

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

Metodologias para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a
Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com
Cal em Diferentes Tempos de Cura

Amanda Dalla Rosa Johann

Porto Alegre
Março de 2013

Amanda Dalla Rosa Johann

**METODOLOGIAS PARA A PREVISÃO DO
COMPORTAMENTO MECÂNICO E PARA A ANÁLISE DA
VARIÇÃO DA POROSIDADE DE UM SOLO SILTOSO
TRATADO COM CAL EM DIFERENTES TEMPOS DE CURA**

Tese 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 Doutora em Engenharia.

Orientação: Prof. Ph.D. Nilo Cesar Consoli

Co-orientação: Prof. Ph.D. Samir Maghous

Porto Alegre

Março de 2013

Dalla Rosa Johann, Amanda

Metodologias para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura / Amanda Dalla Rosa Johann. -- 2013.

271 f.

Orientador: Nilo Cesar Consoli.

Coorientador: Samir Maghous.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2013.

1. Solo-cal. 2. Relação vazios/cal. 3. Análise da Variância. 4. Porosidade. I. Cesar Consoli, Nilo, orient. II. Maghous, Samir, coorient. III. Título.

AMANDA DALLA ROSA JOHANN

**METODOLOGIAS PARA A PREVISÃO DO
COMPORTAMENTO MECÂNICO E PARA A ANÁLISE DA
VARIAÇÃO DA POROSIDADE DE UM SOLO SILTOSO
TRATADO COM CAL EM DIFERENTES TEMPOS DE CURA**

Porto Alegre, 28 de Março de 2013.

Prof. Nilo Cesar Consoli

Ph. D. Concordia University, Canadá
Orientador

Prof. Samir Maghous

Ph. D. Université de Marne la Vallée, França
Co-Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Matthew Richard Coop (City University of Hong Kong)

D.Phil. Oxford University, Reino Unido

Prof. Béatrice Anne Baudet (The University of Hong Kong)

Ph.D. City University London, Reino Unido

Prof. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)

Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Fernando Schnaid (UFRGS)

Ph. D. Oxford University, Reino Unido

*Dedico este trabalho ao meu marido,
aos meus pais e às minhas irmãs,
pelo apoio incondicional,
cumplicidade, exemplo, carinho e amor.*

AGRADECIMENTOS

Na conclusão de mais esta etapa agradeço a todos, pessoas e instituições, que de uma forma ou de outra contribuíram para a conclusão deste trabalho, que é muito importante para mim.

A Deus, que me concedeu a capacidade de realizar esta pesquisa, me guiando com serenidade, me dando forças e me proporcionando coisas maravilhosas durante todo esse percurso.

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

Ao professor Samir Maghous pelo interesse, dedicação e disponibilidade sempre demonstrados no desenvolvimento deste trabalho e principalmente pelas valiosas discussões e sugestões no decorrer do meu Doutorado.

Ao professor António Joaquim Pereira Viana da Fonseca, pela confiança, excelente recepção, apoio, disponibilidade e dedicação demonstrados durante o meu Doutorado Sanduíche. Muito obrigada, principalmente pelas valiosas “aulas” que engrandeceram esta pesquisa.

A todos os professores do PPGECC da UFRGS, que com conhecimento e dedicação me proporcionaram momentos preciosos de aprendizado. Em especial à professora Ana Paula Kirchheim, obrigada por toda a disponibilidade.

Ao meu marido Luis, pelo apoio incondicional, pelo carinho, amor, amizade e paciência. O meu muito obrigada por “abraçar” este sonho e não medir esforços para realizá-lo. Obrigada pela parceria em todas as horas, pelas palavras certas na hora certa e principalmente por não se importar em ficar “sujo” de caulim. Amo-te meu Lindo!

Aos meus pais Amando e Celenir por sempre se fazerem presentes em todos os momentos, me incentivando e me apoiando com muito amor e carinho. Muito obrigada por se exemplos profissional e pessoal e pelo incondicional estímulo ao estudo.

À minha irmã Salete, colega Engenheira, e à minha irmã Sandra, futura Arquiteta, pelo incentivo, companhia, amizade, carinho e alegria. À Bebel, pelo conforto da sua companhia. Aos “cunhas” queridos, Thomas e Rodrigo, pela torcida e pelos momentos de descontração.

A todos os meus familiares e amigos pela torcida e amizade, em especial às famílias Dalla Rosa, Cadore, Johann e Lange.

A todos os meus colegas do LEGG/ENVIRONGEO. Muito obrigada pela disponibilidade, pela troca de ideias, pela amizade e pelos momentos de descontração. Em especial, agradeço aos bolsistas Marina, Marcele, Guilherme e Otávio, pelo excelente trabalho realizado, com muita dedicação e esforço, muito obrigada pela troca de ideias, companheirismo, amizade e apoio durante a nossa longa e trabalhosa caminhada. Aos colegas Luizmar Lopes Junior, Lucas Festugato e Francisco Dalla Rosa, pelos conhecimentos transmitidos, disponibilidade, amizade e discussões que muito contribuíram para esta pesquisa. Aos colegas Anderson Fonini, Rodrigo Caberlon Cruz, Márcio Floss, Emanuele Gauer, Jucélia Bedin, Bianca Lobo, Daniela Rosa, Lidiane Ibeiro, Klaus Theisen e Vagner Bertè, pela troca de ideias, pela disponibilidade, apoio e amizade.

Aos colegas, professores e funcionários do Laboratório de Geotecnia – LABGEO da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, em especial ao colega Saul Guedes. Agradeço também ao povo acolhedor do Porto.

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

Aos professores e funcionários do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Vale dos Sinos – UNISINOS.

Ao Marcelo, da Dagoberto Barcelos, pela disponibilidade da cal.

Ao professor Nelson, pela oportunidade, que se transformou em um grande crescimento pessoal e profissional.

À Mabel e à Marcele pela força, abraço acolhedor e profissionalismo. Dizem que “amigos são anjos que nos ajudam a voar quando temos as asas machucadas...” Obrigada por tudo “anjos”!

Ao PPGEC/UFRGS pela oportunidade de realizar este curso de Doutorado. Ao CNPq e à CAPES pelo auxílio proporcionado com a bolsa, que possibilitou minha total dedicação aos estudos e ao desenvolvimento desta pesquisa.

Muito obrigada!

“Plante sementes de otimismo e amor, para colher amanhã
os frutos da alegria e da felicidade.”

C. Torres Pastorino

RESUMO

DALLA ROSA JOHANN, A. **Metodologias para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura.** 2013. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A técnica de tratamento de solos com cal ou cimento vem sendo empregada com sucesso na engenharia geotécnica, melhorando as características do solo, que por ser um material complexo e muito variável nem sempre satisfaz as necessidades da obra a ser realizada. As últimas pesquisas em solos tratados com cal mostram o desenvolvimento de metodologias de dosagem baseadas em critérios racionais (como a relação água/cimento para o concreto), onde a relação volume de vazios/volume de cal desempenha papel fundamental na obtenção da resistência desejada. O volume de vazios (ou a porosidade) é um fator importante nestas metodologias de dosagem, e ainda não existem técnicas que quantifiquem este fator (como o ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio para o concreto) e também modelos que permitam o entendimento do comportamento da porosidade dessas misturas o longo do tempo de cura (como o modelo de Powers para o concreto). Assim, esta pesquisa tem como objetivo verificar a influência da quantidade de cal (C_a), da porosidade (η), do teor de umidade (ω) e do tempo de cura (t), sobre a resistência à compressão simples (q_u), sobre a resistência à tração (q_t) e sobre a rigidez inicial (G_o) de um solo siltoso estabilizado com cal (misturas caulim-cal), verificando a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa de q_u , q_t e G_o . Além disso, esta pesquisa busca quantificar a porosidade dessas misturas solo-cal e também desenvolver um modelo, que permita o entendimento do comportamento da sua porosidade ao longo do tempo de cura. Para atingir os objetivos da pesquisa foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, ensaios de resistência à tração por compressão diametral, ensaios para a medida de G_o , ensaios de sucção matricial e ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, de resistência à tração e de rigidez inicial demonstram que o aumento da quantidade de C_a , a diminuição da η e o aumento do t provoca o aumento de q_u , q_t e G_o . Sendo que, q_u , q_t e G_o crescem linearmente com o aumento da quantidade de cal e exponencialmente com a redução da sua porosidade. Assim, verifica-se que, a relação vazios/cal (η/C_{av}), definida pela razão entre a porosidade da mistura compactada e o teor volumétrico de cal, demonstra ser um parâmetro adequado na estimativa de q_u , q_t e G_o . A partir desses mesmos resultados, observa-se que a ω também desempenha um papel fundamental na previsão de q_u , q_t e G_o . Além disso, a partir dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração e rigidez inicial, observa-se que a existência de relações únicas e distintas no controle de q_u , q_t e G_o em função da η , do C_{av} e da ω mostrou-se muito eficiente para relações de dosagem. Relações entre q_u , q_t , G_o e η/C_{av} também, foram muito satisfatórias. Além disso, foram realizadas análises estatísticas dos dados obtidos neste experimento, e os resultados demonstram, a partir da análise da variância, que todos os fatores controláveis escolhidos no experimento são significativos. Os resultados dos ensaios de porosímetro por intrusão de mercúrio demonstram que a porosidade diminui com o tempo de cura. Porém, o modelo de Powers não se adaptou perfeitamente na previsão da variação da porosidade das misturas caulim-cal estudadas.

Palavras-chave: solo-cal; relação vazios/cal; análise da variância; porosidade.

ABSTRACT

DALLA ROSA JOHANN, A. **Methodologies to Foresee the Mechanical Behavior and Analysis the Porosity Variation of a silty soil treated with lime in different curing time periods.** 2013. Ph.D. Thesis in Civil Engineering – Graduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The technique of treating soil with lime or cement 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 needs of the earthwork to be performed. The last researches in soils treated with lime are in the development of dosage methodologies based on rational criteria (such as water/cement ratio for concrete), where the voids/lime ratio plays a fundamental role in the assesment of the target strength. The void volume (or porosity) is an important factor in these dosage methodologies, and there are not techniques that quantify this factor (as the test porosimetry with intrusion of mercury, for concrete) and also models that allow understanding the behavior of porosity for these mixtures in long curing times (such as the Powers's model for concrete). Thus, this research aims to determine the influence of the amount of lime (C_a), porosity (η), moisture content (ω) and curing time period (t) on the unconfined compression strength (q_u), tensile strength (q_t) and initial stiffness (G_o) of a silty soil stabilized with lime (kaolin-lime mixtures), checking the suitability of the use of voids/lime ratio in estimating q_u , q_t and G_o . Besides, this research aims to quantify the porosity of these soil-lime mixtures and also adjusting a model that allows understanding the behavior of their porosity during the curing time. For that, a number of unconfined compression tests, splitting tensile tests, the measurement of G_o , measurement of matric suction and porosimetry with intrusion of mercury tests were carried out in present work. The results of unconfined compression strength, tensile strength and initial stiffness show that increasing the amount of C_a , decreasing of η and increasing of t , causes increased of q_u , q_t and G_o . Further, q_u , q_t and G_o grow linearly with the increased amount of lime and exponentially with reducing its porosity. The voids/lime ratio, defined as the ratio of the compacted mixture porosity and the lime volumetric content, adjusted by an exponent, proves to be an appropriate parameter to estimate the q_u , q_t and G_o . From these results, it is observed that the ω also plays a fundamental parameter in predicting the q_u , q_t and G_o . Moreover, it is noted that the existence of distinct and unique relationships in the control of q_u , q_t and G_o according to η , C_{av} and ω proved to be very efficient for dosage relationships. Relations between q_u , q_t , G_o and η/C_{av} were very satisfactory too. Furthermore, statistical analyzes were performed of the results obtained in this experiment, and results demonstrate, through analysis of variance, that all controllable factors chosen in the experiment are significant. The results of test porosimetry with intrusion of mercury show that the porosity decreases with increasing curing time. However, the Powers's model has not adapted perfectly to predict the variation of the porosity of kaolin-lime mixtures studied.

Key-words: Soil-lime; voids/lime ratio, analysis of variance; porosity.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	29
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	29
1.2 OBJETIVOS	31
1.2.1 Objetivo Geral.....	31
1.2.2 Objetivos Específicos	31
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	32
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 VISÃO GERAL SOBRE A TÉCNICA DO SOLO-CAL	33
2.2 MATERIAIS UTILIZADOS EM MISTURAS SOLO-CAL	35
2.2.1 Solo	35
2.2.2 Cal.....	36
2.2.2.1 Propriedades da Cal	36
2.2.2.2 Dosagem da Cal	37
2.2.3 Água.....	38
2.3 Reações solo-cal	38
2.4 Relação vazios/cal.....	41
2.5 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE MISTURAS SOLO-CAL.....	50
2.5.1 Variáveis determinantes do comportamento de misturas solo-cal.....	50
2.5.1.1 Efeito da Cal	50
2.5.1.2 Efeito da densidade e compactação	50
2.5.1.3 Efeito do tempo de cura	51
2.5.1.4 Efeito do teor de umidade e a relação água/cal	53
2.5.2 Comportamento mecânico de solos estabilizados com cal.....	54
2.5.2.1 Resistência à compressão simples	55
2.5.2.2 Resistência à Tração	56
2.5.2.3 Resistência ao Cisalhamento	57

2.5.2.4 Resposta Tensão-Deformação	58
2.5.2.5 Rigidez Inicial.....	60
2.5 QUANTIFICAÇÃO DA POROSIDADE: POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (PIM).....	62
2.6 METODOLOGIA PARA A PREVISÃO DA VARIAÇÃO DA POROSIDADE: MODELO DE POWERS.....	66
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	70
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	70
3.2 MÉTODOS	73
3.2.1 Coleta de amostras	73
3.2.2 Preparação das amostras	73
3.2.3 Ensaio de caracterização	74
3.2.4 Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	74
3.2.4.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova.....	74
3.2.4.2 Procedimento de Ensaio.....	77
3.2.5 Medidas de Sucção	78
3.2.6 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	80
3.2.6.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova.....	80
3.2.6.2 Procedimento de Ensaio.....	81
3.2.7 Ensaio de medidas de Rigidez Inicial	82
3.2.7.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova.....	82
3.2.7.2 Procedimento de Ensaio.....	83
3.2.8 Ensaio para a Análise da Variação da Porosidade	87
3.2.8.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova.....	87
3.2.8.2 Procedimento de Ensaio.....	89
3.3 MATERIAS	91
3.3.1 Caulim.....	91
3.3.2 Cal.....	93
3.3.2.1 Dosagem da cal.....	93

3.3.3 Água.....	94
3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS.....	94
3.4.1 Definição dos Pontos de Moldagem.....	94
3.4.1.1 Ensaios de Resistência à Compressão Simples e Sucção.....	96
3.4.1.2 Ensaios de Resistência à tração.....	96
3.4.1.3 Ensaios de Medidas de rigidez inicial.....	96
3.3.1.4 Ensaios para a Análise da Variação da Porosidade.....	97
3.4.2 Definição do Tempo de Cura.....	97
3.4.3 Método de Avaliação da Influência dos Fatores Controláveis.....	97
3.4.4 Método para a Previsão da Variação da Porosidade.....	98
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	99
4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	99
4.1.1 Amostras com 17% de umidade.....	99
4.1.1.1 Efeito do teor da cal.....	99
4.1.1.2 Efeito da porosidade.....	101
4.1.1.3 Relação vazios/cal.....	103
4.1.1.4 Efeito do tempo de cura.....	115
4.1.2 Amostras com 20% de umidade.....	116
4.1.2.1 Efeito do teor da cal.....	116
4.1.2.2 Efeito da porosidade.....	118
4.1.2.3 Relação vazios/cal.....	120
4.1.2.4 Efeito do tempo de cura.....	123
4.1.3 Amostras com 23% de umidade.....	124
4.1.3.1 Efeito do teor da cal.....	124
4.1.3.2 Efeito da porosidade.....	126
4.1.3.3 Relação vazios/cal.....	128
4.1.3.4 Efeito do tempo de cura.....	132

4.1.4 Efeito do teor de umidade	134
4.1.5 Relações únicas no controle da resistência à compressão simples do solo estudado	137
4.1.6 Modo de ruptura dos corpos-de-prova de caulim-cal submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples.....	139
4.1.7 Medidas de Sucção matricial	140
4.1.7.1 Amostras com 17% de umidade	140
4.1.7.2 Amostras com 20% de umidade	142
4.1.7.3 Amostras com 23% de umidade	144
4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	146
4.2.1 Amostras com 17% de umidade	147
4.2.1.1 Efeito do teor de cal	147
4.2.1.3 Relação vazios/cal.....	149
4.2.1.4 Efeito do tempo de cura	150
4.2.2 Amostras com 20% de umidade	151
4.2.2.1 Efeito do teor de cal	151
4.2.2.3 Relação vazios/cal.....	153
4.2.2.4 Efeito do tempo de cura	155
4.2.3 Amostras com 23% de umidade	156
4.2.3.1 Efeito do teor de cal	156
4.2.3.3 Relação vazios/cal.....	159
4.2.3.4 Efeito do tempo de cura	162
4.2.4 Efeito do teor de umidade	163
4.2.5 Relações únicas no controle da resistência à tração do solo estudado.....	165
4.2.6 Modo de ruptura dos corpos-de-prova de caulim-cal submetidos ao ensaio de resistência à tração	166
4.2.7 Relação da Resistência à Tração com a Resistência à Compressão Simples	167
4.3 ENSAIOS DE MEDIDAS DE RIGIDEZ INICIAL.....	171
4.3.1 Amostras com 17% de umidade	176

4.3.1.1 Efeito do teor de cal	176
4.3.1.3 Relação vazios/cal.....	179
4.3.1.4 Efeito do tempo de cura	182
4.3.2 Amostras com 20% de umidade	183
4.3.2.1 Efeito do teor de cal	183
4.3.2.3 Relação vazios/cal.....	186
4.3.2.4 Efeito do tempo de cura	189
4.3.3 Amostras com 23% de umidade	190
4.3.3.1 Efeito do teor de cal	190
4.3.3.3 Relação vazios/cal.....	193
4.3.3.4 Efeito do tempo de cura	195
4.3.4 Efeito do teor de umidade	196
4.3.5 Relações únicas no controle da rigidez inicial do solo estudado.....	199
4.2.6 Relação da Rigidez Inicial com a Resistência à Compressão Simples.....	201
4.2.7 Relação da Rigidez Inicial com a Resistência à Tração	205
4.4 ANÁLISE DA VARIÂNCIA – ANOVA.....	207
4.4.1 Análise da Variância para a Resistência à Compressão Simples.....	207
4.4.2 Análise da Variância para a Resistência à Tração	208
4.4.3 Análise da Variância para a Rigidez Inicial (G_o).....	209
4.5 ENSAIOS PARA A ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA POROSIDADE.....	210
4.5.1 Características das amostras de caulim-cal submetidas ao ensaio de Porosímetro por Intrusão de Mercúrio.....	210
4.5.2 Resultados dos ensaios de porosímetro por intrusão de mercúrio	211
4.6 ADAPTAÇÃO DO MODELO DE POWERS PARA A PREVISÃO DA VARIAÇÃO DA POROSIDADE	216
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	221
5.1 CONCLUSÕES	221
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	225

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS227

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mecanismo de troca de cátions (PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999).....	39
Figura 2.2 – Mecanismo de estabilização solo-cal (INGLES & METCALF, 1972)	40
Figura 2.3 – Relação vazios/cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples (adaptado de LARNACH, 1960)	42
Figura 2.4 – Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de FOPPA, 2005).....	43
Figura 2.5 – Previsão da tensão desvio através da relação vazios/cimento (CONSOLI <i>et al</i> , 2007).....	44
Figura 2.6 – 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)	45
Figura 2.7 – Relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e do teor de cal volumétrico para amostras com 0% de cinza volante aos 90 dias de cura (DALLA ROSA, 2009).....	45
Figura 2.8 – Relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e do teor de cal volumétrico para amostras com 12,5% de cinza volante (DALLA ROSA, 2009).....	46
Figura 2.9 – Relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e do teor de cal volumétrico para amostras com 25% de cinza volante (DALLA ROSA, 2009).....	46
Figura 2.10 – Resistência à tração <i>versus</i> relação vazios/cimento ajustado (adaptado de VITALI, 2008)	48
Figura 2.11 – Tensão <i>versus</i> relação vazios/cimento para diferentes tensões confinantes (CRUZ, 2008).....	48
Figura 2.12 – Módulo cisalhante <i>versus</i> relação vazios/cimento (CRUZ, 2008).....	49
Figura 2.13 – Módulo cisalhante <i>versus</i> relação vazios/cal ajustado (todas as amostras) (LOPES JUNIOR, 2011)	49
Figura 2.14 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal (adaptado de INGLES & METCALF, 1972).....	52
Figura 2.15 – Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (adaptado de INGLES & METCALF, 1972).....	55
Figura 2.16 – Curvas (ensaios triaxiais CIU) tensão-deformação-poropressão (Consoli <i>et al</i> , 1997).....	59
Figura 2.17 – Curva de degradação da rigidez com o nível de deformação (adaptado de Atkinson, 2000)	61
Figura 2.18 – Faixa de aplicação dos principais métodos para caracterização de espaços porosos (Sato, 1998).....	64
Figura 2.19 – Nível meso do C-S-H, regiões nanocristalinas com escala característica de aproximadamente 5nm. Modelo do C-S-H: (a) Powers e (b) Feldman-Sereda (adaptada de PAULON & KIRCHHEIM, 2011).....	67
Figura 2.20 – Nível meso do C-S-H, regiões nanocristalinas com escala característica de aproximadamente 5nm. Modelo do C-S-H: (a) Munich e (b) Jennings (adaptada de PAULON & KIRCHHEIM, 2011)	68
Figura 3.1 – Corpo-de-prova de caulim-cal para o ensaio de resistência à compressão simples	76
Figura 3.2a – Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	77
Figura 3.2b – Corpo-de-prova de caulim-cal no ensaio de Resistência à Compressão Simples	77
Figura 3.3 – Corpo-de-prova de caulim-cal para o ensaio de sucção matricial.....	79
Figura 3.4 – Corpos-de-prova de caulim-cal para o ensaio de resistência à tração.....	81

Figura 3.5a – Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	82
Figura 3.5b – Corpo-de-prova de caulim-cal no ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	82
Figura 3.6 – Corpo-de-prova de caulim-cal submetido ao ensaio de medidas de rigidez inicial	83
Figura 3.7 – Equipamento Ultrassônico Pundit Lab sendo utilizado no ensaio de medidas de Rigidez Inicial de uma amostra de caulim-cal.....	84
Figura 3.8 – Transdutores de Ondas “P” e “S”.....	84
Figura 3.9 – Exemplos de Ondas no equipamento ultrassônico Pundit Lab: (a) onda “P” e (b) onda “S”	85
Figura 3.10 – Ensaio de resistência à compressão simples de uma amostra de caulim-cal na prensa automática do LABGEO-FEUP	86
Figura 3.11- Molde utilizado para a confecção das amostras para o ensaio de porosímetro por intrusão de Mercúrio PIM	88
Figura 3.12 – Aspecto final de um corpo-de-prova para o ensaio de porosímetro por intrusão de mercúrio	88
Figura 3.13 – Porosimetria por intrusão de mercúrio (Técnicas de Caracterização, 2006)	89
Figura 3.14 – Amostra de caulim-cal dentro do tubo capilar provido de um porta amostra para a realização do ensaio de PIM	90
Figura 3.15 – Porosímetro por intrusão de mercúrio do Laboratório de Materiais de Construção da UNISINOS	90
Figura 3.16 – Curva granulométrica do caulim (rever histograma)	91
Figura 3.17 – Curvas de compactação e curvas de saturação para o material caulim.....	92
Figura 3.18 – Dosagem da cal pelo método do ICL para o solo-cal em estudo	94
Figura 3.19 – Programa de ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração e medidas de rigidez inicial para os ensaios de caulim-cal	95
Figura 4.1 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	100
Figura 4.2 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	100
Figura 4.3 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura	101
Figura 4.4 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	102
Figura 4.5 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	102
Figura 4.6 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura	103
Figura 4.7 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras com 17% de umidade e 28 dias de cura	105
Figura 4.8 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras com 17% de umidade e 90 dias de cura	105
Figura 4.9 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras com 17% de umidade e 360 dias de cura	106
Figura 4.10 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	106
Figura 4.11 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	107
Figura 4.12 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura	107

