]^{-3} \quad \text{Eq.(19)}$$

$$q_u = [4,65 \times 10^6 (T) - 61,6 \times 10^6] \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}} \right]^{-3} \quad \text{Eq.(20)}$$

5.5 RAZÃO TRAÇÃO/ COMPRESSÃO

A Figura 71 mostra o comportamento da resistência à tração por compressão diametral e compressão simples curados a 20°C. A Equação 21 mostra que dividindo a Equação 11 pela Equação 12 obtemos uma constante (0,18), logo 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 valor de constante pode ser encontrada pela 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 à compressão simples, conforme mostrado na Figura 72. Porém a relação entre as resistências varia levemente com a mudança da temperatura, sendo de 0,14 para 27°C, como pode ser observado nas Figuras 73 e 74, tendo o valor 0,20 para a temperatura de 35°C, conforme apresentado nas figuras 75 e 76 e valendo 0,19 para a temperatura de 50°C como mostrado nas Figuras 77 e 78.

$$\frac{q_t}{q_u} = \frac{5,67 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}} \right]^{-3}}{3,14 \times 10^7 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}} \right]^{-3}} = 0,18 \quad \text{Eq.(21)}$$

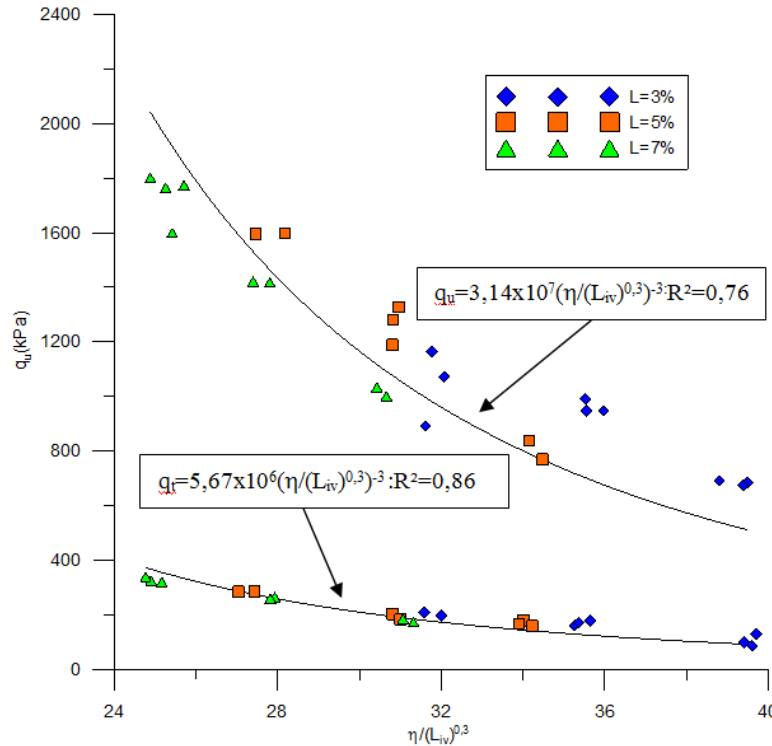


Figura 71-Mudanças na resistência à tração na compressão diametral e à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 20°C.

5.6 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA

A Figura 58 mostra que a resistência a tração por compressão diametral apresenta um aumento mais acentuado até 7 dias e tende a uma estabilização com o aumento do tempo de cura. Resultado semelhante foi encontrado por Serrafini et al (2002) para um solo residual de basalto da região de Ijuí, e para um solo de mesma formação porém da região de Passo fundo. A estabilização ocorre provavelmente devido a extinção das reações das reações posolânicas. Este fato pode ser provocado pelo fato do aumento da temperatura diminuir a solubilidade da sílica. Para um dia de cura há um aumento de significativo, diferentemente dos 28 dias de cura, na resistência dos corpos de prova curado a 35° e 50°C, sugerindo assim que o aumento de temperatura pode ser utilizado para diminuir o tempo de cura das obras em solo cal.

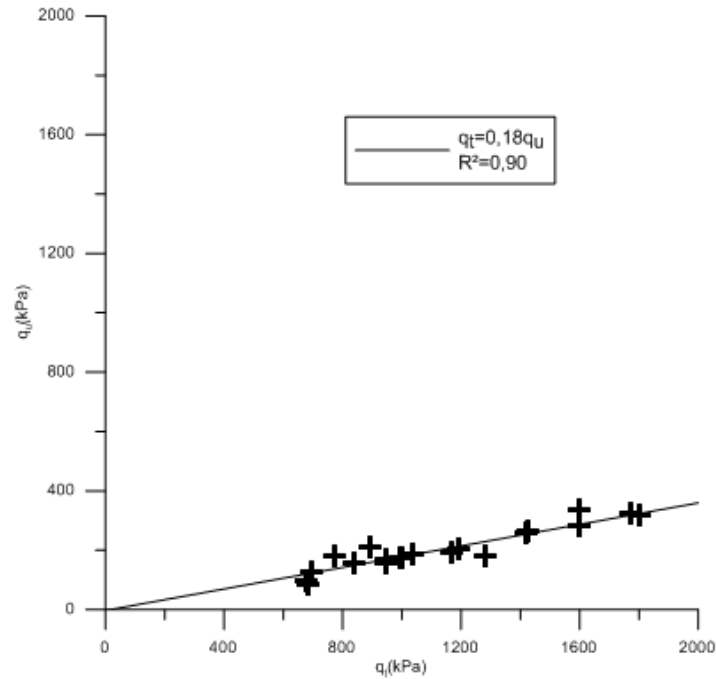


Figura 72-Relação entre a resistência á tração por compressão diametral e à resistência a compressão simples para a temperatura 20°C.

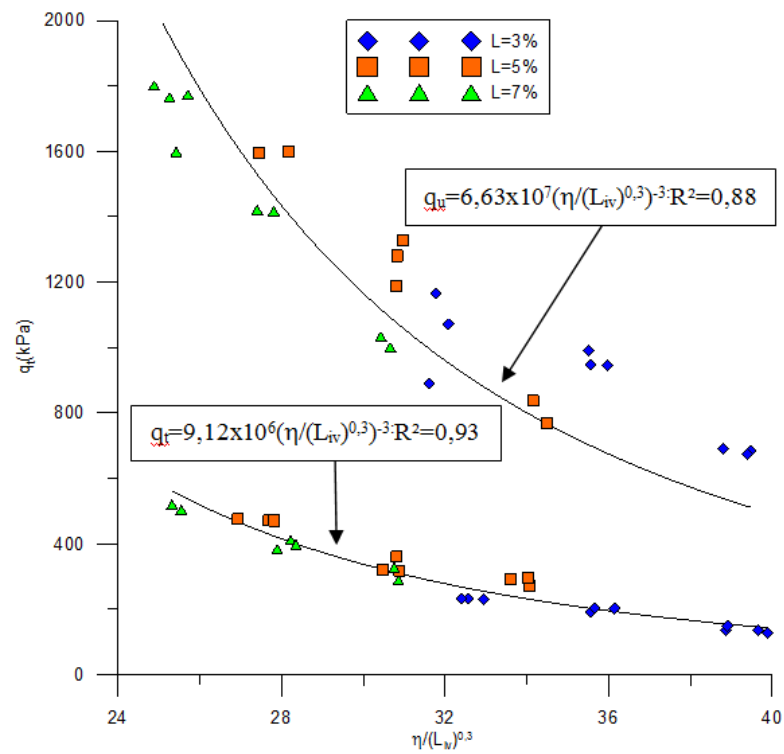


Figura 73- Mudanças na resistência à tração na compressão diametral e à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 27°C.

