

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

Comportamento hidráulico e mecânico de um solo residual
tratado com cal

Mozara Benetti

Porto Alegre

2015

Mozara Benetti

**COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E MECÂNICO DE
UM SOLO RESIDUAL TRATADO COM CAL**

Dissertação de Mestrado 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

2015

MOZARA BENETTI

**COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E MECÂNICO DE
UM SOLO RESIDUAL TRATADO COM CAL**

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

Porto Alegre, 15 de junho de 2015

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

Prof. Dr. Armando M. Awruch
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA
Prof. Andrea Diambra (Universidade de Bristol)
Ph.D. Bristol University, Inglaterra

Prof. Samir Maghous (UFRGS)
Dr. Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussees, França

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

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

À minha família...

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meus agradecimentos às pessoas e instituições que de alguma forma contribuíram para que esteja finalizando esta etapa.

A Deus, que me guiou e me protegeu...

Aos meus pais, Dorival e Jurema, pelo amor, incentivo e apoio incondicional dispensado em todos os momentos da minha vida. Aos meus avós pelo carinho, pelas orações, pelos mimos e por compreenderem a minha ausência em muitos momentos.

À minha irmã, Debora, futura Engenheira, pela paciência, incentivo, companhia, amizade, carinho e alegria. Muito obrigado, ruiva!

Agradeço a valiosa contribuição do meu orientador e Professor Nilo Cesar Consoli, que me orientou com empenho e dedicação. Muito obrigado pela confiança, interesse, disponibilidade, incentivo, exemplo e amizade. Meus sinceros agradecimentos e admiração.

À Professora Karla Heineck, Professor Lucas Festugato e Professor Samir Maghous pela ajuda e valiosas sugestões dadas ao longo desta pesquisa.

Aos professores do curso PPGEC da UFRGS, pelos ensinamentos transmitidos.

A todos os queridos colegas do LEGG. Muito obrigado pela disponibilidade, pela troca de ideias, pela amizade e pelos momentos de descontração. Ao laboratorista João Diniz, pelo apoio em todas as atividades realizadas, dedicação e amizade.

À estimada colega e amiga Lidiane Ibeiro, minha constante companheira que sempre dividiu comigo todos os aprendizados, sempre pronta pra me apoiar e compreender com palavras confortantes e animadoras.

Aos colegas do mestrado, pelo apoio, amizade, discussões teóricas e práticas durante os estudos e pelos momentos de descontração.

Aos amigos, antigos e novos, muito obrigado!

Por fim agradeço ao CNPq e a CAPES, pelo suporte financeiro.

Muito Obrigado!!

RESUMO

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

A abordagem do comportamento hidráulico associado ao comportamento mecânico de um material é de extrema importância. A técnica de tratamento de solos com cal vem sendo empregada com sucesso na engenharia geotécnica, melhorando as características do solo, que por ser um material complexo e variável nem sempre satisfaz as necessidades requeridas para um projeto. Nesse sentido, este estudo tem por objetivo quantificar a influência da quantidade de cal e da porosidade sobre o comportamento hidráulico e mecânico de um solo residual tratado com cal, verificando a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa da condutividade hidráulica, da resistência à compressão simples (q_u) e da resistência à tração (q_t). Para isso, foram realizados ensaios de condutividade hidráulica e de resistência para corpos de prova com 5%, 7% e 9% de cal, com peso específico aparente seco de 16,0 kN/m³, 17,2 kN/m³ e 18,5 kN/m³, curados por 28 dias. Foi observado que a porosidade da mistura é um parâmetro de influência sobre a condutividade hidráulica medida. Ambas as resistências, à compressão simples e à tração por compressão diametral, aumentaram potencialmente com a redução da porosidade. Verificou-se uma única relação q_t/q_u igual a 0,13, sendo independente da relação vazios/cal. A metodologia proposta por Consoli (2014), mostrou-se adequada para a determinação dos parâmetros de resistência (intercepto coesivo e ângulo de atrito) para uma relação $[\eta/(L_{iv})^{0,12}]=35$. A relação vazios/cal, definida pela razão entre a porosidade da mistura compactada e o teor volumétrico de cal, ajustado por uma potência, demonstrou ser um parâmetro eficaz na estimativa do comportamento hidráulico e mecânico do solo-cal estudado.

Palavras-chave: *solo-cal; condutividade hidráulica; resistência mecânica; porosidade; relação vazios/cal.*

ABSTRACT

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

The approach of the hydraulic behavior associated with the mechanical behavior of a material is of utmost importance. The technique of treating soil with lime has been used successfully in geotechnical engineering, improving the characteristics of the soil, which is a highly variable and complex material, and does not always meet the required needs. In that sense, this study has for objective to quantify the influence of amounts of lime and of the porosity on the hydraulic and mechanical behavior a sandy silt soil stabilized with lime, checking the suitability of the use of voids/ lime ratio in estimating of the hydraulic conductivity, unconfined compression strength (q_u) and tensile strength (qt). For that, number of hydraulic conductivity tests and strength tests were carried out for soil-hydrated lime blends, with lime contents of 5%, 7% e 9%, dry unit weight of 16,0 kN/m³, 17,2 kN/m³ and 18,5 kN/m³, 28 days as curing time. It was observed that the porosity of the mixture is a parameter influence on the hydraulic conductivity measured. The results show the unconfined compressive and the splitting tensile strength increasing potentially with the reduction of its porosity. It was found a single q_t/q_u relationship equal to 0,13, being independent of the porosity/lime ratio. The methodology suggested by Consoli (2014), was adequate for determining of Mohr-Coulomb failure parameters (effective cohesion intercept effective angle of shearing resistance) for a ratio $[\eta/(L_{iv})^{0,12}]=35$. The voids/lime ratio, defined as the ratio between the porosity of the compacted mixture and volumetric lime content, adjusted by a power, demonstrated to be the most appropriate parameter to assess the hydraulic and mechanical behavior of the soil-lime mixture studied.

Key-words: *soil-lime; hydraulic conductivity; strength; porosity; voids/lime ratio.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 Objetivo Geral.....	20
1.2.2 Objetivos Específicos	21
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE SOLO-CAL.....	23
2.1.1 Materiais Utilizados no Solo-Cal	24
2.1.1.1 Solo.....	24
2.1.1.2 Cal	25
2.1.1.3 Resíduos Industriais	25
2.1.1.4 Água	26
2.1.2 Dosagem Solo-Cal.....	26
2.1.3 Reações Solo-Cal.....	28
2.2 VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DE MISTURA SOLO-CAL.....	31
2.2.1 Efeito da cal.....	31
2.2.2 Efeito da densidade e compactação	31
2.2.3 Efeito do teor de umidade e da relação água/cal	31
2.2.4 Efeito do tempo de cura	32
2.3 COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE SOLOS	33
2.3.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	33
2.3.1.1 Determinação da condutividade hidráulica	33
2.3.1.2 Permeâmetro de parede rígida X Permeâmetro de parede flexível.....	35
2.3.1.3 Diferentes procedimentos de ensaio.....	36

2.3.1.4	Fatores que interferem na condutividade hidráulica	37
2.4	COMPORTAMENTOS MECÂNICO DE MISTURAS SOLO- CAL	43
2.4.1	Resistência à compressão simples	44
2.4.2	Resistência à tração.....	50
2.4.3	Resistência ao Cisalhamento.....	53
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	55
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	55
3.2	MATERIAIS	57
3.2.1	Solo	57
3.2.2	Resíduo de Britagem.....	60
3.2.3	Cal.....	63
3.2.4	Água.....	64
3.3	Métodos.....	64
3.3.1	Coleta e acondicionamento das amostras.....	64
3.3.2	Preparação das amostras	65
3.3.3	Moldagem e Cura dos Corpos de prova.....	65
3.3.4	Ensaio de Condutividade Hidráulica	66
3.3.4.1	Procedimento de Ensaio	66
3.3.5	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	71
3.3.5.1	Procedimento de Ensaio	72
3.4	PROGRAMA DE ENSAIOS	72
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	75
4.1	COMPORTAMENTO HIDRÁULICO	75
4.1.1	Ensaio de Condutividade Hidráulica	75
4.1.1.1	Efeito do teor de cal	76
4.1.1.2	Efeito da Porosidade	77

4.1.1.3	Relação vazios/cal.....	78
4.2	COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	81
4.2.1	Resistência à Compressão Simples.....	81
4.2.1.1	Efeito do teor de cal.....	81
4.2.1.2	Efeito da porosidade.....	82
4.2.1.3	Relação vazios/cal.....	83
4.2.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	85
4.2.2.1	Efeito do teor de cal.....	86
4.2.2.2	Efeito da Porosidade.....	87
4.2.2.3	Relação Vazios/Cal.....	88
4.2.3	Relação entre a resistência à compressão simples e diametral.....	89
4.3	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA POR CONSOLI (2014) .	90
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	94
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
5.1	CONCLUSÕES.....	96
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	98
	REFERÊNCIAS.....	99
	APÊNDICE A – DADOS DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AOS ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRAULICA.....	105
	APÊNDICE B – DADOS DOS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: mecanismo de troca de cátions. (Adaptado de Prusinski; Brattacharja, (1999)).	29
Figura 2.2: mecanismo de estabilização solo-cal. (Adaptado de Ingles; Metcalf, (1972)).	30
Figura 2.3: efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal.(Adaptado de Ingles e Metcalf, (1972)).	33
Figura 2.4: influência da adição de bentonita e fibras nas matrizes de solo e cinza de fundo. (HEINECK, 2002).	42
Figura 2.5: Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados e curados por 7 dias. (Adaptado de Ingles e Metcalf, (1972)).	45
Figura 2.6: relação vazios/cimento pela resistência à compressão simples. (Adaptado de Larnach, (1960)).	46
Figura 2.7: relação vazios/cimento pela resistência à compressão simples. (Adaptado de Foppa, (2005)).	47
Figura 2.8: fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 28 e 90 dias de cura. (LOPES JUNIOR, 2007).	48
Figura 2.9: relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado versus resistência à compressão simples. (DALLA ROSA, 2009).	49
Figura 2.10: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-25%RBR- CAL.(LOPES JUNIOR, 2011).	50
Figura 2.11: variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal das amostras com 20% de umidade. (CONSOLI et al. 2012).	52
Figura 2.12: variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 20°C. (SILVANI, 2013)	52
Figura 2.13: variação da resistência a tração com a variação da porosidade (CONSOLI et al.2012).	53
Figura 3.1: curva granulométrica da amostra de solo (FOPPA, 2005).	58
Figura 3.2: difratograma de raios x do arenito Botucatu. (LOPES JUNIOR, 2011).	59
Figura 3.3: formações geológicas ao norte do estado do Rio Grande do Sul. (Adaptado IBGE, (1986)).	60
Figura 3.4: curva granulométrica do resíduo (LOPES JUNIOR, 2011).	61

Figura 3.5: difratograma de raios x do resíduo de britagem. (LOPES JUNIOR, 2011).	62
Figura 3.6: distribuição granulométrica dos materiais. (LOPES JUNIOR, 2007).	63
Figura 3.7: instalação da amostra a ser ensaiada na câmara.	67
Figura 3.8: permeâmetro de parede flexível utilizado nos ensaios.	71
Figura 3.9: programa de ensaios de condutividade hidráulica e resistência à tração (adaptada de Lopes Junior, 2011).	73
Figura 3.10: pH SRAB x teor de cal (LOPES JUNIOR, 2011).	74
Figura 4.1: variação da condutividade hidráulica em função do teor de cal.	76
Figura 4.2: variação da condutividade hidráulica em função da porosidade do SRAB- 25%RBR-CAL.	78
Figura 4.3: condutividade hidráulica versus relação vazios/cal do SRAB-25%RBR- CAL.	78
Figura 4.4: (a) variação da condutividade hidráulica em função do $\eta / (L_{iv})^{0,12}$ do SRAB-25%RBR-CAL. (b): variação da condutividade hidráulica, em escala logarítmica, em função do $\eta / (L_{iv})^{0,12}$ do SRAB-25%RBR-CAL.	80
Figura 4.5: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal do SRAB-25%RBR- CAL.	82
Figura 4.6: variação da resistência à compressão simples em função da porosidade do SRAB-25%RBR-CAL.	83
Figura 4.7: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB- 25%RBR-CAL.	84
Figura 4.8: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL.	85
Figura 4.9: variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal do SRAB- 25%RBR- CAL.	86
Figura 4.10: variação da resistência à tração em função da porosidade do SRAB- 25%RBR-CAL.	87
Figura 4.11: resistência à tração versus relação vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL.	88
Figura 4.12: resistência à tração versus relação vazios/cal ajustado do SRAB- 25%RBR-CAL.	89
Figura 4.13: variação da resistência à compressão simples e à tração versus [$(\eta/L_{iv})^{0,12}$] do SRAB-25%RBR-CAL.	90

Figura 4.14: tensão-deformação da amostra com $\eta / (L_{iv})^{0,12}=35$ para 20kPa, 200kPa e 400kPa (LOPES JUNIOR, 2011).....	92
Figura 4.15: envoltória de ruptura de Mohr- Coulomb para um $\eta / (L_{iv})^{0,12}=35$	93
Figura 4.16: envoltória de ruptura de Mohr- Coulomb e Modelo de Previsão segundo Consoli (2014) para um $\eta / (L_{iv})^{0,12}=35$	93
Figura 4.17: comparação entre a condutividade hidráulica e a resistência à compressão simples em função do $\eta / (L_{iv})^{0,12}$	94
Figura 4.18: comparação entre a condutividade hidráulica e a resistência à tração em função do $\eta / (L_{iv})^{0,12}$	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: composição média das cales brasileiras (GUIMARÃES, 2002).	25
Tabela 2.2: Previsão da quantidade de cal em função do tipo de solo. (Adaptado de Ingles e Metcalf, (1972)).	28
Tabela 3.1: etapas e ensaios do programa experimental.	57
Tabela 3.2: propriedades físicas da amostra de arenito Botucatu (FOPPA, 2005)	59
Tabela 3.3: propriedades físicas do resíduo de britagem (LOPES JUNIOR, 2011). .	62
Tabela 3.4: características da cal utilizada.....	64
Tabela 3.5: valores típicos para o parâmetro B (adaptado de LAMBE; WHITMAN, 1979).....	68
Tabela 4.1: resultados dos ensaios de condutividade hidráulica SRAB-25%RBR-CAL para 28 dias de cura.	75
Tabela 4.2: resultados para as amostras de SRAB-25%RBR sem cal e sem tempo de cura.	76
Tabela A.1: dados gerais dos corpos de prova do SRAB-25%RBR-CAL com 28 dias de cura.....	106
Tabela A.2: dados gerais dos corpos de prova do SRAB-25%RBR- sem cura.	107
Tabela B.1: dados gerais dos corpos de prova do SRAB-25%RBR-CAL com 28 dias de cura.....	109
Tabela B.1(continuação): dados gerais dos corpos de prova do SRAB-25%RBR-CAL com 28 dias de cura	110

LISTA DE SÍMBOLOS

B: parâmetro de poro pressão de Skempton

c' : intercepto coesivo efetivo

D_{10} : diâmetro efetivo

e: índice de vazios

IP: índice de plasticidade

k: condutividade hidráulica

k_{20} : condutividade hidráulica a 20° C

L: teor de cal calculado em relação à massa de solo seco e expresso em porcentagem

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

LL: limite de liquidez

LP: limite de plasticidade

q_u : resistência à compressão simples

q_t : resistência à tração por compressão diametral

R^2 : coeficiente de determinação

V_{ca} : volume de cal

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

ϕ' : ângulo de atrito efetivo

γ_d : peso específico aparente seco

ξ : escalar que relaciona tração com compressão

η : porosidade

σ' : tensão normal efetiva

τ : tensão cisalhante

ω : teor de umidade, expresso em porcentagem

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: American Society for Testing and Materials

ENVIRONGEO: Laboratório de Resíduos, Novos Materiais e Geotecnia Ambiental

ICL: Initial Consumption of Lime

LEGG: Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

NBR: Norma Brasileira

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RBR: Resíduo de Britagem

SRAB: Solo Residual de Arenito Botucatu

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USACE: United States Army Corps of Engineers

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O solo é um material complexo e variável, abundante, de fácil obtenção e manuseio, de baixo custo e que oferece grandes oportunidades de emprego na engenharia. Entretanto é comum que um solo de uma determinada região não preencha parcial ou totalmente as exigências de projeto. Obras de engenharia sobre solos com características geotécnicas deficientes tornam-se, na maioria das vezes, inviável técnica e economicamente. Uma das alternativas que se dispõe diante deste cenário é melhorar as propriedades do solo existente, de modo a criar um novo material capaz de atender às exigências de projeto.

O uso da cal como aditivo no tratamento de solos é o mais antigo método estabilização química conhecido, utilizado nas mais variadas aplicações. A cal interage com as partículas amorfas 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.

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, resíduos de britagem) para que sejam conseguidas as melhoras esperadas. O uso do resíduo de britagem como aditivo no solo-cal por ser potencialmente reativo favorece o ganho de resistência mecânica.

O emprego da técnica de estabilização por processos físico-químicos é alvo de inúmeras pesquisas realizadas no PPGEC/UFRGS, com ênfase no comportamento mecânico de materiais geotécnicos cimentados artificialmente, como solo/cimento, solo/cal, solo/cimento/cinza, dentre outros. Diversas pesquisas foram realizadas sobre solos tratados com cal, visando o emprego da técnica como base para rodovias e como camada de suporte para fundações superficiais, investigando seu comportamento sob as mais diversas condições (NÚÑEZ, 1991; THOMÉ, 1994; CARRARO, 1997; CONSOLI, 2001; LOVATO, 2004; LOPES JUNIOR, 2007; CONSOLI et al., 2009a,

2009b; DALLA ROSA, 2009; LOPES JUNIOR, 2011; JOHANN, 2013). Os resultados destas pesquisas demonstram melhoras significativas nos parâmetros geotécnicos estudados (aumento da capacidade de suporte, redução de recalques).

Para que a condutividade hidráulica seja baixa, utilizam-se solos altamente plásticos, que possuem características de contração e expansão com mudanças de umidade. Enquanto que a expansão moderada pode não ser prejudicial, a fissuração causada pelo ressecamento durante estações secas pode fazer com que a camada de argila perca a sua função devido o aumento da condutividade hidráulica. Tais solos possuem problemas adicionais devido à baixa resistência mecânica à tração e difícil trabalhabilidade, afetando seu comportamento. Nestes casos, em que os solos não apresentam resistência à tração e à compressão para suportar os carregamentos impostos, esta propriedade pode ser melhorada com a adição de um agente cimentante, cal ou cimento, que confere coesão à mistura.

Esforços tem sido feitos no sentido de desenvolver novos materiais que possuam características melhoradas, tais como boa trabalhabilidade, baixa condutividade hidráulica, estabilidade climática e capacidade de absorver recalques diferenciais.

Atualmente investiga-se a influência do teor de cal e da porosidade, sobre a resistência de diversos solos artificialmente cimentados e verifica-se a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa da resistência mecânica. Ressalta-se que nesta pesquisa buscou-se analisar a influência dessas variáveis também sobre o comportamento hidráulico, já que esta associação é de extrema importância quando se busca caracterizar um material.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a influência da quantidade de cal e da porosidade sobre o comportamento hidráulico e mecânico de um solo residual tratado com cal, verificando a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa de sua

condutividade hidráulica, da sua resistência à compressão simples e da sua resistência à tração.

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

1.2.2 Objetivos Específicos

- Quantificar a influência isolada de cada uma das variáveis de interesse sobre a condutividade hidráulica: quantidade de cal e porosidade da mistura compactada;
- Quantificar a influência isolada de cada uma das variáveis de interesse sobre a resistência à compressão simples e à resistência à tração: quantidade de cal e porosidade da mistura compactada;
- Avaliar a adequação da relação porosidade/teor volumétrico de agente cimentante na estimativa da condutividade hidráulica, da resistência à compressão simples e da resistência à tração da mistura solo-cal;
- Determinar a relação entre as resistências à compressão e à tração da mistura solo-cal;
- Obter os parâmetros de resistência (intercepto coesivo e ângulo de atrito) para o material em estudo, a partir da metodologia desenvolvida por Consoli (2014);
- Comparar a resistência à compressão simples e a resistência à tração com a condutividade hidráulica da mistura solo-cal.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos descritos sucintamente a seguir:

O capítulo 1 apresenta uma breve introdução, onde são apresentados o problema e a relevância da pesquisa e são definidos os objetivos gerais e específicos desta pesquisa.

O capítulo 2 constitui-se em uma revisão bibliográfica sobre os principais aspectos a cerca do tema abordado. Este capítulo foi estruturado de modo a dar ao leitor uma visão geral sobre a técnica de solos tratados com cal, enfatizando suas aplicações, os materiais utilizados. Posteriormente, são abordados os tópicos referentes ao comportamento hidráulico e mecânico dos solos, com ênfase nas características comportamentais dos solos tratados com cal e fatores que exercem influência sobre estas características.

O capítulo 3 descreve de forma detalhada o programa experimental, especificando as variáveis de interesse, os materiais e métodos utilizados.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na fase experimental, bem como uma análise e discussão dos mesmos.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas nesta pesquisa, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE SOLO-CAL

O uso da cal como aditivo no tratamento de solos é o mais antigo método de estabilização química conhecida, utilizada nas mais variadas aplicações. Segundo Nuñez (1991), citam-se algumas obras antigas como a Via Apia, construída pelos romanos entre a Posta Capena-Capua-Brindisi - 312 a.C; as construções romanas: Santuário de Fortuna (Palestina) – 80 a.C; Teatro de Pompeia – 55 a.C; vários aquedutos em Roma, Segóvia, Constantinopla e França; as construções feitas pelos índios americanos pré-colombianos e no Brasil as cidades de Diamantina e Ouro Preto (MG) e Parati (RJ).

Pode-se definir solo-cal como o produto resultante da mistura compactada de solo (geralmente argila), cal e água. Utiliza-se solo-cal quando não se dispõem de um material ou combinação de materiais com as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade, adequadas ao projeto. A estabilização com cal é comumente empregada na construção de estradas, sendo geralmente utilizado como base e sub-base de pavimentos (INGLES e METCALF, 1972). Outra importante aplicação de solo-cal tem sido na proteção de taludes contra erosão em obras hidráulicas.

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

Além das aplicações destacadas, outras utilizações de solo-cal também são relatadas na literatura como, por exemplo, para execução de fundações profundas, na construção de caminhos de serviços, para reforços em aterros, para contenção em escavações (injeção de lama de cal sob pressão ou *grouting*), ou ainda no fechamento de trincheiras abertas para a passagem de canalizações (INGLES e METCALF, 1972; GUIMARÃES, 2002).

2.1.1 Materiais Utilizados no Solo-Cal

2.1.1.1 Solo

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 e METCALF, 1972).

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

Thompson (1966) denominou de reativos aqueles solos que ao reagirem com a cal sofrem substancial ganho de resistência, qual seja, 345 kN/m², após 28 dias de cura à temperatura de 22,8°C. Solos que apresentam limitada reatividade pozolânica (ganhos de resistência inferiores a 345kN/m²) são denominados não-reativos.

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

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

2.1.1.2 Cal

A cal utilizada na estabilização ou melhoria dos solos é produto resultante da calcinação, em temperaturas próximas de 1000°C, de rochas carbonatadas cálcicas e magnesianas existentes na superfície terrestre (GUIMARÃES, 2002).