Figura 4.13 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura.....	108
Figura 4.14 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura.....	108
Figura 4.15 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura.....	109
Figura 4.16 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura.....	110
Figura 4.17 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura.....	110
Figura 4.18 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura.....	111
Figura 4.19 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal ajustado para as amostras com 17% de umidade e 28 dias de cura.....	111
Figura 4.20 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal ajustado para as amostras com 17% de umidade e 90 dias de cura.....	112
Figura 4.21 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal ajustado para as amostras com 17% de umidade e 360 dias de cura.....	112
Figura 4.22 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 17% de umidade e 28 dias de cura.....	113
Figura 4.23 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 17% de umidade e 90 dias de cura.....	114
Figura 4.24 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 17% de umidade e 360 dias de cura.....	114
Figura 4.25 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 17% de umidade submetidas aos ensaio de resistência à compressão simples com 28, 90 e 360 dias de cura .	115
Figura 4.26 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura.....	116
Figura 4.27 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura.....	117
Figura 4.28 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura.....	117
Figura 4.29 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura.....	118
Figura 4.30 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura.....	119
Figura 4.31 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura.....	119
Figura 4.32 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras com 20% de umidade e 28 dias de cura.....	120
Figura 4.33 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras com 20% de umidade e 90 dias de cura.....	121
Figura 4.34 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras com 20% de umidade e 360 dias de cura.....	121

Figura 4.35 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de cura	122
Figura 4.36 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 90 dias de cura	122
Figura 4.37 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 360 dias de cura	123
Figura 4.38 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 20% de umidade submetidas aos ensaio de resistência à compressão simples com 28, 90 e 360 dias de cura .	124
Figura 4.39 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura.....	125
Figura 4.40 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura.....	125
Figura 4.41 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura.....	126
Figura 4.43 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	127
Figura 4.44 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	127
Figura 4.45 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura	128
Figura 4.46 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	129
Figura 4.47 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	129
Figura 4.48 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura	130
Figura 4.49 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal ajustado para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	131
Figura 4.50 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal ajustado para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	131
Figura 4.51 – Resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura	132
Figura 4.52 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 23% de umidade submetidas aos ensaio de resistência à compressão simples com 28, 90 e 360 dias de cura .	133
Figura 4.53 – Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade e 28 dias de cura submetidas aos ensaios de resistência à compressão simples.....	134
Figura 4.54 – Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade e 90 dias de cura submetidas aos ensaios de resistência à compressão simples.....	135
Figura 4.55 – Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade e 360 dias de cura submetidas aos ensaios de resistência à compressão simples....	136
Figura 4.56 – Variação da resistência à compressão simples com a porosidade (η), com o teor volumétrico de cal (C_{av}) e com a porcentagem de umidade (ω) para 28, 90 e 360 dias de cura	138
Figura 4.57a – Corpo-de-prova de caulim-cal submetido ao ensaio de resistência à compressão simples (LEGG/ENVIRONGEO – UFRGS).....	139
Figura 4.57b – Corpo-de-prova de caulim-cal submetido ao ensaio de resistência à compressão simples (LABGEO – FEUP)	139

Figura 4.58 – Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nas amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura	141
Figura 4.59 – Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas 28, 90 e 360 dias de cura	141
Figura 4.60 – Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nas amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura	143
Figura 4.61 – Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas 28, 90 e 360 dias de cura	143
Figura 4.62 – Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nas amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura	144
Figura 4.63 – Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas 28, 90 e 360 dias de cura	146
Figura 4.64 – Variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	147
Figura 4.65 – Variação da resistência à tração em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	148
Figura 4.66 – Resistência à tração <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	149
Figura 4.67 – Resistência à tração <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	150
Figura 4.68 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 17% de umidade submetidas aos ensaio de resistência à tração com 28 e 360 dias de cura.....	151
Figura 4.69 – Variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	152
Figura 4.70 – Variação da resistência à tração em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	153
Figura 4.71 – Resistência à tração <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	154
Figura 4.72 – Resistência à tração <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	155
Figura 4.73 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 20% de umidade submetidas aos ensaio de resistência à tração com 28, 90 e 360 dias de cura.....	156
Figura 4.74 – Variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	157
Figura 4.75 – Variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura	157
Figura 4.76 – Variação da resistência à tração em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	158
Figura 4.77 – Variação da resistência à tração em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura	159
Figura 4.78 – Resistência à tração <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	160
Figura 4.79 – Resistência à tração <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura	160
Figura 4.80 – Resistência à tração <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	161

Figura 4.81 – Resistência à tração <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura	162
Figura 4.82 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 23% de umidade submetidas aos ensaio de resistência à tração com 28, 90 e 360 dias de cura.....	163
Figura 4.83 – Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade e 28 dias de cura submetidas aos ensaios de resistência à tração	164
Figura 4.84 – Variação da resistência à tração com a porosidade (η), com o teor volumétrico de cal (C_{av}) e com a porcentagem de umidade (ω) para 28 dias de cura.....	166
Figura 4.85a – Corpo-de-prova de caulim-cal submetido ao ensaio de resistência à tração..	167
Figura 4.85b – Corpo-de-prova de caulim-cal submetido ao ensaio de resistência à tração..	167
Figura 4.86 – Resistência à tração e resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 17% de umidade e 28 dias de cura ...	168
Figura 4.87 – Resistência à tração e resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de cura ...	169
Figura 4.88 – Resistência à tração e resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 23% de umidade e 28 dias de cura ...	169
Figura 4.89 – Resistência à tração e resistência à compressão simples <i>versus</i> relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 23% de umidade e 360 dias de cura .	170
Figura 4.93 – Rigidez inicial <i>versus</i> tempo de cura para as amostras com 17% de umidade e peso específico aparente seco de 1,4 g/cm ³	171
Figura 4.94 – Rigidez inicial <i>versus</i> tempo de cura para as amostras com 17% de umidade e peso específico aparente seco de 1,5 g/cm ³	172
Figura 4.95 – Rigidez inicial <i>versus</i> tempo de cura para as amostras com 17% de umidade e peso específico aparente seco de 1,6 g/cm ³	172
Figura 4.90 – Rigidez inicial <i>versus</i> tempo de cura para as amostras com 20% de umidade e peso específico aparente seco de 1,4 g/cm ³	173
Figura 4.91 – Rigidez inicial <i>versus</i> tempo de cura para as amostras com 20% de umidade e peso específico aparente seco de 1,5 g/cm ³	173
Figura 4.92 – Rigidez inicial <i>versus</i> tempo de cura para as amostras com 20% de umidade e peso específico aparente seco de 1,6 g/cm ³	174
Figura 4.96 – Rigidez inicial <i>versus</i> tempo de cura para as amostras com 23% de umidade e peso específico aparente seco de 1,4 g/cm ³	174
Figura 4.97 – Rigidez inicial <i>versus</i> tempo de cura para as amostras com 23% de umidade e peso específico aparente seco de 1,5 g/cm ³	175
Figura 4.98 – Rigidez inicial <i>versus</i> tempo de cura para as amostras com 23% de umidade e peso específico aparente seco de 1,6 g/cm ³	175
Figura 4.99 – Variação da rigidez inicial em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	177
Figura 4.100 – Variação da rigidez inicial em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	177
Figura 4.101 – Variação da rigidez inicial em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	178
Figura 4.102 – Variação da rigidez inicial em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	179
Figura 4.103 – Rigidez inicial <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	180
Figura 4.104 – Rigidez inicial <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	180

Figura 4.105 – Rigidez inicial <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	181
Figura 4.106 – Rigidez inicial <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	181
Figura 4.107 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 17% de umidade e 28 e 90 dias de cura submetidas aos ensaios de medidas de rigidez inicial	182
Figura 4.108 – Variação da rigidez inicial em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	183
Figura 4.109 – Variação da rigidez inicial em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	184
Figura 4.110 – Variação da rigidez inicial em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	185
Figura 4.111 – Variação da rigidez inicial em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	185
Figura 4.112 – Rigidez inicial <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	187
Figura 4.113 – Rigidez inicial <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	187
Figura 4.114 – Rigidez inicial <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	188
Figura 4.115 – Rigidez inicial <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	188
Figura 4.116 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 28 e 90 dias de cura submetidas aos ensaios de medidas de rigidez inicial	189
Figura 4.117 – Variação da rigidez inicial em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	190
Figura 4.118 – Variação da rigidez inicial em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	191
Figura 4.119 – Variação da rigidez inicial em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	192
Figura 4.120 – Variação da rigidez inicial em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	192
Figura 4.121 – Rigidez inicial <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	193
Figura 4.122 – Rigidez inicial <i>versus</i> relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	194
Figura 4.123 – Rigidez inicial <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura	194
Figura 4.124 – Rigidez inicial <i>versus</i> relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura	195
Figura 4.125 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 23% de umidade e 28 e 90 dias de cura submetidas aos ensaios de medidas de rigidez inicial	196
Figura 4.126 – Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade e 28 dias de cura submetidas aos ensaios de medidas de rigidez inicial	197

Figura 4.127 – Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade e 90 dias de cura submetidas aos ensaios de medidas de rigidez inicial	198
Figura 4.128 – Variação da rigidez inicial com a porosidade (η), com o teor volumétrico de cal (C_{av}) e com a porcentagem de umidade (ω) para 28 e 90 dias de cura	200
Figura 4.129 – Razão G_o/q_u versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 17% de umidade e 28 dias de cura	201
Figura 4.130 – Razão G_o/q_u versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de curas	202
Figura 4.131 – Razão G_o/q_u versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 23% de umidade e 28 dias de cura	202
Figura 4.132 – Razão G_o/q_u versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 17% de umidade e 90 dias de cura	203
Figura 4.133 – Razão G_o/q_u versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 90 dias de cura	204
Figura 4.134 – Razão G_o/q_u versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 23% de umidade e 90 dias de cura	204
Figura 4.135 – Razão G_o/q_t versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 17% de umidade e 28 dias de cura	205
Figura 4.136 – Razão G_o/q_t versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de cura	206
Figura 4.137 – Razão G_o/q_t versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 23% de umidade e 28 dias de cura	206
Figura 4.138 – Volume total acumulado de mercúrio (cm^3/g) para as amostras com peso específico aparente seco de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm^3 e 0 e 28 dias de cura	212
Figura 4.139 – Distribuição do volume total intrudido de mercúrio (cm^3/g) para as amostras com peso específico aparente seco de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm^3 e 0 e 28 dias de cura	212
Figura 4.140 – Variação da porosidade (η) das amostras de caulim-cal (com peso específico aparente seco de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm^3) do 0 dia de cura para 28 dias de cura	213
Figura 4.141 – Distribuição dos poros para as amostras com peso específico aparente seco de 1,4 g/cm^3	214
Figura 4.142 – Distribuição dos poros para as amostras com peso específico aparente seco de 1,5 g/cm^3	215
Figura 4.143 – Distribuição dos poros para as amostras com peso específico aparente seco de 1,6 g/cm^3	215

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição média das cales brasileiras (GUIMARÃES, 2002)	37
Tabela 3.1 – Etapas e Ensaios do Programa Experimental	73
Tabela 3.2 – Propriedades físicas do caulim	92
Tabela 3.3 – Caracterização da cal utilizada	93
Tabela 3.4 – Pontos de moldagem para os ensaios de caulim-cal.....	95
Tabela 4.1 – Tabela ANOVA para os resultados de Resistência à Compressão Simples do caulim-cal estudado	208
Tabela 4.2 – Tabela ANOVA para os resultados de Resistência à Tração do caulim-cal estudado.....	209
Tabela 4.3 – Tabela ANOVA para os resultados de Rigidez Inicial do caulim-cal estudado	210
Tabela 4.4 – Porosidade (η) das amostras submetidas ao ensaio de porosímetro por intrusão de mercúrio.....	211
Tabela 4.5 – Variação da porosidade (η) das amostras de caulim-cal (com peso específico aparente seco de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm ³) do 0 dia de cura para 28 dias de cura.....	213
Tabela 4.6 – Fator de hidratação calculado para a cal.....	219

LISTA DE SÍMBOLOS

a : massa de água

ω : teor de umidade calculado em relação à massa de solo e cal e expresso em porcentagem

c_a : massa de cal

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

C_{av} : teor de volumétrico de cal, expresso em porcentagem do volume total

C_{iv} : teor de volumétrico de cimento, expresso em porcentagem do volume total

C_u : coeficiente de uniformidade

D_{10} : diâmetro efetivo

e : base do logaritmo neperiano (2,7183)

e : índice de vazios

q_u : resistência à compressão simples

q_t : resistência à tração

G_0 : rigidez inicial

t : tempo de cura

S_u : sucção

S : grau de saturação de moldagem.

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

V_{ca} : volume de cal

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

w : teor de umidade do papel filtro

γ_d : massa específica aparente seca

η : porosidade

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

c : coesão

ϕ : ângulo de atrito

Φ : diâmetro dos poros

V_c : volume de cimento

V_{fl} : volume de materiais sólidos por m^3 do concreto

α : grau de hidratação do cimento

k : resistência intrínseca do gel de hidratação

n : constante empírica.

P = carga suportada pelo corpo-de-prova

D = diâmetro do corpo-de-prova

H = altura do corpo-de-prova

σ_t = resistência à tração

ρ : massa específica do solo

L : distância entre os transdutores

t : tempo de viagem da onda

R^2 : coeficiente de correlação

V_s : volume de solo por cm^3 da amostra

α : grau de hidratação da cal

V_{gel} : volume de gel de hidratação da cal

η_0 = porosidade inicial (ao 0 dia)

η_{28} = porosidade aos 28 dias de cura

η_s = teor volumétrico de solo

η_{ca}^{ani} = teor volumétrico de cal anidra

m_{ca}^{ani} = massa específica da cal anidra

m_s = massa específica do solo

ca = teor em massa de cal.

F_H = fator de hidratação da cal

η_{ca}^{hid} = teor volumétrico de cal hidratada

$\Delta\eta$ = variação da porosidade

S_v = teor volumétrico de solo (%), calculado a partir da massa específica real dos grãos

C_{av} = teor volumétrico de cal (%), calculado a partir da massa específica real dos grãos

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM: American Society for Testing and Materials

NBR: Norma Brasileira

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USACE: United States Army Corps of Engineers

USBR: United States Bureau of Reclamation

LEGG: Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

ENVIRONGEO: Laboratório de Resíduos, Novos Materiais e Geotecnia Ambiental

FEUP : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LABGEO: Laboratório da Geotecnia

UNISINOS : Universidade do Vale do Rio dos Sinos

LMS: Laboratório de Mecânica dos Solos

LC: limite de contração

LL: limite de liquidez

LP: limite de plasticidade

IP : índice de plasticidade

PCA: Portland Cement Association

TRB: Transportation Research Board

ICL: Initial Consumption of Lime

ISC : Índice Suporte de Califórnia

RCS : Resistência à Compressão Simples

CIU : ensaio triaxial não-drenado

C-S-H : Silicato de Cálcio Hidratado

IUPAC : International Union of Pure and Applied Chemistry

PIM: ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

SEM : microscopia eletrônica de varredura

TEM : microscopia eletrônica de transmissão

DTP : distribuição do tamanho de poros

SUCS : Sistema Unificado de Classificação de Solos

MQ : média quadrada

SQ : soma quadrada

GDL : graus de liberdade

Prob : probabilidade

SIG : significância

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

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 muito variável nem sempre satisfaz as necessidades da obra a ser realizada.

Na pavimentação, por exemplo, alguns solos necessitam de bases granulares para o pavimento ser realizado, o que gera um alto custo quando a jazida está localizada distante da obra, além de causar degradação ambiental pela exploração da jazida e pelo próprio transporte do material. Outro exemplo são os solos que necessitam fundações profundas, cujo custo se torna inviável dependendo do porte da obra.

Assim, na busca de novas tecnologias que proporcionem redução de custos e tornem a obra economicamente viável, uma alternativa é o melhoramento destes solos através de técnicas de estabilização com a utilização de cal ou cimento.

A cal é utilizada na estabilização de solos desde a antiguidade, com aplicação principalmente em pavimentações e aterros. Muitas pesquisas (NÚÑEZ, 1991; THOMÉ, 1994; CARRARO, 1997; CONSOLI, 2001; LOVATO, 2004, DALLA ROSA, 2009, LOPES JUNIOR, 2011, CONSOLI *et al.*, 2011) sobre solos tratados com cal têm sido realizadas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, visando seu emprego como base para rodovias e como camada de suporte para fundações superficiais, sendo que os resultados demonstram melhoras significativas nos parâmetros geotécnicos estudados (aumento da capacidade de suporte e redução dos recalques).

Os solos tratados com cal exibem um comportamento mecânico complexo, influenciado por diversos fatores (quantidade de cal adicionada, porosidade da mistura, teor de umidade e tempo de cura), e assim, geralmente o procedimento de dosagem do solo-cal restringe-se à escolha do teor de cal necessário a partir de uma estimativa inicial fornecida pela literatura ou norma, seguida pela execução de uma série de ensaios laboratoriais, até a obtenção das propriedades requeridas.

Contudo, as últimas pesquisas em solos tratados com cal mostram o desenvolvimento de metodologias de dosagem baseadas em critérios racionais (como a relação água/cimento para o concreto), onde a relação volume de vazios/volume de cal desempenha papel fundamental na obtenção da resistência mecânica desejada.

Como estas metodologias de dosagem se baseiam no volume de vazios/volume de cal, a quantificação do volume de vazios (ou da porosidade) de misturas solo-cal se torna algo muito importante. Porém, ainda não existem técnicas que quantifiquem a porosidade (como o porosímetro por injeção de mercúrio para o concreto) desses solos estabilizados com cal e também modelos que permitam o entendimento do comportamento da porosidade dessas misturas ao longo do tempo (como o modelo de Powers para o concreto).

Assim, esta pesquisa busca fornecer subsídios para que, através de relações de dosagem, desenvolvidas a partir da identificação e quantificação das variáveis mais importantes no controle da resistência à compressão simples, da resistência à tração e da rigidez inicial de um solo estabilizado com cal, se possa atingir de forma objetiva e com maior confiabilidade as propriedades requeridas nas misturas caulim-cal. Além disso, esta pesquisa busca uma técnica que possa quantificar a porosidade de misturas solo-cal e também, uma metodologia que possa ser utilizada para prever a porosidade dessas misturas em diferentes tempos de cura.

A partir destas metodologias será possível reduzir o número de ensaios em laboratório e assim, obter com confiabilidade e com maior rapidez uma dosagem que atenda às características da mistura caulim-cal requerida.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é quantificar a influência da quantidade de cal, da porosidade, do teor de umidade e do tempo de cura, sobre o comportamento mecânico de um solo siltoso estabilizado com cal, verificando a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa da sua resistência à compressão simples, da sua resistência à tração e da sua rigidez inicial. Além disso, esta pesquisa busca analisar a variação da porosidade das misturas estudadas e também, uma metodologia que possa ser utilizada para prever a porosidade dessas misturas em diferentes tempos de cura.

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: quantidade de cal, porosidade da mistura compactada, teor de umidade e tempo de cura sobre a resistência à compressão simples, sobre a resistência à tração e sobre a rigidez inicial do solo-cal estudado;
- Verificar a adequação da relação vazios/cal na estimativa da resistência à compressão simples, da resistência à tração e da rigidez inicial do caulim-cal estudado;
- Estabelecer relações entre a resistência à compressão simples, a resistência à tração e a rigidez inicial das misturas solo-cal estudadas.
- Verificar a existência de relações únicas e distintas no controle da resistência à compressão simples, da resistência à tração e da rigidez inicial em função da porosidade, da quantidade de cal e do teor de umidade para os tempos de cura estudados.
- Verificar se as variáveis de interesse (quantidade de cal, porosidade da mistura compactada, teor de umidade e tempo de cura) e suas interações são estaticamente significativas;

- Verificar a variação da porosidade com o tempo de cura, em amostras de interesse, das diferentes misturas caulim-cal estudadas nesta pesquisa;
- Verificar a adaptação do modelo de Powers para prever a variação da porosidade dessas misturas ao longo do tempo de cura.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. O capítulo 1 constitui-se de uma introdução, onde são apresentados o problema e a relevância da pesquisa e são definidos os objetivos gerais e específicos a serem atingidos.

No capítulo 2 é feita uma revisão da literatura acerca de aspectos relevantes do tema abordado, proporcionando ao leitor uma visão geral sobre a técnica de solos artificialmente cimentados. Assim, os principais aspectos abordados são a aplicação de solos tratados com cal, os métodos de dosagem existentes, bem como os materiais utilizados e as características comportamentais típicas de misturas solo-cal. São abordados também, os fatores que exercem influência sobre as características de solos artificialmente cimentados, em termos de variáveis determinantes e comportamento mecânico. No capítulo 2 são abordados, ainda, os principais aspectos sobre a técnica de porosímetro por intrusão de mercúrio, que permite quantificar a porosidade de materiais cimentados e os principais aspectos sobre o modelo de Powers, que permite prever a porosidade de materiais cimentados.

O capítulo 3 apresenta a descrição do programa experimental utilizado no desenvolvimento da pesquisa, especificando as variáveis de interesse, os métodos e materiais utilizados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos na etapa experimental, bem como, uma análise e discussão detalhada acerca dos mesmos.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VISÃO GERAL SOBRE A TÉCNICA DO 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, como a Via Apia, construída pelos Romanos. Pode-se definir solo-cal como o produto resultante da mistura compactada de solo (geralmente argila), cal e água, em proporções estabelecidas através de dosagem (USBR, 1998).

A adição de cal ao solo tem sido denominada de maneiras diferentes conforme o autor, sendo que termos como solo estabilizado, solo melhorado, solo modificado e solo tratado, são comumente utilizados. De maneira geral o critério para a adoção de uma ou outra denominação é o grau de alteração das propriedades do solo natural em função da quantidade de agente cimentante aplicado. Entretanto os processos são conceitualmente os mesmos, ou seja, a introdução e mistura de cal ao solo para obtenção de propriedades como resistência ou deformabilidade adequadas a um determinado uso de engenharia. Nesta revisão da literatura não será feita distinção entre os termos, sendo mantido o termo utilizado pelo autor citado.

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 ou sub-base de pavimentos (INGLES & METCALF, 1972).