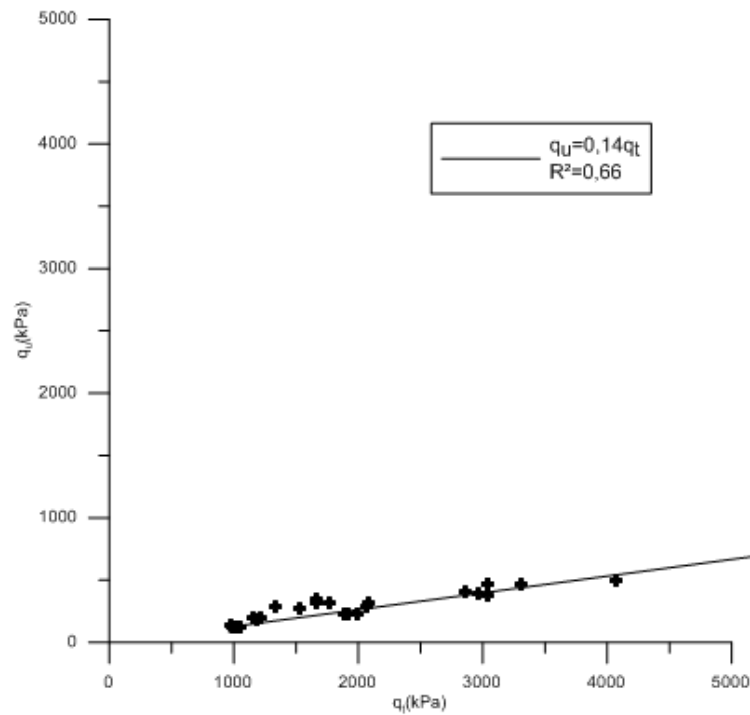


Figura 74-Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples para a temperatura 27°C.

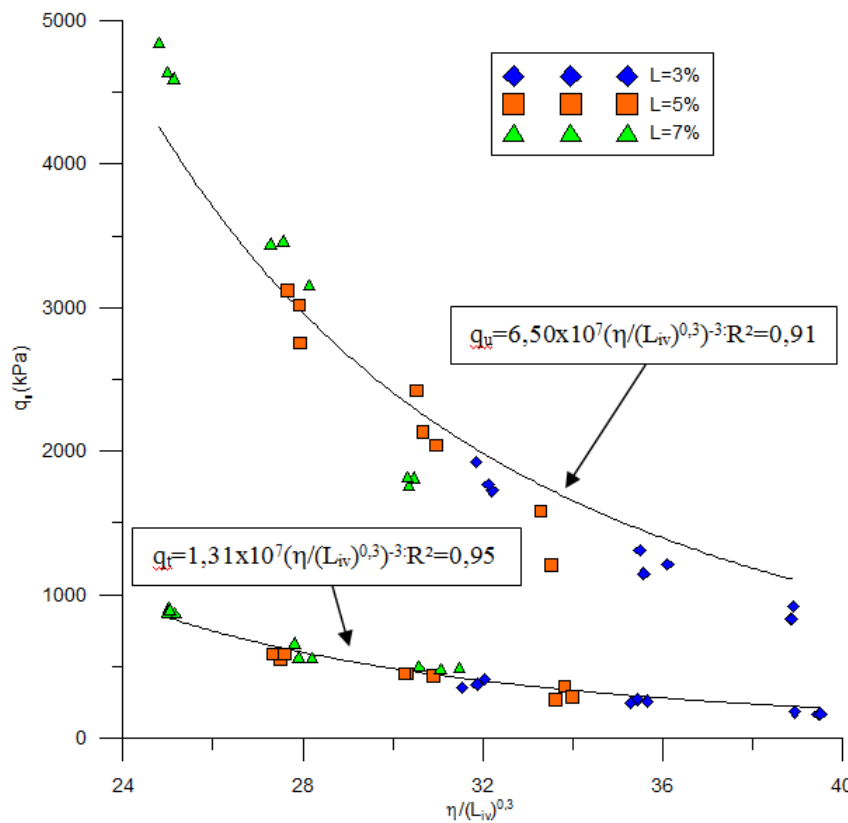


Figura 75- Mudanças na resistência à tração na compressão diametral e à compressão simples pela variação da relação $\eta / (L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 35°C.

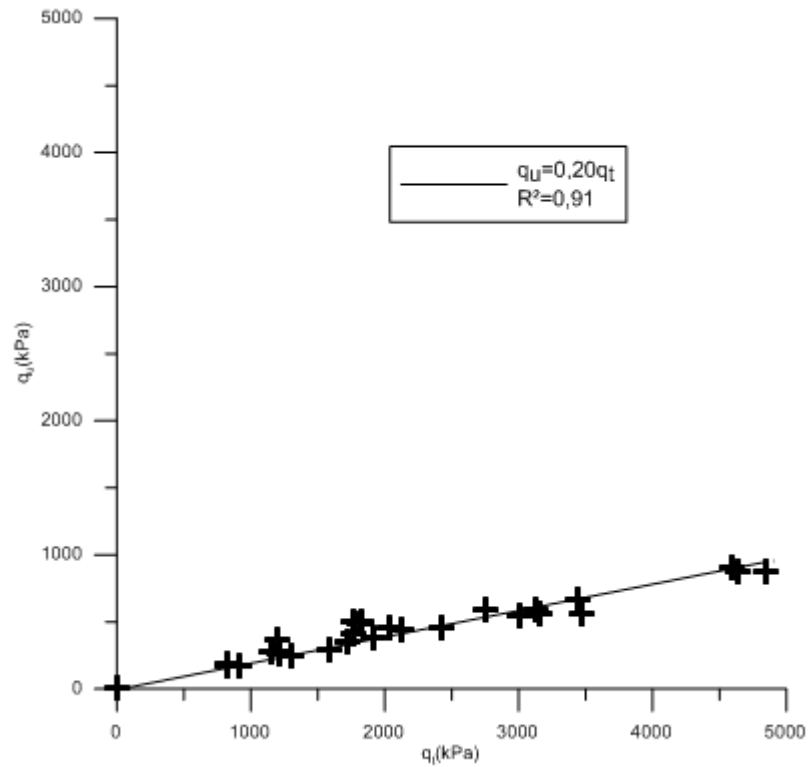


Figura 76-Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples para a temperatura 35°C.