Atualmente, a estabilização de solos com cal é amplamente utilizada em diversas estruturas como estradas, ferrovias, aeroportos, aterros, execução de fundações profundas, proteção de encostas, entre outras.

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

Na tabela 2.1 são apresentadas as propriedades com valores médios das cales comercializadas no mercado brasileiro segundo Guimarães (2002).

Tabela 2.1: composição média das cales brasileiras (GUIMARÃES, 2002).

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

2.1.1.3 Resíduos Industriais

A preocupação com o destino dos resíduos provenientes de qualquer tipo de indústria é alvo de inúmeras pesquisas. A introdução de resíduos industriais na área de

melhoramento de solos visa basicamente solucionar problemas de caráter econômico, tecnológico, energético e ambiental.

Entre os materiais utilizados no melhoramento de solos no Brasil estão o fosfogesso, a cal de carbureto, as cinzas pesadas, as fibras de garrafas PET, o alcatrão de madeira, os resíduos da indústria de pedras preciosas, os resíduos da construção e demolição e as raspas de pneu.

O uso de fillher proveniente da britagem de rochas balsáticas, material utilizado nesta pesquisa, é normalmente utilizado como adição no melhoramento de solos com cal, onde a matriz é predominantemente arenosa com escassez de argila coloidal, a qual não reage satisfatoriamente com a cal. Para a estabilização desses solos, quando o consumo de cal é muito elevado (economicamente inviável) ou quando a correção da granulometria não é possível (por falta de outros materiais), a adição de materiais silteosos pode torná-los reativos à cal (TRB, 1996; CONSOLI et.al., 2001; LOPES JUNIOR, 2007; DALLA ROSA, 2009).

2.1.1.4 Água

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

2.1.2 Dosagem Solo-Cal

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

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

- Método do pH (EADES; GRIM, 1966) – consiste na determinação do teor mínimo de cal que produza um aumento no valor de pH para 12,4;
- 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);
- 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;
- Método de Thompson (1966) – que define como reativo um solo que apresente um aumento de resistência à compressão simples de pelo menos 345kPa quando estabilizado com cal.

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

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

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

A título de ilustração, a tabela 2.2, adaptada de Ingles e Metcalf (1972), apresenta um indicativo da quantidade de cal a ser adicionada para a estabilização, de acordo com o tipo de solo.

Tabela 2.2: Previsão da quantidade de cal em função do tipo de solo. (Adaptado de Ingles e Metcalf, (1972)).

TIPO DE SOLO	TEOR DE CAL PARA MODIFICAÇÃO	TEOR DE CAL PARA ESTABILIZAÇÃO
Pedra finamente britada	2 a 4	Não recomendado
Pedregulho argiloso bem graduado	1 a 3	≥ 3
Areias	Não recomendado	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado	≥ 5
Argila siltosa	1 a 3	2 a 4
Argilas	1 a 3	3 a 8
Solos orgânicos	Não recomendado	Não recomendado

2.1.3 Reações Solo-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 Dimond 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 água para que tenham início. O primeiro evento é a dissociação da molécula de hidróxido de cálcio segundo as reações apresentadas nas equações 2.1 e 2.2:



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 2.1 ilustra o processo de floculação do solo, este processo ocorre rapidamente, porém somente melhora as características de trabalhabilidade do solo.

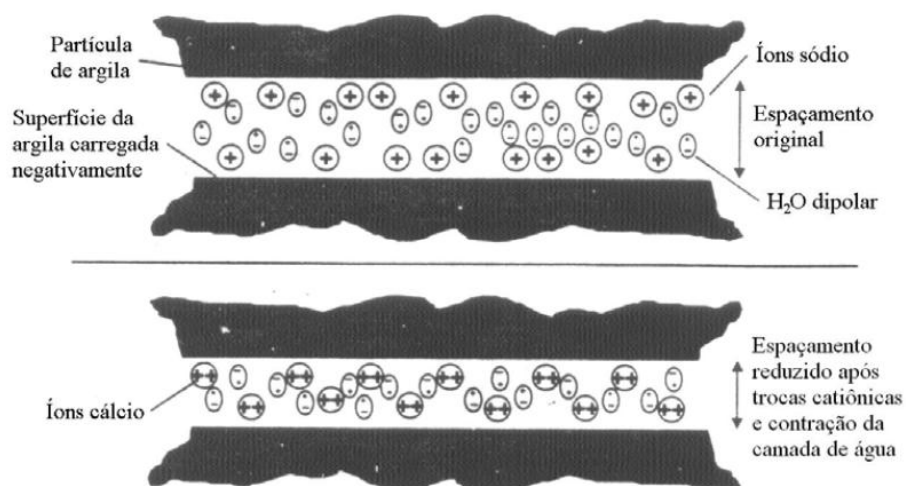


Figura 2.1: mecanismo de troca de cátions. (Adaptado de Prusinski; Brattacharja, (1999)).

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.

Segundo Castro (1981), a permeabilidade de uma mistura solo-cal pode diminuir devido ao bloqueio de canais, poros e fissuras pelos produtos das reações pozolânicas. Diz ainda, que o coeficiente de permeabilidade pode servir, em alguns casos, para verificar ou não a ocorrência de reações pozolânicas.

Ingles e Metcalf (1972) explicaram que os efeitos da estabilização dependem do ataque de um produto químico como a cal, junto a um argilomineral 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 2.2.

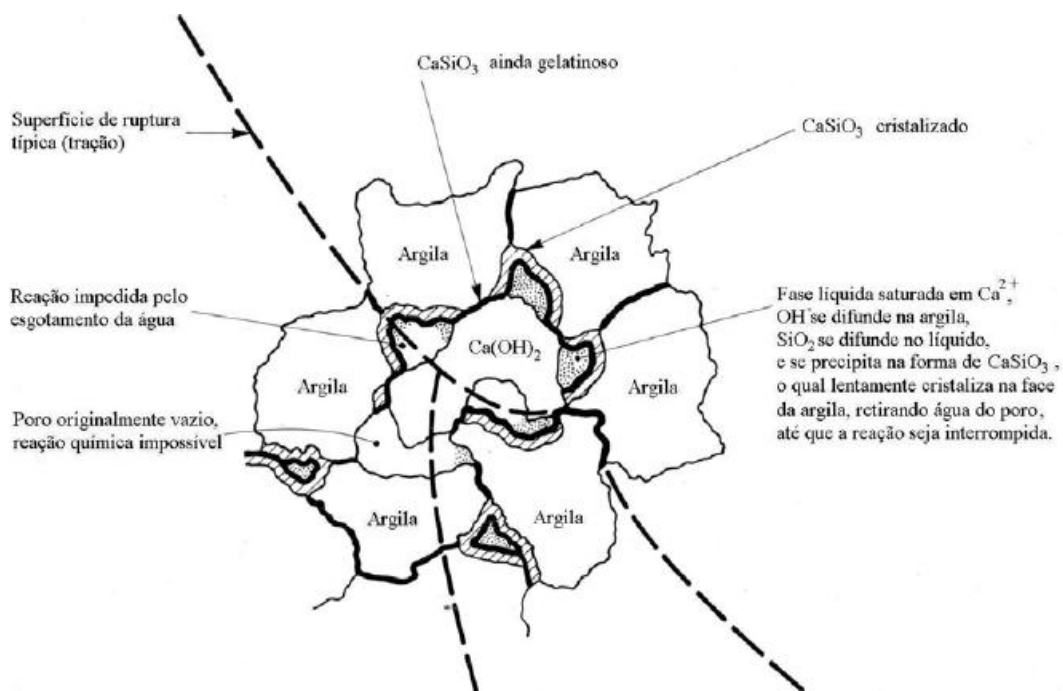


Figura 2.2: mecanismo de estabilização solo-cal. (Adaptado de Ingles; Metcalf, (1972)).

2.2 VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DE MISTURA SOLO-CAL

2.2.1 Efeito da cal

A primeira resposta da mistura solo-cal será a redução do índice de plasticidade e melhoria da trabalhabilidade e a segunda será o ganho de resistência através da cimentação das partículas (INGLES E METCALF, 1972; TRB, 1987).

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

2.2.2 Efeito da densidade e compactação

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

Diversos autores observaram que misturas solo-cal apresentam menor massa específica aparente seca máxima que o solo natural (γ_d), 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).

2.2.3 Efeito do teor de umidade e da relação água/cal

Solos estabilizados com cal normalmente são compactados em campo na umidade ótima para obtenção da massa específica aparente seca máxima, como determinado no ensaio de compactação de Proctor. Entretanto, estudos com solo-cal e solo-cimento mostram que em alguns casos, o teor de umidade que proporciona máxima resistência e

durabilidade não é necessariamente igual ao teor de umidade que gera a maior massa específica aparente seca, e sim um valor levemente inferior ao teor ótimo (CARRARO, 1997; FOPPA, 2005).

Lopes Junior (2007) estudou misturas de solo residual de arenito Botucatu com 25% de rocha basáltica pulverizada, tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal. Nessas misturas utilizou-se 10%, 12%, 14% e 16% de umidade de moldagem. Os resultados mostraram que a variação de umidade de moldagem não afetou a resistência à compressão simples para os tempos de cura (28 dias e 90 dias). Verificou-se não existir relação entre a resistência à compressão simples e a relação água/cal. Segundo o autor, para o solo estudado, a relação água/cal não é a melhor maneira de prever a resistência em solos no estado não-saturado. Em solos tratados com cal, Ingles e Metcalf (1972) afirmam que a água somente é necessária para transportar os íons de cálcio e hidroxila para a superfície da argila para que ocorram as reações químicas e que o teor ótimo de água obtido pelo ensaio de compactação é suficiente para efetivar este processo.

2.2.4 Efeito do tempo de cura

Ingles e Metcalf (1972) apresentaram um estudo sobre a influência do tempo de cura em diferentes tipos de solos, tratados com 5% de cal hidratada, observando as taxas de ganhos de resistência maiores em pedregulhos arenosos conforme figura 2.3.

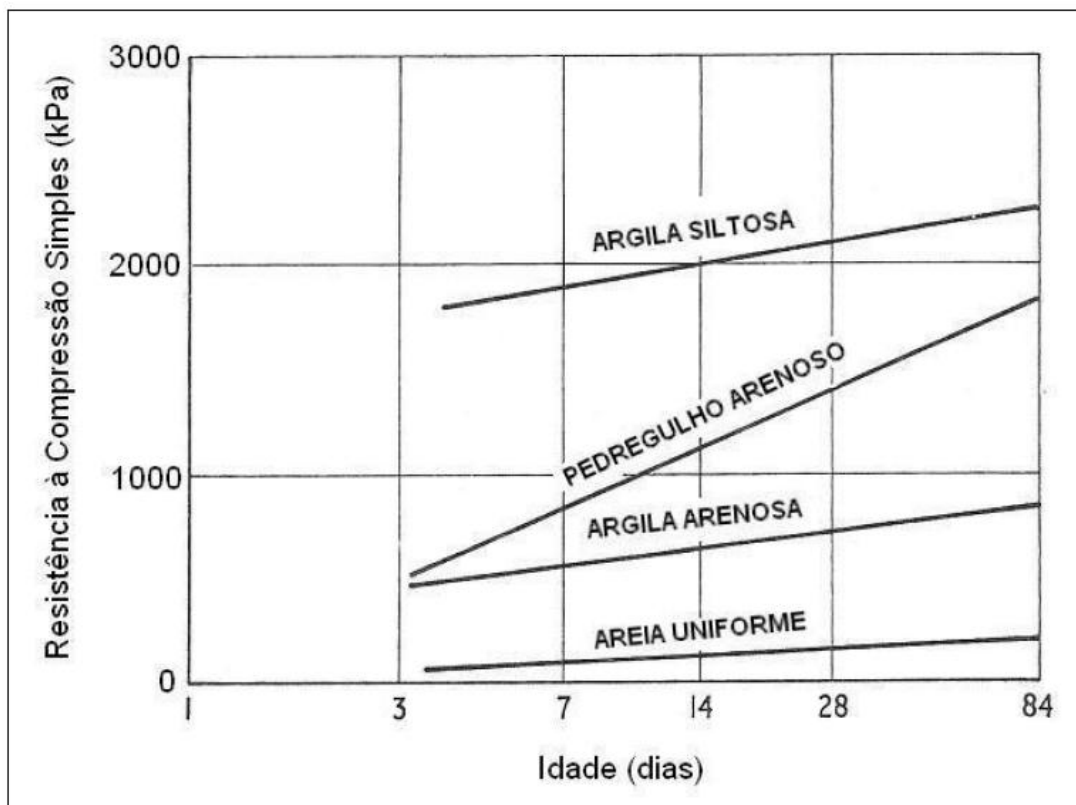


Figura 2.3: efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal. (Adaptado de Ingles e Metcalf, (1972)).

Lopes Junior (2007) verificou que misturas de solo residual de arenito Botucatu com 25% de rocha basáltica pulverizada, tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal, curadas com 90 dias, apresentaram em média, resistências 50% superiores em relação às amostras com 28 dias de cura.

2.3 COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE SOLOS

2.3.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

2.3.1.1 Determinação da condutividade hidráulica

A permeabilidade é a propriedade que um solo apresenta de permitir o escoamento de água através dele, propriedade esta que varia de acordo com os diversos tipos de solos encontrados, tais como areia, argila, entre outros. Já a condutividade hidráulica depende

invariavelmente da viscosidade do fluido permeante no solo, que por sua vez depende da temperatura (DANIEL, 1994).

Henry Darcy, um engenheiro francês, realizou experimentos sobre o escoamento laminar através de um meio poroso. Estes experimentos foram feitos com filtros de areia, os quais foram atravessados por água na direção vertical. O escoamento foi linear, isto é, a área da seção transversal da camada de filtro era constante com respeito à altura (LAMBE1979).

A água pode percolar livremente por uma massa de solo permeável sob a ação da gravidade. No caso de um fluxo permanente de um fluido não-viscoso, aplica-se a equação de Bernoulli expressa pela equação 2.3:

$$\frac{p}{\gamma_0} + z + \frac{v^2}{2g} = cte \quad (\text{equação 2.3})$$

Onde:

p é a pressão piezométrica num ponto qualquer,

γ_0 é a massa específica da água,

z é a cota do ponto,

g é a aceleração da gravidade, e

v é a velocidade de percolação nesse ponto.

Sendo que a velocidade de percolação num ponto é a razão entre a vazão (Q) de água que atravessa uma seção transversal (A) em um determinado tempo Δt , assim:

$$v = \frac{Q}{A \cdot \Delta t} \quad (\text{equação 2.4})$$

Na maioria dos problemas de percolação de água através dos solos o último termo da equação de Bernoulli pode ser desprezado, pois o valor de v é muito pequeno. Entretanto aparece uma perda de carga devido a uma deflexão nas alturas entre os fluxos de dois pontos quaisquer Δh . Esta deflexão vai representar a perda de carga do

fluxo na distância Δs . Com estas duas grandezas define-se uma relação que se chama de gradiente hidráulico:

$$i = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta h}{\Delta s} \quad (\text{equação 2.5})$$

, que representa a dissipação de energia por unidade de peso de fluxo, uma distância Δs .

Um dos pontos fracos da lei de Darcy é que esta é limitada a um escoamento vertical de um líquido de massa específica constante através de um meio permeável de seção transversal constante. Para diminuir estas restrições, seria necessário formular relações diferenciais, pois somente os resultados de Darcy não revelariam os efeitos se a permeabilidade fosse variável. Os resultados de Darcy levam a seguinte expressão:

$$v = k \cdot i \quad (\text{equação 2.6})$$

De modo que (k) represente o coeficiente de condutividade hidráulica e que a velocidade de percolação (v) é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico (i).

2.3.1.2 Permeâmetro de parede rígida X Permeâmetro de parede flexível

A condutividade hidráulica pode ser influenciada pelo tipo de permeâmetro utilizado. Daniel (1994) e Boynton e Daniel (1985) descrevem um estudo abrangente sobre os diferentes tipos de permeâmetros e seus respectivos desempenhos. Um permeâmetro pode ser classificado como permeâmetro de parede rígida ou flexível.

Entre os tipos de permeâmetro de parede rígida, um deles é o chamado “Compaction mold permeameter”, onde o solo é compactado dentro do tubo e o teste de condutividade hidráulica é conduzido através da aplicação de uma carga hidráulica. As desvantagens do sistema são a não saturação da amostra, a impossibilidade de saturação por contra pressão, a não existência de controle sobre pressões atuantes na amostra e a existência da possibilidade de haver fluxo lateral pelas paredes do tubo do permeâmetro.

O permeâmetro de parede flexível é mais confiável em função do selamento que a membrana proporciona ao redor de toda a amostra. Por causa de todas as dificuldades

encontradas nos ensaios com permeâmetros de parede rígida, prefere-se a utilização de permeâmetros de parede flexível.

O permeâmetro de parede flexível possui várias vantagens: amostras indeformadas podem ser facilmente testadas, a contra-pressão pode ser utilizada para saturar a amostra e as tensões verticais e horizontais podem ser facilmente monitoradas.

Dixon et al. (1999) resumiu as dificuldades inerentes ao ensaio de condutividade hidráulica. Estas incluem saturação incompleta, fluxo entre o corpo de prova e a parede da célula no caso de ensaio em parede rígida, vazamento na membrana no ensaio de parede flexível, vazamento na tubulação, bolhas de ar e efeito do menisco na tubulação e no sistema de medição de fluxo, mudanças na estrutura do solo produzida pelos altos gradientes hidráulicos em ambos os ensaios de carga constante e ensaio de adensamento, amostras não uniformes, mudanças químicas na argila, crescimento de bactérias, variações na temperatura e mudanças na estrutura do solo pela reversão da direção de fluxo.

2.3.1.3 Diferentes procedimentos de ensaio

A realização de testes nos permeâmetros deve ser feita com controle de entrada de líquido na amostra. A lei de Darcy relaciona a taxa de fluxo com o gradiente hidráulico. Assume-se que a área transversal da amostra (A) e a altura da amostra (L) sejam conhecidas. Então, para a determinação da condutividade hidráulica é necessária a medição da taxa de fluxo (q) e da carga hidráulica aplicada na amostra (ΔH). O controle de entrada de líquido na amostra pode ser feito de três diferentes formas: testes com carga constante, carga variável e com taxa de fluxo constante, descritos a seguir:

Carga Constante: existem várias maneiras de manter a carga hidráulica constante, dentre elas a utilização de reservatórios ou com tubo de Mariotti. Possui a vantagem da simplicidade de cálculo e pressão constante na amostra, o que evita a sua variação volumétrica.

Carga Variável: pode ser feito de duas maneiras:

1. com carga hidráulica de entrada variável e carga hidráulica de saída constante (atmosfera), recomendado para solo com condutividade hidráulica maior que 1×10^{-5} m/s;
2. com cargas hidráulicas de entrada e de saída variáveis, recomendado para solos com baixa condutividade hidráulica. Possui a desvantagem de que a variação de carga pode liberar bolhas de gás dissolvidas e também pode causar variações na tensão efetiva, resultando em consolidação da amostra.

Fluxo constante: é realizado através do bombeamento do líquido através da amostra a uma taxa de fluxo constante e medição de perda de pressão ocasionada pela passagem do líquido pela amostra através de um transdutor diferencial de pressão. Possui a vantagem da possibilidade de realização de ensaios em curto espaço de tempo e automação total do equipamento. Por outro lado, é um equipamento caro e existe a possibilidade do desenvolvimento de gradientes hidráulicos altíssimos, se a taxa de fluxo utilizada for alta.

Quando os solos são permeados com água, existem alguns critérios que devem ser observados para determinar quando um teste pode ser finalizado:

1. os fluxos de entrada e saída de água da amostra devem ser razoavelmente iguais;
2. a condutividade hidráulica deve estar razoavelmente estável;
3. devem ser coletados pontos suficientes para que um resultado representativo seja obtido.

2.3.1.4 Fatores que interferem na condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica de um solo pode ser influenciada por um grande número de fatores, dentre eles o teor de umidade na moldagem, o grau de saturação, o método de compactação, o esforço de compactação, o gradiente hidráulico, o tamanho dos aglomerados de partículas de solo, a distribuição dos tamanhos dos poros, a composição

química do líquido permeante, a idade da amostra a ser testada e o índice de vazios (BOYNTON e DANIEL, 1985).

Segundo Huang et al. (1998), o coeficiente de permeabilidade de um solo saturado pode ser descrito como uma função do índice de vazios. O coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado com estrutura relativamente incompressível pode ser descrito como uma função do grau de saturação (FREDLUND E RAJARDO, 1993).

No entanto do ponto de vista de engenharia, os solos são deformáveis, e a função do coeficiente de condutividade hidráulica para um solo não saturado e deformável deve incorporar a influência das mudanças em ambos os índices de vazios e o grau de saturação. Na prática de engenharia civil convencional, onde água é o permeante, são identificados muitos fatores que afetam fortemente a permeabilidade de solos ricos em argila: tamanho dos grãos, a estrutura ou arranjo das partículas, grau de saturação, índice de vazios, concentração eletrolítica, composição e natureza de cátions adsorvidos e tensão atuante na amostra (MITCHELL, 1976).

De acordo com Lambe e Whitman (1979), o comportamento de um solo é enormemente influenciado pelo tipo de estrutura existente. Em geral quando o solo está no estado floculado, ele apresenta maior resistência, menor compressibilidade e maior permeabilidade do que o mesmo solo, no mesmo índice de vazios, porém no estado disperso. Esse comportamento deve-se à maior dificuldade de se impor deslocamentos entre partículas que se encontram em um estado desordenado e a existência de forças de atração entre as partículas. O aumento do teor de umidade tende a reduzir essas forças de atração, permitindo um arranjo mais ordenado.

Segundo Favaretti e Previatello (1994), aumentos na condutividade hidráulica podem ocorrer devido à estrutura do solo ser mais floculada e sua porosidade maior. Além disso, a dissolução de minerais do solo pode ocorrer em pHs altos, reduzindo o teor de sílica tetraédrica e os permeantes ácidos podem causar a dissolução da camada tetraédrica.

Outro fator que contribui para compor as características da condutividade hidráulica de um solo é a força atrativa das partículas a que está sujeita a água. A uma distância de algumas moléculas, a força atrativa entre o grão sólido e os íons da água é da ordem de

milhares de atmosferas, mesmo a temperaturas de 15°C a 25°C, formando assim uma camada de água com um vínculo muito forte com os grãos. Uma segunda camada iônica contribui, embora com menor intensidade, para a coesão dos solos. A espessura dessa dupla camada iônica de água vai expressar as propriedades físicas do solo em nível macroscópico através da coesão e capilaridade (VARGAS, 1977).

As tensões efetivas a que um solo é submetido poderão afetar a condutividade hidráulica. Daniel (1994) relata que os solos altamente compressíveis ou solos com outras características tais como macroporos, fissuras ou planos de falha são os mais sensíveis às mudanças nas tensões efetivas. Em todos os casos, o aumento das tensões efetivas irá reduzir a porosidade e, por consequência, a condutividade hidráulica. Segundo o autor, a melhor prática é submeter à amostra a uma tensão efetiva representativa das condições de campo. Para solos compressíveis deve-se tomar o cuidado para que não ocorra consolidação excessiva da amostra, resultando em valores muito baixos de condutividade hidráulica. Tendo em vista os resultados apresentados acima, os autores chamam atenção para o uso de tensões confinantes muito altas em laboratório, que podem levar a resultados errôneos. Da mesma forma, deve-se tomar especial cuidado com materiais submetidos a baixas tensões efetivas em campo.