Segundo Guimarães (1971), o uso expressivo de solo-cal em rodovias iniciou-se na década de 50. O autor relatou algumas experiências de sucesso em pistas experimentais de solo-cal no Brasil, entre elas:

- Aeroporto de Congonhas (São Paulo): na área de hangares da Varig (10.000 m²) foi construída uma base de solo-cal-agregado, com 6% de cal hidratada;
- Rodovia Curitiba/Porto Alegre (Paraná): próximo ao km 10, com 1000 metros de extensão. Foi utilizado um solo siltoso, com 3% e 7% de cal;
- Rodovia Cruz Alta/Carazinho (BR 377/RS): dois trechos experimentais em solo argiloso com 4% de cal.

A técnica de melhoramento do solo também pode ser utilizada nas fundações de edificações 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 & METCALF, 1972).

A solução tradicionalmente utilizada para suportar as cargas das construções nestes locais é o uso de fundações profundas. Estas atravessam o material menos resistente e são assentes em camadas mais profundas de maior capacidade de suporte. No entanto, este tipo de solução técnica pode inviabilizar, por exemplo, obras de conjuntos habitacionais de baixo custo, nos quais o investimento em fundações pode vir a ser uma grande parcela do valor total do empreendimento (THOMÉ *et al*, 2005).

Estudos realizados nos últimos anos no sul do Brasil têm demonstrado que a utilização de fundações apoiadas em sistemas de dupla camada, sendo a superior constituída de solos cimentados compactados, é uma técnica alternativa que pode ser utilizada nos casos em que existam camadas de solos de baixa resistência e o nível de carga das edificações seja baixo (THOMÉ *et al*, 2005).

Thomé *et al* (2005), a partir de uma série de resultados de ensaios de placa sobre sistemas de dupla camada, sendo a superior cimentada, e simulações numéricas através do Método dos Elementos Finitos, apresentam um método semi-empírico de dimensionamento de fundações superficiais apoiadas sobre uma camada de solo resistente, a qual se encontra assente sobre uma camada de baixa resistência.

Outra importante aplicação do solo-cal tem sido na proteção de taludes contra a erosão em obras hidráulicas como, por exemplo, no canal de irrigação de Friant-Kern na Califórnia, no qual foi utilizada cal virgem pulverizada (3% a 5%). Tanto no aspecto estanqueidade, como

no de estabilidade, o canal, com vazão de 150 m³/min, não apresentou nenhuma erosão significativa após um ano de serviços contínuos (LITTLE, 1999; GUIMARÃES, 2002).

A cal também possui grande aplicação na estabilização de solos moles e solos expansivos. Sandroni e Consoli (2010) apresentam uma ampla revisão bibliográfica sobre a prática geotécnica para estes tipos de solos. Dentre as posturas de projeto disponíveis na engenharia geotécnica em solos extremamente moles e expansivos, os autores destacam as seguintes: evitação, deslocamento, substituição, aterros convencionais, sobrecarga, reforços geossintéticos, drenos verticais, geotubos, tratamento de camada superficial por mistura com aglomerante seco, colunas de mistura de solo com ligantes, colunas de material granular, aterros reforçados com geossintéticos apoiados em colunas (material granular ou mistura de solo com ligante) ou estacas, aterro sobre laje de concreto estaqueada e congelamento. A adoção de uma ou mais soluções técnicas está associada principalmente ao tipo de obra e a espessura da camada de baixa resistência.

2.2 MATERIAIS UTILIZADOS EM MISTURAS SOLO-CAL

2.2.1 Solo

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

Para verificar qual aditivo 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 345 kN/m²) são denominados de 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 de cal (2% a 3%). Além disso, para este solo, 4% de cal foi suficiente 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 caulínico mais cal foi sensivelmente superior ao da outra.

Ormsby e Kinter (1973) constataram, para um solo contendo como principal argilo-mineral a caulinita, que a mistura com cal cálcica apresentou maior resistência à compressão simples que a mistura com cal dolomítica. Quando o principal argilo-mineral 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.

2.2.2 Cal

2.2.2.1 Propriedades da Cal

Conforme Guimarães (2002), 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. Na forma hidratada deve obedecer às determinações da Norma Brasileira NBR 7175/86.

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 (%)	Insolúvel 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 Cálca	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 Cálca	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 Magnesiana	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 Magnesiana	51–61	30–37	0,5–4,5	0,2–1,0	0,5–4,8	0,5–4,5	0,05–0,1		–

2.2.2.2 Dosagem da 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 de laboratório (INGLES & METCALF, 1972).

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

I – 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.

II – Método do ICL (Initial Consumption of Lime) – proposto por Rogers *et al* (1997), é uma variação do método do pH, onde o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor constante (máximo);

III – Método do Lime Fixation Point (HILT & DAVIDSON, 1960) – baseado no limite de plasticidade, que determina o teor de cal máximo que proporciona melhoria na trabalhabilidade, sem ganhos significativos de resistência;

IV – Método de Thompson (1966) – que define como reativo um solo que apresente um aumento de resistência à compressão simples de pelo menos 345 kPa quando estabilizado com cal.

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 & 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.

2.2.3 Água

A água potável é considerada satisfatória para utilização em misturas de 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 & METCALF, 1972).

2.3 REAÇÕES SOLO-CAL

Castro (1995) observa que quando se adiciona cal a um solo fino em presença de água, ocorrem simultaneamente algumas reações químicas. A estabilização química com cal é caracterizada por duas etapas distintas: uma etapa inicial rápida (que dura de horas a dias), e outra mais lenta, que pode levar meses a anos.

Alguns fenômenos que podem originar a etapa rápida no processo da interação da cal com um solo fino são: troca catiônica, floculação-aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, adsorção de cal e reações químicas. A fase lenta é caracterizada pelas reações pozolânicas, que proporcionam um aumento da resistência, devido à formação de produtos cimentantes; e pela carbonatação, que é uma reação prejudicial.

Prusinski e Bhattacharja (1999) afirmam que a troca catiônica inicia o processo de estabilização muito rapidamente e é seguida pela floculação e aglomeração. Segundo os autores, a superfície do argilo-mineral é deficiente em carga e, para neutralizar essa deficiência, cátions e moléculas de água são atraídos para a superfície de clivagem carregada negativamente. Isso resultará em uma separação de duas camadas, chamada de dupla camada difusa. Grim *apud* Thomé (1994) afirmou que, assumindo igual concentração, a ordem de adsorção preferencial de cátions comuns, associados com os solos é dada pela série: $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+} < \text{Al}^{3+}$, da direita para a esquerda, ou seja, cátions de menor valência são substituídos por cátions de maior valência. Como a cal é uma fonte de cálcio livre, a sua adição em quantidade suficiente cria uma concentração de Ca^{++} , que serão adsorvidos na superfície dos argilo-minerais.

A floculação e aglomeração causam mudanças na textura da argila, pois sua estrutura é alterada de plana e paralela para uma orientação aleatória de partículas (PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999). Conforme relato do TRB (1987), Herzog & Mitchell (1963) afirmaram que o fenômeno da floculação é causado pelo aumento da concentração eletrolítica da água intersticial, pelo alto pH e pela redução da espessura da dupla camada difusa, através de trocas catiônicas. O mecanismo de troca de cátions é mostrado na figura 2.1.

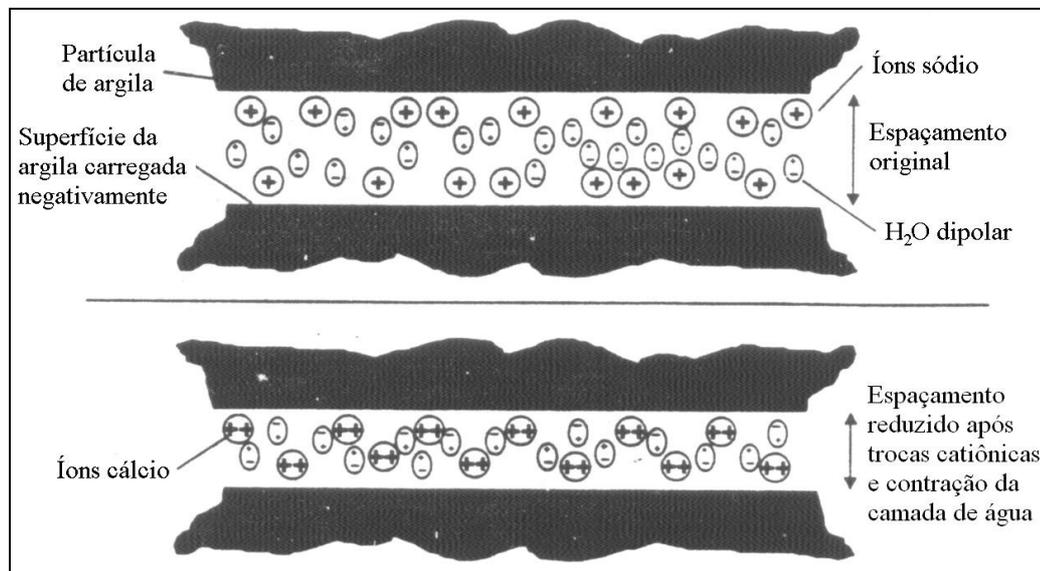


Figura 2.1 – Mecanismo de troca de cátions (PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999)

As reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica de misturas solo-cal. Esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes.

Segundo Rogers & Glendinning (2000), os íons hidroxila liberados da cal elevam o pH da mistura a um valor suficientemente alto, de modo que a sílica e a alumina sejam dissolvidas do solo. Essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio (explicação muito direta). Segundo relato do TRB (1987) esta reação não cessará enquanto houver $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reagindo e sílica disponível no solo. Conforme Ingles & Metcalf (1972), 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. Os autores salientam que 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.

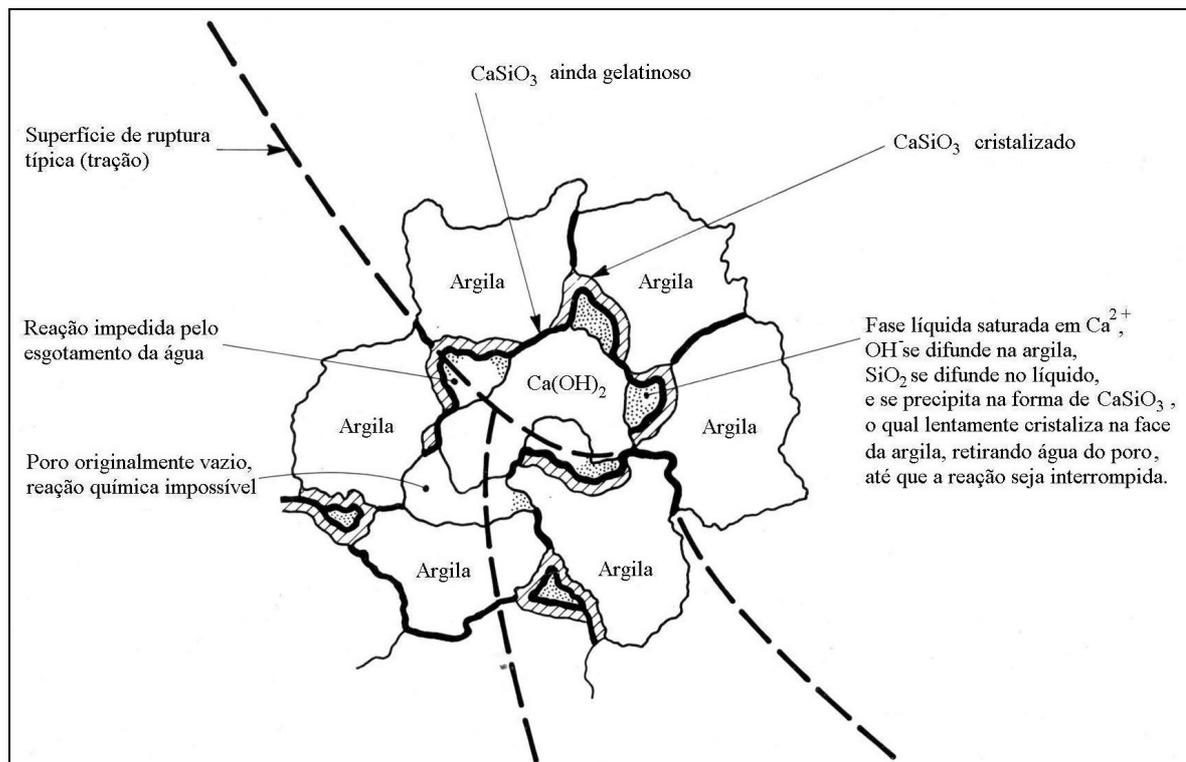


Figura 2.2 – Mecanismo de estabilização solo-cal (INGLES & METCALF, 1972)

2.4 RELAÇÃO VAZIOS/CAL

Nessa parte da revisão foram abordados os trabalhos que correlacionam a quantidade de vazios com a quantidade cal para a estimativa da resistência à compressão simples, da resistência à tração e da rigidez inicial. Foram abordados também, os trabalhos que relacionam a quantidade de vazios com a quantidade de cimento para a estimativa da resistência à compressão simples, da resistência à tração e da rigidez inicial pela falta de trabalhos em relação ao uso da cal.

Recentes pesquisas relatam o uso da relação volume de vazios/volume de agente cimentante na previsão do comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados (FOPPA, 2005; LOPES JUNIOR, 2007; CRUZ, 2008; RIGHETTO, 2008; DALLA ROSA, 2009; CONSOLI, 2010; LOPES JUNIOR, 2011, CONSOLI, 2011).

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 aparente secas, ambos determinados a partir das curvas de compactação das misturas de solo e cimento.

A relação vazios/cimento utilizada por Larnach (1960) é definida pela seguinte expressão:

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar + água)}}{\text{Volume absoluto de cimento}} \quad (\text{Equação 2.1})$$

A Figura 2.3 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.

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 2.4 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.

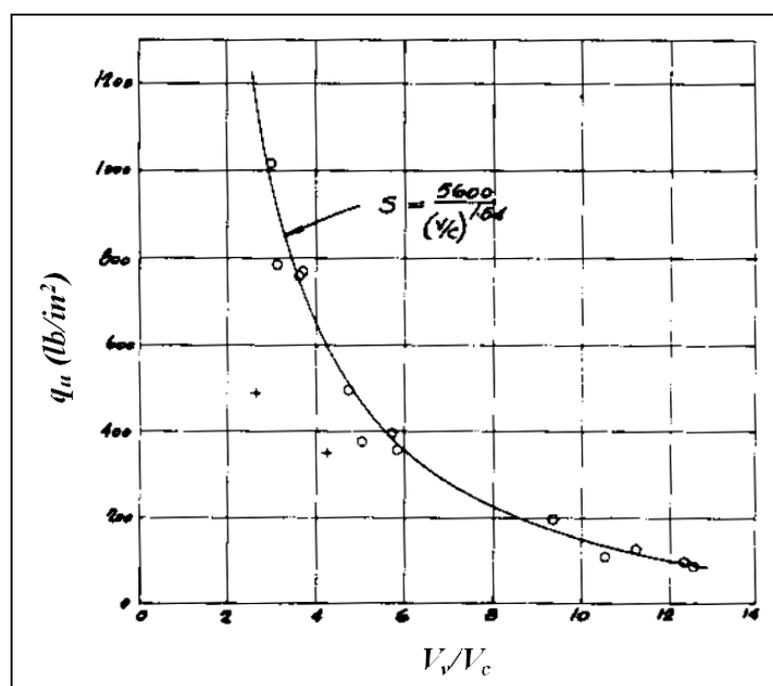


Figura 2.3 – Relação vazios/cimento *versus* resistência à compressão simples (adaptado de LARNACH, 1960)

Consoli *et al* (2007) com o objetivo de verificar o comportamento tensão-deformação de corpos-de-prova com mesma relação vazios/cimento, realizaram seis ensaios triaxiais não-drenados com tensões de confinamento de 20kPa e compararam com a curva de ajuste dos resultados de resistência à compressão simples obtidos por Foppa (2005). Foram adotados três

valores de $\eta/(C_{iv})^{0,28}$ (relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustados por um fator 0,28) para avaliação (20, 25 e 35), como é apresentado na Figura 2.5.

Os autores concluíram que a relação vazios/cimento também fornece bons resultados para a previsão da tensão desvio dos ensaios triaxiais não-drenados. Perceberam também, que a curva de ajuste dos ensaios triaxiais ficou próxima, porém, um pouco acima da curva de ajuste dos ensaios de resistência à compressão simples, devido ao efeito do confinamento (Figura 2.5).

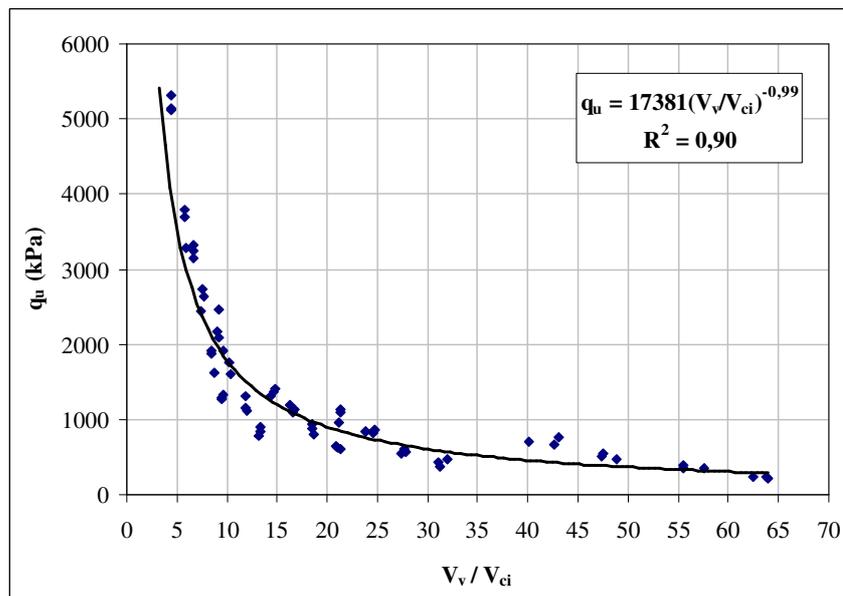


Figura 2.4 – Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de FOPPA, 2005)

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

Dalla Rosa (2009) verificou a mesma tendência obtida pelos trabalhos anteriores, tratando uma areia-siltosa com 3%, 5%, 7% e 9% de cal e 0%, 12,5% e 25% de cinza volante em

relação à massa de solo seco. Para cada porcentagem de cinza volante foi realizada uma série de ensaios de resistência à compressão simples em diferentes tempos de cura (28, 60 e 90 dias), moldadas a diferentes teores de cal e massas específicas aparente secas, ambos determinados a partir das curvas de compactação deste material. As Figuras 2.7, 2.8 e 2.9 apresentam os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples das amostras tratadas com cal e com 0%, 12,5% e 25% respectivamente. Verifica-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/cal (ajustados por um fator 0,12).

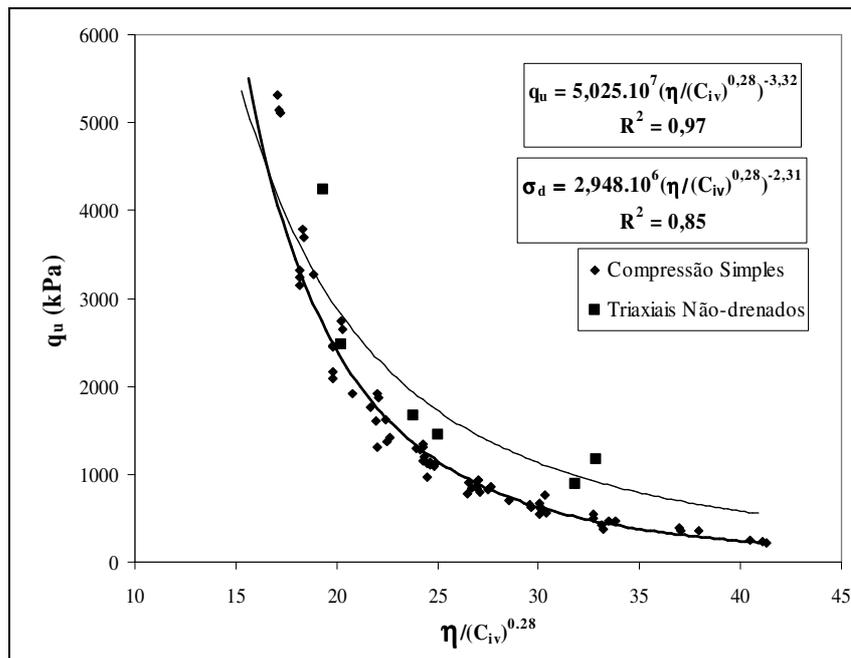


Figura 2.5 – Previsão da tensão desvio através da relação vazios/cimento (CONSOLI *et al*, 2007)

Os exemplos de aplicações apresentados demonstram como o projetista pode, utilizando o fator vazios/agente cimentante, escolher adequadamente a quantidade de cal e/ou cimento e a energia de compactação para proporcionar uma mistura que atenda à resistência necessária para o projeto ao menor custo possível. O fator vazios/agente cimentante pode ser também de extrema utilidade no controle da execução de camadas tratadas com cimento ou cal, na medida em que, constatada uma compactação inferior à prescrita, poderá se estimar com confiabilidade a perda da resistência decorrente deste fato e conseqüentemente medidas corretivas poderão ser tomadas como, por exemplo, o reforço da camada ou ainda, a redução do carregamento transmitido.