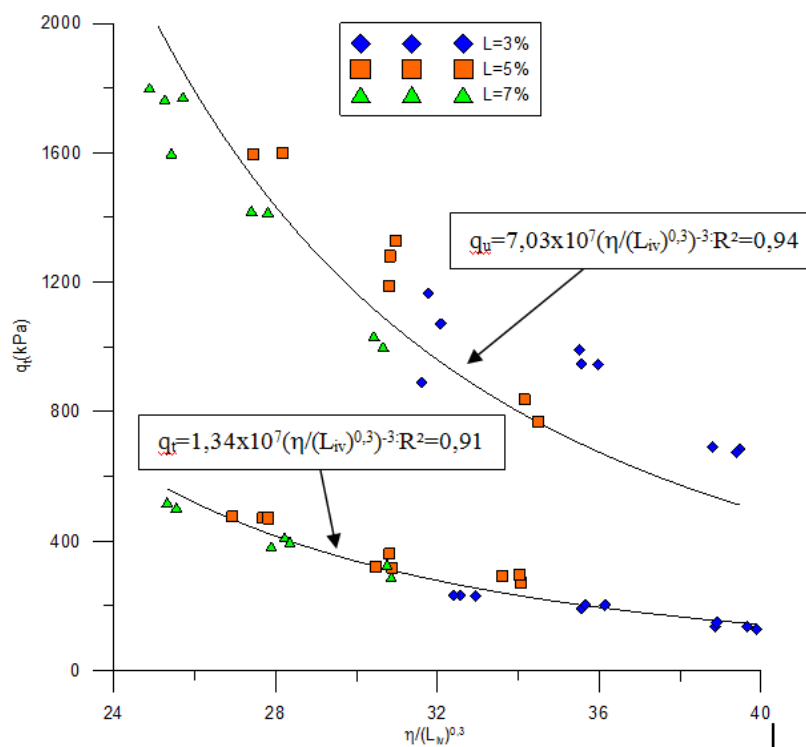


Figura 77- Mudanças na resistência à tração na compressão diametral e à compressão simples pela variação da relação $\eta/(L_{iv})^{0,3}$ para a temperatura de 50°C

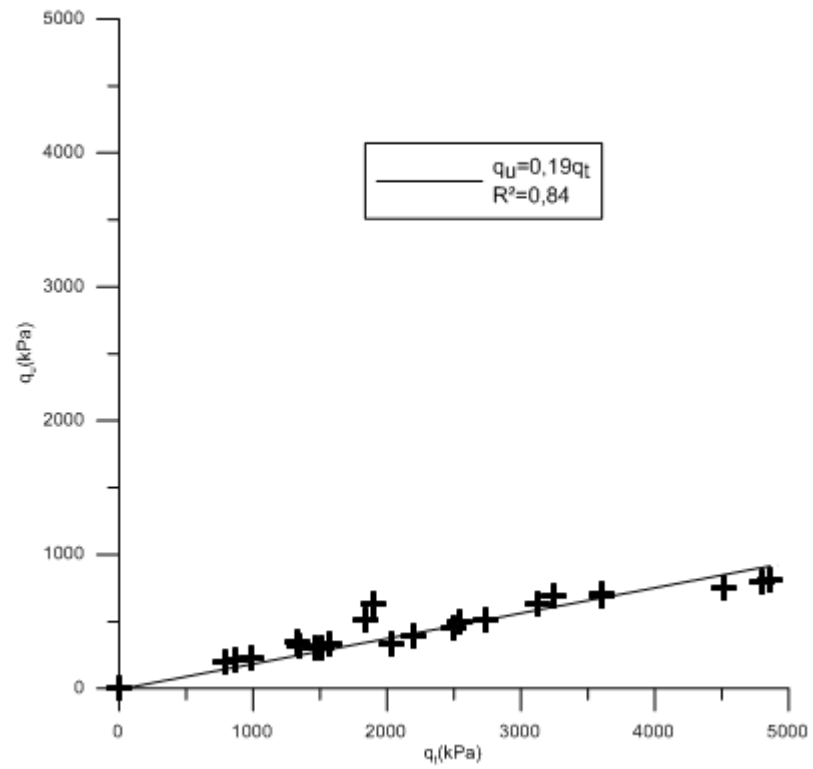


Figura 78-Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e à resistência a compressão simples para a temperatura 50°C.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

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

- **quanto à influência da quantidade de cal**

Para todas as temperaturas estudadas, a resistência à tração na compressão diametral e à compressão simples aumentam linearmente com o aumento do teor de cal. A elevação da temperatura provoca ganhos na resistência à tração na compressão diametral quando a temperatura aumenta de 20°C para 27°C, de 27°C para 35°C, porém não varia significativamente quando a temperatura de cura muda de 35°C para 50°C provavelmente devido à extinção das reações pozolânicas. Porém na resistência à compressão simples os aumentos param de ser significativos a partir da temperatura de 27°C.

- **quanto à influência da porosidade**

Ambas as resistências estudadas ampliam-se exponencialmente com a redução da porosidade devido provavelmente ao acréscimo da efetividade das ligações entre as partículas.

- **relação porosidade/ teor volumétrico de cal**

A relação da porosidade da mistura compactada e do teor de agente cimentante volumétrico ajustado por um expoente igual a 0,3, qual seja: $[\eta/(L_{iv})^{0,3}]$, mostrou-se a melhor maneira de obter uma correlação única que permita a previsão de comportamento das amostras curadas a todas as temperaturas, porosidades e teores de cal estudados.

- **quanto à influência da temperatura de cura.**

A resistência à tração na compressão diametral amplia-se 1,6 vezes quando a temperatura de cura passa de 20°C para 27°C, 1,4 vezes quando a temperatura de cura é elevada de 27°C para 35°C porém não há acréscimo relevante quando a temperatura é varia de 35°C para 50°C. O comportamento da resistência à compressão simples é diferente, pois quando a temperatura de cura é elevada de 20°C para 27°C há um aumento de cerca de 2 vezes na resistência porém a partir desta temperatura não há crescimento significativo da resistência a compressão simples com o elevação da temperatura de cura. A parada no

aumento das resistências estudadas é provavelmente devido à extinção das reações entre a cal e a cinza volante. Pode-se observar ainda que para a mistura estudada curada por 28 dias a temperaturas de 20, 27, 35 e 50°C existe uma relação única das resistências estudadas com a porosidade, o teor volumétrico de cal e a temperatura. Até uma dada temperatura, representada por 35°C para tração e 27°C para compressão, à relação

$$\frac{q}{\left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,3}}\right]^{-3}} \text{ com a temperatura é linear, após esta temperatura torna-se uma assíntota.}$$

- **relação entre as resistências à tração e à compressão**

A razão entre a resistência à tração e à compressão não é constante para as diferentes temperaturas estudadas, sendo que a resistência à tração na compressão diametral é 0,18, 0,14, 0,20 e 0,19 vezes a resistência à compressão simples para as temperaturas de 20, 27, 35 e 50°C, respectivamente.