A aplicação de gradientes hidráulicos muito altos pode causar várias alterações no solo. Necessariamente, as tensões efetivas em uma das extremidades do corpo de prova (entrada de água) serão menores na outra extremidade do corpo de prova (saída de água). Por isso, quanto maior é o gradiente hidráulico, maior será a diferença nas tensões efetivas. Uma vez que o aumento das tensões efetivas tende a reduzir o índice de vazios, haverá uma tendência de diminuição da condutividade hidráulica na extremidade do corpo de prova por onde a água irá sair. O efeito da diferença de tensão efetiva no topo e na base do corpo de prova é mais pronunciado em materiais mais compressíveis. Por isso, o gradiente hidráulico utilizado não deve resultar em uma tensão efetiva que exceda a tensão de pré-adensamento do material. Tal prática leva à consolidação excessiva na porção final da amostra, diminuindo a condutividade hidráulica (CARPENTER E STEPHENSON, 1986; DANIEL, 1993).

Tavenas et al.(1983) recomendam que o gradiente hidráulico seja aplicado mediante um aumento de $\Delta P/2$ no topo e uma diminuição de $\Delta P/2$ na base da amostra, com o objetivo

de diminuir os efeitos da consolidação na base da amostra ocasionada pelas diferenças de tensões efetivas ao longo da mesma.

Gradientes hidráulicos altos tendem a carrear as partículas finas do solo, ocasionando dois tipos de problemas: as partículas finas podem ficar aprisionadas na porção final do corpo de prova, reduzindo a condutividade hidráulica; e as partículas finas podem ser totalmente carreadas dos solos mais granulares, aumentando a condutividade hidráulica. Em geral, devem ser utilizados gradientes hidráulicos que se aproximem aos valores encontrados em campo. A norma americana D 5084 (ASTM, 1990), recomenda os limites a serem utilizados em solos com baixa condutividade hidráulica.

A condutividade hidráulica do solo varia com a temperatura em função da variação da viscosidade do líquido permeante com a temperatura. Com água, a condutividade hidráulica varia aproximadamente 3% para cada 1°C de mudança na temperatura (ASTM D 5084). As correções para os efeitos da temperatura são facilmente feitas. Entretanto, para ensaios de longa duração pode ser necessário o controle de temperatura para evitar expansão e contração da água dentro do sistema.

No caso das areias, o solo pode ser visto como um material constituído por diversos canais, interconectado uns aos outros, nos quais a água está armazenada em equilíbrio hidrostático, ou está fluindo dentro deles por ação da gravidade. A baixa compressibilidade dos solos arenosos possibilita pouca transferência de pressões entre grãos e água, assim este tipo de solo tem as características de ser um solo muito permeável. Já no caso das argilas o modelo dos canais da areia perde a validade, pois o pequeníssimo diâmetro e a forma dos grãos da argila produzem uma interação entre a água e a fase sólida do solo. Sendo tais canais tão pequenos, existe uma alta compressibilidade neste meio, diferente das areias, impedindo que o líquido saia do solo. Estas características determinam um solo de baixa permeabilidade (VARGAS, 1977).

Mitchell (1976), ao estudar a permeabilidade da argila compactada, verificou que a permeabilidade das amostras de argila compactada no lado seco do teor de umidade ótimo para a compactação padrão era muitas vezes maior do que no ramo úmido. A razão para este fenômeno foi explicado em termos de estrutura das partículas de argila. Solos compactados no ramo mais seco que o teor de umidade ótimo obtiveram

orientações de partículas mais aleatórias e um tamanho de poro médio maior do que quando compactado no ramo mais úmido em relação ao teor de umidade ótimo, onde as partículas tinham um arranjo mais paralelo. Dessa forma, quanto maiores forem os poros individuais para qualquer área total dos poros, maior o fluxo seria, uma vez que a permeabilidade varia em função do tamanho dos poros.

Osinubi (1998) estudou a influência da adição de 8% de cal virgem em um solo residual laterítico. O coeficiente de permeabilidade das amostras não curadas compactadas no nível de energia padrão com um teor máximo de 4% de cal foi de $3,38 \times 10^{-5}$ cm/s e diminuíram com o aumento no teor de cal. Para as amostras preparadas no nível de energia (West African Standard), o coeficiente de permeabilidade diminuiu de um valor de $3,38 \times 10^{-6}$ cm/s sem nenhum teor de cal, para $2,15 \times 10^{-6}$ cm/s com 8% de cal. A permeabilidade de todas as amostras tratadas com cal, preparados para os dois níveis de energia considerando uma idade de cura até 14 dias aumentou, e diminuiu com idade superior a 14 dias de cura.

Ao estudar a influência da adição de bentonita em matrizes de solo residual de arenito Botucatu e areia de Osório, Heineck (2002) constatou que a adição de bentonita mostrou-se efetiva na diminuição da condutividade hidráulica para as matrizes de SRAB e areia. Segundo a autora a maior diminuição na permeabilidade foi observada nas misturas cuja matriz era constituída de areia, mostrando que o principal fator que governa a condutividade hidráulica das misturas é a morfologia dos grãos constituintes da matriz, em que a adição de 18% de bentonita reduziu a condutividade hidráulica de $3,17 \times 10^{-5}$ m/s para $5,15 \times 10^{-10}$ m/s. Para as matrizes de cinza pesada e caulim, a adição de bentonita não provocou mudanças expressivas na condutividade hidráulica. No caso da matriz de cinza pesada, existe a influência da forma e porosidade dos grãos, que possuem alta permeabilidade intrínseca, dificultando a diminuição da condutividade hidráulica. O caulim é um material que possui uma condutividade baixa e a adição de mais argila não influenciou significativamente os valores de condutividade hidráulica. Para as matrizes estudadas, verificou-se que adição de 0,5% de fibras de 24 mm não influenciou significativamente a condutividade hidráulica.

A figura 2.4 apresenta a influência da adição de bentonita e fibras nas matrizes de SRAB, cinza de fundo, areia e caulim estudados por Heineck (2002).

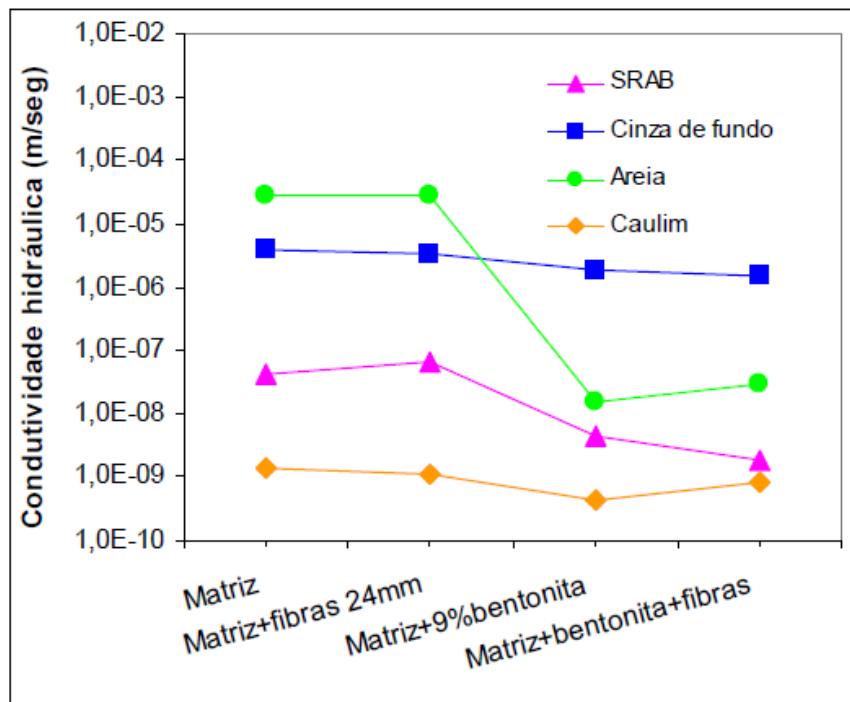


Figura 2.4: influência da adição de bentonita e fibras nas matrizes de solo e cinza de fundo. (HEINECK, 2002).

Kalinski e Yerra (2005) avaliaram a influência do teor de umidade e da compactação na condutividade hidráulica em misturas de cimento Portland estabilizado com cinzas volantes. Os teores de cimento estudado pelos autores foram de 5%, 10% e 15%. As misturas com teor de umidade menor que 20%, a condutividade hidráulica se mostrou ser independente do efeito de compactação e ficou na ordem de 10^{-5} cm/s. Quando a compactação foi efetuada entre um teor de umidade de 20% e o teor de umidade ótimo a condutividade hidráulica foi afetada pela compactação. Para misturas com teor de umidade maior que o teor de umidade ótimo a condutividade hidráulica foi da ordem de 10^{-6} cm/s e é independente do efeito de compactação.

Sante et al. (2014), avaliaram a influência das condições de cura na permeabilidade de um solo argiloso tratado com cal, através da evolução das reações solo-cal. As condições de cura das amostras afetam profundamente os valores de condutividade hidráulica que tendem a diminuir com o aumento do tempo gasto na condição de não saturação e tendem a reduzir apreciavelmente com o tempo. Um aumento geral dos valores de condutividade hidráulica causado pela adição de cal foi detectado para todas as amostras testadas quando comparado com a condutividade hidráulica do solo não

tratada. Dependendo da condição de cura, foram observados diferentes comportamentos. A condutividade hidráulica da amostra saturada imediatamente após a compactação pode ser até duas ordens de grandeza maior do que a condutividade hidráulica da amostra curada durante 7 dias em condições não saturadas. Esse fato se deve que durante os primeiros 7 dias após a mistura e compactação da amostra, a troca catiônica é completamente cessado e as reações pozolânicas já iniciaram.

Os exemplos acima abrangem uma variada gama de materiais e fornecem uma idéia básica do comportamento dos fatores que mais influenciam a condutividade hidráulica, cujo conhecimento é importante para resolução de diversos problemas práticos de Engenharia.

2.4 COMPORTAMENTOS MECÂNICO DE MISTURAS SOLO- CAL

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

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

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

Solos tratados com cal exibem um comportamento mecânico complexo, influenciado por diversos fatores, dentre os quais se destacam a quantidade de cal adicionada, a porosidade da mistura, o teor de umidade e o tempo de cura.

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

2.4.1 Resistência à compressão simples

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

Segundo Ingles 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 de solo-cal apresentar uma cimentação lenta que dependera do tipo de solo (Figura 2.5).

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

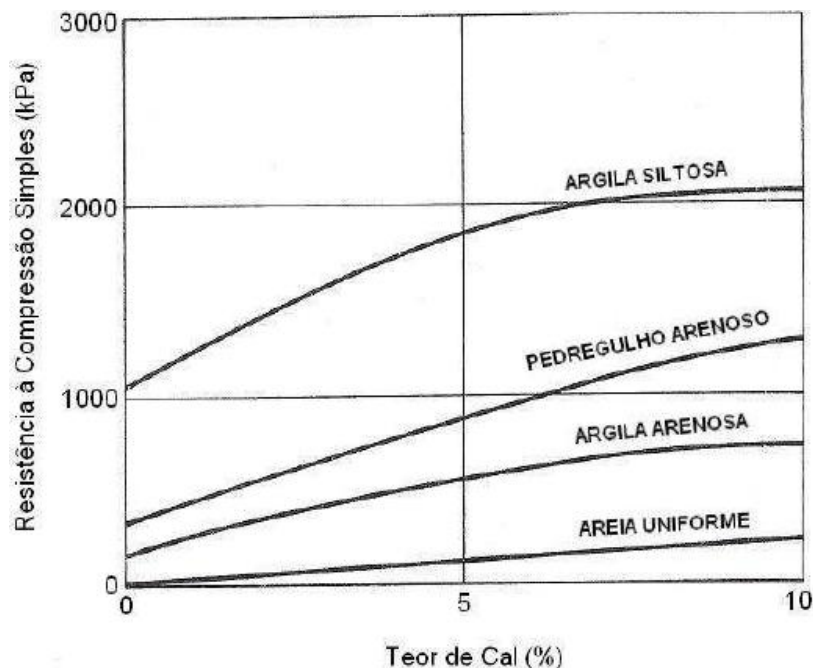


Figura 2.5: Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados e curados por 7 dias. (Adaptado de Ingles e Metcalf, (1972)).

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

A relação volume de vazios/volume de agente cimentante na previsão do comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados é foco de inúmeras pesquisas, dentre elas: Lopes Junior (2007), Lopes Junior (2011), Dalla Rosa (2009).

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

Em seu estudo, Larnach (1960) utilizou uma areia fina misturada com uma argila pulverizada na proporção de nove partes da areia para uma de argila. As porcentagens

de cimento utilizadas, em relação ao peso do solo seco, foram de 5,3%, 11,1% e 17,7%. Para cada porcentagem de cimento foi feita uma série de ensaios de resistência à compressão simples e de flexão em vigotas, moldadas a diferentes teores de umidade e massas específicas aparentes secas, ambos determinados a partir das curvas de compactação das misturas de solo e cimento. A relação vazios/cimento utilizada por este autor é definida pela seguinte expressão:

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

A figura 2.6 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples das amostras de solo-cimento curadas previamente por 7 dias. Observa-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/cimento. Para Larnach (1960), o uso deste tipo de relação, similarmente ao que ocorre em concreto, pode ser de extrema utilidade para dosagem e controle de execução de misturas de solo-cimento em campo.

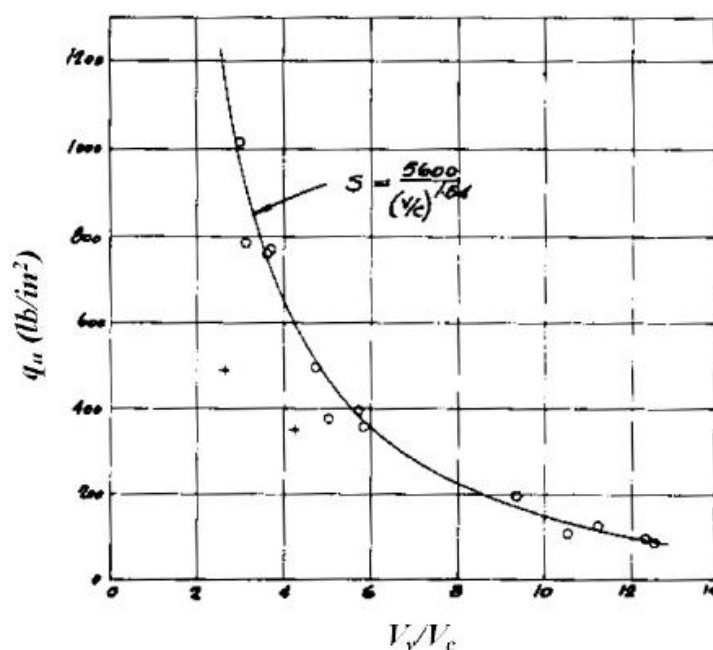


Figura 2.6: relação vazios/cimento pela resistência à compressão simples. (Adaptado de Larnach, (1960)).

Posteriormente, Foppa (2005) verificou a mesma tendência obtida por Larnach (1960), tratando uma areia-siltosa com 2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12% de cimento em relação ao peso de solo seco. Para cada porcentagem de cimento foi feita uma série de ensaios de resistência à compressão simples, moldadas a diferentes teores de umidade e massas

específicas aparente secas, ambos determinados a partir das curvas de compactação das misturas de solo e cimento. A figura 2.7 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples das amostras de solo-cimento curadas previamente por 7 dias. Verifica-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/cimento.

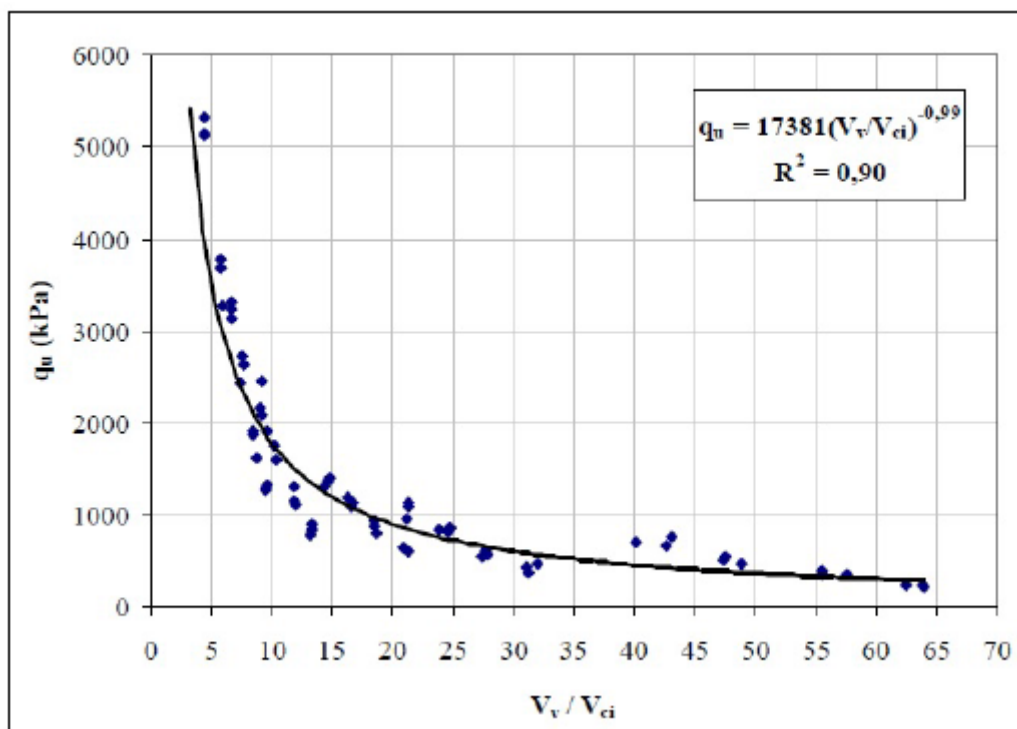


Figura 2.7: relação vazios/cimento pela resistência à compressão simples. (Adaptado de Foppa, (2005)).

O primeiro trabalho a testar a relação volume de vazios/ volume de agente cimentante para solos tratados com cal foi apresentado por Lopes Junior (2007). O autor partiu do conceito de que dada uma variação no volume de vazios de uma amostra, uma variação proporcional no volume de cal seria suficiente para contrabalançar a perda ou ganho de resistência.

Em seu estudo, Lopes Junior (2007) estudou a relação vazios/ cal tratando uma areia-siltosa com resíduo de britagem e as proporções de 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal em relação ao peso de solo seco. Para cada porcentagem de cal foi feita uma série de ensaios de resistência à compressão simples, moldadas a diferentes teores de umidade e massas específicas aparente secas, ambos determinados a partir das curvas de compactação das misturas. A figura 2.8 apresenta os resultados dos ensaios de

resistência à compressão simples das amostras tratadas com cal com 28 e 90 dias de cura. Verifica-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/cal, ajustados por um fator 0,06.

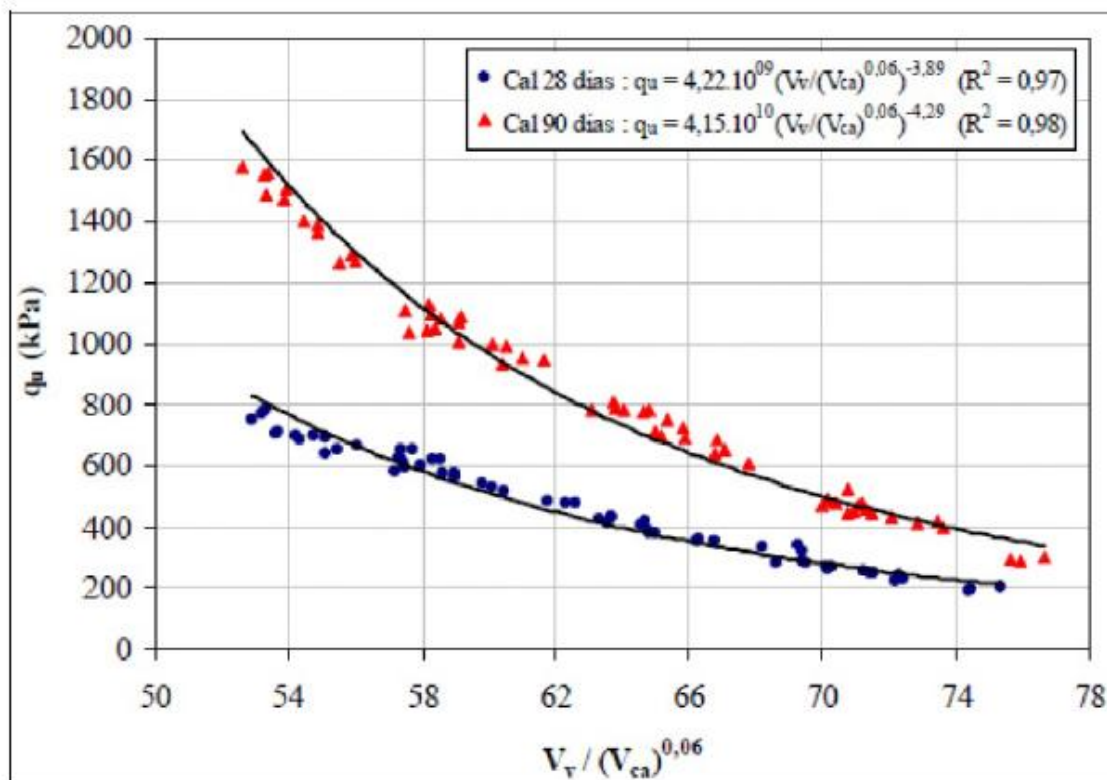


Figura 2.8: fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 28 e 90 dias de cura. (LOPES JUNIOR, 2007).

Dalla Rosa (2009), utilizando o mesmo conceito vazios/cal, tratou um solo silte arenoso misturado com diferentes proporções de cinza (12,5%, 25% e 50%) com 3%, 5%, 7% e 9% de cal. Para cada porcentagem de cal foi realizado uma série de ensaios de compressão simples, moldadas a diferentes massas específicas aparentes secas e curadas por distintos tempos de cura. A figura 2.9 apresenta a relação vazios/cal, expressa na forma de porosidade/teor volumétrico de cal, com os resultados de compressão simples das amostras de solo-cal com 25% de cinza volante curadas previamente por 28, 60 e 90 dias. Para compatibilização das grandezas o autor utilizou uma potência igual a 0,12, o qual não variou com o tempo de cura.

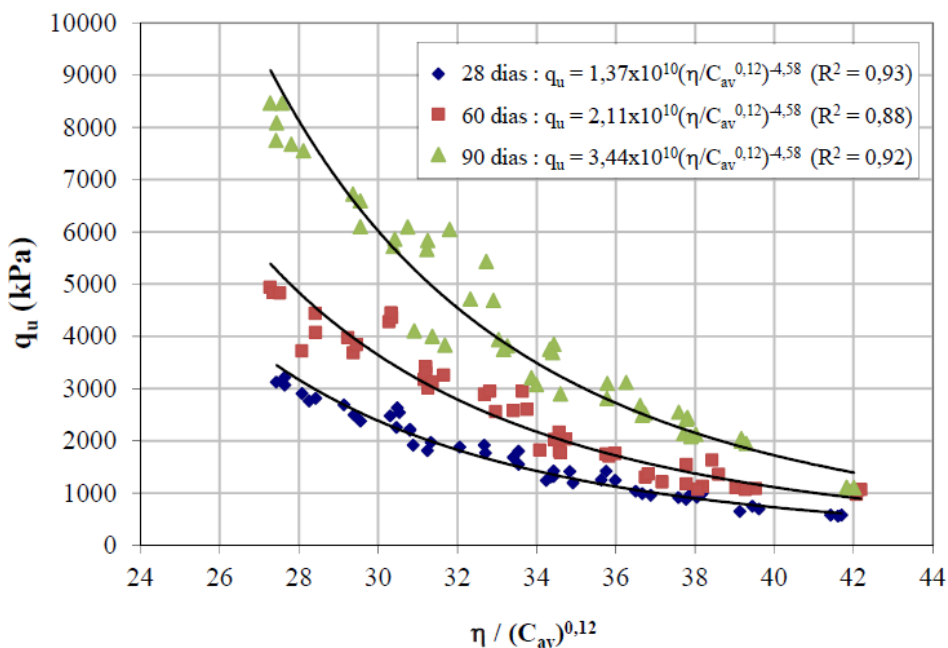


Figura 2.9: relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado versus resistência à compressão simples. (DALLA ROSA, 2009).