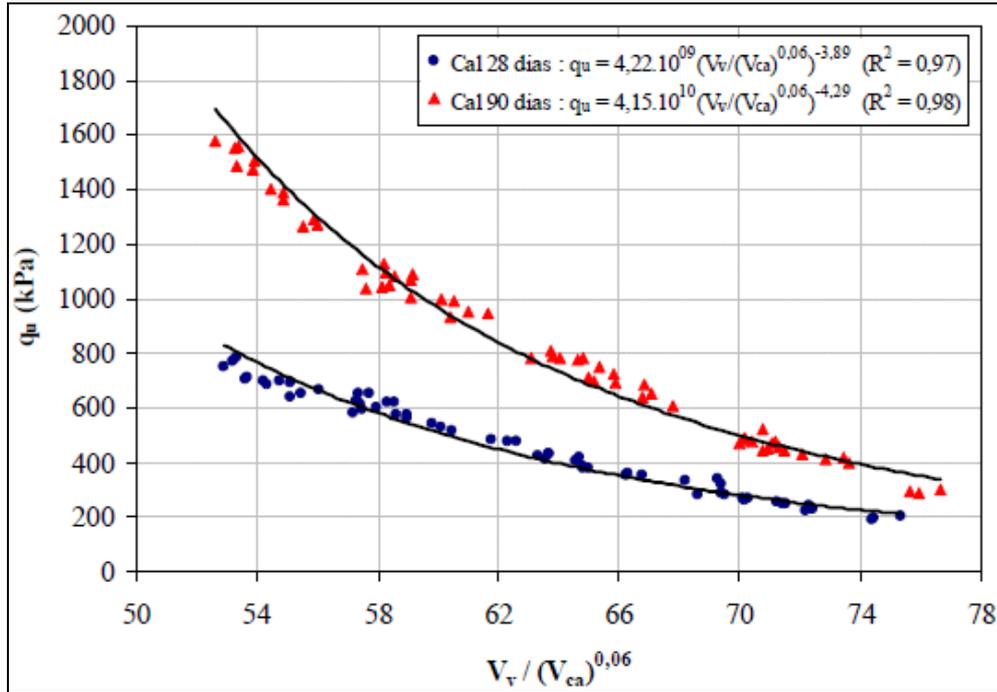


Figura 2.6 – Fator vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras com 28 e 90 dias de cura (LOPES JUNIOR, 2007)

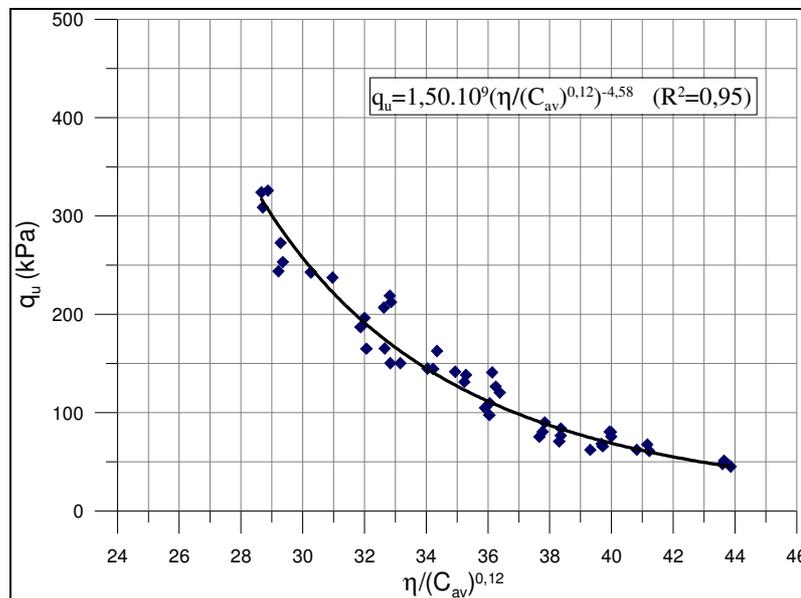


Figura 2.7 – Relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e do teor de cal volumétrico para amostras com 0% de cinza volante aos 90 dias de cura (DALLA ROSA, 2009)

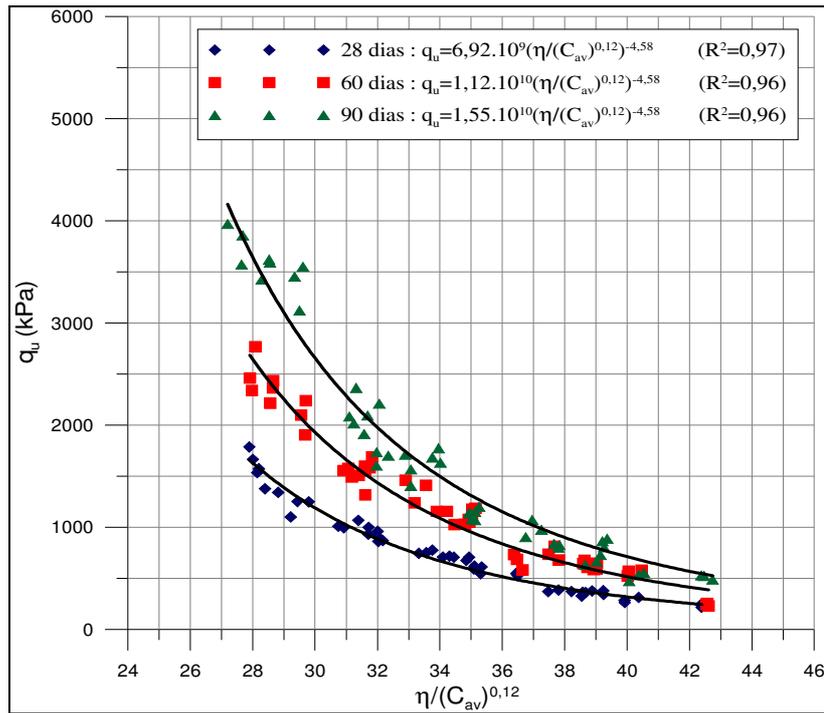


Figura 2.8 – Relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e do teor de cal volumétrico para amostras com 12,5% de cinza volante (DALLA ROSA, 2009)

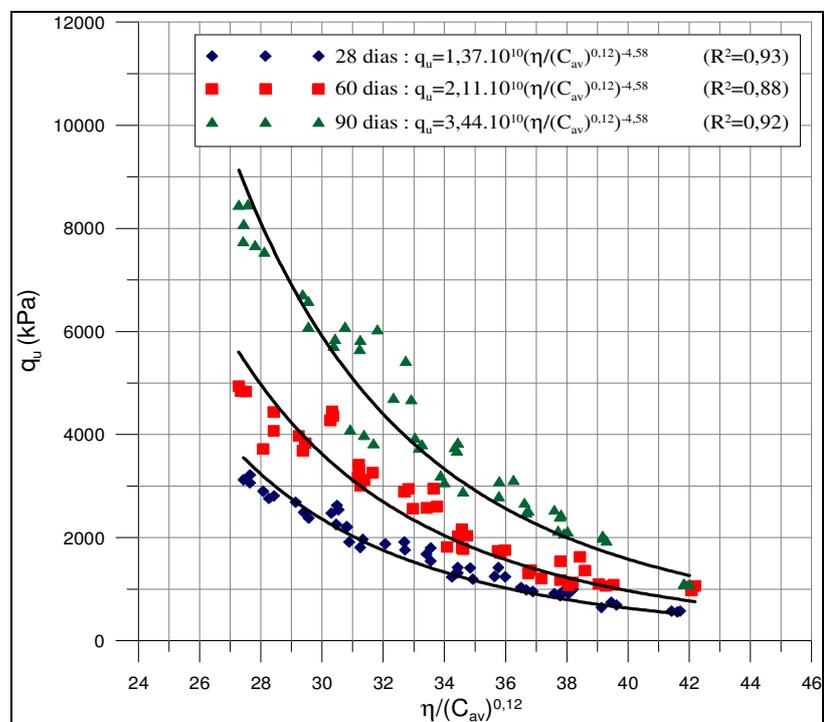


Figura 2.9 – Relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e do teor de cal volumétrico para amostras com 25% de cinza volante (DALLA ROSA, 2009)

Vitali (2008) apresenta, na Figura 2.10, um bom ajuste para a resistência à tração em função da relação/vazios cimento. Em seu experimento foram utilizadas amostras de um solo silte arenoso tratado com diferentes porcentagens de cimento (2%, 3%, 5% e 7%).

Cruz (2008) utilizando o mesmo conceito da relação vazios/cimento tratou uma areia fina com 2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12% de cimento. Para cada porcentagem de cimento foi feita uma série de ensaios de resistência à compressão simples, moldadas com 10% de umidade e diferentes índices de vazios (0,68; 0,73 e 0,80). O autor avaliou a resistência à compressão simples, a influência de tensões efetivas de confinamento e a rigidez inicial (G_0) através da técnica de bender elements. A Figura 2.11 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples comparando com as resistências à compressão triaxial. Nota-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/cimento.

Na Figura 2.12 são apresentadas as correlações entre a relação vazios/cimento e a rigidez inicial (G_0). A partir dos resultados de resistência à compressão simples e rigidez inicial, Cruz (2008) relacionou as duas variáveis de resposta, obtendo como equação resultante:

$$\frac{G_0}{q_u} \cong 1000 \sqrt{\frac{\eta}{C_{iv}}} \quad (\text{equação 2.2})$$

Lopes Junior (2011) estudou misturas de solo residual de arenito Botucatu tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal e verificou a adequação do uso da relação vazios/cal dessas misturas para a obtenção da rigidez inicial (G_0), em diversos tempos de cura (Figura 2.13).

A relação vazios/agente cimentante, apresentada por diversos autores neste item, possui grande potencial de utilização para as misturas solo-cal estudadas nesta pesquisa. Isto se justifica pela eficiência desta relação na previsão do comportamento mecânico e na previsão da rigidez inicial de materiais cimentados, inclusive de misturas solo-cal.

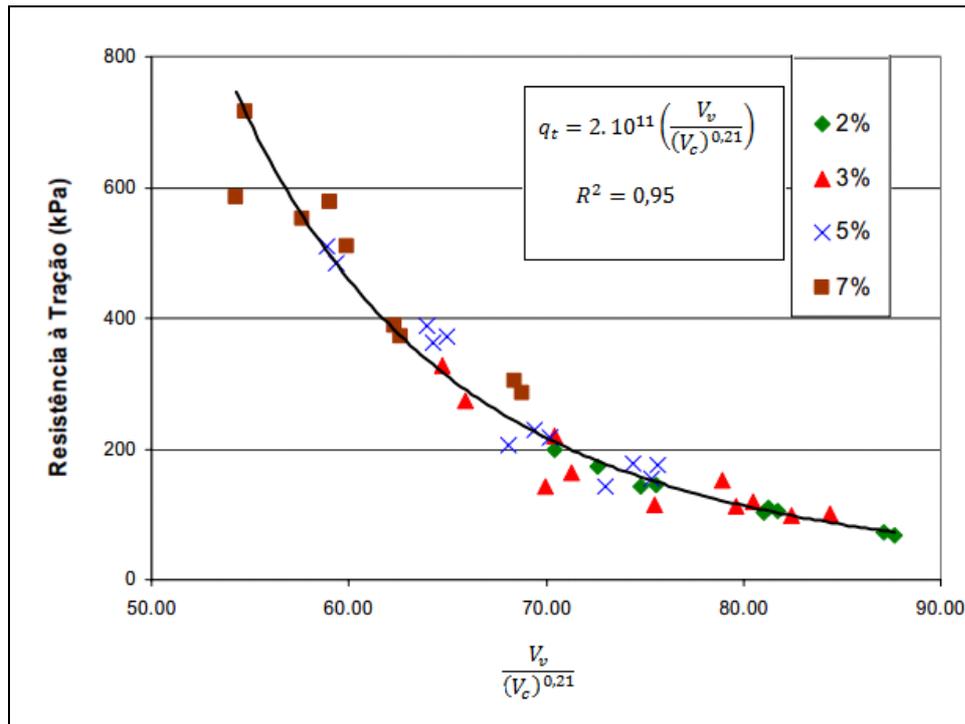


Figura 2.10 – Resistência à tração *versus* relação vazios/cimento ajustado (adaptado de VITALI, 2008)

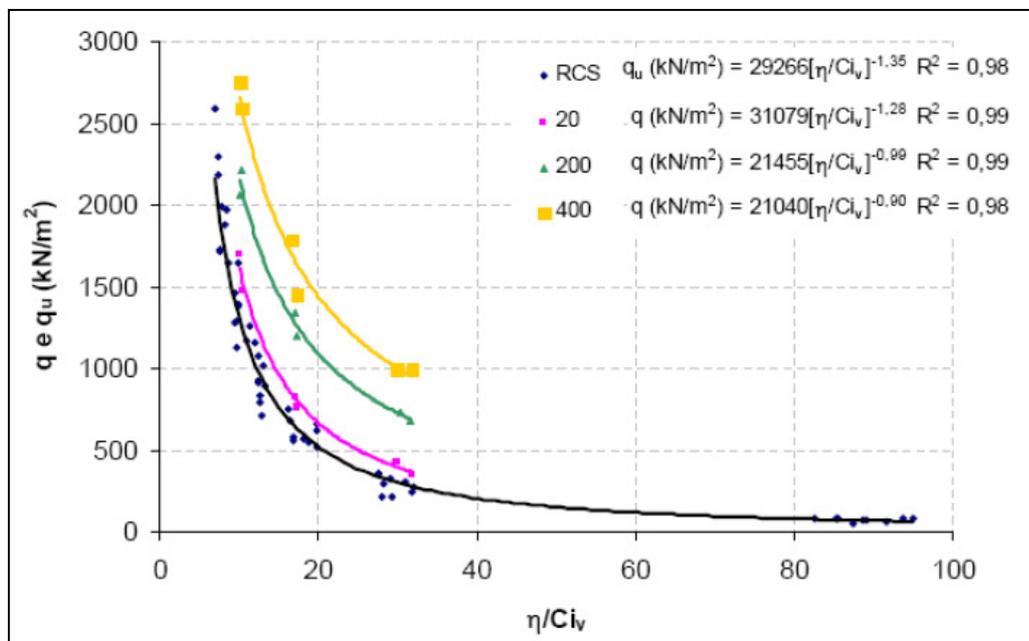


Figura 2.11 – Tensão *versus* relação vazios/cimento para diferentes tensões confinantes (CRUZ, 2008)

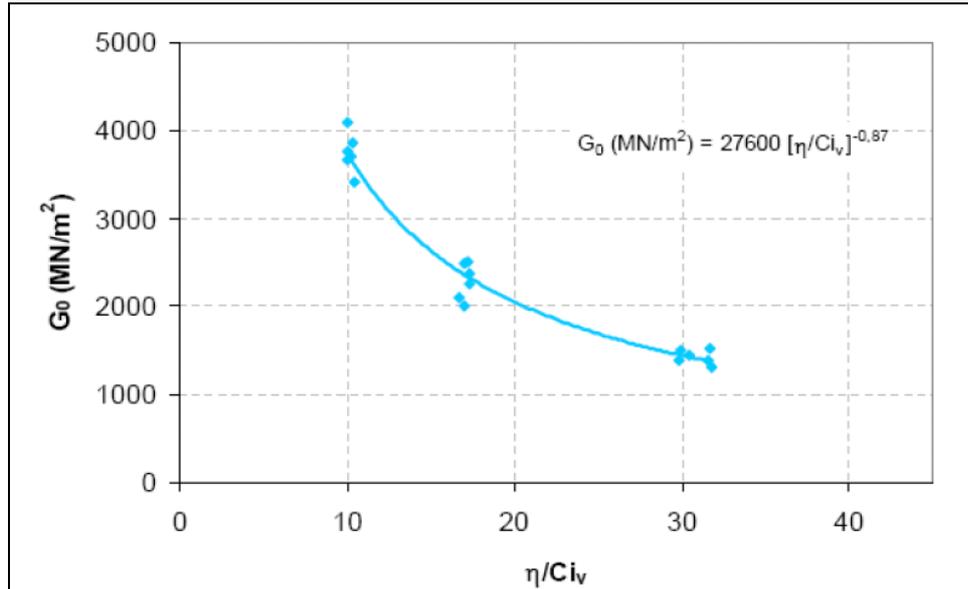


Figura 2.12 – Módulo cisalhante *versus* relação vazios/cimento (CRUZ, 2008)

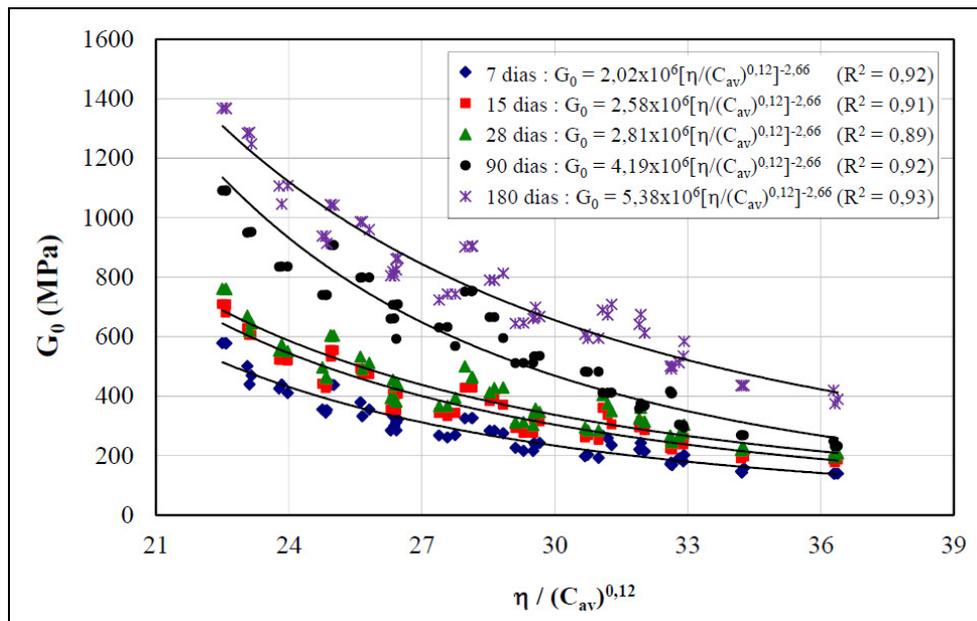


Figura 2.13 – Módulo cisalhante *versus* relação vazios/cal ajustado (todas as amostras) (LOPES JUNIOR, 2011)

2.5 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE MISTURAS SOLO-CAL

2.5.1 Variáveis determinantes do comportamento de misturas solo-cal

Quando se adiciona cal a um solo argiloso suas propriedades físicas são alteradas. Essas alterações dependem de diversos fatores, entre eles: tipo de solo, tipo e teor de cal, energia de compactação, período e condições de cura.

Nos itens subsequentes serão detalhados os efeitos de alguns dos fatores considerados de grande importância na determinação da resistência de solos cimentados e que tem relação com as variáveis de estudo escolhidas nesta pesquisa.

2.5.1.1 Efeito da Cal

A primeira resposta da mistura solo-cal será a redução do índice de plasticidade e melhoria na trabalhabilidade e a segunda será o ganho de resistência através da cimentação das partículas (INGLES & METCALF, 1972; ATTOH-OKINE, 1995; TRB, 1987).

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

Consoli *et al* (2001), ao estudarem um solo arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, verificaram que para uma mesma tensão confinante, o aumento da quantidade de cal provoca aumento da resistência de pico e diminuição da deformação na qual o pico é atingido.

Lopes Junior (2007, 2011) e Dalla Rosa (2009) ao estudarem misturas solo-cal, observaram que o aumento da quantidade de cal provoca um aumento da sua resistência à compressão simples.

2.5.1.2 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 & METCALF, 1972).

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

As partículas do solo, quando adicionada cal, se tornam mais floculadas, devido à substituição dos íons sódio monovalentes da argila por íons cálcio divalentes. Devido à floculação, a quantidade de vazios e o tamanho dos vazios no solo aumentam. Esta estrutura floculada é forte o suficiente para resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios mais alto, reduzindo assim o γ_d do solo. Quanto mais vazios houver, mais água será necessária para preenchê-los, o que resultará em uma umidade ótima maior, e uma curva de compactação mais achatada (Sivapullaiah *et al*, 1998). Com a adição de cinza volante, um comportamento similar também é normalmente observado em misturas solo-cinza-cal.

Lopes Junior (2007, 2011) e Dalla Rosa (2009) ao estudarem misturas solo-cal, observaram que o aumento do peso específico aparente seco provoca um aumento da sua resistência à compressão simples.

2.5.1.3 Efeito do tempo de cura

Ingles e Metcalf (1972) apresentam um estudo sobre a influência do tempo de cura em diferentes tipos de solos, observaram taxas de ganhos de resistência maiores em pedregulhos arenosos, conforme a Figura 2.14.

Thomé (1994) estudou misturas de uma argila mole (pedologicamente conhecida como Gley Húmico) com 5, 7 e 9% de cal dolomítica. Observou que a resistência não apresentou variação significativa para tempos de cura superiores a 7 dias. Segundo o autor, as reações pozolânicas foram impedidas ou sua quantidade foi insuficiente para cimentar as partículas. As reações pozolânicas poderiam ser impedidas pelos seguintes fatores simultâneos ou independentes: falta de água, temperatura de cura muito baixa, teor de cal insuficiente ou presença de matéria orgânica.

Carraro (1997) ao estudar um solo silte arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, observou que o teor de cal presente nas misturas não exerceu influência significativa sobre os valores médios de resistência à compressão simples até a idade de 90 dias de cura, para a maior idade de cura adotada (180 dias), a resistência à compressão simples é fundamentalmente dependente do teor de cal de carbureto, apresentando uma relação aproximadamente linear.

Lopes Junior (2007) verificou que as 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, apresentam em média, resistência 50% superiores em relação às amostras com 28 dias de cura.

Para as misturas de solo residual de arenito Botucatu com 25% de cinza volante, tratadas com 3%, 5%, 7% e 9% de cal (Dalla Rosa, 2009) verificou que as amostras curadas por um período de 90 dias, apresentavam em média, resistências 35% superiores às amostras curadas por 60 dias, e estas, por sua vez, apresentavam resistências 65% superiores em relação às amostra com 28 dias de cura.

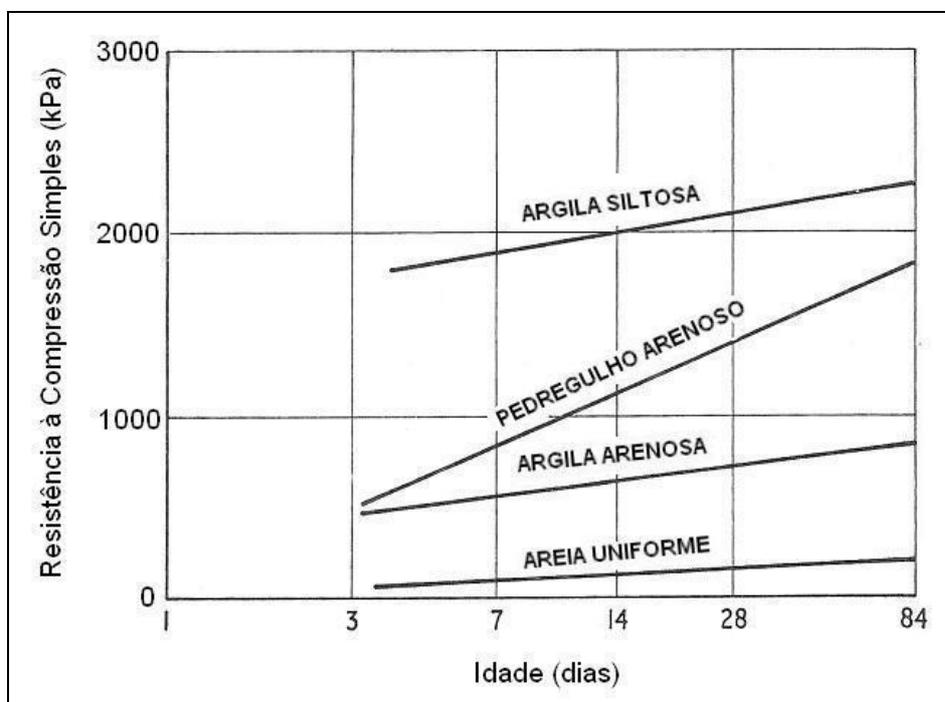


Figura 2.14 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal (adaptado de INGLES & METCALF, 1972)

Lopes Junior (2011) estudou misturas de solo residual de arenito Botucatu tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal e verificou que as amostras curadas com 360 dias de cura, apresentam, em média, o dobro da resistência à compressão das amostras com 90 dias de cura.

2.5.1.4 Efeito do teor de umidade e a 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).

Kézdi (1979) observou que não existe uma correlação entre o teor de umidade de moldagem que confere aos corpos-de-prova o máximo valor de resistência e aquele que permite a compactação na máxima densidade.

Osinubi (1998) estudou a influência do retardamento da compactação em misturas solo-cal, observando uma redução na umidade ótima da mistura com a espera na compactação, o que pode ser atribuído às trocas catiônicas e à floculação das partículas de argila, que ocorrem simultaneamente, deste modo diminuindo a água disponível no sistema. Segundo o autor, em materiais compactados imediatamente após a mistura, a mudança nas características de compactação é principalmente devida à alteração na granulometria do solo; quando ocorre uma demora na compactação, os produtos de hidratação se unem às partículas tornando necessária a ruptura dessas agregações para que o solo seja compactado satisfatoriamente, o que pode não recuperar sua total resistência.