- **influência do tempo de cura**

A temperatura de cura tem maior influencia no ganho de resistência em tempos de cura menores, logo o pode-se alterar esta variável quando deseja-se um ganho de resistência mais rápido.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- a. a verificação do aumento da resistência à compressão simples e à tração na compressão diametral, para o solo-cinza-calem estudo, em tempos de cura mais curtos, como 1 e 3 dias e períodos de cura mais longos, como 45 e 90 dias.
- b. executar ensaios triaxiais para avaliar se é possível prever o comportamento da envoltória de ruptura do material estudado através da parábola de Griffith.
- c. analisar a influência da temperatura de cura em misturas com solos argilosos e siltosos.
- d. avaliar a atuação da temperatura quando utilizados outros resíduos industriais.
- e. verificar a intervenção da temperatura em outras cales como a cal calcítica e a cal de carbureto.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL- MUKHTAR, M.; LASLEDJ, A.; ALCOVER, J., **Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C** Applied Clay Science, n.50, p. 191-198. 2010(a)

AL- MUKHTAR, M.; LASLEDJ, A.; ALCOVER, J., **Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50 °C** Applied Clay Science, n.50, p. 199-203. 2010(b)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770:** Solo coesivo- Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas e solos – Terminologia: **NBR 6502.** Rio de Janeiro, 1995.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassa - Especificação. 1986.

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

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. **NBR 9604:** Abertura de trincheira em solo com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 1986

.ARABI, M.; WILD, S., 1989. **Property changes induced in clay soils when using lime stabilization**. Mun. Engr., 6:85-99.

ARGELIN, R. R. Influencia do Procedimento de Mistura de Cal Hidratada ao Solo no Comportamento do Sol Estabilizado para Fins de Pavimentação Rodoviária. In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 3, 2005, Goiânia, Anais...

BEHAK, L. **Estabilização de um Solo Sedimentar Arenoso do Uruguai com Cinza de Casca de Arroz e Cal**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2007

BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J. I.; TODRES, H., Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime - A Critical Review of Literature, PCA R&D Serial No. 2066, Portland Cement Association, Skokie, Illinois USA, 2003, 60 pages.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – PPGEC/UFRGS. Porto Alegre. 2005. 243p.

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

CHANG, T. S., and WOODS, R. D. Effect of particle contact bond on shear modulus. Journal of Geotechnical Engineering, v.118 n.8, p.1216–1233.

CLOUGH, G.W.; KÜCK, W.M.; KASALI, G. Silicate-stabilized sands. Journal of Geotechnical Engineering Division, New York, v.105, n.1, p.65-82, 1979.

CERRATI, J.A.P.; **Efeitos da adição de cal e cinza volante nas propriedades de um solo residual compactadas**. 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 1977

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. 81-85, 2012.

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.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** Cabo Verde, 2001. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho Escola de Engenharia.

CRONST, F. **Estudo das Variáveis que Influenciam a Estabilização Química de um Solo Residual de Basalto Encontrado na Região de Ijuí-RS.** 2010. Trabalho de Conclusão – Curso de Engenharia Civil, UNIJUÍ, Ijuí. 2010.

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

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

DALLA ROSA, F. THOMÉ, A. Análise da temperatura de cura como fator de influência na resistência de um solo estabilizado com resíduo industrial e cal. In: CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLOGIA EM ENGENHARIA E FEIRA DE PROTÓTIPOS, 16, 2001, Ijuí, **Anais...** Ijuí; CD-Rom. 2001.

DIMOND, S.; KINTER, E. B. **Mechanisms of soil lime stabilization: an interpretive review.** Highway Research Record, Washington, n. 92, 1965

DIAS, C.R.C. **Estudos de Misturas de Areia-asfalto e Cinza-cal para Emprego em Revestimentos de Vias Urbanas.** 2004. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2004

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

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

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

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

GRIM, R.E. **Clay mineralogy.** New York: McGraw-Hill, 1953. 422p.

GUIMARÃES, José Epitácio Passos. **A cal – Fundamentos e aplicações na Engenharia Civil**. São Paulo: Pini, 1998.

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

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing, Vol 1, Soil Classification and compaction Tests**. London: Prentech Press, 339 p., 1980-a.

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing, Vol 2, Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests**. London: Prentech Press, 402 p., 1980-b.

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing, Vol 3, Effective Stress Tests**. London: Prentech Press, 495 p., 1980-c.

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

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

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

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. **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.

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

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

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.

MALLMANN, J.E.C. **Estabilização pozolânica de cinzas volantes e pesadas com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante.** Porto Alegre, Escola de Engenharia, 1996. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

MARINHO, F. A. M. A técnica do Papel Filtro para Medição da Sucção. In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 1995, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: CPGEC/CNPQ/FINEP/FAPERGS/ABMS, 1995, 2v, v.1, p.111-125.

MATEUS, M., 1964. **Soil-lime stabilization of soils for highway purposes - final report.** Illinois High. Engng. Series, No. 25.

MINNICK, L. J. **Reactions of hydrated lime with pulverized coal fly ash.** In: FLY ASH UTILIZATION, 1967, Pittsburgh. Proceedings... Edison Electric Institute, American public Power Association, Bureau of Mines Symposium. 1967, p.287-315.

MOORE, R. K., KENNEDY, T. W. and HUDSON, W. R. **Factors affecting the tensile strength of cement-treated materials.** 1970.Highway Research Record: Soil Stabilization: Multiple Aspects, Vol. 315, Highway Research Board, Washington, D.C., 64–80.

MORSY, M. S. **Effect of temperature on hidration kinetics and stability of hidration phases of metakaolin-lime sludge-silica fume system.** Ceramics – Silikáty, Munich n.49, p. 225-229. 2005.

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.

PRUSINSKI, J.R.; BHATTACHARJA, S. **Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils.** Transportation Research Record, Washington, D.C., n. 1652, p.215- 227, 1999.

ROJÁS, M. F. **Study of hydrated phases present in a MK–lime system cured at 60 °C and 60 months of reaction.** Cement and Concrete Research, Lausanne n.36, p. 827–831 2006.