Lopes Junior (2011), 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 é substancialmente diferente. Buscando compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas procedeu a aplicação de uma potência sobre uma delas. Após diversas tentativas obteve-se que, aplicando uma potência de 0,12 sobre o parâmetro (L_{iv}), haveria uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, resultando em um melhor ajuste para a relação vazios/cal. Esse fator está associado ao tipo de agente cimentante, a matriz do solo e no mecanismo de cimentação.

A figura 2.10 apresenta as curvas de variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/teor volumétrico cal ajustado pela potência 0,12 para corpos de prova de 28, 90 e 360 dias de cura. O teor de umidade dos corpos de prova era de 14%, porém quantidades de cal e porosidades variadas.

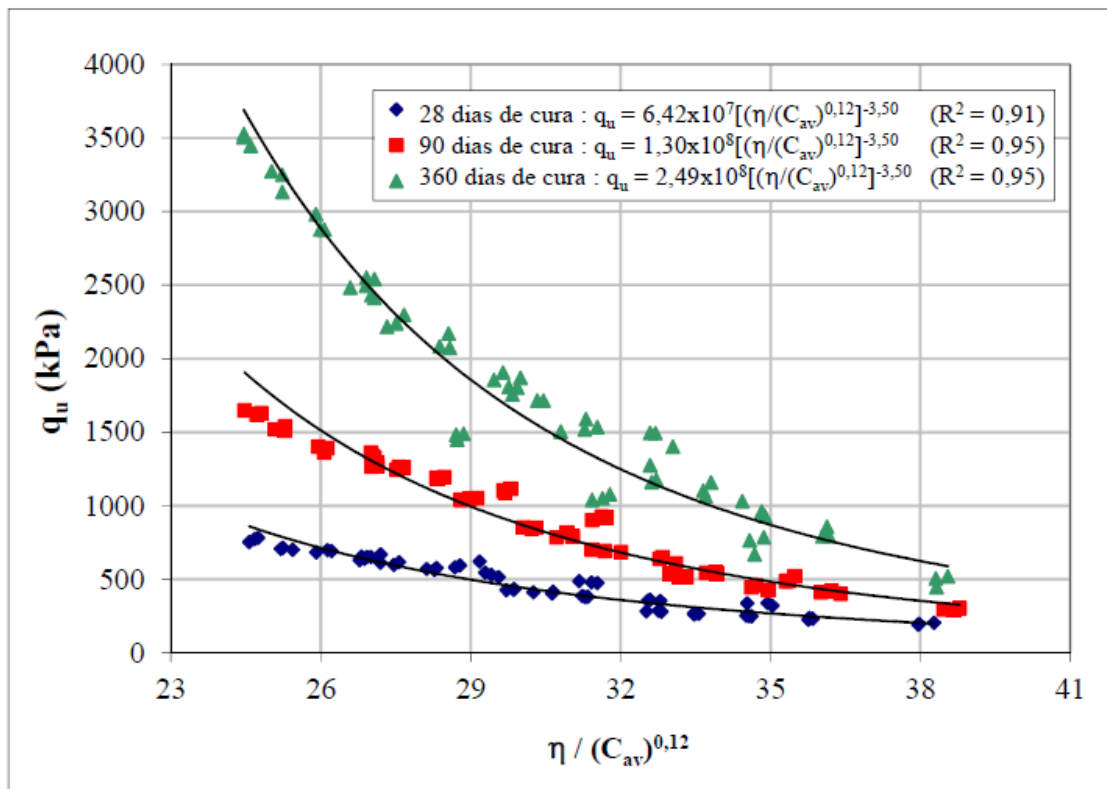


Figura 2.10: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-25%RBR- CAL.(LOPES JUNIOR, 2011).

Pode-se observar uma boa correlação entre o volume de vazios/volume de cal ajustados à resistência à compressão simples de solo-cal compactado estudado pelo autor.

2.4.2 Resistência à tração

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

Conforme citado por Núñez (1991), Thompson (1975) constatou que o quociente entre a resistência à tração pela resistência a compressão simples das misturas solo-cal estudadas, varia de 0,10 a 0,15, independentemente do tipo e/ou teor de cal. Além disso, Cerrati (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. (2010), ao estudarem uma mistura areia-cimento concluíram que a razão entre a resistência à tração e a compressão simples é igual a 0,15, independentemente da relação vazios/cal. Como consequência, as metodologias de dosagem com base em critérios racionais podem se concentrar tanto em ensaios de tração como em ensaios de resistência à compressão simples para este material.

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 2.11. O mesmo fato foi observado por Silvani (2013) para uma mistura de areia uniforme cinza volante e cal, como pode ser observado na figura 2.12. 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.

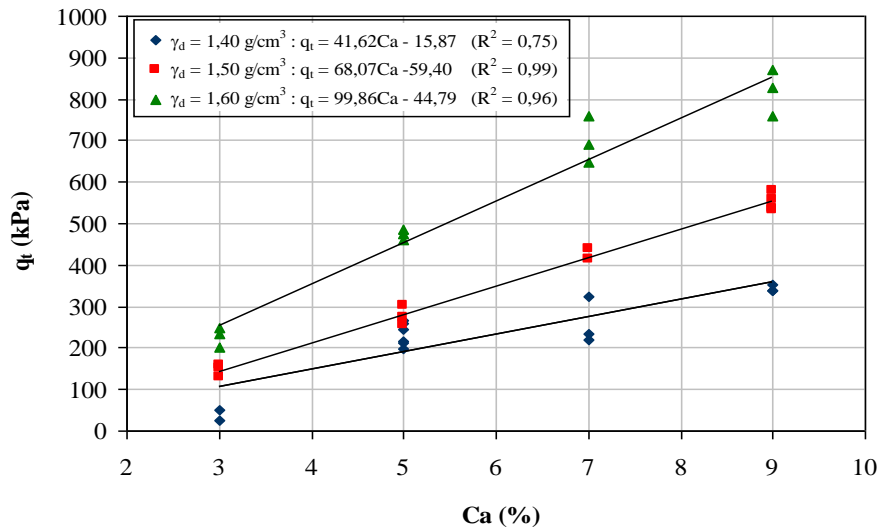


Figura 2.11: variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal das amostras com 20% de umidade. (CONSOLI et al. 2012).

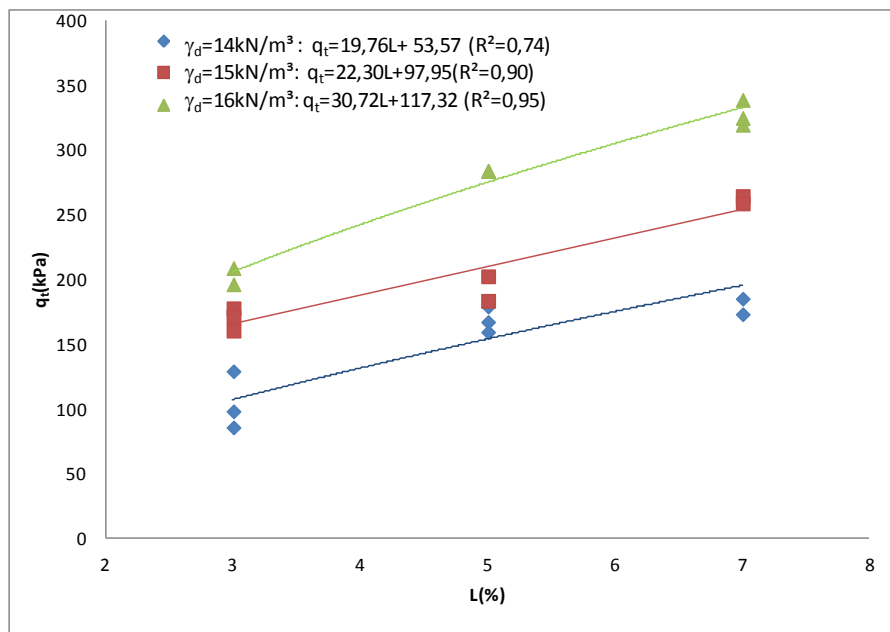


Figura 2.12: variação da resistência à compressão tração por compressão diametral em relação à quantidade de cal das amostras curadas a 20°C. (SILVANI, 2013)

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 2.13.

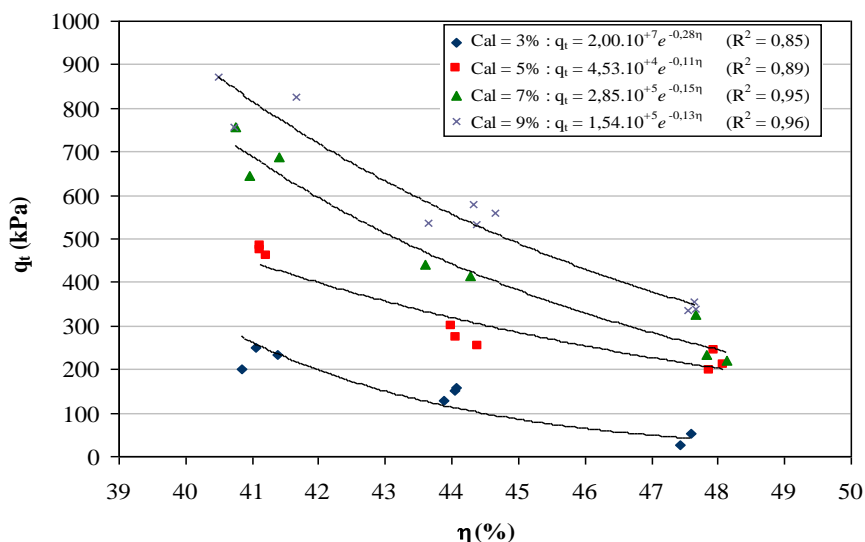


Figura 2.13: variação da resistência a tração com a variação da porosidade (CONSOLI et al.2012).

2.4.3 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 intercepto coesivo e ângulo de atrito, compreendidos entre 13,7 kPa e 21,6 kPa e 19,7° e 23,1°. O solo natural tinha $c = 6,1$ kPa e $\phi = 18,3^\circ$.

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

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este programa experimental tem 2 objetivos fundamentais. O primeiro consiste em quantificar a influência da quantidade de cal e da porosidade da mistura compactada sobre a condutividade hidráulica e sobre a resistência à compressão simples e à tração. O segundo é verificar a validade do uso da relação vazios/cal na estimativa da condutividade hidráulica e da resistência à compressão e à tração.

As variáveis da presente pesquisa podem ser classificadas em dois grupos: variáveis independentes e variáveis dependentes. As variáveis independentes são todos os fatores que podem causar algum efeito sobre as variáveis dependentes, e são divididas em fatores controláveis, fatores constantes e fatores de ruído.

Os fatores controláveis são:

- *Peso específico do solo-cal*: expresso através da porosidade (η) inicial da moldagem ou do peso específico aparente seco (γ_d) da mistura compactada;
- *Quantidade de cal (L)*: massa de cal dividida pela massa de solo seco expresso, em porcentagem;
- *Tempo de cura*: 28 dias.

Os fatores constantes são:

- *Tipo de solo*: solo residual de arenito Botucatu;
- *Tipo de agente cimentante*: cal hidratada dolomítica;
- *Teor de umidade (w)*: massa de água (a) dividida pela massa de material seco (solo + cal), expresso em porcentagem;

- *Tensão efetiva durante a saturação:* 20 kPa;
- *Gradiente hidráulico aplicado durante o ensaio de condutividade hidráulica:* 10;
- *Velocidade de deslocamento nos ensaios de resistência à tração:* 1,14 mm por minuto.

Os fatores de ruído são:

- *Homogeneidade do resíduo:* uso de uma amostra retirada de uma única vez da empresa.

As variáveis dependentes são as variáveis de resposta do experimento:

- *Condutividade hidráulica (k);*
- *Resistência à tração (q_t).*

O programa experimental foi dividido em duas etapas: a primeira etapa incluiu os ensaios de condutividade hidráulica; e a segunda etapa abrangeu a realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, sobre os pontos de moldagem pré-estabelecidos de acordo com o programa de ensaios no item 3.4. Estas etapas tiveram por objetivo avaliar a influência de cada uma das variáveis investigadas sobre a condutividade hidráulica e a resistência à compressão diametral do solo em estudo.

Os dados referentes à resistência à compressão simples foram compilados de Lopes Junior (2011).

A tabela 3.1 apresenta de forma esquemática as etapas do programa experimental, bem como o tipo e o número de ensaios que serão realizados em cada etapa.

Tabela 3.1: etapas e ensaios do programa experimental.

ETAPA	TIPO DE ENSAIO	N ° DE ENSAIOS
Comportamento Hidráulico	Condutividade Hidráulica	12
Comportamento Mecânico	Resistência à compressão simples	27*
	Resistência à tração por compressão diametral	22

*Resultados compilados de Lopes Junior (2011).

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Solo

Para o presente estudo foi utilizado o solo residual de Arenito Botucatu vastamente estudado no LEGG/ENVIRONGEO.

O solo residual de arenito é pertencente à denominada formação Botucatu. Além da existência de trabalhos prévios (NÚÑEZ, 1991; PRIETTO, 1996; HEINECK, 1998, FOPPA 2005, LOPES JUNIOR, 2011), a escolha desse solo deu-se por três fatores básicos: é um solo que cobre uma extensa área do Rio Grande do Sul sob regiões de relevante importância econômica, possui algumas características como erodibilidade e baixa capacidade de suporte, fazendo deste um material que necessita de algum tipo de adequação ou melhoria para emprego sob condições mais severas do posto de vista da engenharia, por sua uniformidade de características físicas e boa trabalhabilidade em laboratório.

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

As propriedades físicas do solo residual de arenito Botucatu (SRAB) são apresentadas na tabela 3.2. A figura 3.1 apresenta a curva granulométrica deste material.

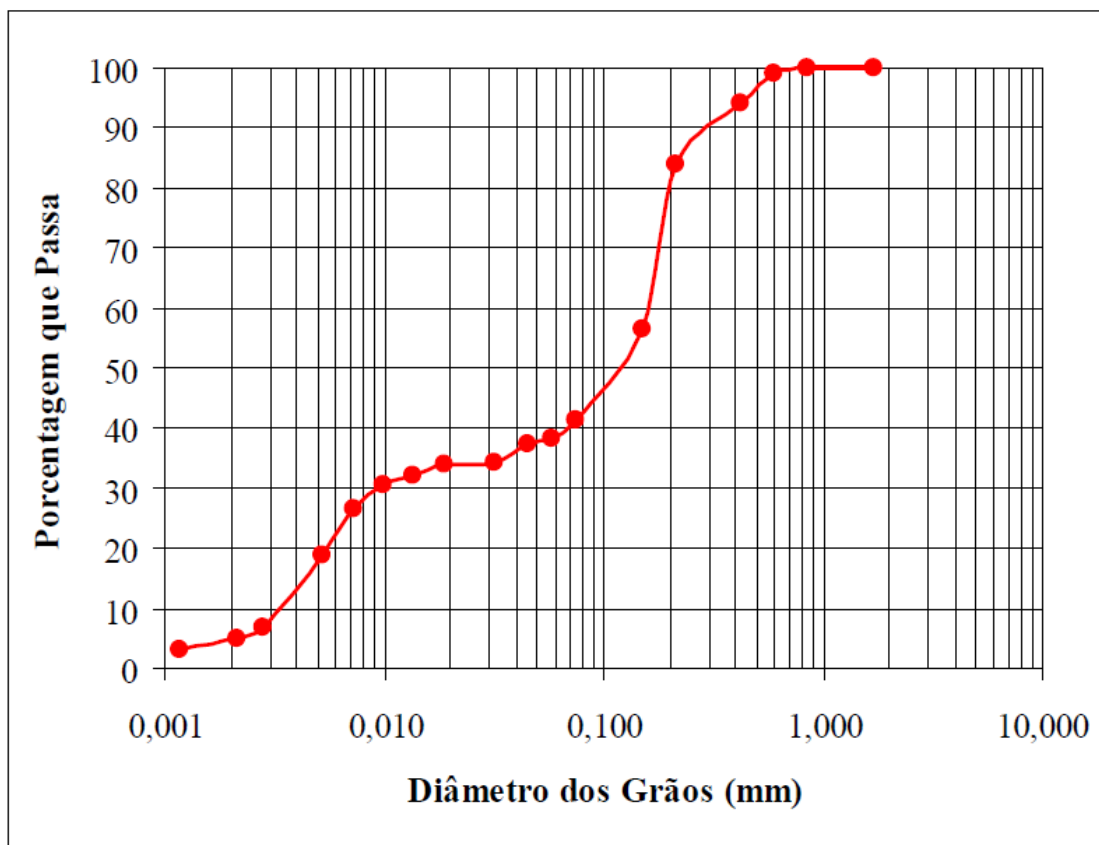


Figura 3.1: curva granulométrica da amostra de solo (FOPPA, 2005).

Tabela 3.2: propriedades físicas da amostra de arenito Botucatu (FOPPA, 2005)

PROPRIEDADES	VALORES
Limite de Liquidez (LL)	23%
Limite de Plasticidade (LP)	13%
Índice de Plasticidade (IP)	10%
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	26,4
% de Areia Média ($0,2 < \phi < 0,6\text{mm}$)	16,2%
% de Areia Fina ($0,06 < \phi < 0,2\text{mm}$)	45,4%
% de Silte ($0,002 < \phi < 0,06 \text{ mm}$)	33,4%
% de Argila ($\phi < 0,002 \text{ mm}$)	5,0%
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,0032mm
Coeficiente de uniformidade (C_u)	50

O SRAB pode ser classificado como uma areia argilosa (SC), de acordo com o Sistema Unificado de Classificação. Através do difratograma da amostra de solo, apresentado na figura 3.2, identificou-se a presença dos minerais: quartzo, caulinita e hematita (responsável pela cor rosada característica do solo residual de arenito Botucatu).

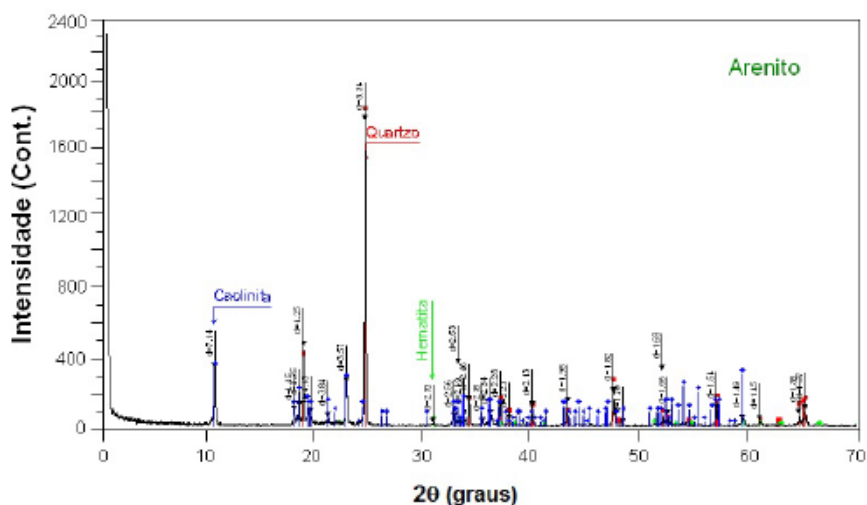


Figura 3.2: difratograma de raios x do arenito Botucatu. (LOPES JUNIOR, 2011).

3.2.2 Resíduo de Britagem

O resíduo de britagem, utilizado como aditivo no solo-cal desta pesquisa, é a fração fina (pulverizado) proveniente do processo britagem da rocha basáltica, pertencente à denominada formação Serra Geral (Figura 3.3).

Dentre os fatores considerados relevantes pela escolha deste material está a utilização na estabilização de solo como comprova Lopes Junior (2007 e 2011), cobre uma extensa área do território do Rio Grande do Sul sob regiões de relevante importância econômica e questão ambiental, por se tratar de um material poluente com inexpressiva utilização na engenharia corrente. Além disso, o resíduo de britagem é caracterizado como potencialmente reativo.

O resíduo de britagem utilizado neste trabalho é oriundo da usina de britagem pertencente à empresa Andreetta e Cia. Ltda., localizada na região norte do estado do Rio Grande do Sul no município de Erechim.

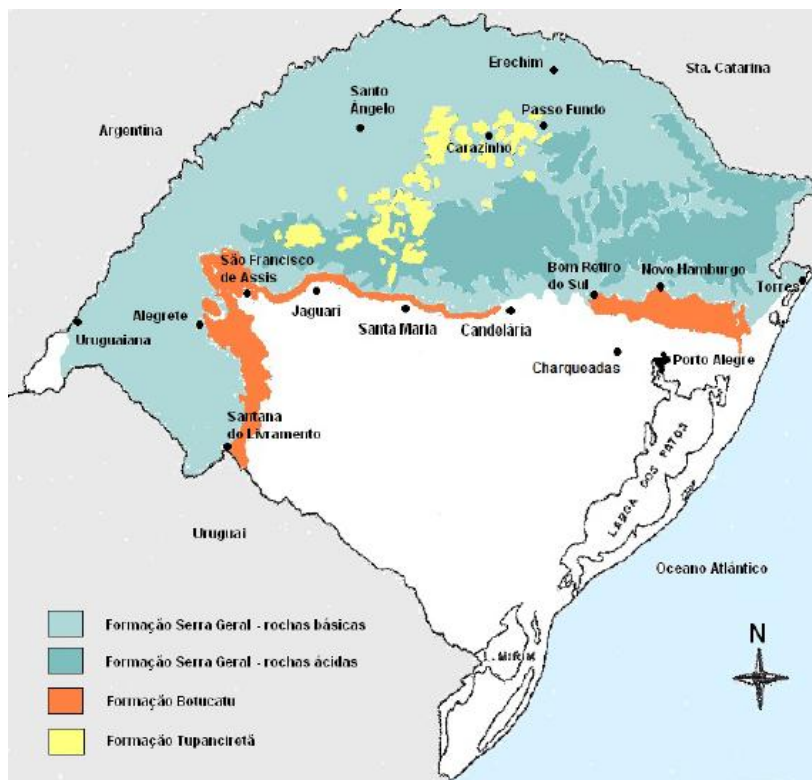


Figura 3.3: formações geológicas ao norte do estado do Rio Grande do Sul. (Adaptado IBGE, (1986)).

A seguir são apresentadas algumas propriedades físicas do resíduo de britagem. Na figura 3.4 é apresentada a curva granulométrica do resíduo e na tabela 3.3 são apresentadas as frações granulométricas, bem como as demais propriedades.