De acordo com Guimarães (1971), o tipo de cal utilizada também influencia no teor de umidade ótimo. Para um solo com 38% de argila e 32% de silte, estabilizado com cal calcária e dolomítica, o autor observou uma umidade ótima em média 1,3% maior para as misturas com cal calcária que para as misturas com cal dolomítica.

Na literatura foram encontrados somente trabalhos que utilizam a relação água/aglomerante para estimativa da resistência de solos tratados com cimento (FOPPA, 2005; AZAMBUJA, 2004). Em solos tratados com cal, Ingles e Metcalf (1972) afirmam que a água somente é necessária para transportar os íons 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 esse processo.

Consoli *et al* (2001), com base em ensaios de compressão triaxial em amostras de solo-cinza-cal, constataram que logo após a compactação, a máxima rigidez ocorreu para as amostras compactadas no ramo seco das curvas de compactação e a máxima resistência ocorreu na umidade próxima à umidade ótima da curva de compactação. Após 28 dias de cura, os autores observaram que a máxima rigidez e a máxima resistência ocorreram no ramo seco das curvas de compactação.

Lopes Junior (2007), ao estudar um solo silte-arenoso tratado com dois diferentes tipos agentes cimentantes (cal e cimento), verificou que a variação do teor de umidade de moldagem, mantendo-se constante a massa específica aparente seca, não afetou consideravelmente a resistência à compressão simples de amostras com cal curadas a 28 dias e de amostras com cimento. Já para as amostras com cal curadas a 90 dias, de maneira geral, ocorreu uma diminuição da resistência com um teor de umidade acima do ótimo.

Além disso, Lopes Junior (2007), verificou que não existe relação entre a relação água/cal, a relação água/cimento e a resistência à compressão simples para o material estudado. Esse mesmo comportamento, para as amostras com cimento, foi verificado por Foppa (2005).

Rosa (2010), ao estudar um solo siltoso tratado com cimento, verificou que o teor de umidade de moldagem demonstrou ter papel fundamental na estimativa da sua resistência à compressão simples. O autor observou que o aumento do teor de umidade ocasionou um aumento da resistência à compressão simples do material estudado.

2.5.2 Comportamento mecânico de solos estabilizados com cal

Solos estabilizados, mediante a adição de cal ou cimento, constituem-se, em última análise, em um 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.

2.5.2.1 Resistência à compressão simples

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

Segundo Ingles & Metcalf (1972), geralmente, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até certo nível, usualmente 8% para solos argilosos. A partir deste ponto a taxa de acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal, devido às misturas solo-cal apresentarem uma cimentação lenta que dependerá do tipo de solo (Figura 2.15).

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

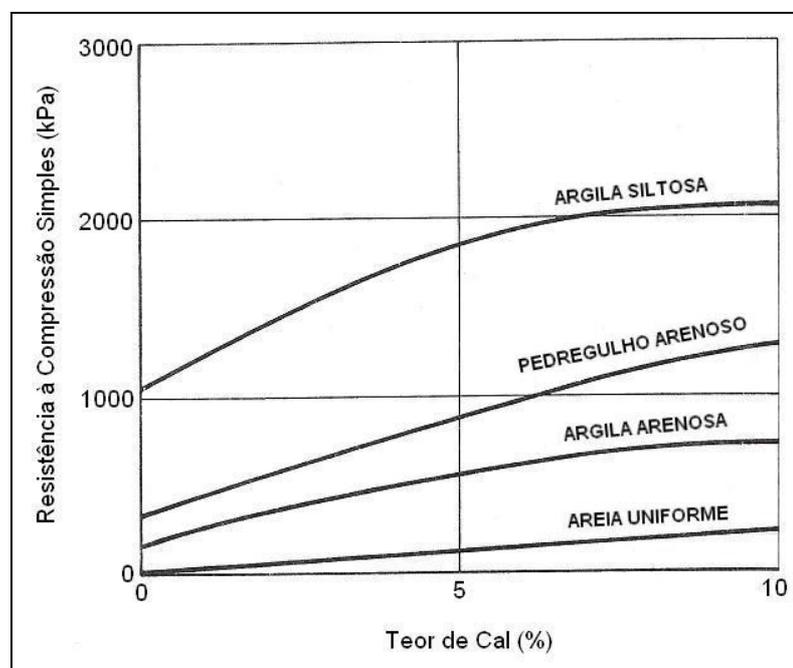


Figura 2.15 – Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (adaptado de INGLES & METCALF, 1972)

Ormsby e Kinter (1973), por sua vez, constataram que em solos ricos em caolinita 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 do segundo grau, e os melhores efeitos são obtidos com a adição de cal dolomítica.

O aumento da resistência à compressão simples de misturas solo-cal, com o aumento da energia de compactação, foi observado por Mateos (1964), que afirmou que a resistência das misturas é fortemente influenciada pela temperatura de cura, recomendando a construção de camadas de pavimento estabilizadas com cal no início do verão. Carraro (1997) verificou que a energia de compactação influencia e é de fundamental importância na determinação da resistência mecânica de solos tratados com cal de carbureto e cinza volante.

Lopes Junior (2007, 2011) e Dalla Rosa (2009) verificaram, em amostras de solo-cal, que a quantidade de cal e a porosidade são fatores de fundamental importância para a determinação da resistência à compressão simples das misturas estudadas, sendo que o aumento da quantidade de cal e a redução da porosidade provocam o aumento da sua resistência à compressão simples.

2.5.2.2 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 a tração pela resistência à compressão simples das misturas solo-cal estudadas varia de 0,10 a 0,15, independente do tipo e/ou teor de cal. Além disso, Ceratti (1979) ao estudar os efeitos da adição de cal e cinza volante a um solo residual compactado também constatou uma relação entre 0,10 e 0,13.

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

Segundo TRB (1987), estudos de Thompson (1969) demonstraram que o quociente entre a resistência à tração na flexão e a resistência à tração na compressão diametral é

aproximadamente 2. Assim pode-se estimar que a resistência à tração na flexão é 25% da resistência à compressão simples.

Consoli *et al* (2010), ao estudarem uma mistura areia-cimento concluíram que a razão entre a resistência à tração e à resistência à compressão simples é igual a 0,15 independente 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.

2.5.2.3 Resistência ao Cisalhamento

Existe um entendimento geral que, para uma dada variação de tensões, a resistência ao cisalhamento de solos cimentados pode ser representada por uma envoltória reta de Mohr-Coulomb, definida por um intercepto coesivo, que é apenas função da cimentação, e por um ângulo de atrito que parece não ser afetado pela cimentação (SCHNAID *et al*, 2001).

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. Considerando as baixas tensões confinantes atuantes no interior de pavimentos flexíveis ou fundações superficiais, o aumento da coesão é da maior importância. Para os solos de Illinois, Thompson (1966) observou que o ângulo de atrito interno de misturas solo-cal variava de 25° a 35° e obteve a seguinte relação entre a coesão (c) e a resistência à compressão simples (RCS):

$$c = 9,3 + 0,292 \text{ RCS} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Onde: c e RCS são medidas em psi (1 psi \cong 0,7 kgf/cm²).

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

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 10kN/m² para 42kN/m² e um acréscimo no ângulo de atrito de 35° para 38°, em relação ao solo natural.

2.5.2.4 Resposta Tensão-Deformação

As características tensão-deformação são essenciais para a análise do comportamento de uma estrutura de pavimento ou fundações superficiais assentes sobre uma camada em solo-cal.

Em geral, o comportamento tensão-deformação de solos cimentados pode ser descrito como inicialmente rígido, aparentemente linear até um ponto de plastificação bem definido, além do qual o solo sofre aumento nas deformações plásticas até a ruptura. Outra característica apresentada é a marcante fragilidade na ruptura com a formação de planos de ruptura. Tal fragilidade aumenta com o acréscimo da quantidade de agente estabilizante e diminui com o aumento da tensão efetiva média (SCHNAID *et al*, 2001).

O efeito da cal nas características de deformabilidade de um solo fino reativo são marcantes. A tensão de ruptura aumenta significativamente, enquanto que a deformação para ruptura diminui. Akoto & Singh (1986) observaram que quando as tensões de tração são elevadas, as amostras de laterita tratadas com cal se deformam notavelmente antes de romperem. Thompson (1965), entretanto, afirmou que a análise da curva tensão-deformação revela o comportamento frágil das misturas solo-cal.

Para o solo classificado como Gley Húmico, Thomé (1994), observou que o módulo secante, entre a origem e 75% da tensão de ruptura, aumenta com o teor de cal. Após 7 dias de cura, a mistura solo tratado com 9% de cal apresentou módulo secante 2,63 vezes maior do que o solo natural.

No solo silte-arenoso tratado com cal de carbureto e cinza volante, Consoli *et al* (2001) observaram um comportamento frágil na ruptura e que a deformação axial na ruptura diminui com a cimentação, verificaram que não só a cimentação influencia nesse processo, mas também as condições de compactação. Os autores observaram também que o módulo de deformação secante decresce de forma acentuada com o aumento das deformações axiais.

Consoli *et al* (2003) apresentam o resultado de um interessante experimento sobre o comportamento de fundações superficiais apoiadas sobre uma camada com 30 cm de espessura de areia tratada com 7% de cimento Portland e também a mesma camada arenosa tratada com 7 % de cimento mais 0,5 % de fibras de polipropileno, sobrejacente ao solo local. Observou-se significativa melhora dos parâmetros da areia, especialmente a coesão e o módulo de elasticidade, quando da introdução de cimento e de cimento mais fibras. Outro

aspecto importante é que, nos ensaios triaxiais, as amostras de areia-cimento apresentaram um comportamento marcadamente frágil, enquanto que as amostras de areia-cimento-fibra apresentaram um comportamento mais próximo do dúctil, ou seja, com pequena queda de resistência depois de atingido o pico. Esse tipo de comportamento é desejável, já que rupturas frágeis não apresentam sinais de aviso, podendo causar graves acidentes.

Consoli *et al* (1997) apresentam resultados de ensaios triaxiais CIU contendo o comportamento tensão-deformação-poropressão de misturas de argila com alto teor de umidade com 13% de cal e períodos de cura de 7, 28, 90 e 180 dias de cura (Figura 2.16). A partir de tais resultados é possível verificar a mudança no comportamento para com o tempo de cura em amostras com cal suficiente (mais de 11%) para a ocorrência de reações pozolânicas. Observa-se que a resistência não apresentou variação significativa para tempos de cura inferiores a 28 dias.

No solo silte-arenoso tratado com cal de carbureto e cinza volante, Consoli *et al* (2001) observaram um comportamento frágil na ruptura e que a deformação axial na ruptura diminui com a cimentação, verificaram que não só a cimentação influencia no processo, mas também as condições de compactação. Os autores observaram também que o módulo de deformação secante decresce de forma acentuada com o aumento das deformações axiais.

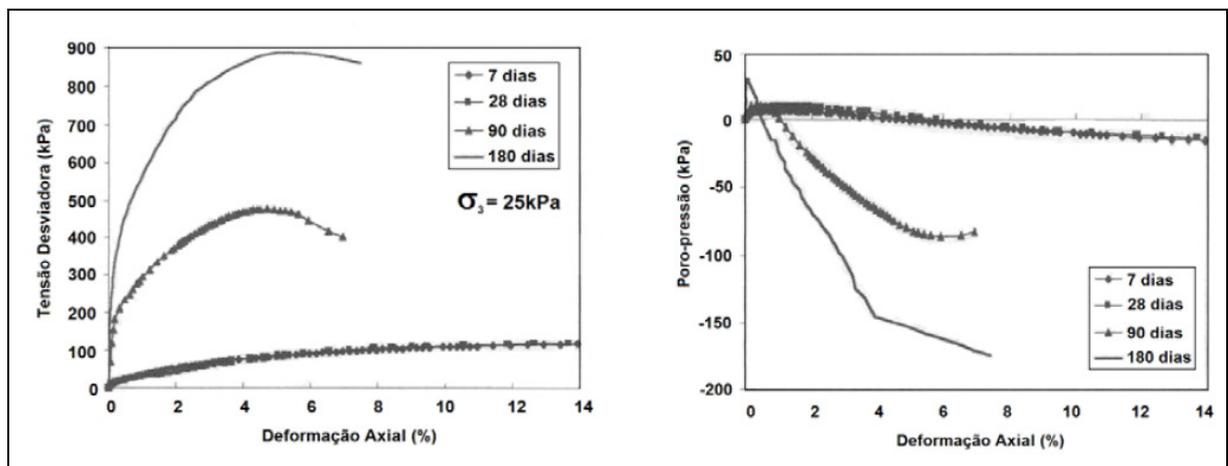


Figura 2.16 – Curvas (ensaios triaxiais CIU) tensão-deformação-poropressão (Consoli *et al*, 1997)

2.5.2.5 Rigidez Inicial

O aumento da rigidez inicial é o efeito mais evidente em solos cimentados, por esta razão, diversos autores se dedicaram ao estudo do comportamento de pequenas deformações de materiais geotécnicos. Entre eles, estão Clough *et al* (1981), Chang e Woods (1992), High e Jardine (1993), Tatsuoka *et al* (1999), Consoli *et al* (2010) e Schnaid *et al* (2001).

O fato de que, para pequenas deformações, o solo exhibe frequentemente um comportamento não-linear que traz consequências práticas e de caráter fundamental (Burland, 1989). Por exemplo, Jardine *et al* (1986) mostraram que a não-linearidade da relação tensão-deformação do solo produz efeitos muito significativos na interação solo-estrutura, na distribuição de tensões na massa de solo e nos deslocamentos em zonas próximas à áreas carregadas e escavações. Burland (1989) enfatiza que se a natureza não-linear do comportamento do solo a pequenas deformações não é considerada, a interpretação de ensaios de campo pode se tornar confusa e equivocada.

Através dos trabalhos realizados por Atkinson e Salfors (1991) e Mair (1993), Atkinson (2000) apresenta na Figura 2.17 uma típica curva rigidez-deformação, onde se observa a degradação da rigidez com o aumento da deformação, as faixas de deformações a que o solo está submetido em condições de serviço para diferentes estruturas geotécnicas e as faixas de deformações para as quais a rigidez pode ser determinada em diferentes ensaios laboratoriais. Verifica-se que para pequenas deformações a rigidez é relativamente alta, enquanto que, para deformações próximas da ruptura, o seu valor diminui drasticamente. Esta degradação, demonstra claramente a forte dependência da rigidez com o nível de deformação, comprovando o caráter não-linear dos solos.

Assim, vários estudos têm proposto a utilização de um modelo de comportamento baseado em múltiplas superfícies de plastificação, aperfeiçoando assim a concepção do comportamento destes materiais a pequenas deformações. Tatsuoka *et al* (1999) apresenta um exemplo onde são observadas três superfícies de plastificação. A plastificação primária define o limite das deformações elásticas, onde é possível observar que a variação do módulo de variação volumétrica ou cisalhante parece permanecer constante. Neste estágio, as deformações máximas que delimitam esta região são normalmente inferiores a 0,001%. Uma superfície secundária delimita a região onde ainda não ocorrem deformações plásticas em grande escala, porém esta região é marcada pela quebra das ligações cimentantes entre os contatos das partículas, sendo que quando superada a mesma, notáveis mudanças no vetor de incremento

de deformações plásticas são constantes. Por final, uma terceira superfície define o limite onde a partir deste ponto, deformações em larga escala são observadas, e como consequência, ocorre progressiva degradação da estrutura cimentante. Sendo assim, esta superfície é somente afetada por deformações relativamente grandes.

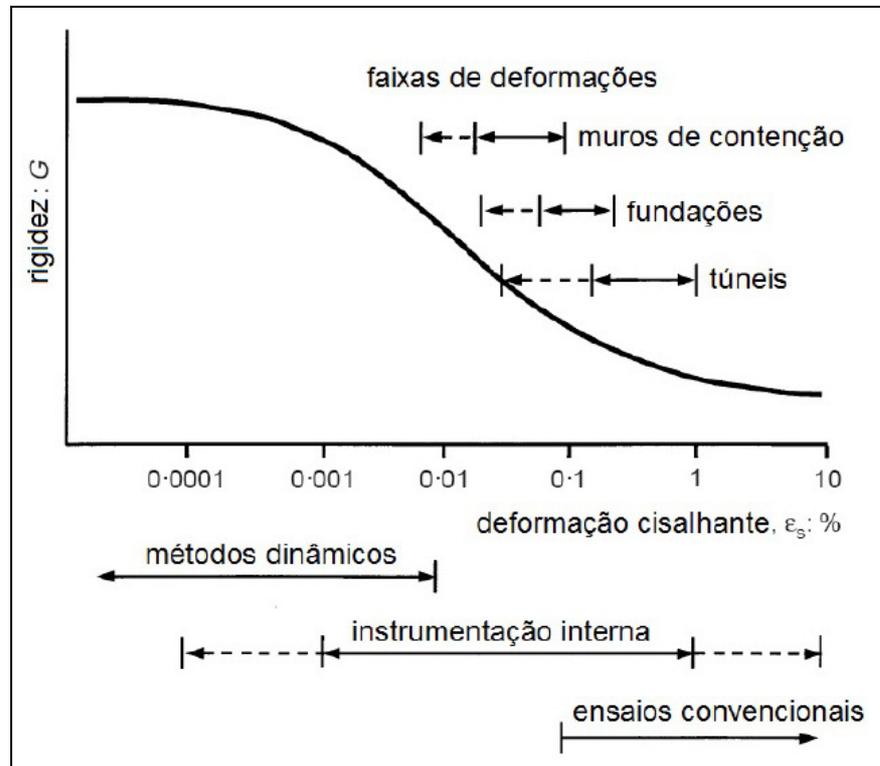


Figura 2.17 – Curva de degradação da rigidez com o nível de deformação (adaptado de Atkinson, 2000)

Rotta *et al* (1998) e Consoli *et al* (2000) investigaram experimentalmente o procedimento usual de obtenção da rigidez de solos cimentados em ensaios triaxiais convencionais, fixando-se na influência da aplicação de tensões confinantes antes e após a cimentação do solo. Os autores verificaram que a degradação da cimentação causou, nas amostras curadas sem confinamento, a queda da rigidez inicial com a tensão de confinamento, ao passo que nas amostras curadas sob tensão verificou-se o aumento com a tensão de confinamento.

Lopes Junior (2011), que estudou misturas de solo residual de arenito Botucatu tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal e verificou que a adição de cal, mesmo em pequenas quantidades, promoveu o aumento substancial da rigidez inicial. O módulo cisalhante tende a aumentar não-linearmente com o aumento da quantidade de cal. Além disso, a redução na

porosidade do material compactado promoveu aumentos substanciais da rigidez inicial dessas misturas.

Galaa *et al* (2011) analisaram dois conjuntos de amostras de solo-cimento (um submerso em água e outro não submerso em água) e observaram que a rigidez inicial aumentou para ambos os conjuntos de amostras, porém, as amostras que não foram submersas em água apresentaram valores de rigidez inicial maiores em comparação com as amostras submersas em água.

Fonini (2012), ao estudar misturas de solo-cimento, observou que o aumento do tempo de cura proporcionou o aumento das medidas de rigidez inicial das amostras estudadas.

2.5 QUANTIFICAÇÃO DA POROSIDADE: POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (PIM)

Como apresentado ao longo desta revisão bibliográfica, a relação vazios/cal (ou a relação vazios/cimento) é utilizada por diversos autores para prever o comportamento mecânico de solos tratados com cal (ou cimento), mostrando-se muito eficiente. Como a porosidade é um fator fundamental desta relação, é importante conhecer seu comportamento, e isso pode ser feito através da análise da sua variação ao longo do tempo de cura.

Basicamente o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, que é muito utilizado na área de concretos e argamassas, fornece duas curvas, a curva de volume acumulado e um histograma de frequência contínuo dos diversos diâmetros de poros constituintes da estrutura. Com a primeira é possível, obter, para um determinado diâmetro de poro, as porcentagens, em relação ao volume de vazios da amostra, dos poros de diâmetro maior ou menor do que o considerado. Já a segunda fornece os intervalos de diâmetros de poros por classe.

A fase aquosa ou água do poro forma o meio o qual gera a hidratação e as reações contendo os produtos de hidratação e os agentes externos nas pastas de cimento. Segundo Oliveira (2000), o contínuo refinamento dos poros, devido ao crescente volume ocupado pelos produtos de hidratação, altera a dimensão dos poros e a interconectividade da rede capilar. O volume de mercúrio introduzido diminui gradativamente, ao longo do tempo, alterando a microestrutura da distribuição dos poros devido a evolução da hidratação das pastas de cimento.

Na fase experimental da sua pesquisa, Oliveira (2000) que estudou pastas de cimento de escória, utilizou amostras cortadas em discos de espessura entre 1,2 e 2 mm a partir de corpos-de-prova com diâmetro interno de 16 mm. Imediatamente após o corte, os discos foram imersos em álcool isopropílico anidro por 10 dias e, em seguida, foram submetidos à secagem em estufa à vácuo a 100° C por 20h. O equipamento utilizado foi da marca Micrometrics modelo AutoPore III 9410. O diâmetro mínimo detectado pelo equipamento é de 3×10^{-9} m (3 nm). O volume de poros com diâmetro superior a 100×10^{-6} m (0,1 mm ou 105 nm) foi desprezado por tratar-se de um volume injetado em baixa pressão, relacionado as fissuras preexistentes nos corpos-de-prova. Como o diâmetro medido por esta técnica é de 3×10^{-9} m (3 nm), toda a faixa detectada é de interesse no estudo da água do poro por abranger a faixa de poros capilares ($5 < \Phi < 1000$ nm). Assim, por meio dos resultados dos ensaios da porosimetria pode-se estimar a quantidade de água de condensação capilar das pastas, em função da umidade relativa do meio com a qual os corpos-de-prova entram em equilíbrio.

Os ensaios realizados por Oliveira (2000), demonstram que o diâmetro dos poros das pastas estudadas concentra-se na faixa de poros capilares entre 10 nm e 100 nm, sendo que para cimento de escória com ativação de silicato de sódio em elevado teor (denominado cimento 5N7,5S) apresentou o menor volume total de vazios comparados com o cimento das outras pastas (cal, CPV, gipsita), porém a faixa de poros está claramente deslocada para diâmetros menores, estando o maior volume de vazios concentrado na faixa de vazios interlamelares. Isto indica a formação de maior quantidade de C-S-H, o que pode ser comprovado por difratogramas de raios-X realizados pelo autor.

Segundo Martínez (2003), além do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, existem outros métodos que podem ser utilizados para a caracterização dos espaços porosos dos solos, sendo os principais apresentados na Figura 2.18, segundo a classificação da União internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC).

Segundo Delage *et al* (1996), entre as várias técnicas disponíveis usadas para estudar a microestrutura do solo, a porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM), a microscopia ótica em lâminas delgadas, a microscopia eletrônica de varredura (SEM) e a microscopia eletrônica de transmissão (TEM) são as mais frequentemente utilizadas pelos engenheiros geotécnicos. Os resultados podem revelar o tipo de mineral, além dos padrões de cimentação e arranjo de grãos. Autores como Al Mukhar (1995), Gens *et al* (1995), Sato *et al* (1995) e Wan *et al* (1995) têm utilizado principalmente a porosimetria por intrusão de mercúrio. Outros autores,

como Araki e Camapum de Carvalho (1995) e Kulikova (1995), têm usado em menor escala a microscopia eletrônica. Mais raramente o processamento de imagens tem sido utilizado (Shi Bin, 1995). O diâmetro dos poros menores, que pode ser medido por intrusão de mercúrio, depende da capacidade máxima de pressão do porosímetro utilizado. Geralmente, instrumentos com pressão máxima de 200MPa ou mais altas estão disponíveis, correspondendo a um diâmetro de poro mínimo de 0,07 μ m. Isto é suficiente para acessar a maioria dos espaços de poros nas argilas menos plásticas. Shirdharan *et al* (1971), *apud* Delage *et al* (1996), mostram que mais de 95% de volume total de uma caulinita (LP=36%; IP=26%) foi intrudido a uma pressão de 100MPa (correspondendo a um diâmetro de poro de 0,014 μ m) dando uma fiel descrição da distribuição do tamanho de poros (DTP). O método de porosimetria por intrusão de mercúrio se aplica para a medição de poros na faixa de 0,003 μ m a 400 μ m, sendo mais adequado na faixa de 0,1 μ m a 100 μ m (British Standards Institution, 1992).