ROJÁS, M. F.; CABRERA, J. **Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C.** Cement and Concrete Research, Lausanne n.31, p. 519-527. 2000

ROJÁS, M. F.; CABRERA, J. **The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin–lime–water systems.** Cement and Concrete Research, Lausanne n.32, p. 133-138. 2001

ROGERS, C. D. F., GLENDINNING, S., AND ROFF, T. E. J. **Lime modification of clay soils for construction expediency.** Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, v. 125, p. 242-249, 1997.

ROHLFES Jr, J. A. **Comportamento de um solo cimentado e suas aplicações em engenharia de fundações** 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.1996

SERAFINI, L. **Estabilização de Solos com o Uso da Cal Hidratada.** 2002. Trabalho de Conclusão – Curso de Engenharia Civil, UPF, Passo Fundo.2002

SPINELLI, L.F. **Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRGS. Porto Alegre. 1999. 133p

THOMÉ, A. **Comportamento de Fundações Superficiais Apoiadas em Aterros Estabilizados com Resíduos Industriais.** 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.1999

THOMÉ, A. **Estudo do Comportamento de um Solo Mole Tratado com Cal, Visando seu Uso em Fundações Superficiais.** 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.1994

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

TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. **Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul.** Gravel. Porto Alegre. ISSN 1678-5975. n. 03, p. 109-116. 2005.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD **The stabilization, reaction, properties, design and construction.** Washington, 1987. (State of the Art Report, 5)

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

Tabela A.1 – Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 20°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
1	3-14-20-a	3%	14,29%	1,40	0,85	45,89	33,02	1,63	28,10	86
2	3-14-20-b	3%	14,19%	1,39	0,85	45,98	32,67	1,63	28,21	129
3	3-14-20-c	3%	13,86%	1,40	0,84	45,70	32,20	1,64	27,89	98
4	3-15-20-a	3%	14,01%	1,49	0,73	42,14	36,26	1,75	24,13	178
5	3-15-20-b	3%	14,24%	1,50	0,72	41,76	37,27	1,76	23,76	161
6	3-15-20-c	3%	14,28%	1,50	0,72	41,86	37,25	1,75	23,86	172
7	3-16-20-a	3%	14,27%	1,60	0,62	38,09	41,63	1,87	20,39	209
8	3-16-20-b	3%	14,00%	1,59	0,63	38,53	40,32	1,86	20,77	197
9	3-16-20-c	3%	13,60%	1,59	0,63	38,49	39,22	1,86	20,73	194
10	5-14-20-a	5%	14,30%	1,40	0,84	45,70	33,40	2,68	17,06	179
11	5-14-20-b	5%	14,19%	1,40	0,84	45,59	33,26	2,68	16,98	168
12	5-14-20-c	5%	13,58%	1,39	0,85	45,94	31,48	2,67	17,23	160
13	5-15-20-a	5%	14,15%	1,49	0,74	42,44	36,49	2,84	14,94	200
14	5-15-20-b	5%	14,30%	1,49	0,73	42,19	37,16	2,85	14,79	203

Tabela A.1(continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 20°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
15	5-15-20-c	5%	14,08%	1,49	0,74	42,41	36,35	2,84	14,92	184
16	5-16-20-a	5%	14,10%	1,58	0,63	38,57	40,84	3,03	12,73	280
17	5-16-20-b	5%	13,99%	1,60	0,61	37,86	41,38	3,07	12,35	284
18	5-16-20-c	5%	13,70%	1,59	0,62	38,30	39,99	3,04	12,58	285
19	7-14-20-a	7%	14,40%	1,39	0,86	46,18	33,30	3,65	12,66	174
20	7-14-20-b	7%	14,22%	1,40	0,84	45,57	33,52	3,69	12,35	175
21	7-14-20-c	7%	13,81%	1,40	0,85	45,88	32,23	3,67	12,50	186
22	7-15-20-a	7%	14,28%	1,49	0,73	42,10	37,42	3,93	10,72	265
23	7-15-20-b	7%	14,50%	1,50	0,72	41,96	38,16	3,93	10,67	259
24	7-15-20-c	7%	13,66%	1,50	0,72	41,94	35,97	3,94	10,66	260
25	7-16-20-a	7%	14,50%	1,58	0,63	38,60	42,22	4,16	9,28	320
26	7-16-20-b	7%	13,90%	1,59	0,62	38,26	40,88	4,18	9,14	325
27	7-16-20-c	7%	13,64%	1,60	0,62	38,09	40,33	4,20	9,08	339

Tabela A.2 – Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 27°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
84	3-14-50-a	3%	13,92%	1,41	0,82	45,20	32,83	1,65	27,33	136
85	3-14-50-b	3%	14,62%	1,39	0,85	45,93	33,73	1,63	28,15	135
86	3-14-50-c	3%	14,09%	1,41	0,83	45,24	33,19	1,65	27,37	149
87	3-14-50-d	3%	14,04%	1,39	0,86	46,14	32,17	1,63	28,39	129
88	3-15-50-a	3%	14,44%	1,49	0,73	42,06	37,45	1,75	24,05	191
89	3-15-50-b	3%	14,78%	1,48	0,74	42,62	37,69	1,73	24,61	203
90	3-15-50-c	3%	14,48%	1,49	0,73	42,15	37,46	1,75	24,14	203
91	3-16-50-a	3%	14,88%	1,56	0,65	39,47	41,68	1,83	21,61	232
92	3-16-50-d	3%	13,99%	1,57	0,64	39,10	39,64	1,84	21,27	233
93	3-16-50-e	3%	14,24%	1,58	0,64	38,92	40,54	1,84	21,11	232
94	5-14-50-c	5%	14,58%	1,41	0,83	45,28	34,48	2,70	16,77	293
95	5-14-50-d	5%	14,50%	1,40	0,84	45,78	33,78	2,68	17,11	272
96	5-14-50-e	5%	14,51%	1,40	0,84	45,72	33,88	2,68	17,07	296
97	5-16-50-c	5%	13,62%	1,61	0,61	37,72	40,44	3,07	12,27	476
98	5-16-50-d	5%	14,10%	1,58	0,63	38,61	40,79	3,03	12,75	472

Tabela A.2(continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 27°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
99	5-16-50-e	5%	14,22%	1,58	0,63	38,77	40,95	3,02	12,83	471
100	5-15-50-a	5%	14,26%	1,49	0,73	42,20	37,04	2,85	14,80	361
101	5-15-50-c	5%	14,61%	1,49	0,73	42,28	37,87	2,85	14,85	318
102	5-15-50-e	5%	14,18%	1,50	0,72	41,81	37,28	2,87	14,56	321
103	7-14-50-d	7%	14,44%	1,41	0,84	45,51	34,09	3,69	12,32	328
104	7-14-50-a	7%	13,58%	1,40	0,84	45,64	31,94	3,68	12,38	288
105	7-14-50-b	7%	14,05%	1,40	0,84	45,68	33,00	3,68	12,41	212
106	7-15-50-a	7%	14,38%	1,48	0,74	42,46	37,28	3,90	10,89	412
107	7-15-50-c	7%	14,42%	1,50	0,73	42,05	37,84	3,93	10,70	383
108	7-15-50-d	7%	14,39%	1,48	0,74	42,61	37,12	3,89	10,95	398
109	7-16-50-a	7%	14,45%	1,57	0,64	39,10	41,47	4,13	9,47	504
110	7-16-50-b	7%	14,29%	1,58	0,63	38,80	41,35	4,15	9,35	520
111	7-16-50-c	7%	14,18%	1,58	0,63	38,72	41,13	4,15	9,32	643