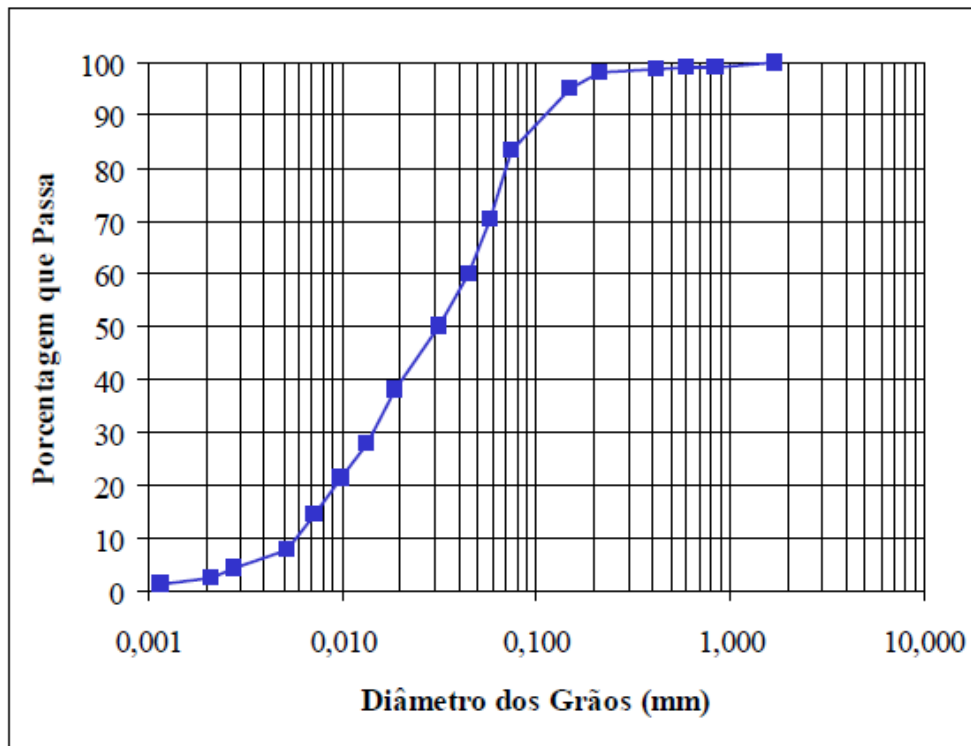


Figura 3.4: curva granulométrica do resíduo (LOPES JUNIOR, 2011).

Tabela 3.3: propriedades físicas do resíduo de britagem (LOPES JUNIOR, 2011).

PROPRIEDADES	VALORES
Limite de Liquidez (LL)	28%
Limite de Plasticidade (LP)	20%
Índice de Plasticidade (IP)	8%
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	33,3
% de Areia Média ($0,2 < \phi < 0,6\text{mm}$)	1,9%
% de Areia Fina ($0,06 < \phi < 0,2\text{mm}$)	38,4%
% de Silte ($0,002 < \phi < 0,06 \text{ mm}$)	57,5%
% de Argila ($\phi < 0,002 \text{ mm}$)	2,2%
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,0066mm
Coefficiente de uniformidade (C_u)	9

O RBR pode ser classificado como um silte arenoso (ML) – não plástico de acordo com o Sistema Unificado de Classificação. Na figura 3.5 é apresentado o difratograma da amostra de resíduo de britagem, identificando a presença dos minerais do grupo dos plagioclásios, feldspatos e esmectita.

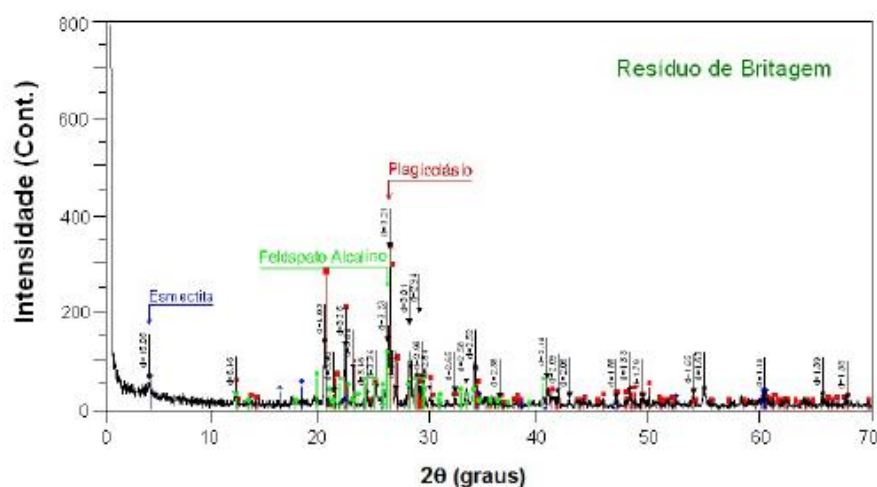


Figura 3.5: difratograma de raios x do resíduo de britagem. (LOPES JUNIOR, 2011).

A Figura 3.6 apresenta as curvas de distribuição granulométrica do solo residual de Arenito Botucatu, do resíduo de britagem e do solo com 25% de resíduo. A determinação do teor de resíduo em 25% encontra-se descrito no item 3.4.

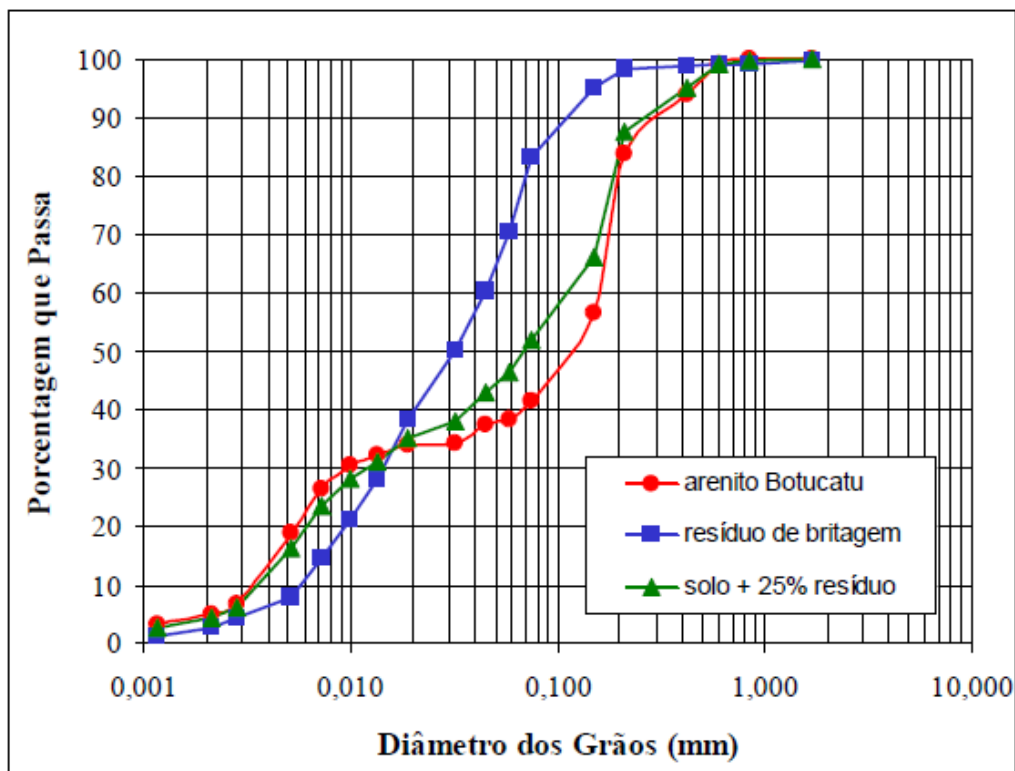


Figura 3.6: distribuição granulométrica dos materiais. (LOPES JUNIOR, 2007).

3.2.3 Cal

A cal utilizada no trabalho foi uma cal hidratada dolomítica, comercialmente chamada de “Primor Extra”, produzida na cidade de Caçapava do Sul – RS. A tabela 3.4 apresenta os resultados fornecidos pelo fabricante dos ensaios de caracterização da cal utilizada, comparada com as exigências da NBR 7175 (ABNT, 1986).

Tabela 3.4: características da cal utilizada.

PROPRIEDADES	LIMITES DA NBR 7175	ANÁLISE
Massa específica	$\leq 600\text{g/l}$	510g/l
Perda ao fogo	-	23,3%
Resíduo Insolúvel	-	4,7%
CO ₂ (anidrido carbônico)	$\leq 5\%$	2,2%
Óxidos Totais	$\geq 88\%$	94,8%
Óxidos não hidratados	$\leq 15\%$	11,0%
CaO	-	44,8%
MgO	-	27,9%
Umidade	$\leq 1,5\%$	0,6%
Resíduo na peneira 0,600mm	$\leq 0,5\%$	0,0%
Resíduo na peneira 0,075mm	$\leq 15\%$	8,0%

A massa específica da cal é de 2,49 g/cm³ (LOPES JUNIOR, 2011).

3.2.4 Água

A água utilizada para a moldagem dos corpos de prova foi água destilada.

3.3 Métodos

3.3.1 Coleta e acondicionamento das amostras

O solo residual de arenito Botucatu foi acondicionado em tonéis plásticos adequadamente vedados.

O resíduo de britagem foi coletado diretamente dos reservatórios dos equipamentos das usinas, mediante uso de ferramentas manuais, em quantidade suficiente para a

realização dos ensaios previstos. As amostras assim obtidas foram armazenadas e transportadas em sacos plásticos adequadamente vedados.

A cal foi armazenada em recipientes de vidro adequadamente vedados para evitar reações com dióxido de carbono presente na atmosfera.

3.3.2 Preparação das amostras

A preparação das amostras para a moldagem dos corpos de prova, que envolve os procedimentos de secagem ao ar, destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica seguiu os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457 (ABNT, 1986).

3.3.3 Moldagem e Cura dos Corpos de prova

A moldagem dos corpos de provas para os ensaios de condutividade hidráulica e de resistência à tração foi realizada em um molde cilíndrico com dimensões suficientes para confecção de amostras com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A confecção dos corpos de prova foi realizada através de procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura.

Após a pesagem dos materiais (solo, resíduo de britagem, cal e água) com uma precisão de 0,01g, o solo, o resíduo e a cal eram misturados com o auxílio de uma espátula metálica, até chegar a uma mistura uniforme. Posteriormente era adicionada a água, continuando o processo de mistura até uma adequada homogeneização.

A quantidade de resíduo e cal necessária para a mistura foi calculada em relação à massa de solo seco utilizada e a quantidade de água (teor de umidade) em relação à soma das massas de solo seco, resíduo e cal. A quantidade total de misturas permitia a moldagem de um corpo de prova e uma sobra para a determinação do teor de umidade.

A amostra era então compactada estaticamente em três camadas. Concluído o processo de moldagem, o corpo de prova era extraído do molde, e a sua massa e medidas

(diâmetro e altura) devidamente anotadas com resolução de 0,01g e 0,1mm respectivamente e acondicionando em um saco plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas do teor de umidade.

Os corpos de prova assim obtidos eram armazenados e curados por um período de 28 dias.

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

- Peso específico aparente seco (γ_d): grau de compactação de 98% a 102%, sendo o grau de compactação definido como o valor de γ_d efetivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de γ_d definido como meta.
- Teor de umidade (ω): valor especificado $\pm 0,5$ pontos percentuais, (para um $\omega = 14\%$ foram aceitos valores compreendidos entre 13,5% e 14,5%).
- Dimensões: diâmetro $50 \pm 0,5$ mm e altura 100 ± 1 mm.

3.3.4 Ensaio de Condutividade Hidráulica

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados através das seguintes etapas: instalação da amostra, percolação, saturação e medição de da condutividade hidráulica. As etapas são descritas detalhadamente e individualmente no item 3.3.4.1.

3.3.4.1 Procedimento de Ensaio

1) Instalação da Amostra

Após a moldagem e cura, o corpo de prova foi instalado na câmara do permeâmetro de parede flexível sobre o pedestal com as pedras porosas e os papéis filtros nas extremidades, uma membrana de látex foi colocada no entorno da amostra a qual foi

fixada com o-rings nas extremidades. Após o acondicionamento do corpo de prova e a selagem da câmara, a mesma foi completada com água, evitando as bolhas de ar.

A figura 3.7 ilustra a instalação da amostra a ser ensaiada na câmara.



Figura 3.7: instalação da amostra a ser ensaiada na câmara.

2) Percolação

Esta fase visa à eliminação das bolhas de ar na amostra e facilita a saturação do corpo de prova.

O procedimento inicia com a aplicação de uma contra pressão (altura da coluna d'água disponível para percolação) e uma tensão de confinamento na amostra, de modo que a tensão efetiva fique em aproximadamente 20 kPa. A base deve estar conectada ao reservatório de água e o topo à pressão ambiente para que haja fluxo.

Esta etapa durou até que fossem percolados duas vezes o volume de vazios da amostra, variando de 24 a 72 horas, dependendo das características da amostra ensaiada, ou até que não fossem mais percebidas bolhas de ar saindo da amostra.

3) Saturação

A saturação consistiu-se na aplicação de incrementos de tensão isotrópica de 50 kPa, sendo a tensão efetiva mantida em aproximadamente 20 kPa.

Os incrementos de tensão confinante eram aplicados, abrindo-se a válvula da tensão confinante um pouco antes da contra pressão (aplicada no topo do corpo de prova). O novo incremento era aplicado somente depois que a contra pressão que foi aplicada no topo do corpo de prova atingisse a base do corpo de prova, ou seja, somente depois que a pressão estivesse equalizada por todo o corpo de prova. A tensão confinante máxima utilizada depende da capacidade do equipamento e da tensão efetiva de ensaio. A contra pressão deve ser de no mínimo 200 kPa para que as bolhas de ar sejam dissolvidas na água. A saturação foi monitorada pelo parâmetro B (SKEMPTON, 1954). Este parâmetro é definido pela razão entre a variação de poro-pressão e a correspondente variação da tensão total aplicada.

Para solos em geral, quando a amostra encontra-se saturada, obtém-se B igual ou muito próximo da unidade, ou seja, toda tensão aplicada se transforma em excesso de poro-pressão. Entretanto quando a compressibilidade do solo se torna da mesma ordem de grandeza da compressibilidade da água, como é o caso de solos muito densos, solos cimentados ou rochas brandas, o valor do parâmetro B, na condição de saturação, é menor que a unidade. A tabela 3.5, adaptada de Lambe e Whitman (1979), ilustra alguns exemplos de valores para o parâmetro B.

Tabela 3.5: valores típicos para o parâmetro B (adaptado de LAMBE; WHITMAN, 1979)

MATERIAL	S (%)	B
Arenito	100	0, 286
Granito	100	0, 342
Concreto	100	0, 582
Areia Densa	100	0, 9921
Areia fofa	100	0, 9984
Argila de Londres	100	0, 9981

Na presente pesquisa, a condição de saturação das amostras era arbitrariamente alcançada quando para um nível de 460 kPa de contra-pressão, um valor de B na ordem de 0,7 a 0,9 fosse atingido.

4) Medição da Condutividade Hidráulica

Os ensaios para a determinação do coeficiente de condutividade hidráulica foram realizados com carga constante, considerando válida a lei de Darcy, sendo que a vazão máxima era dada pelo quociente do volume total de água passante na amostra e o tempo total de ensaio. Utilizando a seguinte equação 3.1 para o cálculo do coeficiente de condutividade hidráulica:

$$k = \frac{Q.L}{A.h} \quad (\text{equação 3.1})$$

Onde:

k= coeficiente de condutividade hidráulica (cm/s);

Q= vazão passante na amostra (cm³/s);

A= área transversal da amostra (cm²);

L= comprimento da amostra (cm);

h=carga hidráulica (cm);

As variáveis A e L são constantes do corpo de prova. Estas dimensões se mantêm durante o ensaio, ou seja, considera-se que não ocorrem deformações do corpo de prova durante o ensaio.

A vazão foi determinada pela diferença de nível dos acumuladores de aplicação da tensão de base e topo observados nos tubos graduados em um determinado tempo, logo o volume total foi determinado multiplicando-se a área transversal pela diferença de nível dos acumuladores.

A carga hidráulica (h) foi determinada pela diferença de tensão da base e topo registrada pelos transdutores eletrônicos de pressão. A carga (gradiente hidráulico) deve ser mantida constante durante todo o ensaio, sendo que a norma D 5084 (ASTM, 1990) admite uma diferença máxima de 5% na medição da tensão de base e topo.

Nas amostras de SRAB-25%RBR-CAL foi aplicado um gradiente hidráulico igual a 10, que segundo a norma D 5084 (ASTM, 1990), pode ser aplicado em amostras com condutividade hidráulica de até 1×10^{-8} m/s. Gradientes maiores podem consolidar o material, lixiviar partículas para fora da amostra ou fazer com que as partículas menores ficassem retidas na porção final da amostra, colmatando os poros por onde a água deveria sair.

No fim do ensaio, efetuou-se a correção de condutividade hidráulica segundo a temperatura da água, de acordo com a norma D 5084 (ASTM, 1990).

$$k_{20} = R_t \cdot k \quad (\text{equação 3.2})$$

Onde:

k_{20} = condutividade hidráulica para água a 20° C;

R_t = fator de correção da viscosidade da água em diferentes temperaturas;

k = condutividade hidráulica obtida da equação 3. 1.

O permeâmetro de parede flexível utilizado no LEGG/ENVIRONGEO, descrito por Cruz, (2004) é composto por uma célula triaxial, um sistema de aplicação de pressão composto por células de pressão com interface ar/água e a aquisição de dados é feita por um conversor analógico/digital (datalogger).

A figura 3.8 ilustra o permeâmetro utilizado nos ensaios.

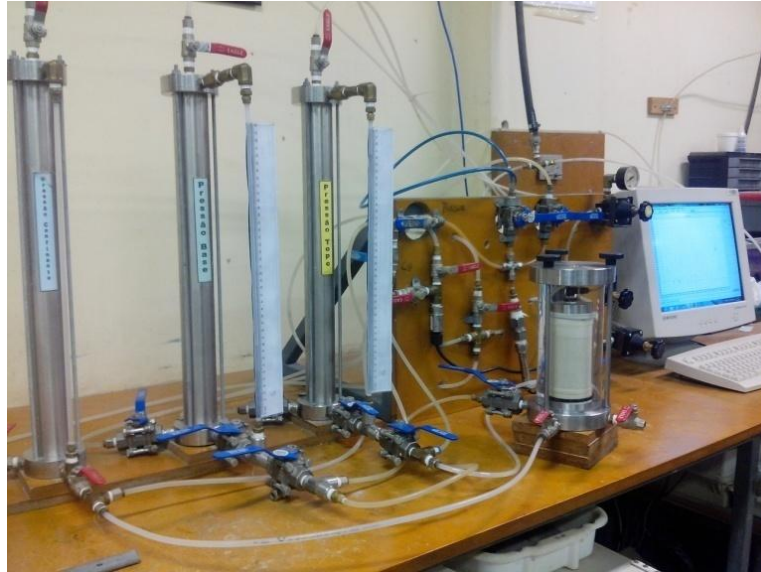


Figura 3.8: permeâmetrode parede flexível utilizado nos ensaios.

3.3.5 Ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral

A determinação das propriedades dos solos está associada a diferentes graus de dificuldades experimentais, dependendo da característica que está sendo determinada. Em ensaios de determinação direta da tração há problemas relacionados à forma de prender as amostras nas extremidades para que possam ser tracionadas. Isto provoca a concentração de tensões no corpo de prova. Portanto, a resistência à tração de solos tem sido determinada através de métodos de outros esforços que não os de tração e interpretam os resultados obtendo o valor desejado.

Nesta pesquisa foi utilizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, que consiste no carregamento de amostras cilíndricas no sentido de seu diâmetro. Além de ser um ensaio de fácil execução, é um ensaio amplamente utilizado no meio científico.

3.3.5.1 Procedimento de Ensaio

Para os ensaios de tração por compressão diametral 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. A velocidade de deformação destes ensaios foi de 1,14 milímetros por minuto. O procedimento dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral seguiu a NBR 7222 (ABNT, 1994).

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

A temperatura da água era controlada e mantida em $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Imediatamente antes do ensaio de resistência tração por compressão diametral, os corpos de prova foram retirados do recipiente e superficialmente secos com auxílio de um tecido absorvente. Procedia-se então a execução do ensaio e anotava-se a carga máxima atingida pelo corpo de prova.

Como critério de aceitação para o ensaio, estipulou-se que as resistências individuais de cada conjunto de corpos de prova não deveriam se afastar mais de 10% da resistência média desse conjunto.

3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS

O programa de ensaios de condutividade hidráulica e de resistência à tração consistiu em verificar a influência das variáveis (quantidade de cal, porosidade) e a relação vazios/cal em uma areia argilosa tratada com cal.

Para isto foi elaborado o programa de ensaios apresentados na figura 3.9. Nela podemos observar a curva de compactação na energia normal e curvas de saturação do arenito Botucatu (SRAB), sem adição de cal e resíduo; a curva de compactação do solo com 25% de resíduo de britagem (RBR), para as energias normal e modificada; a curva de compactação do solo com 25% de resíduo de britagem e 11% de cal na energia normal e os pontos de moldagem dos corpos de prova. A posição dos pontos de moldagem foi estabelecida de modo que estes ficassem compreendidos dentro da faixa de pesos

específicos aparentes secos e teor de umidade exequível numa situação de campo e laboratório.

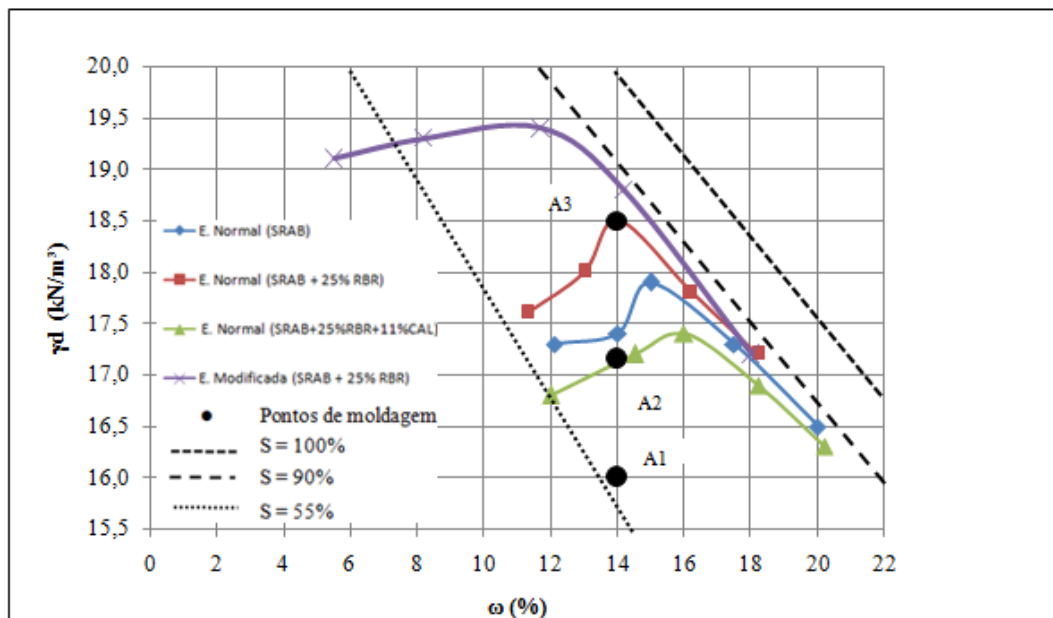


Figura 3.9: programa de ensaios de condutividade hidráulica e resistência à tração (adaptada de Lopes Junior, 2011).