A Figura 2.18 apresenta as faixas de tamanho de poros para as quais cada método possibilita a caracterização dos espaços porosos. É importante salientar que, segundo vários autores, entre os quais Sill *et al* (1973), Lawrence (1978) e Delage (1984) *apud* Martínez (2003), a estrutura dos poros do solo não é afetada durante o processo de intrusão. Esta conclusão foi obtida em função das comparações entre o método de PIM e outros métodos utilizados pelos autores, como por exemplo: a técnica de absorção de nitrogênio e outras técnicas convencionais.

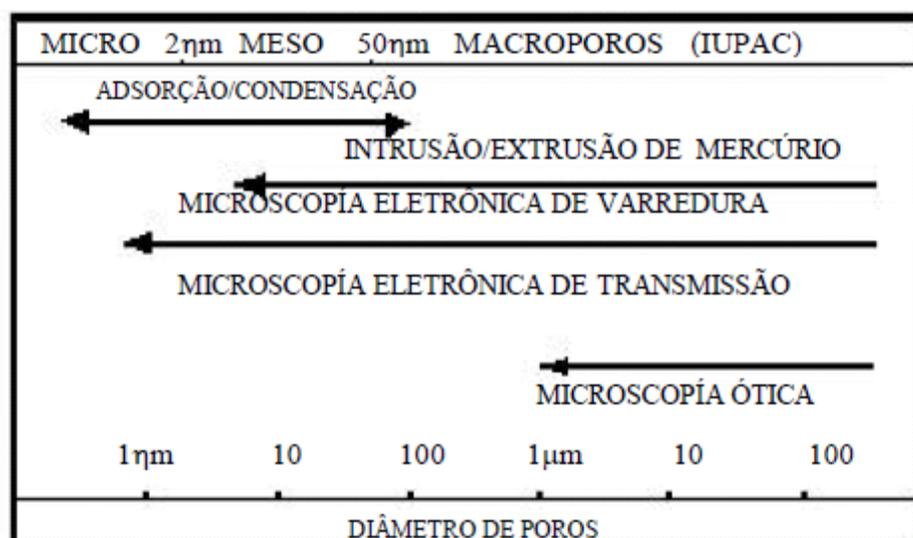


Figura 2.18 – Faixa de aplicação dos principais métodos para caracterização de espaços porosos (Sato, 1998)

Segundo Jucá (1990), a técnica de intrusão de mercúrio é o meio mais conveniente para estudar a distribuição do tamanho de poros do solo, inclusive para tamanhos de poros tão pequenos quanto $0,012\mu\text{m}$ e volumes da ordem de $0,0001\text{ml}$. Isto permite estudos de porosimetria em quase todos os tipos de solos, incluindo os solos finos.

Vilar (1995) observou através de ensaios de porosimetria com solos compactados em diferentes densidades e mesmo teor de umidade, variações dos macroporos, permanecendo inalterado o volume de poros de menores dimensões.

Delage *et al* (1996), estudando as relações entre os métodos de PIM e microscopia eletrônica, no estudo da distribuição de poros de um silte compactado, obtiveram uma boa concordância entre as duas técnicas.

Martínez (2003) analisou a porosidade em amostras compactadas de três solos residuais, utilizando a técnica PIM e a microscopia ótica. A análise dos resultados demonstram uma boa concordância entre os resultados de PIM e de microscopia ótica. Mediante este estudo, o autor ressalta as vantagens de cada método no que diz respeito à identificação, quantificação, variação e classificação de vazios:

- vantagens do método de PIM:
 - determinação e quantificação dos mesoporos;
 - fornecimento de resultados como: volume total de poros e demais índices associados com a curva de distribuição do tamanho dos poros;
 - medida dos poros intra-agregados menores (difíceis de serem vistos pela microscopia ótica, com tamanhos de poros com raio inferior a $0,06\mu\text{m}$).

- vantagens da microscopia ótica:
 - determinação do raio real do poro;
 - identificação do tipo do poro (intra-agregado, interagregado ou em canais) e da sua distribuição na massa de solo;
 - Menor custo

A partir do que foi apresentado neste item, a técnica de MIP apresenta grande potencial para o estudo da porosidade de amostras de solo-cal. Pois, subentende-se que as reações solo-cal também alteram a microestrutura da distribuição dos poros (ocasionando o seu contínuo refinamento devido ao crescente volume ocupado pelos produtos das reações) como relata Oliveira (2000) para pastas de cimento. Além disso, vários autores, entre eles Martínez (2003), conseguiram bons resultados utilizando esta técnica para amostras de diferentes solos. Martínez (2003), apresentou ainda, vantagens relevantes deste método que são fundamentais para a análise da variação da porosidade de misturas solo-cal (como o volume total de poros, que pode ser utilizado para a comparação da porosidade dessas misturas ao longo do tempo de cura).

2.6 METODOLOGIA PARA A PREVISÃO DA VARIAÇÃO DA POROSIDADE: MODELO DE POWERS

O desenvolvimento de modelos que prevêm o comportamento da porosidade, que é um fator fundamental da relação vazios/cal na previsão do comportamento mecânico de misturas solo-cal, ao longo tempo de cura é de grande importância. Com o uso das técnicas para a quantificação da porosidade é possível desenvolver um modelo para prever a variação da porosidade dessas misturas.

Na falta de metodologias para a previsão da porosidade de misturas solo-cal, este item baseia-se no consagrado modelo de Powers, que é utilizado na previsão da porosidade de pastas de cimento.

Segundo Neville (1997), as reações que transformam o cimento Portland em um agente cimentante ocorrem quando o cimento entra em contato com água. A presença da água, os silicatos e aluminatos formam produtos de hidratação que, com o tempo, formam a pasta, firme e dura, de cimento

A evolução da hidratação do cimento determina-se através da quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na pasta, no calor desenvolvido na hidratação, na massa específica da pasta, na quantidade de água combinada quimicamente e na quantidade de cimento não-hidratado presente na pasta de cimento (NEVILLE, 1997).

O produto formado pela hidratação do cimento, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), compõe de 50% a 60% o volume de sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada e é, portanto, a fase mais importante e determinante das suas propriedades. Em nível atômico o C-S-H é formado por camadas com cadeias de SiO_4 , com possíveis substituições do Si por Al (PAULON & KIRCHHEIM, 2011).

Segundo Paulon & Kirchheim (2011), embora a estrutura exata do C-S-H não seja conhecida, vários modelos (Figuras 2.19 e 2.20) têm sido propostos para explicar as propriedades dos materiais. De acordo com o modelo de Powers (1958) e Brunauer (1962), o material tem uma estrutura em camadas com uma elevada área superficial. Essas distâncias sólido-sólido são chamadas de espaços interlamelares. O modelo de Feldman-Sereda (1970) representa a estrutura de C-S-H como arranjo irregular ou dobrado de camadas que são randomicamente dispostas, criando espaços interlamelares de diferentes formas e tamanhos (MEHTA & MONTEIRO, 2008). O modelo de Munich desenvolvido por Wittmann (1976) propõe uma estrutura do C-S-H em forma de uma rede tridimensional de gel amorfo formado por compostos chamados xerogel. O modelo de Jennings, apresentado em 2000, propõe que o C-S-H é uma agregação de precipitados coloidais que são modificados quimicamente durante a hidratação. As Figuras 2.19 e 2.20 apresentam esses modelos. Mehta & Monteiro (2008) *apud* Paulon & Kirchheim (2011), destacam que a morfologia do C-S-H varia desde fibras pouco cristalinas até redes reticulares.

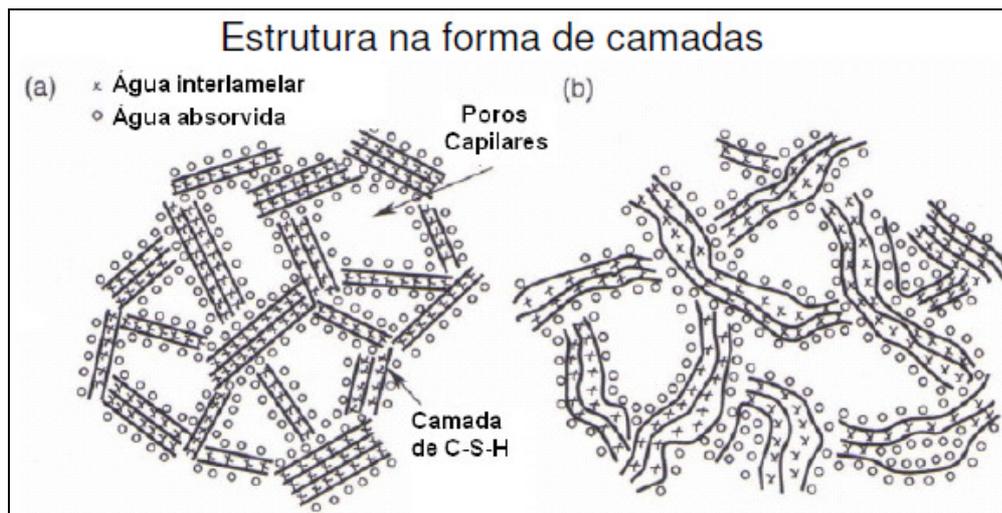


Figura 2.19 – Nível meso do C-S-H, regiões nanocristalinas com escala característica de aproximadamente 5nm. Modelo do C-S-H: (a) Powers e (b) Feldman-Sereda (adaptada de PAULON & KIRCHHEIM, 2011)

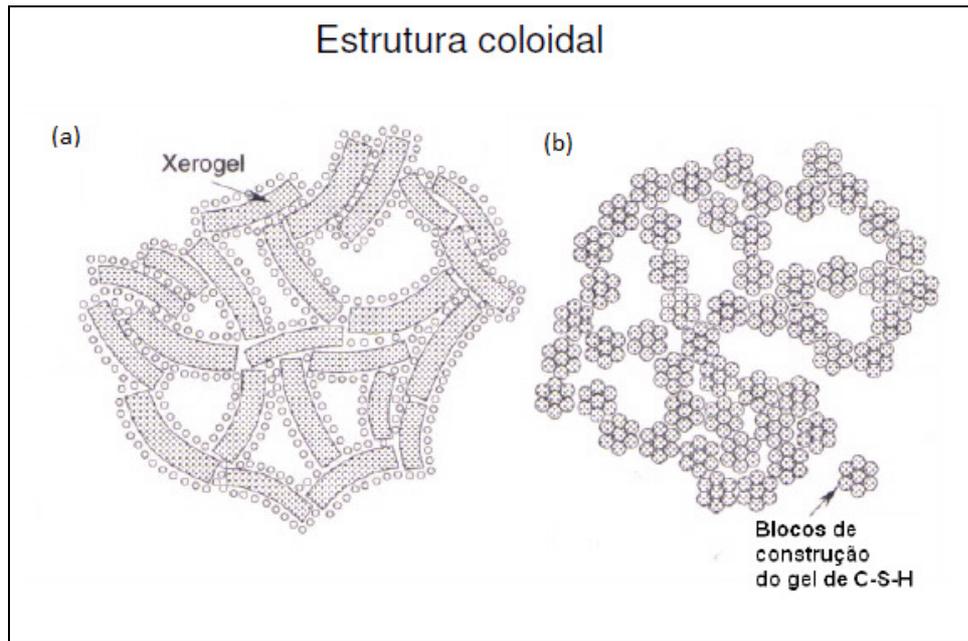


Figura 2.20 – Nível meso do C-S-H, regiões nanocrystalinas com escala característica de aproximadamente 5nm. Modelo do C-S-H: (a) Munich e (b) Jennings (adaptada de PAULON & KIRCHHEIM, 2011)

Segundo Nambiar & Ramamurthy (2008), o modelo de Powers, apresenta um modelo representativo da composição física do concreto fresco e endurecido para concretos de referência. O autor destaca que os modelos são constituídos de 2 diagramas: um para o grau de hidratação de 100% e o outro para o grau de hidratação de 67%, aos 28 dias. Contudo, de acordo com os experimentos de Powers, o cimento utilizado por ele atingiu 67% do grau de hidratação aos 28 dias, sendo que o grau de hidratação, aos 28 dias, depende do tipo de cimento.

O modelo desenvolvido por Powers (1960) expressa a resistência do concreto em função de uma relação gel/vazios, definida como a razão entre o volume de hidratação do cimento e o volume de vazios. A resistência para a relação gel/vazios é dada por: Resistência = k (gel/vazios)ⁿ, em que "k" é a resistência intrínseca do gel de hidratação e "n" é uma constante empírica. A equação gel/vazios considera o grau de hidratação do cimento e assim o fator tempo de cura é incorporado na equação. O volume de cimento hidratado (gel de hidratação) é utilizado como $2,06\alpha V_c$.

$$vazios = 1 - V_{fl} - V_c(1 - \alpha) \quad (\text{Equação 2.4})$$

$$\frac{gel}{vazios} = \frac{2,06\alpha V_c}{1 - V_{fl} - V_c(1 - \alpha)} \quad (\text{Equação 2.5})$$

Onde V_c é o volume de cimento, V_{fl} é o volume de materiais sólidos por m^3 do concreto, α é o grau de hidratação do cimento e 2,06 é o fator de hidratação para o cimento.

Nambiar & Ramamurthy (2008), que estudaram diferentes dosagens de concreto com cimento, areia e cinza volante, fizeram uso do modelo de Powers para a previsão da porosidade das dosagens estudadas. O autor conclui que as porosidades medidas (através da técnica de saturação à vácuo com base na ASTM C 1202/97) apresentaram valores que estão de acordo com a porosidade teórica prevista pelo modelo de Powers. Além disso, o autor enfatiza que relação gel/vazios para o concreto com cinza volante deve ser melhorada incorporando o efeito, em volume, dos produtos formados pela hidratação da cinza volante.

Fonseca (2006) ao estudar dosagens de concreto (traços rico, normal e pobre) com agregado graúdo reciclado e natural, comparou os resultados das resistências à compressão obtidas experimentalmente, e os resultados das resistências à compressão pelo modelo de Powers (1960). De acordo com os resultados obtidos pelo autor, observa-se que as resistências obtidas experimentalmente para os concretos de referência apresentaram valores coerentes com os obtidos pelas equações de Powers. Para esses concretos valores de resistência experimental até 5% superior ao valor teórico, para o traço rico; para o traço normal foi 47% superior e para o traço pobre 61%.

Através do modelo, que expressa a formação do C-S-H, apresentado por Powers (Figura 19a), percebe-se que um processo semelhante ocorre nas misturas solo-cal, durante as reações de hidratação (Figura 2.2). Assim, o modelo de Powers apresenta grande potencial para a previsão da porosidade dessas misturas. Além disso, Nambiar & Ramamurthy (2008) e Fonseca (2006) obtiveram bons resultados em seus experimentos utilizando o modelo de Powers, onde os resultados experimentais foram coerentes com os teóricos.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este programa experimental tem quatro objetivos fundamentais. O primeiro consiste em quantificar a influência da quantidade de cal, da porosidade da mistura compactada, do teor de umidade e do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples no solo-cal estudado. O segundo é verificar a validade do uso da relação vazios/cal na estimativa da resistência à compressão simples, da resistência à tração e da rigidez inicial das misturas solo-cal. O terceiro é analisar a variação a porosidade, em amostras de interesse, das diferentes misturas. E o quarto é a adaptação de um modelo que possa prever a variação da porosidade deste solo tratado com cal.

O programa experimental desta pesquisa foi desenvolvido a partir da metodologia de Projeto de Experimentos. Segundo Ribeiro & Ten Caten (2003) trata-se de uma metodologia apoiada fortemente em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, a execução e a análise de um experimento. O uso de Projeto de Experimentos permite que se estruture a sequência de ensaios de forma a traduzir os objetivos pré-estabelecidos pelo pesquisador.

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

- fatores controláveis:

- *peso específico do solo-cal*: expresso através da porosidade (η) inicial de moldagem ou do peso específica aparente seco (γ_d) da mistura compactada;
- *quantidade de cal* (Ca): massa de cal (c_a) dividida pela massa de solo seco, expressa em porcentagem;
- *teor de umidade* (ω): massa de água (a) dividida pela massa de solo seco, expresso em porcentagem;
- *tempo de cura úmida*: tempo de permanência do corpo-de-prova na câmara úmida após a moldagem até o seu rompimento, expresso em dias;
- fatores constantes:
 - *tipo de solo*: caulim rosa;
 - *tipo de agente cimentante*: cal hidratada (tipo CH II);
 - *temperatura durante a moldagem*: $23^\circ \pm 2^\circ\text{C}$;
 - *taxa de deformação nos ensaios de resistência à compressão simples*: 1,14% por minuto;
- *fatores de ruído*
 - *velocidade de moldagem dos corpos-de-prova*: a moldagem foi realizada em uma prensa que não é automatizada;

As variáveis dependentes são as variáveis de resposta do experimento:

- *resistência à compressão simples* (q_u);
- *resistência à tração* (q_t);
- *rigidez inicial* (G_o);
- *sucção matricial* (S_u);

- *porosidade (η)*;

A relação vazios/cal (V_v/V_{ca}) definida como sendo o volume absoluto de vazios (V_v) dividido pelo volume absoluto de cal (V_{ca}) presentes nas amostras compactadas, é uma variável derivada dos fatores controláveis e será utilizada na análise dos dados.

Basicamente, o programa experimental foi dividido em quatro etapas. Na primeira etapa foram realizados os ensaios de caracterização física do solo e da cal e os ensaios de dosagem da cal, com o objetivo de classificar os materiais e acessar as propriedades necessárias ao desenvolvimento das etapas seguintes.

Na segunda etapa foi realizada uma bateria de ensaios de resistência à compressão simples e de resistência à tração sobre os pontos de moldagem pré-estabelecidos de acordo com o programa de ensaios detalhado no item 3.4. Esta etapa foi desenvolvida para avaliar a influência isolada de cada uma das variáveis investigadas sobre a resistência à compressão simples e sobre a resistência à tração dos solo tratado. Ainda nesta etapa, foram realizadas medidas de sucção matricial em amostras de interesse.

Na terceira etapa foram realizados ensaios para a obter de rigidez inicial das misturas solo-cal estudadas, o programa de ensaios está detalhado no item 3.4. Esta etapa teve como objetivo avaliar a influência isolada de cada uma das variáveis investigadas sobre a rigidez do material tratado.

Na quarta etapa foram realizados ensaios de Porosímetro por Intrusão de Mercúrio (PIM), em amostras de interesse, das diferentes misturas. Esta etapa teve como objetivo avaliar a porosidade dessas misturas ao longo do tempo de cura. O programa detalhado para os ensaios de análise da variação da porosidade encontram-se no item 3.4.

A Tabela 3.1 apresenta as etapas do programa experimental, bem como o tipo e número de ensaios que foram realizados em cada etapa.

No item 3.4 encontram-se detalhadas as etapas para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples, de resistência à tração, de medidas de rigidez inicial e de análise da variação da porosidade. Como o programa de ensaios foi baseado em resultados obtidos na etapa de caracterização, ele será apresentado após os itens referentes aos métodos e materiais.

Tabela 3.1 – Etapas e Ensaio do Programa Experimental

Etapa	Material	Tipo de Ensaio	Número de ensaios
Ensaio de Caracterização	Caulim	Massa Específica Real dos Grãos	3
		Análise Granulométrica	1
		Limite de Plasticidade	1
		Limite de Liquidez	1
		Compactação	1
	Cal	Massa Específica Real dos Grãos	3
Dosagem Cal	Caulim-cal	Método Rogers <i>et al</i> (Método do ICL - 1997)	1
Resistência Mecânica	Caulim-cal	Resistência à compressão simples	384
		Medidas de Sucção Matricial	54
	Caulim-cal	Resistência à Tração por Compressão Diametral	108
Rigidez inicial	Caulim-cal	Medida de Rigidez Inicial pelo equipamento Ultrassônico	480
Análise da Variação da Porosidade	Caulim-cal	Porosímetro por Intrusão de Mercúrio (PIM)	6

Portanto, nos itens 3.2 e 3.3, são apresentados os métodos e materiais utilizados durante o programa experimental, a justificativa para a escolha dos mesmos, sua descrição, bem como referências às normas técnicas utilizadas.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Coleta de amostras

O solo caulim foi fornecido ensacado pelo fabricante. A amostra assim recebida foi armazenada adequadamente no sentido de evitar a sua contaminação.

A cal, adquirida em embalagem de 20 kg foi armazenada em recipientes de vidro, com volume de aproximadamente 4 litros cada, e adequadamente vedados para evitar sua carbonatação prematura em função da umidade do ar.

3.2.2 Preparação das amostras

O material caulim foi armazenado até a data da sua utilização em sacos plásticos, devidamente identificados e vedados. A determinação da umidade higroscópica seguiu os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457/86.

3.2.3 Ensaio de caracterização

Para a caracterização do solo foram utilizados os ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade, compactação e determinação do teor de umidade. A determinações do teor de umidade do solo seguiu os procedimentos descritos pelo anexo da norma NBR 6457/86.

A análise granulométrica do solo foi realizada através da técnica de difração à laser.

A determinação da massa específica real dos grãos do solo e da cal seguiu o método descrito pela NBR 6508/84.

A obtenção dos limites de liquidez e de plasticidade do solo seguiu os métodos descritos nas normas NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente.

Para o ensaio de compactação foram utilizados os procedimentos descritos pela NBR 7182/86.

Para determinação do pH foi empregado um pH-metro micronal B374 com eletrodo de vidro combinado. O eletrodo foi calibrado com soluções de pH 4,0, pH 7,0 e pH 10,0 para a determinação do pH das misturas solo-cal.

3.2.4 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Ensaio de resistência à compressão simples têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade da estabilização com cal ou acessar aspectos relativos à importância de fatores influentes sobre a resistência de solos tratados. Uma das razões para tal é a sua simples e rápida execução. Além disso possui baixo custo, é confiável e é amplamente difundido no meio técnico.

3.2.4.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Foram utilizados, para os ensaios de resistência à compressão simples, corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A confecção dos corpos-de-prova foi

realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura.

Após a pesagem dos materiais (solo, cal e água) com precisão de 0,01 g, os materiais eram misturados com o auxílio de uma espátula metálica, até que a mistura adquirisse coloração uniforme. Em seguida, a água era adicionada continuando o processo de mistura até que a homogeneidade fosse obtida.

A quantidade de solo e cal constituem a massa seca total. Assim, a quantidade de cal necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa seca de solo, sendo que a quantidade de água (teor de umidade) era calculada em relação à massa seca total. A quantidade total de mistura permitia a moldagem de um corpo-de-prova e uma sobra para determinação do teor de umidade.

Após a mistura dos materiais, a quantidade de mistura necessária para confecção de um corpo-de-prova era dividida em três partes iguais, armazenadas em recipientes com tampa para evitar a perda da umidade, para posterior compactação.