Tabela A.3 – Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 35°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
28	3-14-35-a	3%	14,46%	1,40	0,84	45,75	33,55	1,64	27,94	167
29	3-14-35-b	3%	13,35%	1,41	0,83	45,27	31,44	1,65	27,41	185
30	3-14-35-c	3%	14,59%	1,40	0,84	45,79	33,81	1,64	27,99	172
31	3-15-35-a	3%	14,28%	1,50	0,72	41,93	37,18	1,75	23,93	271
32	3-15-35-b	3%	14,40%	1,49	0,73	42,14	37,26	1,75	24,13	259
33	3-15-35-c	3%	13,92%	1,50	0,72	41,79	36,40	1,76	23,79	247
34	3-16-35-a	3%	14,00%	1,60	0,61	38,06	40,90	1,87	20,36	355
35	3-16-35-b	3%	13,71%	1,59	0,63	38,55	39,48	1,85	20,79	413
36	3-16-35-c	3%	14,18%	1,59	0,62	38,39	41,03	1,86	20,64	376
37	5-14-35-a	5%	14,24%	1,41	0,83	45,50	33,46	2,69	16,92	361
38	5-14-35-b	5%	14,55%	1,41	0,83	45,29	34,41	2,70	16,77	273
39	5-14-35-c	5%	14,20%	1,40	0,84	45,67	33,20	2,68	17,04	289
40	5-15-35-a	5%	13,65%	1,49	0,73	42,29	35,38	2,85	14,85	434
41	5-15-35-b	5%	13,70%	1,51	0,71	41,64	36,19	2,88	14,46	450
42	5-15-35-c	5%	13,55%	1,51	0,71	41,57	35,86	2,88	14,42	450

Tabela A.3(continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 35°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
43	5-16-35-a	5%	14,08%	1,59	0,62	38,39	40,98	3,04	12,63	552
44	5-16-35-b	5%	14,00%	1,59	0,62	38,18	41,01	3,05	12,52	590
45	5-16-35-c	5%	13,87%	1,59	0,63	38,50	40,24	3,03	12,69	586
46	7-14-35-a	7%	13,92%	1,41	0,83	45,31	33,07	3,71	12,22	506
47	7-14-35-b	7%	14,26%	1,40	0,85	45,87	33,30	3,67	12,50	486
48	7-14-35-c	7%	14,21%	1,38	0,86	46,36	32,68	3,64	12,75	494
49	7-15-35-a	7%	14,21%	1,50	0,72	41,95	37,40	3,93	10,66	667
50	7-15-35-b	7%	14,00%	1,49	0,73	42,07	36,72	3,93	10,71	568
51	7-15-35-c	7%	14,50%	1,49	0,74	42,42	37,63	3,90	10,87	566
52	7-16-35-a	7%	14,50%	1,59	0,62	38,42	42,44	4,17	9,21	909
53	7-16-35-b	7%	14,41%	1,58	0,63	38,59	41,98	4,16	9,27	877
54	7-16-35-c	7%	14,44%	1,59	0,62	38,37	42,34	4,18	9,18	878
55	7-16-35-c	7%	13,75%	1,59	0,62	38,45	40,21	4,17	9,22	900

Tabela A.4 – Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 50°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
56	3-14-50-a	3%	14,59%	1,40	0,85	45,84	33,74	1,63	28,05	197
57	3-14-50-b	3%	14,12%	1,41	0,82	45,18	33,34	1,65	27,30	217
58	3-14-50-c	3%	13,55%	1,41	0,83	45,23	31,94	1,65	27,36	223
59	3-15-50-a	3%	14,00%	1,50	0,72	41,73	36,69	1,76	23,73	308
60	3-15-50-b	3%	13,97%	1,50	0,72	41,87	36,44	1,75	23,86	334
61	3-15-50-c	3%	14,21%	1,50	0,72	41,91	37,03	1,75	23,91	308
62	3-16-50-a	3%	14,58%	1,59	0,63	38,54	41,97	1,85	20,78	388
63	3-16-50-b	3%	14,04%	1,59	0,62	38,38	40,62	1,86	20,64	388
64	3-16-50-c	3%	14,27%	1,59	0,62	38,44	41,21	1,86	20,69	339
65	5-14-50-a	5%	14,06%	1,41	0,84	45,54	33,00	2,69	16,95	321
66	5-14-50-b	5%	13,92%	1,40	0,85	45,81	32,40	2,67	17,13	349
67	5-14-50-c	5%	14,00%	1,41	0,83	45,29	33,12	2,70	16,77	339
68	5-16-50-a	5%	14,23%	1,59	0,62	38,36	41,47	3,04	12,62	629
69	5-16-50-b	5%	13,73%	1,59	0,62	38,28	40,11	3,05	12,57	687

Tabela A.4(continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 50°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade	Massa espec. aparente	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
--------	------	---------	-----------------	-----------------------	------------------	----------------	-----------------------	-------	---------------	-------

			(%):	seca. (g/cm ³):						
70	5-16-50-c	5%	13,75%	1,59	0,62	38,42	39,98	3,04	12,65	750
71	5-15-50-a	5%	14,48%	1,49	0,73	42,24	37,57	2,85	14,82	504
72	5-15-50-b	5%	14,41%	1,50	0,72	41,98	37,68	2,86	14,66	445
73	5-15-50-c	5%	13,97%	1,51	0,71	41,66	36,88	2,88	14,47	506
74	7-14-50-a	7%	14,28%	1,41	0,83	45,46	33,76	3,70	12,30	551
75	7-14-50-b	7%	14,14%	1,41	0,82	45,17	33,75	3,72	12,15	633
76	7-14-50-c	7%	15,72%	1,34	0,92	45,16	34,32	3,52	12,14	551
77	7-15-50-a	7%	14,30%	1,49	0,73	42,35	37,18	3,91	10,84	702
78	7-15-50-b	7%	14,41%	1,49	0,73	42,08	37,78	3,93	10,72	688
79	7-15-50-c	7%	14,00%	1,51	0,71	41,52	37,34	3,96	10,47	661
80	7-16-50-a	7%	14,28%	1,59	0,63	38,56	41,63	4,17	9,26	751
81	7-16-50-b	7%	14,24%	1,59	0,63	38,52	41,57	4,17	9,24	801
82	7-16-50-c	7%	13,89%	1,59	0,62	38,25	40,86	4,19	9,14	816
83	7-16-50-d	7%	14,29%	1,59	0,62	38,26	42,03	4,19	9,14	790