Para a escolha dos finos a serem utilizados como aditivo no solo-cal e determinação do teor de resíduo em 25%, foi levada em consideração a existência de trabalhos prévios (TRB, 1976; CARRARO, 1997, LOPES JUNIOR, 2007; LOPES JUNIOR, 2011).

Nas misturas de solo-cal com 25% de resíduo de britagem foram moldados corpos de prova com 5%, 7% e 9% de cal para cada um dos três pesos específicos aparentes secos definidos a partir do trabalho realizado por Lopes Junior (2011) e apresentados na figura 3.8 e para um tempo de cura de 28 dias. Enquanto as amostras sem cura e sem cal foram preparadas com SRAB-25% de resíduo de britagem.

Os teores de cal de 5%, 7% e 9% foram definidos a partir do método de ICL (ROGERS et al., 1997) e da experiência brasileira e internacional com solo-cal. Na figura 3.10, é apresentada a variação do pH do solo residual de arenito Botucatu em relação à quantidade de cal. Verifica-se que é necessário um teor mínimo de 3% de cal para cessar a variação do pH e chegar à valores constantes ($\text{pH} \approx 12,6$).

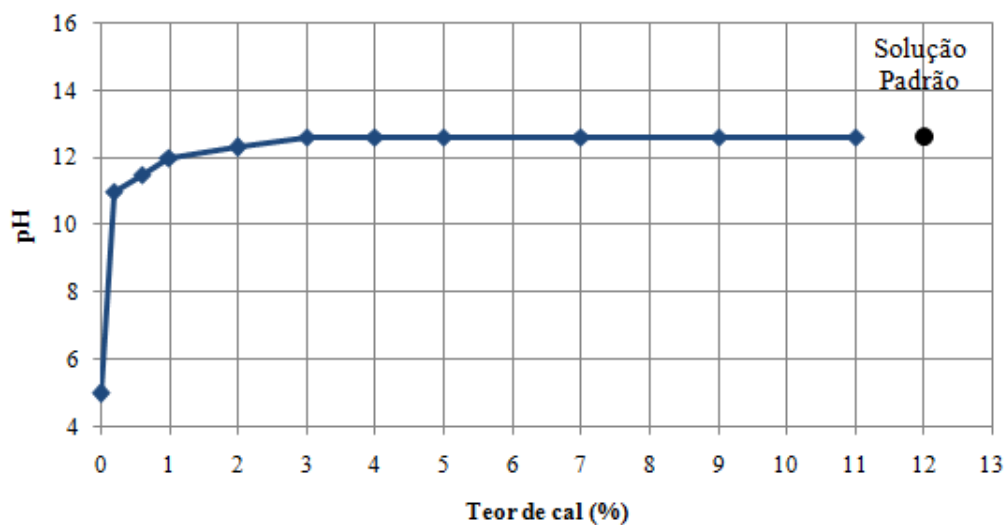


Figura 3.10: pH SRAB x teor de cal (LOPES JUNIOR, 2011).

Para os ensaios de condutividade hidráulica, cada corpo de prova foi moldado em duplicata e manteve-se como critério de escolha o corpo de prova que estivesse mais próximo dos critérios descritos no item 3.3.3.

Devido à dispersão característica dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, cada corpo de prova foi moldado em triplicata. A fim de corroborar a reatividade do resíduo usado nesta pesquisa e o estudado por Lopes Junior (2011), aleatoriamente alguns corpos de prova foram rompidos à compressão simples, obtendo-se assim maior confiabilidade.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 COMPORTAMENTO HIDRÁULICO

4.1.1 Ensaio de Condutividade Hidráulica

As tabelas A.1 e A.2, do apêndice “A”, apresentam as características dos corpos de provas submetidos ao ensaio de condutividade hidráulica. As tabelas 4.1 e 4.2 apresentam, em síntese, os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica para as amostras de SRAB-25%RBR-CAL com 28 dias de cura e das amostras de SRAB-25%RBR sem tempo de cura, respectivamente.

Tabela 4.1: resultados dos ensaios de condutividade hidráulica SRAB-25%RBR-CAL para 28 dias de cura.

Teor de cal (%)	Peso específico aparente seco (kN/m ³)	Condutividade hidráulica (m/s)
5	16,0	1,63E-06
	17,2	3,47E-07
	18,5	4,82E-08
7	16,0	9,07E-07
	17,2	2,73E-07
	18,5	6,86E-08
9	16,0	1,25E-06
	17,2	2,17E-07
	18,5	3,38E-08

Tabela 4.2: resultados para as amostras de SRAB-25%RBR sem cal e sem tempo de cura.

Peso específico aparente seco (kN/m ³)	Condutividade hidráulica (m/s)
16,0	1,81E-07
17,2	2,25E-07
18,5	2,57E-08

4.1.1.1 Efeito do teor de cal

A figura 4.1 apresenta a influência do teor de cal e do peso específico aparente seco de moldagem na condutividade hidráulica do compósito SRAB-25%RBR-CAL e para o SRAB-25%RBR.

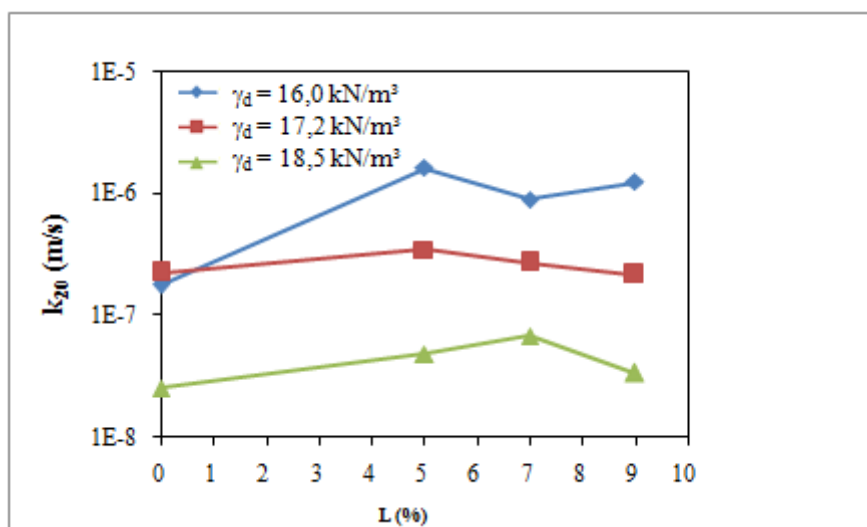


Figura 4.1: variação da condutividade hidráulica em função do teor de cal.

O acréscimo de cal não resultou em uma mudança expressiva no valor do coeficiente de condutividade hidráulica para um mesmo peso específico estudado. Percebe-se que o peso específico aparente seco de moldagem expressa relevância nos resultados. Para um mesmo teor de cal, houve um padrão de comportamento, pois ocorre um paralelismo entre os resultados. Averiguando-se um caso específico para exemplificar, no caso de

5% de cal, o coeficiente de condutividade hidráulica passou de $4,82 \times 10^{-8}$ m/s para $1,63 \times 10^{-6}$ m/s, com a redução do peso específico de $18,5 \text{ kN/m}^3$ para $16,0 \text{ kN/m}^3$.

Segundo Thomé (1999), misturas contendo materiais siltosos, como é o caso do solo residual de arenito Botucatu, apresentam valores de condutividade hidráulica na ordem de 10^{-9} m/s, desde que adicionadas de um material estabilizante e curadas apropriadamente.

A tendência de comportamento observado nesse estudo condiz com a tendência apresentada em outros trabalhos com solos cimentados artificialmente (KALINSKI e YERRA 2005; BELLEZZA E FRATALOCCHI, 2006) em que o aumento do peso específico aparente seco reduziu o valor do coeficiente de condutividade hidráulica.

4.1.1.2 Efeito da Porosidade

Na figura 4.2 são apresentadas as curvas de ajuste da variação da condutividade hidráulica em função da porosidade do solo-resíduo de britagem-cal compactado ensaiados com 28 dias de cura. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$).

Verifica-se que de maneira contrária à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a condutividade hidráulica do compósito SRAB-25%RBR-CAL. Quanto mais denso, menos poroso, com menor índice de vazios o corpo de prova, menor é a condutividade hidráulica.

Independentemente da quantidade de cal utilizada, a redução da porosidade do material promove uma diminuição considerável na condutividade hidráulica, de pelo menos uma ordem de grandeza, dentro da faixa de valores avaliada. Os materiais de cimentação formados devido à adição de cal tendem a diminuir a porosidade do solo tratado com cal e, portanto, o seu coeficiente de condutividade hidráulica.

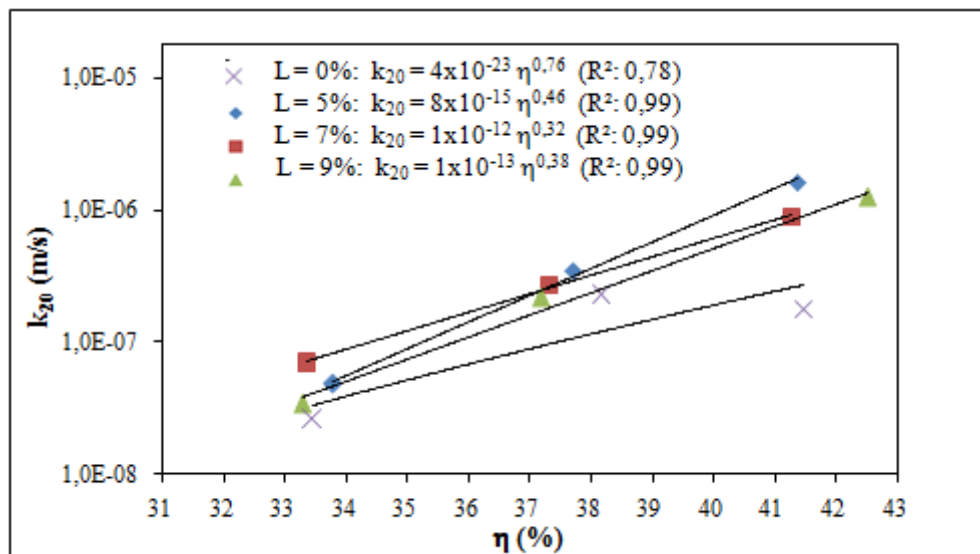


Figura 4.2: variação da condutividade hidráulica em função da porosidade do SRAB-25%RBR-CAL.

4.1.1.3 Relação vazios/cal

Na figura 4.3, são apresentadas as curvas de variação da condutividade hidráulica em função da relação vazios/ cal, expressa pela relação porosidade/teor volumétrico de cal.

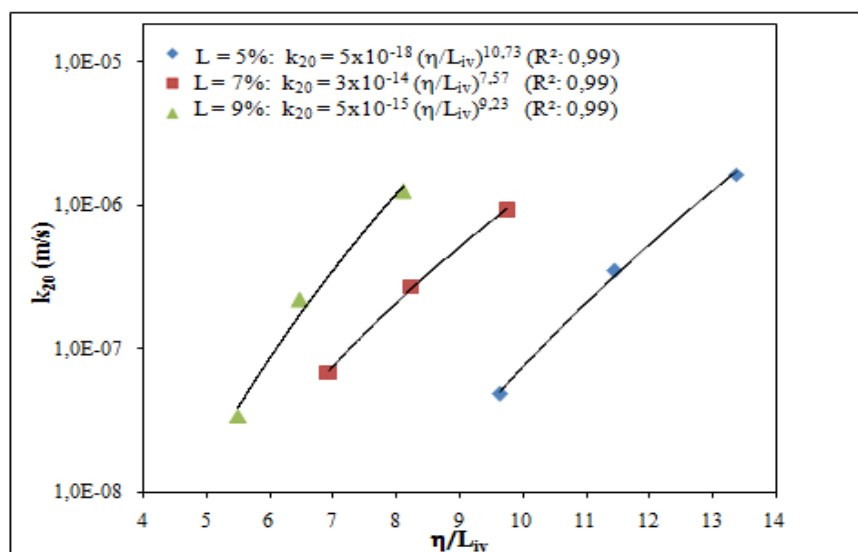


Figura 4.3: condutividade hidráulica versus relação vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL.

Pode-se observar que não existe uma correlação única entre condutividade hidráulica 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 condutividades hidráulicas.

Uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas é através da aplicação de uma potência sobre elas. Lopes Junior (2011) obteve que para esse material uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro L_{iv} , resultaria em uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, promovendo um melhor ajuste para a relação vazios/cal.

A figura 4.4 (a) apresenta a variação da condutividade hidráulica em função da relação vazios/cal, expressa pela relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado a um expoente de 0,12; (b) escala logarítmica.

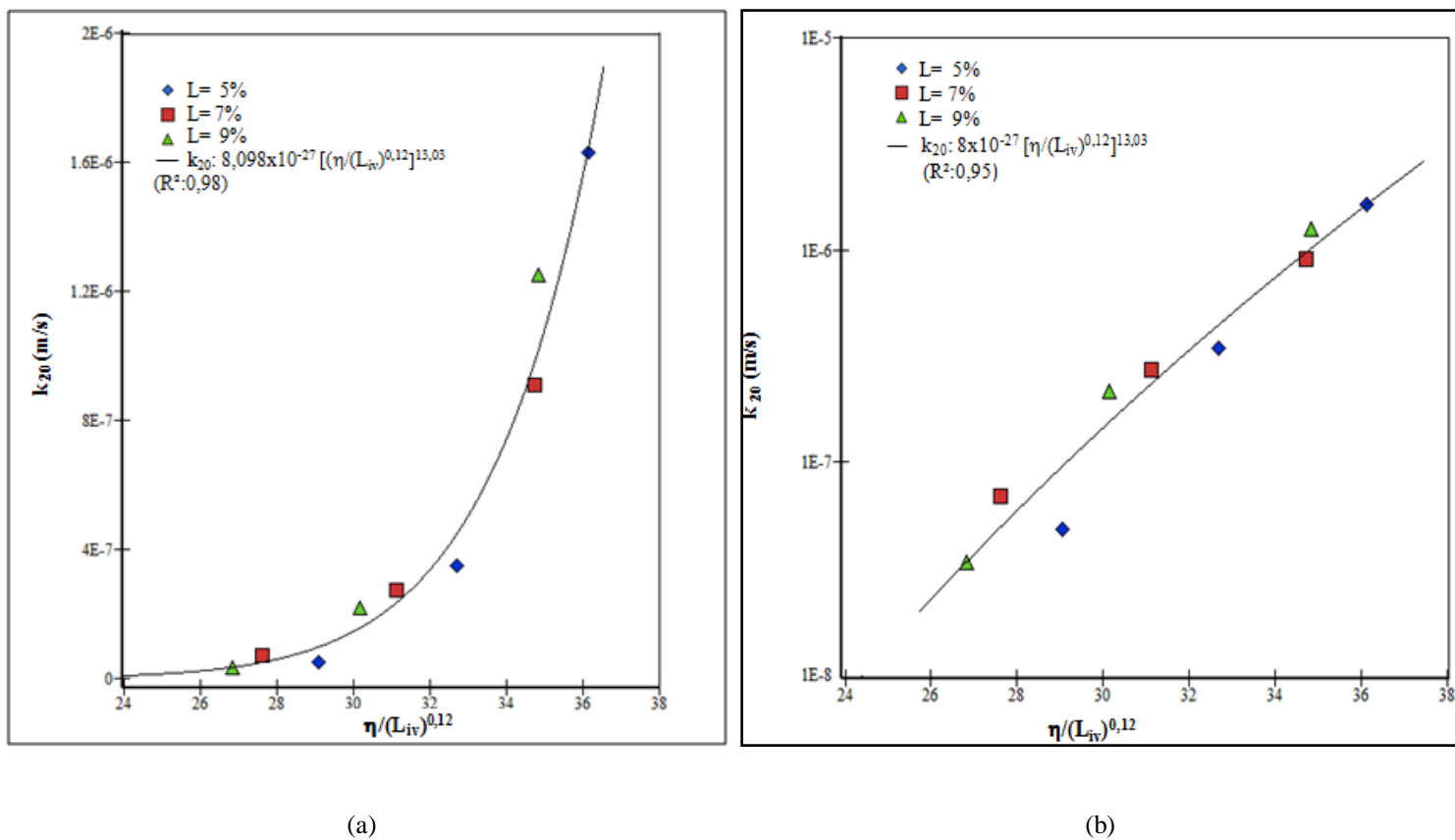


Figura 4.4: (a) variação da condutividade hidráulica em função do $\eta/(L_{iv})^{0.12}$ do SRAB-25%RBR-CAL. (b): variação da condutividade hidráulica, em escala logarítmica, em função do $\eta/(L_{iv})^{0.12}$ do SRAB-25%RBR-CAL.

Pode-se observar uma boa correlação entre o volume de vazios/volume de cal ajustados e a condutividade hidráulica do compósito SRAB-25%RBR-CAL. Para o ajuste foi utilizado uma curva do tipo potência.

4.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Para avaliar o comportamento mecânico deste material, foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral e compilados os resultados de resistência à compressão simples de Lopes Junior (2011) para 28 dias e para os respectivos teores de cal estudados nesse trabalho.

4.2.1 Resistência à Compressão Simples

4.2.1.1 Efeito do teor de cal

A figura 4.5 apresenta as curvas de variação da resistência à compressão simples em função do teor de cal. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$).

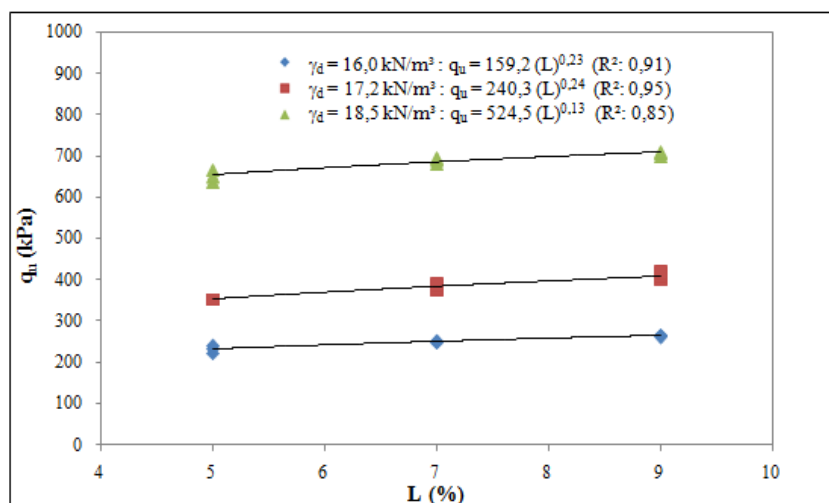


Figura 4.5: variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal do SRAB-25%RBR- CAL.

Verifica-se que a taxa de aumento da resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, praticamente permanece a mesma com o aumento do peso específico aparente seco.

Núñez (1991) verificou que, para misturas de arenito Botucatu e cal, o aumento na porcentagem de (3% a 9%) de cal não influenciou consideravelmente a resistência à compressão simples de amostras curadas por 28 dias. Entretanto, para um tempo de cura maior, 90 dias, o autor observou que o teor de cal é fator decisivo nos ganhos de resistência. Tal fato se deve principalmente as reações pozolânicas, as quais são lentas, podendo estender-se por anos, e só iniciam certo tempo depois da compactação. Segundo relato da TRB (1987) esta reação não cessará enquanto houver hidróxido de cálcio disponível para manter o pH elevado para dissolução da sílica e da alumina dos argilominerais do solo.

4.2.1.2 Efeito da porosidade

Na figura 4.6 são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$).

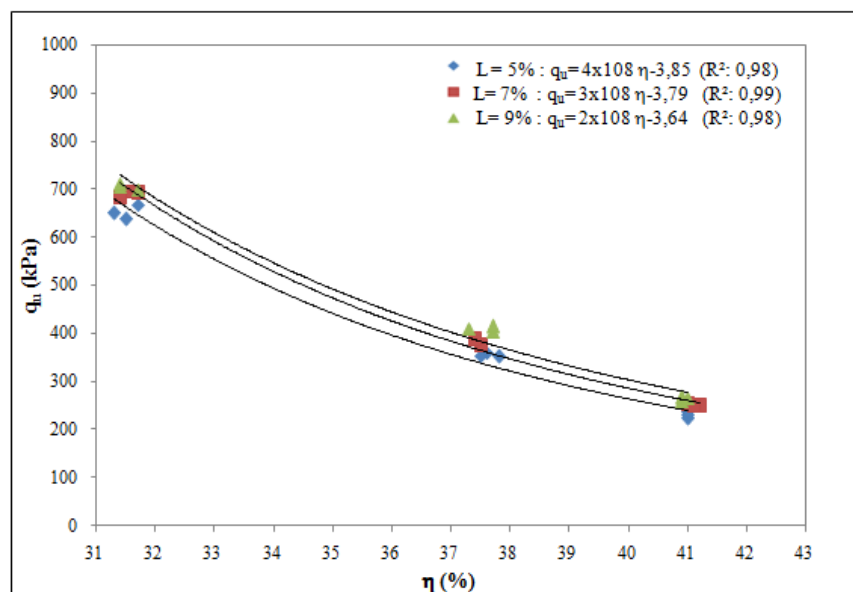


Figura 4.6: variação da resistência à compressão simples em função da porosidade do SRAB-25%RBR-CAL.

Verifica-se que de maneira contrária à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência à compressão simples do compósito SRAB-25%RBR-CAL. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos consideráveis de resistência.

4.2.1.3 Relação vazios/cal

A figura 4.7 apresenta as curvas de variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cal, expressa pela relação porosidade/teor volumétrico de cal para 28 dias e teor de umidade de ($\omega=14\%$).

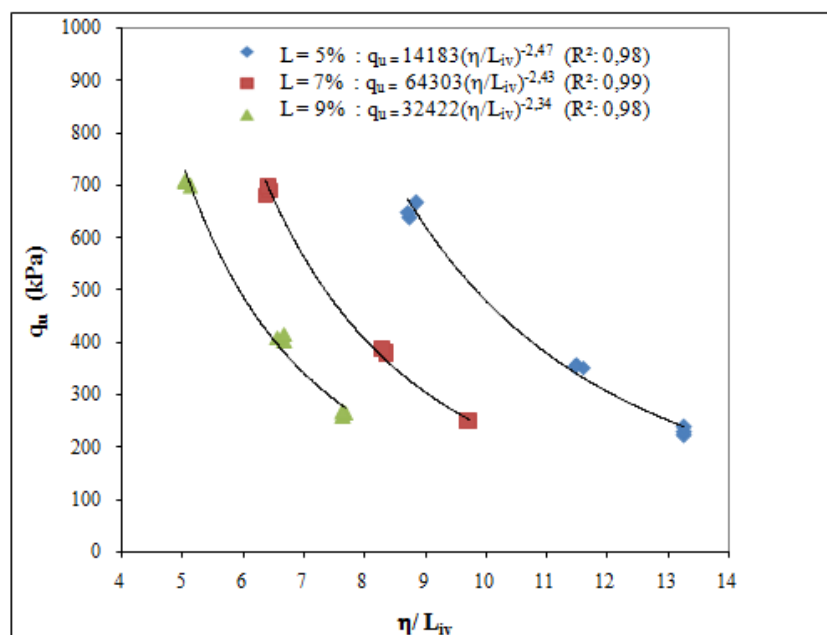


Figura 4.7: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal do SRAB-25% RBR-CAL.