Ao final deste processo, duas pequenas porções da mistura eram retiradas e colocadas em cápsulas para determinação do teor de umidade. A média dos dois teores de umidade medidos foi adotada como sendo o teor de umidade do corpo-de-prova.

A amostra era, então, compactada estaticamente em três camadas no interior de um molde de ferro fundido tripartido, devidamente lubrificado, de maneira que cada camada atingisse o peso específico aparente seco definido, tomando-se o cuidado de escarificar levemente os topos acabados da primeira e da segunda camada para aumentar a integração entre as camadas superpostas.

Concluído o processo de moldagem, o corpo-de-prova era imediatamente extraído do molde, sua massa e medidas (diâmetro e altura) devidamente anotados com precisão de 0,01g e 0,1mm respectivamente, e acondicionado em um saco plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas do teor de umidade.

Os corpos-de-prova assim obtidos eram, então, armazenados e curados por períodos de cura específicos para cada material, em um ambiente com temperatura controlada (temperatura de $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$).

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

- Massa específica aparente seca (γ_d): grau de compactação de 99% a 101%, sendo o grau de compactação definido como o valor de γ_d efetivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de γ_d definido como meta. (Exemplo: para $\gamma_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$ considerou-se aceitáveis corpos-de-prova que apresentarem valores de γ_d compreendidos entre 1,58 e 1,62 g/cm^3).
- Teor de umidade (ω): valor especificado $\pm 0,5$ pontos percentuais (Exemplo: para um objetivo de $\omega=20\%$ foram aceitos valores compreendidos entre 19,5% e 20,5%).
- Dimensões: diâmetro (tolerância de $\pm 0,5 \text{ mm}$) e altura (tolerância de $\pm 1 \text{ mm}$).

A Figura 3.1 apresenta o aspecto final de um corpo-de-prova moldado de acordo com os procedimentos descritos anteriormente.



Figura 3.1 – Corpo-de-prova de caulim-cal para o ensaio de resistência à compressão simples

Devido à dispersão característica dos ensaios de resistência à compressão simples, foram moldados corpos-de-prova em triplicata para cada ponto de moldagem (definidos no item 3.4) obtendo-se assim, uma maior confiabilidade dos resultados.

3.2.4.2 Procedimento de Ensaio

Para estes ensaios foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 100 kN, além de anéis dinamométricos calibrados com capacidade de 10 kN e 50 kN e resolução de 0,005 kN (0,5 kgf) e 0,023 kN (2,3 kgf) respectivamente (Figura 3.2a). A velocidade de deformação destes ensaios eram de 1,14 mm por minuto. O procedimento dos ensaios de resistência à compressão simples seguiram a norma americana ASTM D 5102/1996.

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

A temperatura da água do tanque foi controlada e mantida em 23 ± 3 °C. Imediatamente antes do ensaio de resistência à compressão simples, os corpos-de-prova foram retirados do tanque 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 (Figura 3.2b).



Figura 3.2a – Ensaio de Resistência à Compressão Simples



Figura 3.2b – Corpo-de-prova de caulim-cal no ensaio de Resistência à Compressão Simples

Como critério de aceitação para o ensaio de resistência à compressão simples, estipulou-se que as resistências individuais de três corpos-de-prova não deveriam se afastar mais de 10% da resistência média desse conjunto. Este critério é utilizado em todas as pesquisas realizadas

a partir de ensaios de resistência à compressão simples no LEGG/ENVIRONGEO. Assim, esta pesquisa também adotou este critério, para poder comparar os resultados obtidos com os resultados de trabalhos realizados anteriormente.

3.2.5 Medidas de Sucção

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

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

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

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

Os procedimentos adotados para a medição da sucção matricial são os mesmos que os utilizados por Feuerharmel (2003), por Foppa (2005), por Lopes Junior (2007), por Dalla Rosa (2009) e Lopes Junior (2011) e são descritos a seguir.

Após a realização do ensaio de resistência à compressão simples, com o auxílio de uma espátula, uma pequena amostra cilíndrica, de aproximadamente 5 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura, é obtida do corpo-de-prova rompido. Além da amostra para sucção, através de raspagem do corpo-de-prova ensaiado, retirava-se uma amostra para determinação do teor de umidade.

Dois pedaços de papel filtro, com área de aproximadamente 2 cm^2 , são colocados na parte superior da amostra sem sobreposição dos mesmos (Figura 3.3). O papel filtro era utilizado diretamente da caixa, na condição seco ao ar. O manuseio do papel filtro durante todo o ensaio é realizado com o auxílio de uma pinça metálica para evitar qualquer alteração nas características originais do papel. Após, cada conjunto (papel filtro + amostra) foi protegido por filme plástico de PVC e embalado em um saco plástico selado para garantir que o fluxo ocorra somente entre o solo e o papel, sem interferência do ambiente externo.

As amostras já embrulhadas e identificadas eram, então, colocadas em uma caixa de isopor com tampa por um período de 7 dias, necessário para que o equilíbrio de sucção entre o solo e o papel filtro seja alcançado.

Após alcançado o equilíbrio, os papéis filtro eram removidos rapidamente da amostra e colocados em recipientes plásticos numerados e com tampa. Essa operação era realizada dentro de 3 a 5 segundos. O peso dos dois conjuntos (papel filtro úmido + recipiente) foi determinado utilizando-se uma balança com resolução de $0,0001 \text{ g}$.

Depois de obtido o peso úmido de cada conjunto, os papéis eram retirados dos recipientes, colocados em tampas de cápsula (previamente identificada com a mesma numeração do recipiente) e levados a uma estufa de 60°C durante 48 horas. Após secagem, cada papel filtro foi retirado da estufa e rapidamente recolocado no mesmo recipiente utilizado para obtenção do peso úmido. Determina-se, então o peso seco de cada conjunto.



Figura 3.3 – Corpo-de-prova de caulim-cal para o ensaio de sucção matricial

Após a obtenção do peso seco, os papéis filtro eram descartados e os recipientes pesados. Através desses dados, o teor de umidade de cada papel filtro foi calculado. Com o teor de umidade e a correspondente equação de calibração, obteve-se a sucção do papel filtro, e a média dos dois valores considerada igual à sucção existente na amostra.

3.2.6 Ensaio 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 que utilizam a aplicação de outros esforços que não os de tração e interpretam os resultados obtendo indiretamente 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. Neste tipo de ensaio a resistência à tração é determinada através da equação abaixo:

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

P = carga suportada pelo corpo-de-prova;

D = diâmetro do corpo-de-prova;

H = altura do corpo-de-prova.

3.2.6.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Foram utilizados, para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A confecção dos corpos-de-prova foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura descritos no item 3.2.4.1. As mesmas tolerâncias (especificadas no item 3.2.4.1) utilizadas para os corpos-de-prova de resistência à compressão simples, foram utilizadas para as amostras de resistência à tração por compressão diametral.

A Figura 3.4 apresenta o aspecto final de um corpo-de-prova para o ensaio de resistência à tração.



Figura 3.4 – Corpos-de-prova de caulim-cal para o ensaio de resistência à tração

Devido à dispersão característica dos ensaios de resistência à tração, foram moldados corpos-de-prova em triplicata para cada ponto de moldagem (definidos no item 3.4) obtendo-se assim, uma maior confiabilidade dos resultados.

3.2.6.2 Procedimento de Ensaio

Para estes ensaios foram utilizados os mesmos equipamentos e os mesmos procedimentos do ensaio de resistência à compressão simples, descritos no item 3.2.4.2, apenas com uma diferença: as amostras ficavam dispostas no sentido horizontal (Figura 3.5), enquanto que nos ensaios de resistência à compressão simples as amostras ficavam dispostas no sentido vertical. Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados segundo a norma NBR 7222/83.



Figura 3.5a – Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

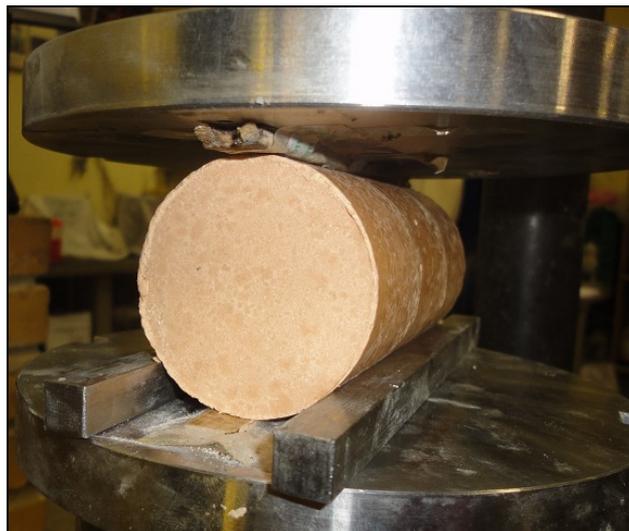


Figura 3.5b – Corpo-de-prova de caulim-cal no ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

3.2.7 Ensaios de medidas de Rigidez Inicial

Os ensaios de medidas de Rigidez Inicial (G_0) foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Portugal, durante o programa de Doutorado Sanduíche.

Os ensaios visaram a determinação do módulo cisalhante elástico (G_0) das misturas solo-cal, tornando assim possível, através das formulações de elasticidade, o cálculo de qualquer outro parâmetro elástico almejado.

3.2.7.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Foram utilizados, para os ensaios de medida de rigidez inicial, corpos-de-prova cilíndricos de 7 cm de diâmetro e 14 cm de altura. Esta dimensão foi utilizada por ser considerada adequada para a realização de ensaios de medida de rigidez inicial, nesse tipo de material.

A confecção dos corpos-de-prova foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação (neste caso em 5 camadas), desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura descritos no item 3.2.4.1. As mesmas tolerâncias (especificadas no item 3.2.4.1) utilizadas para os corpos-de-prova de resistência à compressão simples, foram utilizadas para as amostras de medida de rigidez inicial.

A Figura 3.6 apresenta o aspecto final de um corpo-de-prova submetido ao ensaio de medidas de rigidez inicial.



Figura 3.6 – Corpo-de-prova de caulim-cal submetido ao ensaio de medidas de rigidez inicial

Foram moldados um número específico de corpos-de-prova para cada ponto de moldagem. Este número específico está definido no item 3.4.

3.2.7.2 Procedimento de Ensaio

Para os ensaios de medida de rigidez inicial foi utilizado um equipamento ultrassônico denominado Pundit Lab, da marca Proceq.

O equipamento Pundit Lab consiste basicamente em uma unidade de emissão e recepção de ondas, um conjunto de transdutores de ondas “S” e um conjunto de transdutores de ondas “P”, cabos, acoplantes (para unir os cabos aos transdutores e à unidade de emissão e recepção de ondas), cabo USB (para acoplar a unidade de emissão e recepção de ondas ao computador) e um *software* para aquisição de dados.

O ensaio consiste em posicionar o corpo-de-prova sobre o transdutor receptor de ondas. O transdutor emissor, por sua vez, é posicionado sobre o corpo-de-prova. Acima e abaixo dos transdutores foram colocados pequenos “pesos” a fim de garantir um melhor contato entre os

transdutores e o corpo-de-prova (Figura 3.7). Além disso, foi utilizado o gel condutor de ultrassom, da marca Mercur, para facilitar o envio das ondas ultrassônicas. Primeiro eram realizadas as leituras das ondas primárias (ondas “P” de compressão) e posteriormente das ondas secundárias (ondas “S” de cisalhamento). Os transdutores de ondas “P” e “S” são observados na Figura 3.8. Os transdutores utilizados eram de 82 kHz e 100 kHz para as ondas “P” e para as ondas “S”, respectivamente.



Figura 3.7 – Equipamento Ultrassônico Pundit Lab sendo utilizado no ensaio de medidas de Rigidez Inicial de uma amostra de caulim-cal



Figura 3.8 – Transdutores de Ondas “P” e “S”

O corpo-de-prova devidamente posicionado era submetido a passagem de ondas com diferentes frequências (24, 37, 54 e 82 kHz). As ondas sísmicas foram analisadas no domínio do tempo (“Time Domain”), que se traduz na identificação do tempo da primeira chegada da onda emitida de um extremo ao outro do corpo de prova. A onda que era, então, emitida pela unidade do Pundit Lab (através de um comando no *software*) era transmitida para o transdutor emissor (de ondas “P” ou “S”) que a propagava no corpo-de-prova. Posteriormente, o transdutor receptor (de ondas “P” ou “S”) a captava, e levava a informação à unidade do Pundit Lab, que a conduzia ao software para aquisição dos dados. Neste software era possível obter o tempo de atraso da onda (em μs).

A Figura 3.9 ilustra exemplos de ondas “P” e “S” no software do Pundit Lab. Foram utilizadas ondas do tipo senoidal. Estas ondas foram adotadas após uma bateria de ensaios experimentais, nos quais identificou-se uma resposta mais clara para as frequências utilizadas.

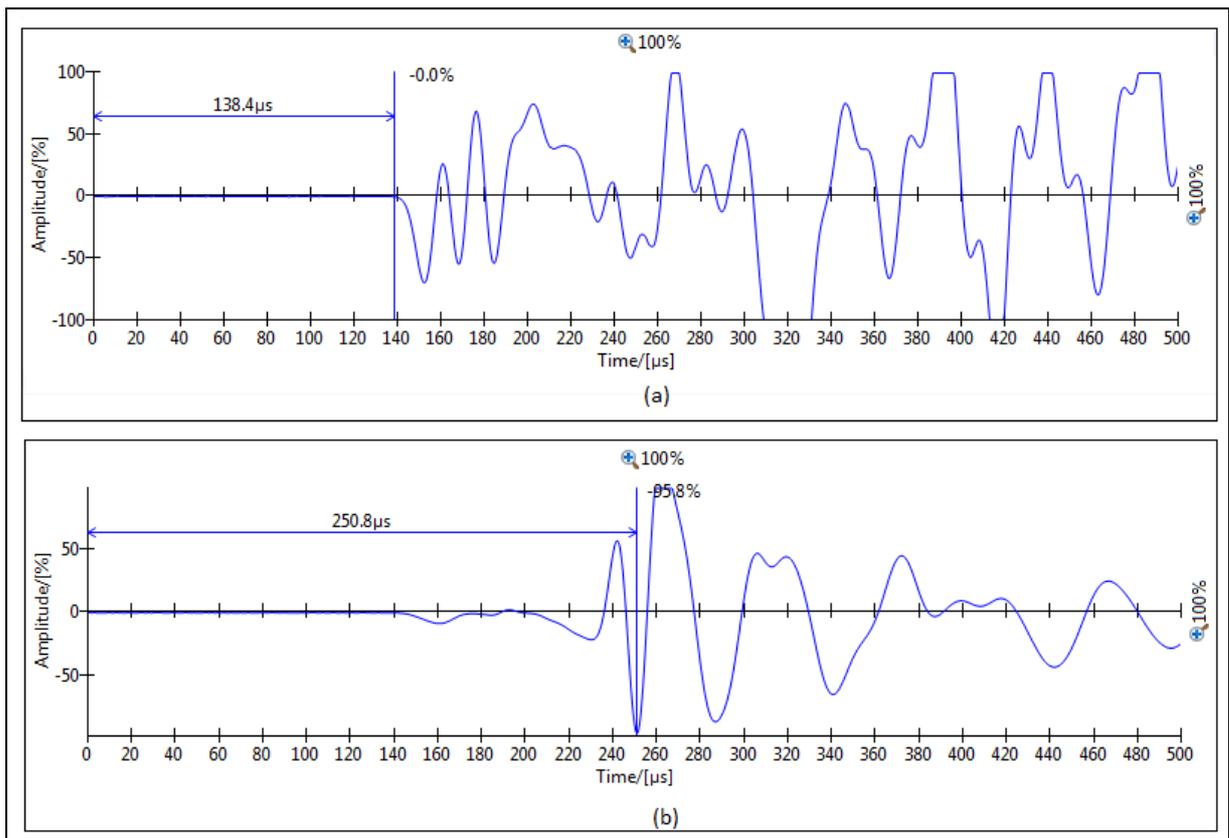


Figura 3.9 – Exemplos de Ondas no equipamento ultrassônico Pundit Lab: (a) onda “P” e (b) onda “S”

As respostas das ondas secundárias (“S”) foram utilizadas para a obter o módulo cisalhante a pequenas deformações (G_0). As leituras das ondas “P” auxiliaram na interpretação das leituras das ondas “S”, fornecendo mais precisão aos resultados.

O tempo entre a transmissão e a recepção da onda é o tempo de viagem da mesma, com o qual pode-se calcular a velocidade da onda cisalhante V_s , e por sua vez, o módulo cisalhante elástico através da equação:

$$G_0 = \rho V_s^2 = \rho \left(\frac{L^2}{t^2} \right)$$

Onde ρ é o peso específico do solo, L é a distância entre os transdutores e t é o tempo de viagem da onda.

Uma das vantagens deste tipo de ensaio é que se trata de um ensaio não destrutivo, que permite medições de G_0 em vários tempos de cura em um único corpo-de-prova.

Ao final das leituras para as medidas de rigidez inicial, as amostras foram rompidas à compressão simples com os mesmos procedimentos descritos no item 3.2.4.2. Contudo, neste caso, a prensa utilizada foi a do LABGEO-FEUP, que consiste em uma prensa automática com capacidade máxima de 100 kN equipada com células de carga de 5, 10, 20, 25 e 100 kN (Figura 3.10). Além disso, amostras de interesse foram submetidas ao ensaio de sucção matricial com os mesmos procedimentos descritos no item 3.2.5.

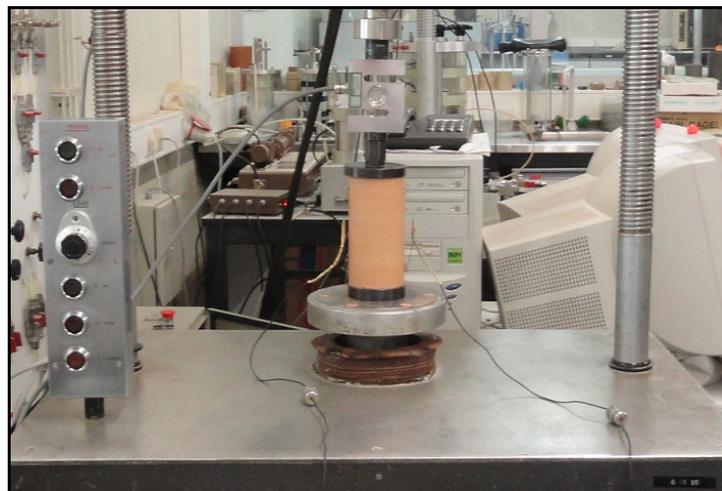


Figura 3.10 – Ensaio de resistência à compressão simples de uma amostra de caulim-cal na prensa automática do LABGEO-FEUP

Após a obtenção dos resultados de resistência à compressão simples no LABGEO-FEUP, os mesmos foram comparados com os resultados de resistência à compressão simples obtidos no LEGG/ENVIRONGEO-UFRGS. Após esta comparação, observou-se que os resultados são similares, portanto, a resistência à compressão simples do caulim-cal estudado independe do equipamento utilizado e do tamanho da amostra.

3.2.8 Ensaios para a Análise da Variação da Porosidade

A análise da variação da porosidade foi realizada através da técnica de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM). Esta técnica foi escolhida, por ser uma das mais utilizadas no meio técnico. Este ensaio determina a distribuição do tamanho de poros, do volume total de poros e da área específica do material, bem como estima através de correlações, a curva de retenção de umidade.

Estes ensaios foram realizados segundo a norma técnica inglesa BS 7591 (BSI,1992) no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Vale dos Sinos – UNISINOS em São Leopoldo, Brasil.

3.2.8.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Foram utilizados, para os ensaios de porosímetro por intrusão de mercúrio, corpos-de-prova prismáticos cujas dimensões: largura, altura e comprimento foram definidas, respectivamente, como 7, 7 e 25 mm. A confecção dos corpos-de-prova foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, acondicionamento, armazenagem e cura descritos no item 3.2.4.1. Contudo, foi utilizado um molde de ferro fundido prismático provido de uma cavidade, também prismática, para a moldagem dos corpos-de-prova (Figura 3.11). A compactação foi realizada através da prensagem da quantidade de material necessário para a amostra a ser ensaiada. A desmoldagem das amostras foi realizada por extrusão.

A Figura 3.12 apresenta o aspecto final de um corpo-de-prova para o ensaio de porosímetro por intrusão de mercúrio.

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

- Massa específica aparente seca (γ_d): grau de compactação de 99% a 101%, sendo o grau de compactação definido como o valor de γ_d efetivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de γ_d definido como meta. (Exemplo: para $\gamma_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$ considerou-se aceitáveis corpos-de-prova que apresentarem valores de γ_d compreendidos entre 1,58 e 1,62 g/cm^3).
- Teor de umidade (ω): valor especificado $\pm 0,5$ pontos percentuais (Exemplo: para um objetivo de $\omega=20\%$ foram aceitos valores compreendidos entre 19,5% e 20,5%).
- Dimensões: tolerância de $\pm 0,1 \text{ mm}$.

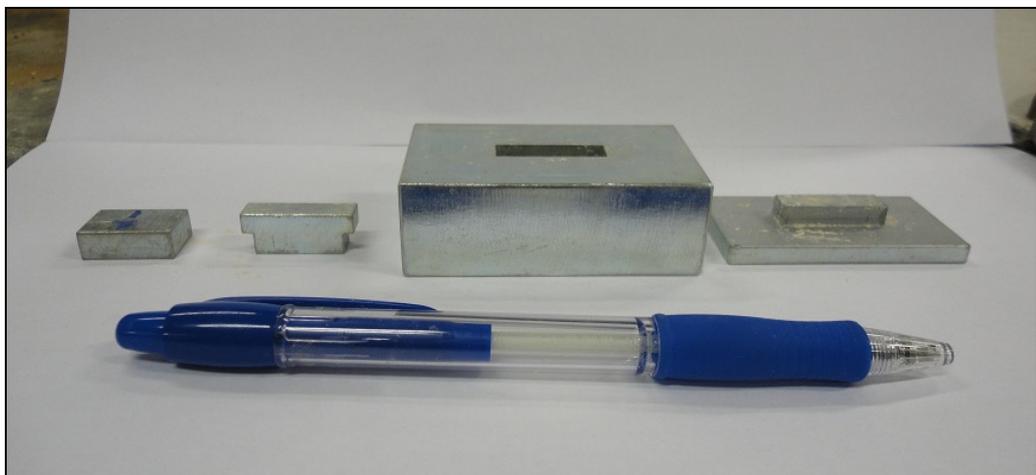


Figura 3.11- Molde utilizado para a confecção das amostras para o ensaio de porosímetro por intrusão de Mercúrio PIM



Figura 3.12 – Aspecto final de um corpo-de-prova para o ensaio de porosímetro por intrusão de mercúrio

Para o ensaio de porosímetro por intrusão de mercúrio foram moldadas amostras de interesse, a partir dos pontos de moldagem definidos no item 3.4.

3.2.8.2 Procedimento de Ensaio

A técnica de porosímetro por intrusão de mercúrio se baseia no fato de que o elemento mercúrio (Hg) se comporta como um fluido não-molhante em relação à maior parte das substâncias, contudo, não penetra espontaneamente em pequenos vazios destes materiais a menos que se aplique uma pressão sobre ele. Se uma amostra de um sólido poroso é encerrada em um recipiente dotado de um capilar, sendo feito o vácuo sobre a mesma e sendo preenchido o recipiente e o capilar com mercúrio, ao se aumentar a pressão sobre o líquido este penetrará nos poros da amostra reduzindo seu nível no capilar. Através do registro da redução do nível de mercúrio no capilar, juntamente com a pressão aplicada se obtém a curva porosimétrica.