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

Tabela B.1–Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 20°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
113	3-14-50-a	3%	13,87%	1,40	0,84	45,77	32,14	1,64	27,97	685
114	3-14-50-b	3%	14,13%	1,40	0,84	45,68	32,85	1,64	27,87	674
115	3-14-50-c	3%	13,39%	1,42	0,82	45,14	31,66	1,66	27,26	692
116	3-15-50-a	3%	13,74%	1,50	0,72	42,02	35,69	1,75	24,01	991
117	3-15-50-b	3%	13,88%	1,50	0,73	42,04	36,01	1,75	24,04	947
118	3-15-50-c	3%	14,05%	1,48	0,74	42,45	36,01	1,74	24,44	947
119	3-16-50-a	3%	14,56%	1,60	0,62	38,13	42,44	1,87	20,42	891
120	3-16-50-b	3%	13,87%	1,59	0,62	38,29	40,25	1,86	20,56	1165
121	3-16-50-c	3%	14,11%	1,58	0,63	38,60	40,57	1,85	20,83	1073
122	5-14-50-a	5%	14,24%	1,40	0,85	45,88	33,06	2,67	17,18	800
123	5-14-50-b	5%	14,32%	1,39	0,86	46,21	32,92	2,65	17,41	770
124	5-14-50-c	5%	13,24%	1,40	0,85	45,86	30,77	2,67	17,16	837
125	5-15-50-a	5%	14,38%	1,49	0,73	42,36	37,17	2,84	14,90	1327
126	5-15-50-b	5%	14,38%	1,49	0,73	42,18	37,37	2,85	14,79	1189
127	5-15-50-d	5%	14,18%	1,49	0,73	42,21	36,83	2,85	14,80	1281

Tabela B.1(continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 20°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
128	5-16-50-a	5%	13,81%	1,59	0,62	38,34	40,25	3,04	12,60	1595
129	5-16-50-a	5%	14,26%	1,57	0,64	39,04	40,72	3,01	12,98	1590
130	5-16-50-a	5%	13,85%	1,57	0,64	39,18	39,39	3,00	13,05	1598
131	7-14-50-c	7%	14,21%	1,41	0,83	45,40	33,66	3,70	12,27	1001
132	7-14-50-d	7%	14,01%	1,42	0,82	45,12	33,47	3,72	12,13	1034
133	7-14-50-e	7%	14,13%	1,41	0,83	45,48	33,39	3,70	12,31	1000
134	7-15-50-a	7%	13,92%	1,51	0,71	41,44	37,21	3,97	10,44	1421
135	7-15-50-b	7%	14,34%	1,50	0,72	41,83	37,89	3,94	10,61	1400
136	7-15-50-d	7%	13,77%	1,50	0,72	41,95	36,25	3,94	10,66	1417
137	7-16-50-b	7%	14,59%	1,59	0,62	38,24	42,95	4,19	9,13	1801
138	7-16-50-c	7%	15,09%	1,57	0,65	39,30	43,01	4,11	9,55	1773
139	7-16-50-d	7%	14,58%	1,58	0,64	38,93	42,03	4,14	9,41	1599
140	7-16-50-e	7%	14,65%	1,58	0,63	38,73	42,49	4,15	9,32	1764
128	5-16-50-a	5%	13,81%	1,59	0,62	38,34	40,25	3,04	12,60	1595

Tabela B.2–Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 27°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
141	3-14-50-a	3%	14,31%	1,42	0,82	45,13	33,82	1,66	27,25	1023
142	3-14-50-b	3%	13,58%	1,43	0,84	45,74	31,52	1,64	27,93	993
143	3-14-50-c	3%	14,30%	1,41	0,85	46,02	32,91	1,63	28,25	971
144	3-14-50-d	3%	13,82%	1,39	0,86	46,22	31,61	1,62	28,47	1051
145	3-15-50-a	3%	14,10%	1,50	0,75	42,96	35,59	1,72	24,95	1188
146	3-15-50-b	3%	14,22%	1,51	0,74	42,65	36,24	1,73	24,64	1154
147	3-15-50-c	3%	14,02%	1,52	0,73	42,30	36,09	1,74	24,29	1215
148	3-16-50-a	3%	13,84%	1,59	0,62	38,15	40,33	1,87	20,44	1879
149	3-16-50-b	3%	14,18%	1,60	0,63	38,53	40,86	1,86	20,77	1919
150	3-16-50-c	3%	14,17%	1,62	0,63	38,72	40,59	1,85	20,94	1988
151	5-14-50-a	5%	14,07%	1,42	0,85	45,85	32,70	2,67	17,16	1324
152	5-14-50-b	5%	14,05%	1,42	0,84	45,60	32,92	2,68	16,99	1518
153	5-15-50-a	5%	14,18%	1,52	0,73	42,15	36,90	2,85	14,77	1655
154	5-15-50-b	5%	14,47%	1,49	0,73	42,29	37,49	2,85	14,85	1657
155	5-15-50-c	5%	14,01%	1,48	0,72	41,78	36,87	2,87	14,54	1758

Tabela A.4(continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 27°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
156	5-16-50-a	5%	13,99%	1,61	0,63	38,49	40,62	3,03	12,68	2857
157	5-16-50-b	5%	13,78%	1,60	0,61	38,02	40,56	3,06	12,43	3043
158	5-16-50-c	5%	14,18%	1,59	0,63	38,54	41,09	3,03	12,71	2955
160	7-14-50-a	7%	15,20%	1,38	0,86	46,18	35,17	3,65	12,66	2083
161	7-14-50-b	7%	14,38%	1,39	0,84	45,73	33,72	3,68	12,43	2065
162	7-14-50-c	7%	14,28%	1,41	0,86	46,30	32,91	3,64	12,72	2000
163	7-15-50-a	7%	14,13%	1,49	0,74	42,43	36,65	3,90	10,87	3473
164	7-15-50-b	7%	13,30%	1,50	0,72	41,84	35,14	3,94	10,61	3568
165	7-15-50-c	7%	14,57%	1,52	0,73	42,11	38,18	3,92	10,73	3810
166	7-16-50-a	7%	14,46%	1,51	0,64	38,87	41,77	4,14	9,38	4074
167	7-16-50-b	7%	14,09%	1,59	0,61	37,91	41,89	4,21	9,01	5500
168	7-16-50-c	7%	14,06%	1,61	0,61	37,83	41,89	4,21	8,98	5500
156	5-16-50-a	5%	13,99%	1,60	0,63	38,49	40,62	3,03	12,68	2857
157	5-16-50-b	5%	13,78%	1,60	0,61	38,02	40,56	3,06	12,43	3043