Pode-se observar que não existe uma relação única entre a resistência à compressão simples e a relação porosidade/teor volumétrico de cal, de modo que iguais valores de porosidade/teor volumétrico de cal, obtidos de diferentes combinações de cal e porosidade, apresentam distintas resistências.

Uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas é através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Para este material Lopes Junior (2011), obteve que uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro (L_{iv}) seria suficiente para compatibilizar as taxas de variação, resultando em um melhor ajuste para a relação vazios/cal.

Na figura 4.8 é apresentada a curva de variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,12 dos corpos de prova com 28 dias. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

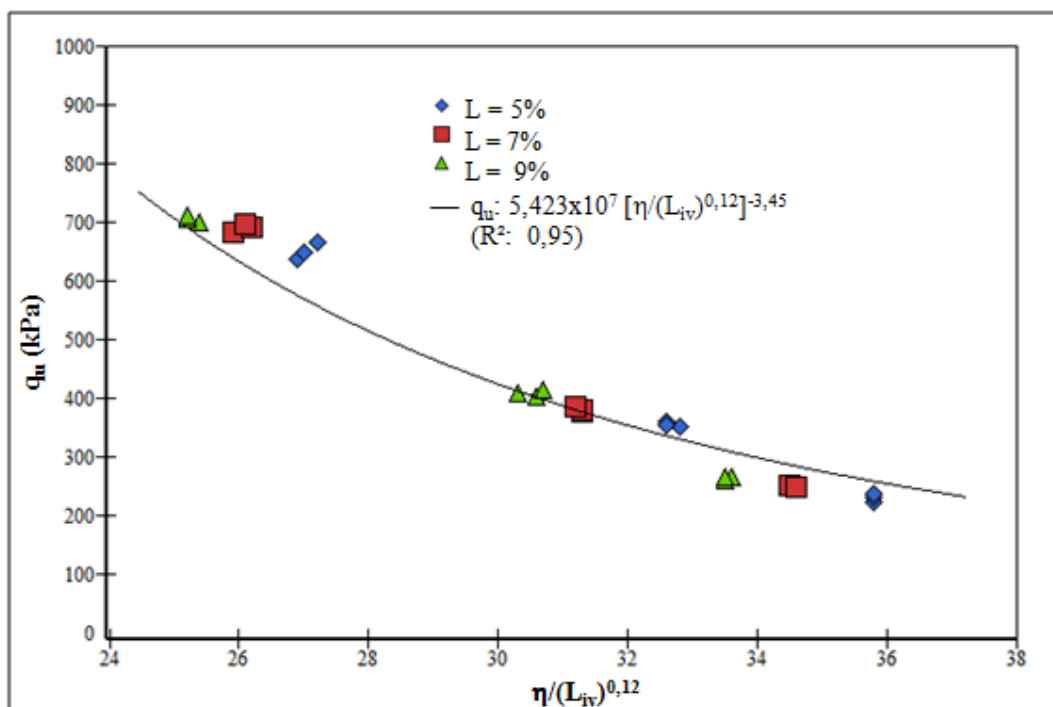


Figura 4.8: resistência à compressão simples versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL.

A potência usada para compatibilizar a variação da resistência à compressão simples pela relação vazios/cal de 0,12 está associado ao tipo de agente cimentante (neste caso a cal), a matriz do solo e o mecanismo de cimentação (empacotamento ou preenchimento de vazios).

Pode-se observar uma boa correlação entre o volume de vazios/volume de cal ajustados e a resistência à compressão simples do compósito SRAB-25%RBR-CAL. Foi utilizado no ajuste curva tipo potência, a qual apresentou melhores coeficientes de correlação R^2 .

4.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Tabela B.1, do Apêndice “B”, apresenta 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.

4.2.2.1 Efeito do teor de cal

Na figura 4.9, são apresentadas as curvas de ajustes da variação da resistência à tração em função da quantidade de cal para 28 dias. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$).

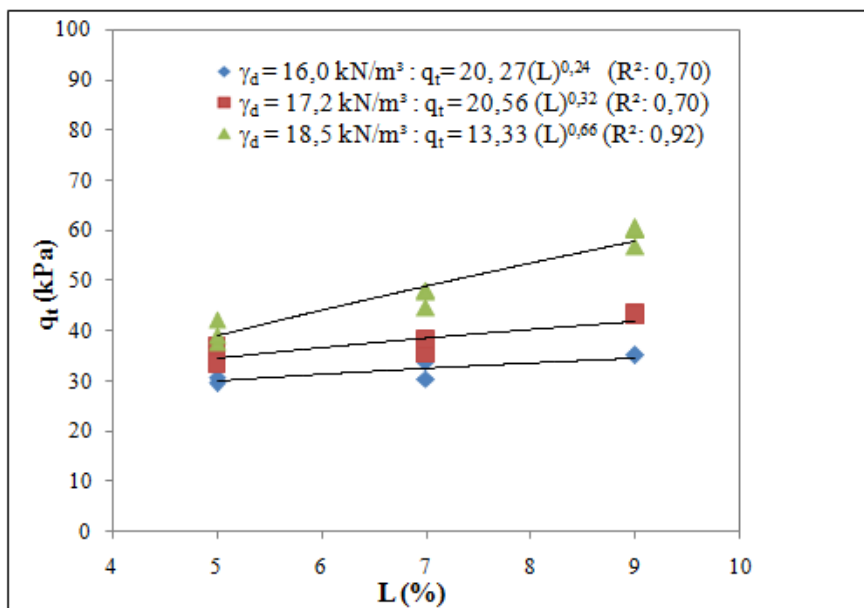


Figura 4.9: variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal do SRAB-25%RBR- CAL.

A resistência à compressão diametral aumenta com a adição de cal, mesmo em pequenas quantidades. 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, SILVANI, 2013).

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 compósito SRAB-25%RBR-CAL compactado. 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), Dalla Rosa (2009) e Silvani (2013).

4.2.2.2 Efeito da Porosidade

Na figura 4.10, são apresentadas as curvas de ajustes da variação da resistência à tração em função da porosidade. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$).

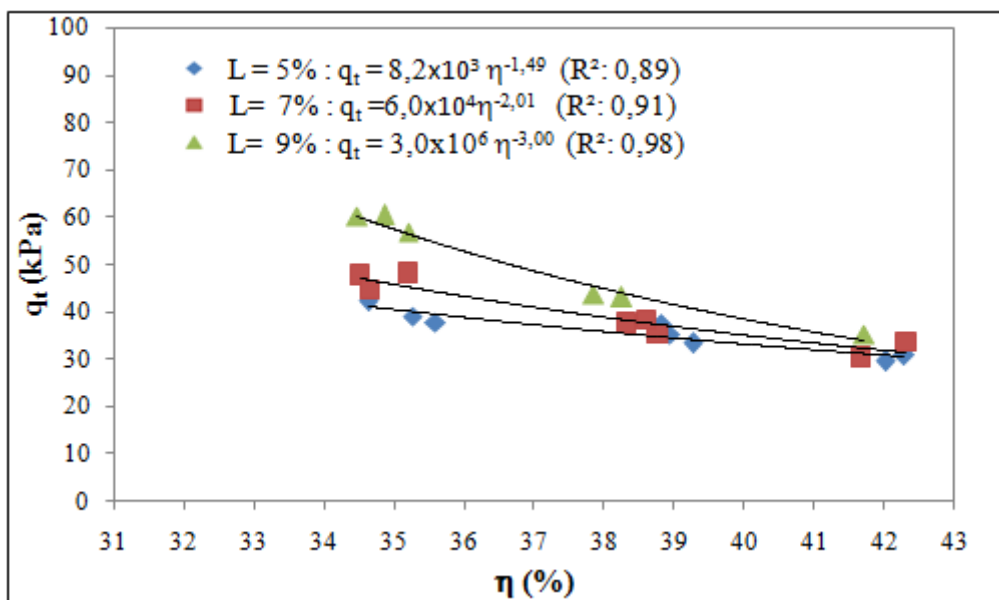


Figura 4.10: variação da resistência à tração em função da porosidade do SRAB-25%RBR-CAL.

Observa-se que todas as curvas têm uma boa tendência potencial, de comportamento similar com as curvas de resistência à compressão simples. Além disso, é possível verificar que a diminuição da porosidade gera aumentos substanciais de resistência à compressão diametral, independentemente da quantidade de cal adicionada

Lopes Junior (2011) 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.

4.2.2.3 Relação Vazios/Cal

Na figura 4.11 é apresentada a variação da resistência à tração em função da relação vazios/cal. Todos os corpos de prova possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$), porém quantidade de cal e porosidades variadas.

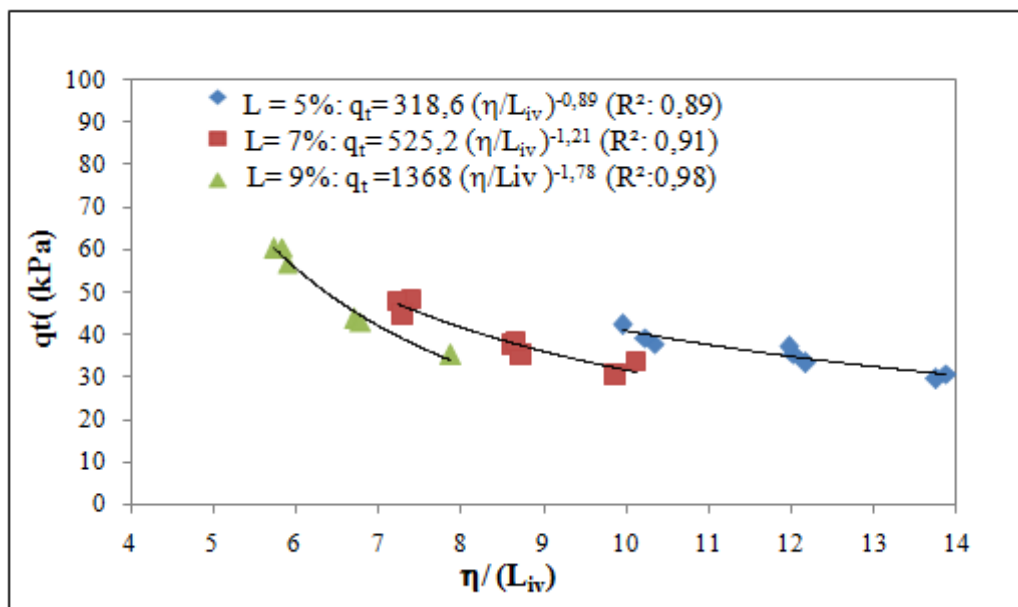


Figura 4.11: resistência à tração versus relação vazios/cal do SRAB-25%RBR-CAL.

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.

Contudo, de forma análoga a análise da resistência à compressão simples, compatibilizou-se as taxas de variação das grandezas citadas através da aplicação de uma potência, uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro L_{iv} , resultando num melhor ajuste para a relação vazios/cal.

Na figura 4.12 é apresentada a curva de variação da resistência à tração em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,12 dos corpos de prova com 28 dias. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

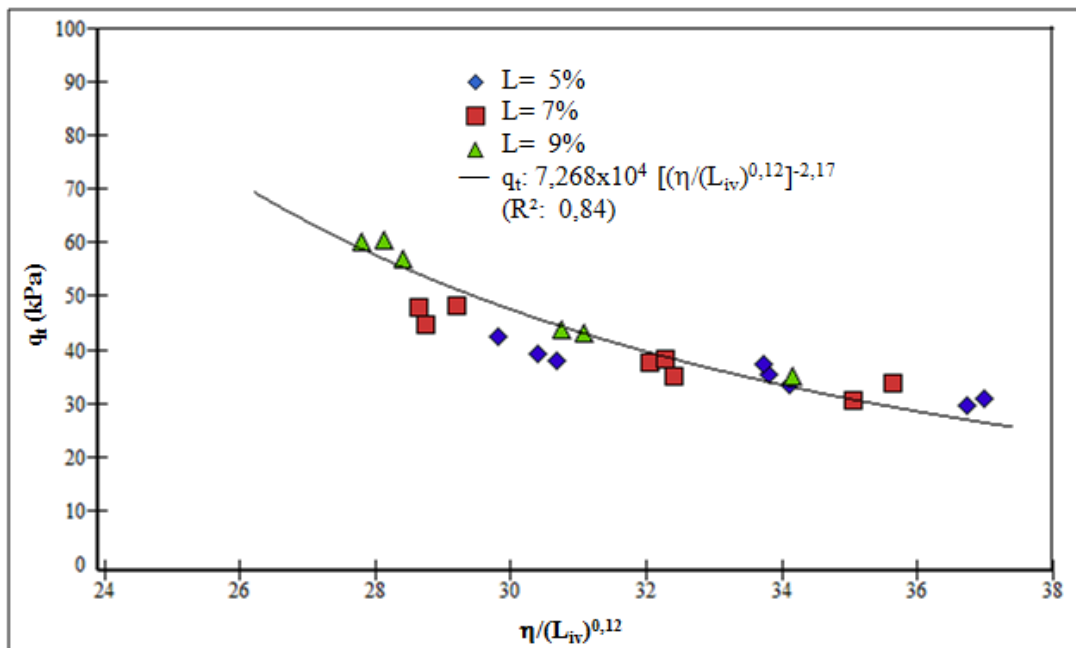


Figura 4.12: resistência à tração versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL.

Pode-se observar uma boa correlação entre o volume de vazios/volume de cal ajustados e a resistência à compressão diametral do compósito SRAB-25%RBR-CAL. Foi utilizado no ajuste curva tipo potência.

4.2.3 Relação entre a resistência à compressão simples e diametral

Segundo vários estudos realizados na UFRGS tem-se demonstrado que a resistência à compressão simples e compressão diametral é controlada em certa forma pela porosidade e a relação vazios/agente cimentante do solo.

Observa-se nos resultados das correlações da resistência à tração com a relação vazios/cal, que a tendência das curvas são as mesmas se comparadas com os resultados de resistência à compressão simples.

Através das figuras 4.8 e 4.12 e as respectivas equações das tendências geradas, utilizou-se a relação vazios/cal para correlacionar a resistência à compressão simples com a resistência à tração para o SRAB-25%RBR-CAL e 28 dias de cura.

Na figura 4.13 são agrupadas as curvas de resistências à compressão simples e de resistência à tração em função da relação vazios/cal.

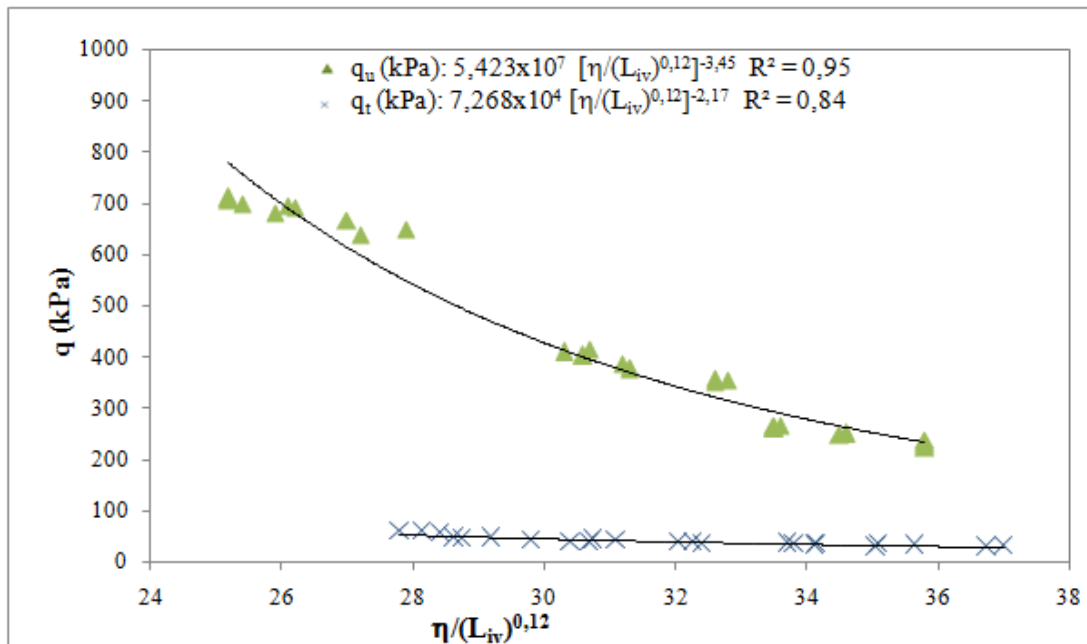


Figura 4.13: variação da resistência à compressão simples e à tração versus $[(\eta/L_{iv})^{0,12}]$ do SRAB-25%RBR-CAL.

A partir da figura 4.13 verificou-se que a razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão simples (q_t/q_u) do SRAB-25%RBR-CAL é, em média 13% para 28 dias.

4.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA POR CONSOLI (2014)

A fim de quantificar a influencia das variáveis de interesse (quantidade de cal, porosidade) e a relação $\eta/(L_{iv})^{0,12}$ evidenciadas neste trabalho, buscou-se aplicar uma metodologia que avaliasse a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb de solos tratados com cal com base na resistência à compressão simples e resistência diametral de tal material, sem a realização de ensaios triaxiais.

A metodologia desenvolvida por Consoli (2014) parte de um conceito previamente estabelecido que a relação entre a resistência à compressão simples e a resistência à compressão diametral é única para cada mistura de solo tratado, onde demonstra que o ângulo de atrito de um determinado solo tratado com cal é independente da porosidade e da quantidade de cal, e o intercepto coesivo é diretamente proporcional da função da resistência à compressão simples ou diametral.

Neste caso, considerando as equações 4.1 e 4.2, propostas pela metodologia tem-se que:

$$\phi' = \arcsin \left(\frac{1-4\xi}{1-2\xi} \right) \quad (\text{equação 4.1})$$

$$c' = \frac{q_u \left[1 - \left(\frac{1-4\xi}{1-2\xi} \right) \right]}{2 \cos \left[\arcsin \left(\frac{1-4\xi}{1-2\xi} \right) \right]} \quad (\text{equação 4.2})$$

A razão da resistência à tração e compressão simples para o compósito SRAB-25%RBR-CAL, para 28 dias, é de $\xi = 0,13$.

Inserindo o valor de ξ , nas equações 4.1 e 4.2 tem-se:

$$\phi' = \arcsin \left(\frac{1-4 \times 0,13}{1-2 \times 0,13} \right) = 38,7^\circ \quad \text{equação (4.3)}$$

$$c' = \frac{q_u \left[1 - \left(\frac{1-4 \times 0,13}{1-2 \times 0,13} \right) \right]}{2 \cos \left[\arcsin \left(\frac{1-4 \times 0,13}{1-2 \times 0,13} \right) \right]} = 0,249 q_u \quad \text{equação (4.4)}$$

Substituindo $\eta / (L_{iv})^{0,12} = 35$ na equação da resistência à compressão simples para 28 dias de cura $q_u = 5,423 \times 10^7 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,12}} \right]^{-3,45}$ temos um valor de $q_u = 255,39 \text{ kPa}$.

Finalmente inserindo o valor de q_u na equação 4.4 tem-se que:

$$c' = 0,249 (255,39) = 63,69 \text{ kPa}$$

Lopes Junior (2011) realizou ensaios triaxiais para o SRAB-25%RBR-CAL para a relação $\eta / (L_{iv})^{0,12}=35$. O comportamento tensão-deformação para 28 dias de cura e tensões de confinamento de 20kPa, 200kPa e 400kPa é apresentado na figura 4.14.

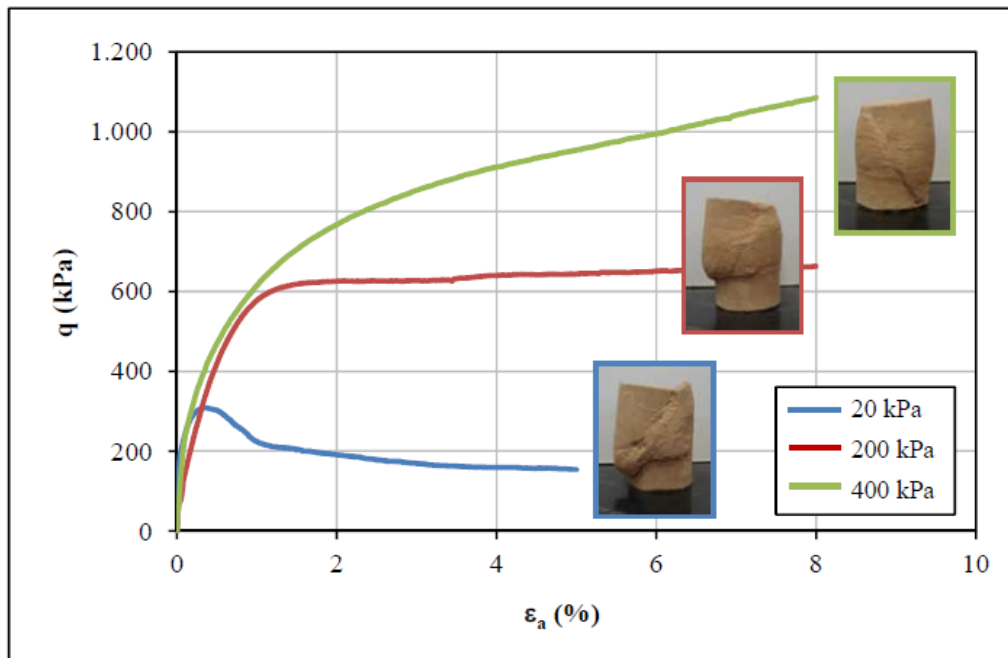


Figura 4.14: tensão-deformação da amostra com $\eta / (L_{iv})^{0,12}=35$ para 20kPa, 200kPa e 400kPa (LOPES JUNIOR, 2011).

Pela análise da figura 4.14, nota-se que o ensaio com 20 kPa de confinamento efetivo apresentou pico de ruptura, os demais ensaios não apresentaram ruptura definida com o aumento da tensão confinante.

Os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito obtidos experimentalmente para um $\eta / (L_{iv})^{0,12}=35$ e 28 dias de cura foram de 76,4 kPa e $30,6^\circ$, respectivamente. A figura 4.15 apresenta a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.

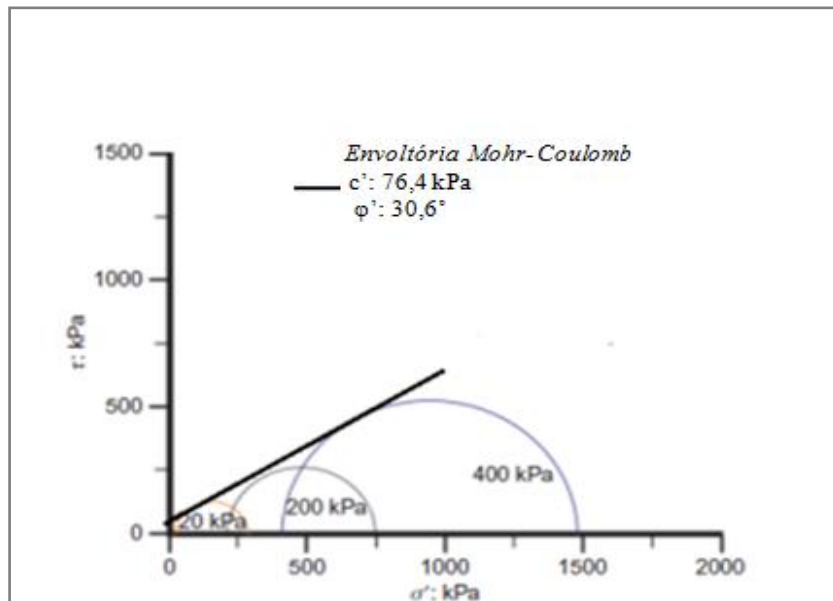


Figura 4.15: envoltória de ruptura de Mohr- Coulomb para um $\eta / (L_{iv})^{0,12} = 35$.

A figura 4.16 apresenta a comparação entre a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb e o modelo de previsão de Consoli (2014) para uma relação $\eta / (L_{iv})^{0,12} = 35$.

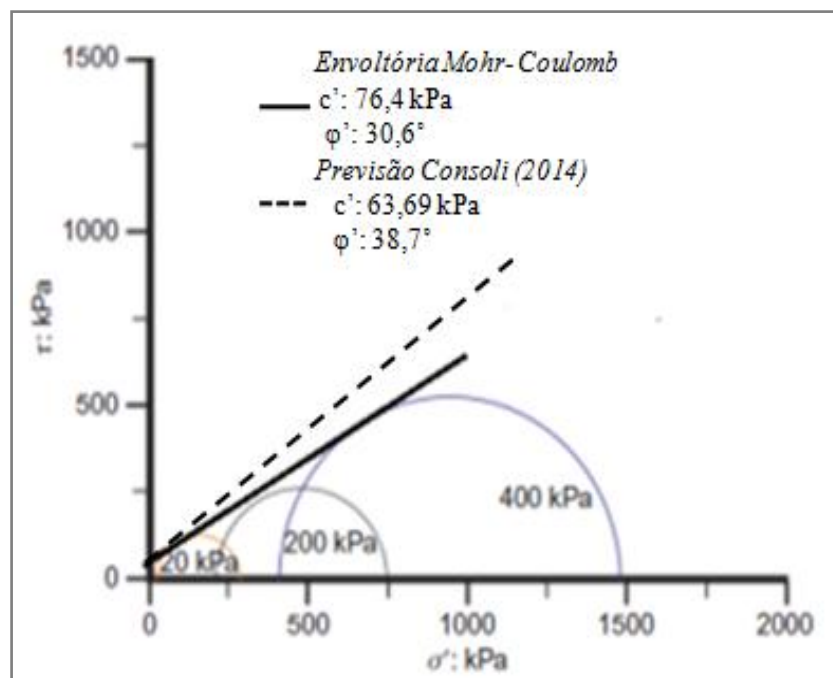


Figura 4.16: envoltória de ruptura de Mohr- Coulomb e Modelo de Previsão segundo Consoli (2014) para um $\eta / (L_{iv})^{0,12} = 35$.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E RESISTÊNCIA MECÂNICA

A partir dos resultados de condutividade hidráulica, resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, pode-se analisar e obter o melhor comportamento físico do compósito SRAB-25%RBR- CAL.

As figuras 4.17 e 4.18 apresentam os resultados de condutividade hidráulica e de resistência à compressão simples e os resultados de condutividade hidráulica e de resistência à tração por compressão diametral em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,12, respectivamente.

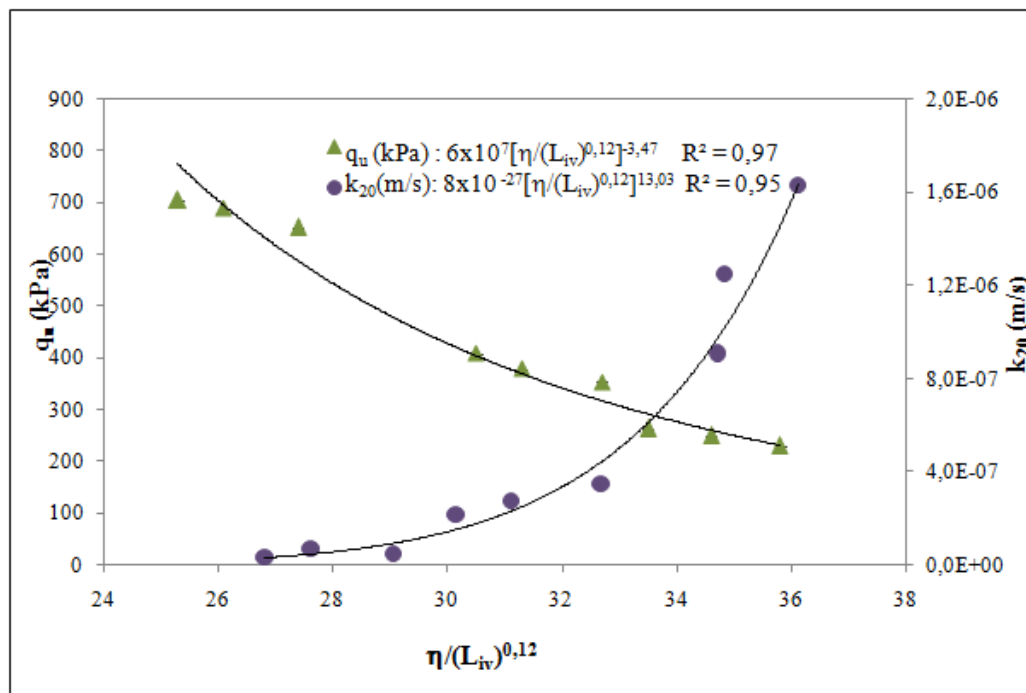


Figura 4.17: comparação entre a condutividade hidráulica e a resistência à compressão simples em função do $\eta/(L_{iv})^{0,12}$.

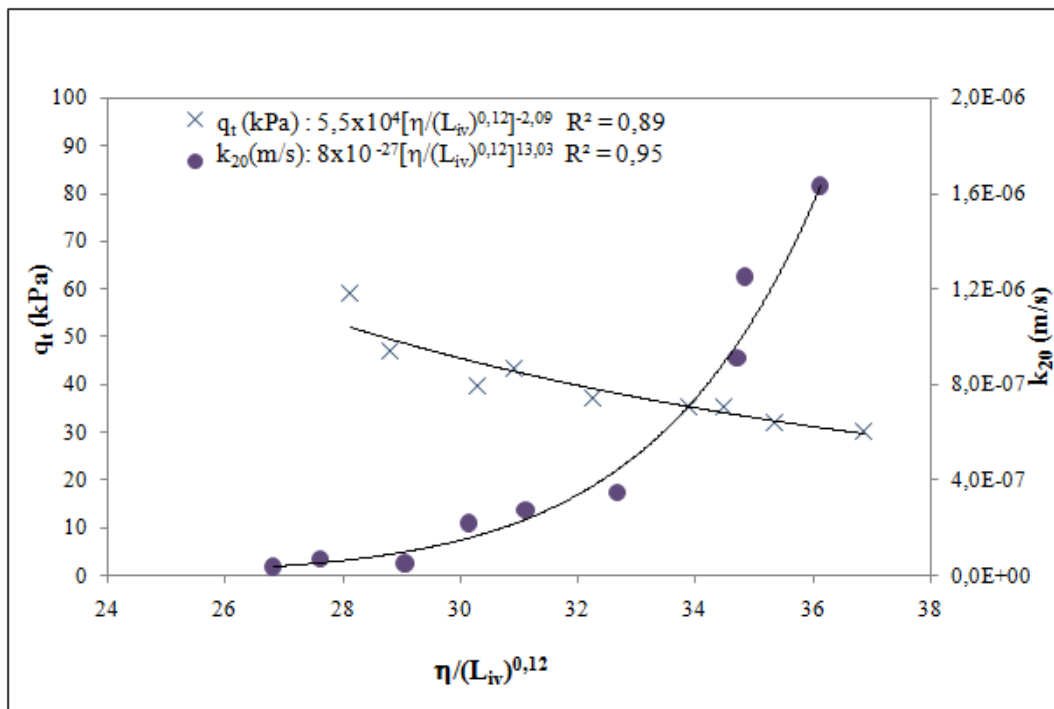


Figura 4.18: comparação entre a condutividade hidráulica e a resistência à tração em função do $\eta / (L_{iv})^{0,12}$.

A partir da análise conjunta das figuras 4.17 e 4.18 tem-se que quanto menor a relação $\eta / (L_{iv})^{0,12}$ maior a resistência (compressão simples e tração) a uma baixa condutividade hidráulica, validando a adequabilidade do parâmetro na previsão do comportamento físico do compósito SRAB-25%RBR- CAL. O ajuste de curva do tipo potência, também se mostrou adequado na correlação das propriedades, na maioria com um R^2 satisfatório.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A partir da análise e discussão dos resultados, bem como da avaliação das variáveis investigadas (quantidade de cal e porosidade) sobre o comportamento hidráulico e mecânico do compósito estudado foram estabelecidas, dentro das condições e limites específicos deste estudo, as seguintes conclusões:

a) Quanto à influência da quantidade de cal

A quantidade de cal, não exerce uma forte influência sobre a condutividade hidráulica da mistura solo-cal estudado.

Independentemente da quantidade de cal adicionada, a redução na porosidade do material compactado promoveu ganhos substanciais de resistência. Verificou-se que a resistência à compressão simples aumentou potencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

b) Quanto à influência da porosidade

A porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a condutividade hidráulica do compósito estudado. Independentemente da quantidade de cal utilizada, a redução da porosidade do material promove uma diminuição considerável na condutividade hidráulica, de pelo menos uma ordem de grandeza, e ganhos significativos de resistência. Verificou-se que a resistência à compressão simples e diametral, aumentou potencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada. Com a redução na porosidade, o material estudado adquire um maior número de contatos e um maior intertravamento entre as partículas, ocorrendo então, uma cimentação mais efetiva e conseqüentemente o aumento na resistência à compressão simples. Além disso, a maior capacidade de distribuição de tensões e

mobilização de atrito no interior da amostra, nas porosidades mais baixas, pode também contribuir para o ganho de resistência do material

c) Relação vazios/cal

Verificou-se que a relação vazios/cal, ajustado por um expoente, é um parâmetro eficaz na previsão do comportamento hidráulico e mecânico de solos tratados com cal.

d) Relação entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão simples

Verificou-se que a razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão simples (q_t/q_u) é única com um valor de 0,13. Este resultado sugere, então, que a resistência à tração das amostras de SRAB-25%RBR-CAL representa, em média, 13,0% da sua resistência à compressão simples.

e) Parâmetros de resistência

Verificou-se que a aplicação da metodologia de previsão da envoltória de ruptura proposta por Consoli (2014) para a determinação de parâmetros de resistência foi satisfatória.

f) Comparação condutividade hidráulica e resistência mecânica

Verificou-se que quanto menor a relação $\eta / (L_{iv})^{0,12}$ maior a resistência (compressão simples e tração) a uma baixa condutividade hidráulica, validando a adequabilidade do parâmetro na previsão do comportamento físico do compósito SRAB-25%RBR-CAL estudado.

5.2 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, sugere-se os seguintes tópicos da pesquisa:

- Verificar a influência de outras variáveis (teor de umidade, outros tempos de cura, método de compactação) na condutividade hidráulica do solo-cal;
- Análise da rigidez e medições de G_0 para o solo-cal com resíduo de britagem;
- Execução de fotomicroscopia e difração de raios-x, para melhor compreensão dos mecanismos de reações entre o solo e a cal;

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes**. Philadelphia, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 5084: Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible wall permeameter**. Philadelphia, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 6457: amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**: Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984b.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1984.

AZAMBUJA, R. M. B. **Comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo-cimento-bentonita para a aplicação em Barreiras verticais de contenção de contaminantes**. 2004. 115p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J.I.; TODRES, H.A. **Stabilization of clay soils by Portland Cement or Lime – A critical review of literature**. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA. PCA R&D Serial n. 2066.60p. 2003.

BELL, F. G. **Lime stabilization of clay minerals and soils**. Engineering Geology, n.42, p. 223-237, 1996.

BELLEZZA, I.; FRATALOCCHI, E. **Effectiveness of cement on hydraulic conductivity of compacted soil-cement mixtures**. Proceedings of ICE – Ground Improvement, v.10, n.2, p.77-90.2006.

BOYNTON, S.S.; DANIEL, D.E. **Hydraulic conductivity tests on compacted clay**. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.111, n.4, p. 465-478. 1985

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.

CASTRO, F.J.C.O; **Um estudo físico químico matemático da estabilização alcalina de solos argilosos.** 1981. 476p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro.

CARPENTER, G.W.; STEPHENSON, R.W. **Permeability Testing in the Triaxial Cell.** *Geotechnical Testing Journal*, Philadelphia, v. 9, n.1, p. 3-9. 1986.

CERATTI, J.A.P. **Efeitos da adição de cal e cinza volante nas propriedades de um Solo Residual Compactado,** 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

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

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

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

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

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. **Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Reston, American Society of Civil Engineers, v. 136, n. 5, p. 759-763. 2010.

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.; MORAES, R. R.; FESTUGATO, L. **Variables controlling strength of fiber-reinforced cemented soils.** *Proc. Instn Civ. Engrs – Ground Improvement*, v. 166, n. 4, p.221–232. 2013.

CONSOLI, N. C.; LOPES JR, L. S.; CONSOLI, B. S.; FESTUGATO, L. **Mohr–Coulomb failure envelopes of lime-treated soils**. *Géotechnique*, v.64, n. 2, p. 165–170.2013.

CONSOLI, N.C. **A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils**. *Engineering Geology*, v. 69, p. 61–68.2014.

CRUZ, R. C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada**. 2008, 216p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 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, 198p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DANIEL, D.E. **Clay liners**. In.: *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, London: Chapman& Hall. Cap. 7, p. 137-163.1993.

DANIEL, D.E. **State-of-the-art: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils**. In: *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport In Soil*, Philadelphia. ASTM STP 1142, ASTM, p. 30-78.1994

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

EADES, J. L.; GRIM, R. E. **A quick test to determine lime requirements for lime stabilization**. *Highway Research Record*, Washington, D. C., n. 139, p. 61–72, 1966.

FAVARETTI, M.; MORACI, N.; PREVIATELLO, P. **Effects of Leachate on the Hydraulic and Mechanical Behavior of Clay Liners**. In: *1ST CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS*. Proceedings. Edmonton, Alberta, Canadá, v. v.1, p. 221-226.1994.

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.

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

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – Fundamentos e aplicações na Engenharia Civil**. São Paulo: Pini, 1998.

GUIMARÃES, J.E.P. **Estabilização de Solos – Nova e importante aplicação da cal – Seus conceitos e suas vantagens**. Boletim n 1. São Paulo: ABPC, 1971.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002, 255p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HEINECK, K. S. **Estudo da Influência da Cimentação Introduzida sob tensão**. 1998, 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HERRIN, M. and MITCHELL, H. **Lime-soil mixtures**. Bulletin n.304. Highway Research Board, Washington, p. 99–138.1961.

HUANG, S., FREDLUND, D.G., BARBOUR, S.L. **Measurement of the coefficient of permeability for a deformable unsaturated soil using a triaxialpermeameter**. CanadianGeotechnicalJournal, v. 35, p 426-432. 1998.

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

ISMAIL, M.A.; SHARMA, S.S.; RANDOLPH, M.F. **Small and Large Strain Behavior of a Calcareous Soil Lithified by Different Cements**. GeoEng, 2000, Lancaster, Pennsylvania USA.

JIMÉNEZ, R. J. W. **Estudo da resistência, condutividade hidráulica e lixiviação de um solo argiloso cimentado e contaminado**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia)- Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

JOHANN, A.D.R. **Metodologias para a previsão do comportamento mecânico e para a análise da variação da porosidade da porosidade de um solo siltoso tratado com cal em diferentes tempos de cura**. 2013. 273p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

KALINSKI, M.E.; YERRA, P.K. **Hydraulic conductivity of compacted cement-stabilized fly ash**. World of Coal Ash (WOCA), Lexington, Kentucky, USA. 2005. Disponível em: (<http://www.flyash.info>).

LAMBE, T.W., WITHMANN, R.V. **Soil Mechanics, SI version**. New York: John Wiley & Sons Inc. 553p. 1979.

LARNACH, W. **Relationship between dry density, voids/cement ratio and strength of soil-cement mixtures**. Civil Engineering and Public Works Reviews, v.1, n.55, p. 903–905, 1960.

- LOPES JUNIOR, L. S. **Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal.** 2011, 226p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada,** 2007, 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- 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) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash.** Ames. 1961, 247p. Tese (Ph.D.) – Iowa State University of Science and Technology.
- MERCIER, S.; MOLINARI, A. **Homogenization of Elastic- viscoplastic Heterogeneous Materials: Self- Consistent and Mori-Tanaka schemes.** *Internacional Journal of Plasticity.* New York, v. 25, p. 1024-1048, 2009.
- MITCHELL, J.K. **Fundamentals of Soil Behavior.** John Wiley & Sons. New York. 422p. 1976.
- MONTARDO, J. P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes.** 1999. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - CPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- 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.
- ORMSBY, W. C.; KINTER, E. B. **Effects of dolomitic and calcitic limes on strength development in mixtures with two clay minerals.** *Public Roads.* v. 4, p.149-160. 1973.
- OSINUBI, K.J. **Permeability of lime treated laterite soil.** *Journal Transport Engineering,* American Society of Civil Engineers, v.124, n.5, p. 456–469, 1998.
- PRIETTO, P.D.M. **Estudo do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado.** 1996. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)– CPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

ROGERS, C.; GLENDINNING, S.; ROFF, T. **Lime modification of clay soils for construction expediency**. Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering, v. 125, p. 242–249, 1997.

SANTE, M. D.; FRATALOCCHI, E.; MAZZIERI, F.; PASQUALINI, E. **Time of reactions in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behavior**. Applied Clay Science, n.99, p.100–109, 2014.

SILVANI, C. **Influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas areia- cinza volante- cal**, 2013, 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SKEMPTON, A.W. **The pore pressure coefficients A and B**. Géotechnique, London, v. 4, p. 143-147, 1954.

TAVENAS, F.; LEBLOND, P.; JEAN, P.; LEROUEIL, S. **The permeability of natural soft clays. Part I. Methods of Laboratory Measurement**. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v. 20, p. 629-644, 1983.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime-fly Ash-stabilized Bases and Subbases**. Washington, D.C., 1976, 66p.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization: Reactions, Properties, Design and Construction**. Washington: TRB, 1987, 58p.

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

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.

THOMPSON, M. R. **Lime Reactivity of Illinois Soils**. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, v. 92, p.67-92. 1966.

USACE- U.S. **Army Corps of Engineers. Soil stabilization for pavements**. Technical Manual, n. 5 -822-14, Washington, D. C., 1994.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos Solos**. Mcgraw- Hill do Brasil, Universidade de São Paulo, 1977, 500p.

**APÊNDICE A – DADOS DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AOS ENSAIOS DE
CONDUTIVIDADE HIDRAULICA**

Tabela A.1: dados gerais dos corpos de prova do SRAB-25%RBR-CAL com 28 dias de cura

Corpo de prova	Cal (%)	ω (%)	γ_d (kN/m ³)	e	η (%)	L (%)	η/L_{iv}	$\eta/(L_{iv})^{0,12}$	k_{20} (m/s)
A1-01	5	13,89	16,2	0,71	41,37	3,10	13,36	36,12	1,63E-06
A1-02	5	14,11	17,1	0,62	37,71	3,30	11,43	32,68	3,47E-07
A1-03	5	13,98	18,4	0,50	33,79	3,51	9,62	29,06	4,82E-08
A1-04	7	13,58	16,2	0,71	41,28	4,24	9,74	34,70	9,07E-07
A1-05	7	14,30	17,3	0,60	37,31	4,54	8,22	31,11	2,73E-07
A1-06	7	13,22	18,4	0,50	33,36	4,82	6,93	27,62	6,86E-08
A1-07	9	13,55	16,3	0,70	41,01	5,37	7,64	33,52	1,25E-06
A1-08	9	14,14	17,3	0,60	37,19	5,74	6,47	30,15	2,17E-07
A1-09	9	13,27	18,4	0,50	33,29	6,06	5,50	26,81	3,38E-08

Tabela A.2: dados gerais dos corpos de prova do SRAB-25%RBR- sem cura.

Corpo de prova	Cal (%)	ω (%)	γ_d (kN/m³)	e	η (%)	L (%)	η/L_{iv}	$\eta/(L_{iv})^{0,12}$	k_{20} (m/s)
A2-01	0	14,41	16,3	0,70	41,45	-	-	-	1,81E-7
A2-02	0	14,25	17,2	0,62	38,08	-	-	-	2,25E-7
A2-03	0	14,45	18,5	0,50	33,45	-	-	-	2,57E-8

**APÊNDICES B – DADOS DOS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS
À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL**

Tabela B.1: dados gerais dos corpos de prova do SRAB-25%RBR-CAL com 28 dias de cura

Corpo de prova	Cal (%)	ω (%)	γ_d (kN/m ³)	e	η (%)	L (%)	η/L_{iv}	$\eta/ (L_{iv})^{0,12}$	q_t (kPa)	$q_{t\text{méd}} o$ (kPa)
B1- 01	5	14,70	17,8	0,55	35,59	3,44	10,34	30,69	37,88	39,77
B1-02	5	14,11	18,1	0,53	34,63	3,48	9,95	29,82	42,31	
B1-03	5	14,19	17,9	0,54	35,27	3,45	10,24	30,41	39,12	
B1- 04	7	14,44	17,9	0,54	35,20	4,75	7,41	29,20	48,20	46,88
B1-05	7	13,78	18,0	0,53	34,53	4,77	7,24	28,63	47,77	
B1-06	7	13,85	18,0	0,53	34,66	4,75	7,30	28,75	44,68	
B1- 07	9	14,34	18,0	0,53	34,48	6,02	5,73	27,80	60,18	59,18
B1-08	9	14,35	17,9	0,54	35,21	5,96	5,91	28,42	56,82	
B1-09	9	14,21	18,0	0,54	34,87	5,97	5,84	28,14	60,53	
B1- 10	5	14,16	17,0	0,64	38,94	3,24	12,04	33,82	37,72	37,09
B1-11	5	14,17	17,0	0,63	38,83	3,24	11,98	33,72	35,39	
B1-12	5	14,41	16,8	0,65	39,27	3,22	12,18	34,12	38,15	
B1- 13	7	13,28	17,0	0,62	38,33	4,44	8,63	32,05	35,28	35,26
B1-14	7	14,03	16,9	0,63	38,77	4,44	8,73	32,42	37,01	
B1-15	7	13,93	17,0	0,63	38,62	4,45	8,68	32,28	33,49	
B1- 16	9	13,57	17,1	0,61	37,86	5,65	6,70	30,75	43,75	43,46
B1-17	9	13,91	17,0	0,62	38,26	5,63	6,79	31,09	43,17	

Tabela B.1(continuação): dados gerais dos corpos de prova do SRAB-25%RBR-CAL com 28 dias de cura

Corpo de prova	Cal (%)	ω (%)	γ_d (kN/m ³):	e	η (%)	L (%)	η/L_{iv}	$\eta/(L_{iv})^{0,12}$	q_t (kPa)	$q_{t,médio}$ (kPa)
B1- 18	5	13,66	16,1	0,72	42,01	3,05	13,76	36,74	29,54	30,16
B1-19	5	13,76	16,0	0,73	42,29	3,05	13,88	37,00	30,78	
B1- 20	7	13,89	16,1	0,71	41,67	4,22	9,87	35,05	30,43	32,07
B1-21	7	13,95	15,9	0,73	42,32	4,18	10,13	35,65	33,71	
B1- 22	9	13,39	16,1	0,72	41,72	5,29	7,88	34,16	35,15	35,15