Tabela B.3–Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 35°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
168	3-14-50-a	3%	14,02%	1,41	0,82	45,17	33,10	1,65	27,30	830
169	3-14-50-b	3%	14,20%	1,41	0,82	45,20	33,50	1,65	27,33	830
170	3-14-50-c	3%	14,41%	1,41	0,83	45,23	33,96	1,65	27,37	920
171	3-15-50-a	3%	13,94%	1,49	0,73	42,07	36,15	1,75	24,06	1149
172	3-15-50-b	3%	14,16%	1,48	0,74	42,58	36,14	1,73	24,58	1212
173	3-15-50-d	3%	14,25%	1,50	0,72	41,99	37,04	1,75	23,98	1309
174	3-16-50-a	3%	13,93%	1,58	0,63	38,73	39,89	1,85	20,94	1725
175	3-16-50-b	3%	14,06%	1,58	0,63	38,64	40,36	1,85	20,87	1767
176	3-16-50-c	3%	14,05%	1,59	0,62	38,37	40,65	1,86	20,63	1925
177	5-14-50-a	5%	14,43%	1,41	0,82	45,19	34,24	2,70	16,71	1208
178	5-14-50-b	5%	14,18%	1,41	0,82	45,19	33,65	2,70	16,71	1210
179	5-14-50-c	5%	14,27%	1,42	0,82	44,92	34,14	2,72	16,53	1585
180	5-16-50-a	5%	14,15%	1,50	0,73	42,03	36,96	2,86	14,70	2132
181	5-16-50-b	5%	14,27%	1,49	0,74	42,37	36,89	2,84	14,90	2040
182	5-16-50-c	5%	14,66%	1,50	0,72	41,87	38,46	2,87	14,60	2423

Tabela B.3(continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 35°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
183	5-15-50-a	5%	14,08%	1,58	0,64	38,88	40,39	3,02	12,89	3018
184	5-15-50-b	5%	14,29%	1,58	0,64	38,89	41,00	3,02	12,90	2754
185	5-15-50-c	5%	14,08%	1,58	0,63	38,57	40,77	3,03	12,73	3123
186	7-14-50-c	7%	14,14%	1,42	0,82	45,04	33,86	3,73	12,09	1765
187	7-14-50-d	7%	13,44%	1,41	0,82	45,18	32,07	3,72	12,16	1818
188	7-14-50-e	7%	13,84%	1,42	0,82	45,00	33,20	3,73	12,07	1825
189	7-15-50-a	7%	13,88%	1,51	0,70	41,29	37,29	3,98	10,38	3449
190	7-15-50-b	7%	14,08%	1,49	0,73	42,35	36,61	3,91	10,84	3160
191	7-15-50-c	7%	13,00%	1,51	0,71	41,64	34,55	3,96	10,53	3467
192	7-16-50-b	7%	13,79%	1,59	0,63	38,55	40,21	4,17	9,26	4600
193	7-16-50-c	7%	13,90%	1,59	0,62	38,36	40,76	4,18	9,18	4645
194	7-16-50-d	7%	13,81%	1,60	0,62	38,13	40,79	4,19	9,09	4851
183	5-15-50-a	5%	14,08%	1,58	0,64	38,88	40,39	3,02	12,89	3018
184	5-15-50-b	5%	14,29%	1,58	0,64	38,89	41,00	3,02	12,90	2754

Tabela B.4–Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 50°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Peso espec. aparente seco. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
168	3-14-50-a	3%	14,02%	1,41	0,82	45,17	33,10	1,65	27,30	830
169	3-14-50-b	3%	14,20%	1,41	0,82	45,20	33,50	1,65	27,33	830
170	3-14-50-c	3%	14,41%	1,41	0,83	45,23	33,96	1,65	27,37	920
171	3-15-50-a	3%	13,94%	1,49	0,73	42,07	36,15	1,75	24,06	1149
172	3-15-50-b	3%	14,16%	1,48	0,74	42,58	36,14	1,73	24,58	1212
173	3-15-50-d	3%	14,25%	1,50	0,72	41,99	37,04	1,75	23,98	1309
174	3-16-50-a	3%	13,93%	1,58	0,63	38,73	39,89	1,85	20,94	1725
175	3-16-50-b	3%	14,06%	1,58	0,63	38,64	40,36	1,85	20,87	1767
176	3-16-50-c	3%	14,05%	1,59	0,62	38,37	40,65	1,86	20,63	1925
177	5-14-50-a	5%	14,43%	1,41	0,82	45,19	34,24	2,70	16,71	1208
178	5-14-50-b	5%	14,18%	1,41	0,82	45,19	33,65	2,70	16,71	1210
179	5-14-50-c	5%	14,27%	1,42	0,82	44,92	34,14	2,72	16,53	1585
180	5-16-50-a	5%	14,15%	1,50	0,73	42,03	36,96	2,86	14,70	2132
181	5-16-50-b	5%	14,27%	1,49	0,74	42,37	36,89	2,84	14,90	2040
182	5-16-50-c	5%	14,66%	1,50	0,72	41,87	38,46	2,87	14,60	2423

Tabela B.3(continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova curados a 35°C

Número	Nome	Cal(%):	Teor de umidade (%):	Massa espec. aparente seca. (g/cm ³):	Índice de vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	L (%)	η/L_{iv}	q_u
183	5-15-50-a	5%	14,08%	1,58	0,64	38,88	40,39	3,02	12,89	3018
184	5-15-50-b	5%	14,29%	1,58	0,64	38,89	41,00	3,02	12,90	2754
185	5-15-50-c	5%	14,08%	1,58	0,63	38,57	40,77	3,03	12,73	3123
186	7-14-50-c	7%	14,14%	1,42	0,82	45,04	33,86	3,73	12,09	1765
187	7-14-50-d	7%	13,44%	1,41	0,82	45,18	32,07	3,72	12,16	1818
188	7-14-50-e	7%	13,84%	1,42	0,82	45,00	33,20	3,73	12,07	1825
189	7-15-50-a	7%	13,88%	1,51	0,70	41,29	37,29	3,98	10,38	3449
190	7-15-50-b	7%	14,08%	1,49	0,73	42,35	36,61	3,91	10,84	3160
191	7-15-50-c	7%	13,00%	1,51	0,71	41,64	34,55	3,96	10,53	3467
192	7-16-50-b	7%	13,79%	1,59	0,63	38,55	40,21	4,17	9,26	4600
193	7-16-50-c	7%	13,90%	1,59	0,62	38,36	40,76	4,18	9,18	4645
194	7-16-50-d	7%	13,81%	1,60	0,62	38,13	40,79	4,19	9,09	4851
183	5-15-50-a	5%	14,08%	1,58	0,64	38,88	40,39	3,02	12,89	3018
184	5-15-50-b	5%	14,29%	1,58	0,64	38,89	41,00	3,02	12,90	2754