De modo geral, o ensaio de PIM fornece a distribuição quantitativa e volumétrica dos poros. A distribuição dos tamanhos dos poros é apresentada dentro da faixa de $0,003\mu\text{m}$ a $400\mu\text{m}$ de diâmetro equivalente. A Figura 3.13 apresenta um esquema do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

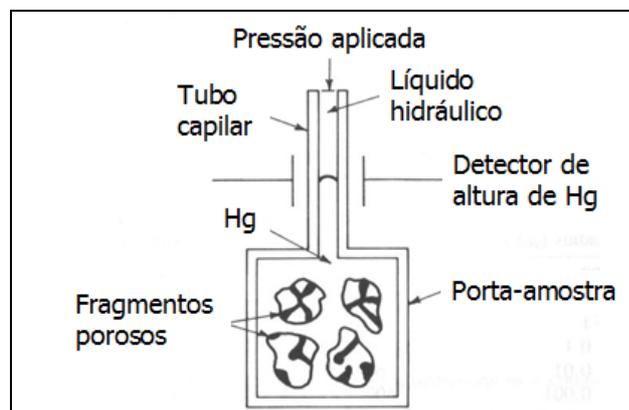


Figura 3.13 – Porosimetria por intrusão de mercúrio (Técnicas de Caracterização, 2006)

O ensaio aplicado teve como objetivo medir o espectro de dimensões de poros das misturas solo-cal estudadas. Os ensaios foram realizados através da intrusão de mercúrio sob pressão crescente em amostras de solo-cal previamente secas em estufa. Primeiramente as amostras foram colocadas em um tubo capilar provido de um porta amostra (Figura 3.14) e em seguida

foram colocadas no equipamento para a realização da técnica de PIM, sendo submetidas ao vácuo. Durante o ensaio foi efetuada a medição do volume de mercúrio penetrante, em função da pressão aplicada. O porosímetro utilizado nesta tese permite a aplicação contínua da intrusão de mercúrio. Através do sistema de aquisição automática de dados do equipamento, o volume de mercúrio intrudido foi medido automaticamente, até decorrido o intervalo de tempo necessário para atingir a estabilização. Foram aplicadas pressões no intervalo de 6,9 a 344 kPa durante o ensaio de porosímetro por intrusão de mercúrio.



Figura 3.14 – Amostra de caulim-cal dentro do tubo capilar provido de um porta amostra para a realização do ensaio de PIM

O equipamento para a técnica de porosímetro por intrusão de mercúrio utilizado nesta pesquisa é observado na Figura 3.15.



Figura 3.15 – Porosímetro por intrusão de mercúrio do Laboratório de Materiais de Construção da UNISINOS

3.3 MATERIAS

3.3.1 Caulim

O material denominado “caulim” utilizado nesta pesquisa é comercialmente conhecido como caulim rosa, originário do município de Pântano Grande-RS. Devido a sua composição mineralógica, os solos caoliníticos (tal como o caulim) não apresentam expansividade.

O caulim é composto por 22% de argila ($< 0,002$ mm) e 78% de silte (0,002 a 0,075 mm). A Figura 3.16 mostra a curva granulométrica do caulim rosa, e a Tabela 3.2 apresenta as propriedades físicas do material.

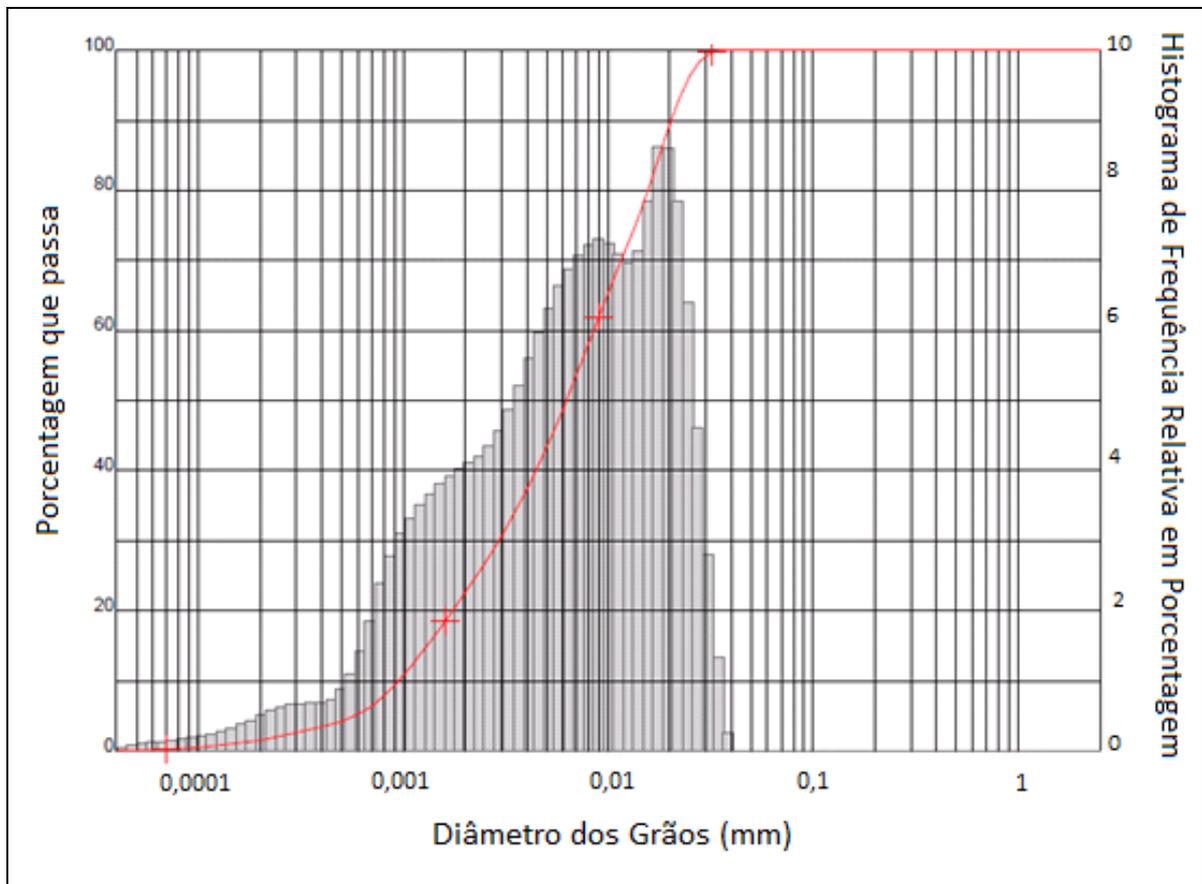


Figura 3.16 – Curva granulométrica do caulim (rever histograma)

A partir da análise da curva granulométrica e da tabela de propriedades físicas percebe-se que mais de 100% do material passa na peneira 200 (0,075 mm), e que essa porcentagem passante se distribui entre as frações silte (78%) e argila (22%). O limite de liquidez (38,2%) é baixo, considerando a média apresentada pelas argilas. O índice de plasticidade (3,7%) indica um

solo fracamente plástico ($1 < \text{Índice de Plasticidade} < 5$). Portanto, o caulim rosa, de acordo com o SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), é classificado como um silte de baixa plasticidade.

Tabela 3.2 – Propriedades físicas do caulim

Propriedades	Valores	Norma seguida para classificação e/ou ensaio	Observações
Limite de Liquidez (LL)	38,2	NBR 6459/84	-
Limite de Plasticidade (LP)	34,5	NBR 7180/84	-
Índice de Plasticidade (IP)	3,7	-	-
Massa Específica Real dos Grãos (G)	2,55 g/cm ³	NBR 6508/84	Média de 3 determinações
% de Silte ($0,002 < \phi < 0,06$ mm)	78%	Ensaio de difração à laser	-
% de Argila ($\phi < 0,002$ mm)	22%		

A Figura 3.17 apresenta as curvas de saturação (90% e 100%) e as curvas de compactação (energia modificada e normal) para o caulim.

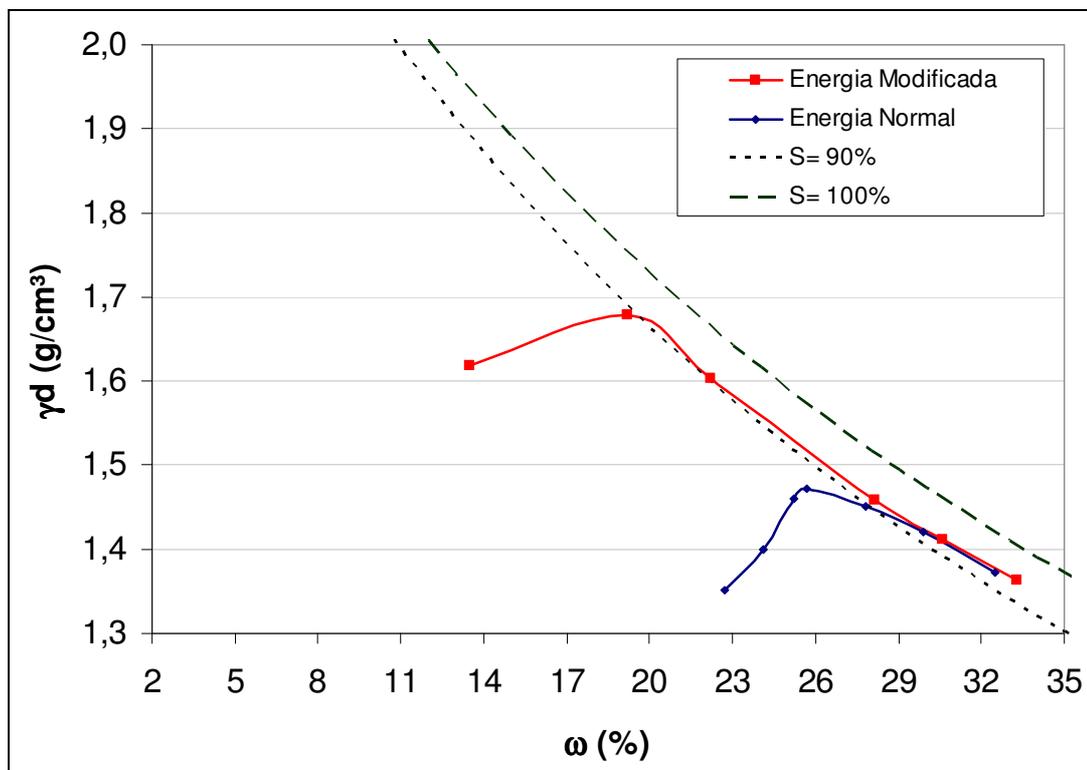


Figura 3.17 – Curvas de compactação e curvas de saturação para o material caulim

3.3.2 Cal

A cal utilizada no trabalho é uma cal hidratada dolomítica do tipo CH II, comercialmente chamada de “Primor Extra”, produzida na cidade de Caçapava do Sul - RS. A Tabela 3.3 apresenta os resultados de ensaios de caracterização da cal utilizada, fornecida pelo fabricante, comparando com as exigências da NBR 7175/86.

Os ensaios de massa específica da cal seguiram as recomendações da NBR NM 23/2001. Obteve-se, a partir de três determinações o valor médio de 2,49 g/cm³.

Tabela 3.3 – Caracterização da cal utilizada

Propriedades	Limites da NBR 7175/86	Análise
Densidade	600 g/l	510 g/l
Perda ao Fogo	-	23,3%
Resíduo Insolúvel	-	4,7%
CO ₂ (anidrido carbônico)	5%	2,2%
Óxidos Totais	88%	94,8%
Óxidos não Hidratados	15%	11%
CaO	-	44,8%
MgO	-	27,9%
Umidade	1,5%	0,6%
Resíduo na peneira 0,600 mm	0,5%	0,0%
Resíduo na peneira 0,075 mm	15%	8,0%

*Dados do fabricante

3.3.2.1 Dosagem da cal

As porcentagens (3% a 9%) de cal, para o solo-cal em estudo, foram definidas a partir do método do ICL (Rogers *et al*, 1997) de dosagem para solo-cal, sendo que as porcentagens definidas estão de acordo com a experiência brasileira e internacional, tanto em nível experimental quanto em aplicações diversas como, por exemplo, em rodovias.

Os resultados de dosagem da cal pelo método do ICL, para o solo em estudo, são observados nas Figura 3.18, demonstrando que as misturas adquirem pH constante a partir da adição de 3% de cal.

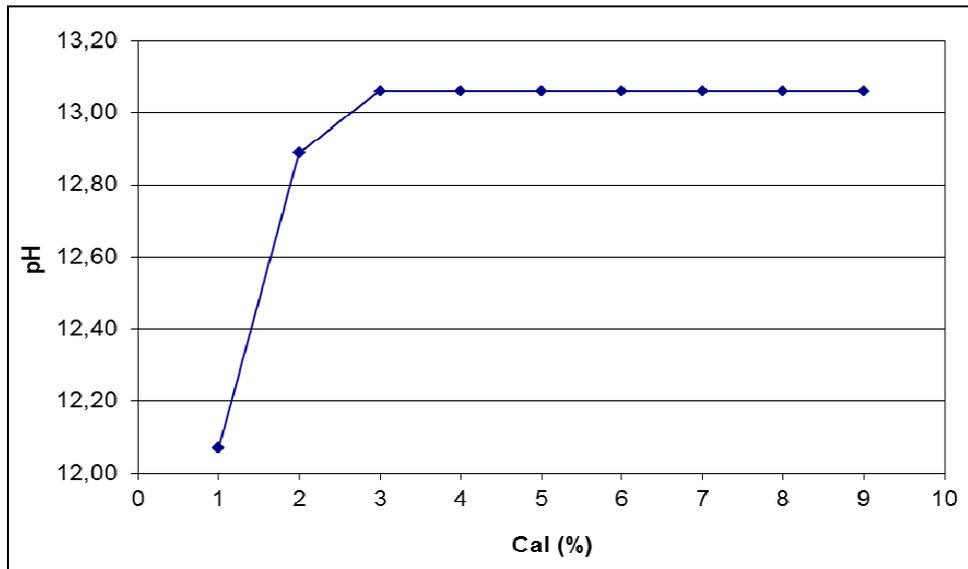


Figura 3.18 – Dosagem da cal pelo método do ICL para o solo-cal em estudo

3.3.3 Água

A água utilizada para a moldagem dos corpos-de-prova foi a água potável proveniente da rede de abastecimento pública. Já para os ensaios de caracterização utilizou-se água destilada, quando especificada pela respectiva norma.

3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS

3.4.1 Definição dos Pontos de Moldagem

O programa de ensaios, para os experimentos realizados nesta pesquisa, é observado na Figura 3.19, a partir das curvas de compactação do material caulim. Nela observa-se as curvas de compactação para o solo caulim nas energias normal e modificada, os pontos de moldagem dos corpos-de-prova e as curvas de saturação de 100% e 90%.

Observa-se que os pontos de moldagem foram posicionados em três linhas verticais (com seus respectivos pontos de moldagem), denominadas linha “A”, com um mesmo teor de umidade e diferentes pesos específicos aparentes secos. A Tabela 3.4 apresenta os pares peso específico aparente seco e teor de umidade para todos os pontos do programa de ensaios.

A posição dos pontos de moldagem foi estabelecida de modo que estes fossem compreendidos dentro de uma faixa de massas específicas aparentes secas e teores de umidade exequíveis em uma situação de campo.

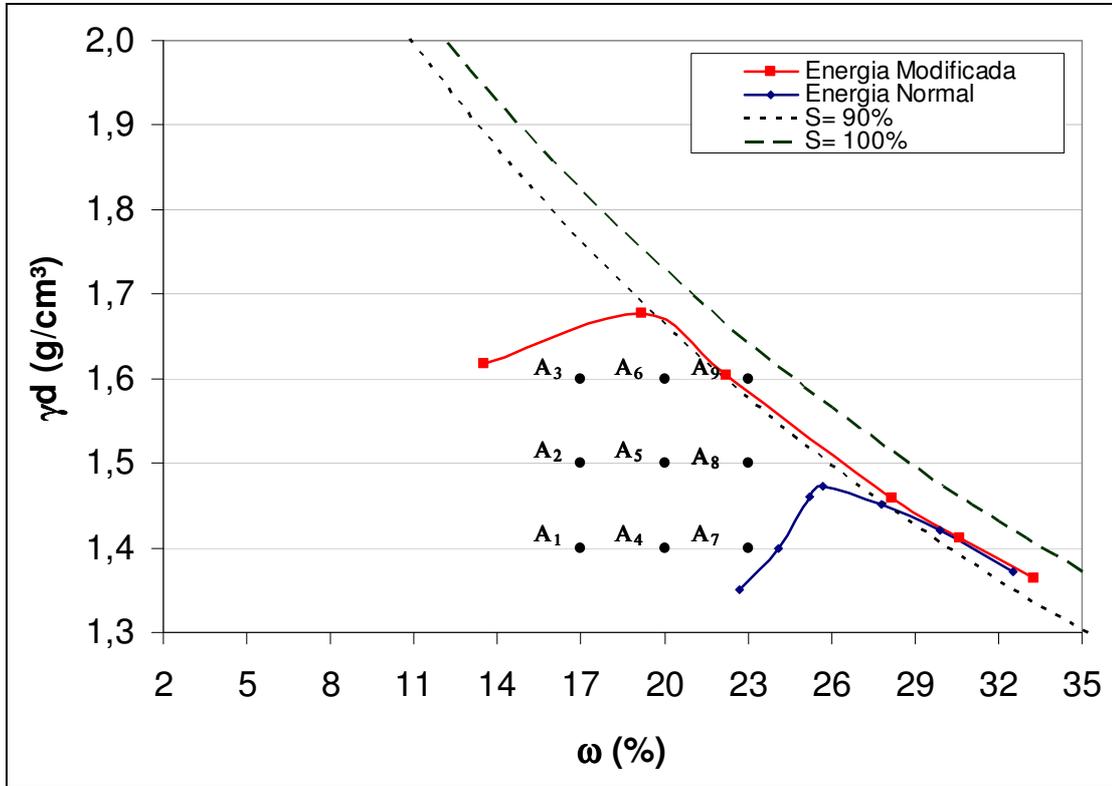


Figura 3.19 – Programa de ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração e medidas de rigidez inicial para os ensaios de caulim-cal

Tabela 3.4 – Pontos de moldagem para os ensaios de caulim-cal

Ponto	γ_d (g/cm ³)	ω (%)
A ₁	1,40	17,0
A ₂	1,50	17,0
A ₃	1,60	17,0
A ₄	1,40	20,0
A ₅	1,50	20,0
A ₆	1,60	20,0
A ₇	1,40	23,0
A ₈	1,50	23,0
A ₉	1,60	23,0

3.4.1.1 Ensaio de Resistência à Compressão Simples e Sucção

O programa de ensaios de resistência à compressão simples teve por objetivo avaliar a influência das variáveis: quantidade de cal, porosidade, teor de umidade e tempo de cura sobre a resistência à compressão simples das misturas solo-cal. Para que seja possível a mensuração da influência de uma variável isoladamente é necessário que as outras variáveis sejam mantidas constantes.

Os pontos A₁ a A₉ foram moldados com 4 diferentes porcentagens de cal (3%, 5%, 7% e 9%) para 3 diferentes tempos de cura (28, 90 e 360 dias). As amostras foram moldadas em triplicata.

Posteriormente ao ensaio de resistência à compressão simples, amostras de interesse foram submetidas aos ensaios de sucção matricial.

3.4.1.2 Ensaio de Resistência à tração

O programa de ensaios de resistência à tração teve por objetivo avaliar a influência das variáveis: quantidade de cal, porosidade, teor de umidade e tempo de cura sobre a resistência à tração das misturas solo-cal. Para que seja possível a mensuração da influência de uma variável isoladamente é necessário que as outras variáveis sejam mantidas constantes.

Os pontos A₁ a A₉ foram moldados com 4 diferentes porcentagens de cal (3%, 5%, 7% e 9%) para o tempo de cura de 28 dias. Amostras de interesse foram moldadas para o tempo de cura de 360 dias.

3.4.1.3 Ensaio de Medidas de rigidez inicial

O programa de ensaios de medidas de rigidez inicial teve por objetivo avaliar a influência das variáveis: quantidade de cal, porosidade, teor de umidade e tempo de cura sobre o módulo cisalhante (G_0) das misturas solo-cal. Para que seja possível a mensuração da influência de uma variável isoladamente é necessário que as outras variáveis sejam mantidas constantes.

Os pontos A₁ a A₉ foram moldados com 4 diferentes porcentagens de cal (3%, 5%, 7% e 9%) e as medidas de rigidez inicial foram feitas em 8 diferentes tempos de cura (3, 7, 14, 28, 45, 60, 75 e 90 dias). As amostras dos pontos da linha com 20% de umidade (A₄, A₅ e A₆) foram moldados em duplicata. Apenas as amostras com 3% e 9% de cal dos pontos da linha A com

17% e 23% de umidade (A_1 , A_2 , A_3 , A_7 , A_8 e A_9) foram moldados em duplicata, para as outras porcentagens de cal (5% e 7% de) foram moldadas apenas uma amostra.

3.3.1.4 Ensaio para a Análise da Variação da Porosidade

Os ensaios para a análise da variação da porosidade foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento da porosidade das misturas solo-cal ao longo do tempo de cura, em amostras de interesse.

As amostras investigadas, nesta fase da pesquisa, foram moldadas a partir da linha “A” central com 20% de umidade (A_4 , A_5 e A_6). Cada ponto foi moldado com 9% de cal para 2 tempos de cura diferentes (0 e 28 dias).

3.4.2 Definição do Tempo de Cura

O tempo de cura foi definido a partir do tempo hábil para analisar a resistência à compressão simples, a resistência à tração e a rigidez inicial das misturas estudadas e também do tempo necessário para que as reações químicas dessas misturas ocorressem. Assim, com os tempos de cura de 28, 90 e 360 dias foram obtidos resultados relevantes para cada tipo de ensaio realizado.

3.4.3 Método de Avaliação da Influência dos Fatores Controláveis

Para avaliar a influência dos fatores controláveis foi realizado um projeto fatorial completo onde todos os fatores controláveis foram variados e todas as combinações entre eles foram realizadas.

Assim, para os ensaios de resistência à compressão simples, de resistência à tração e de medidas de rigidez inicial cada ponto das linhas “A” (com umidades de 17, 20 e 23% que são observadas na Figura 3.18) foram moldados com diferentes níveis de cal (3%, 5%, 7% e 9%) e diferentes níveis de tempo de cura.

A partir da avaliação da influência dos fatores controláveis se verificou a adequação da relação vazios/cal (V_v/V_{ca}) na estimativa da resistência à compressão simples, da resistência à tração e da rigidez inicial destas misturas. Neste trabalho foi adotado, como definição da relação vazios/cal a expressão utilizada por Lopes Junior (2007) e Dalla Rosa (2009): V_v/V_{ca} , onde V_v é o volume absoluto de vazios (água + ar) e V_{ca} é o volume absoluto de cal.

3.4.4 Método para a Previsão da Variação da Porosidade

A partir dos resultados da variação da porosidade das amostras de caulim-cal em dois diferentes tempos de cura (0 e 28 dias), foi possível calcular o fator de hidratação para a cal e assim, avaliar a adaptação do modelo de Powers (equação 2.5) para a previsão da porosidade de misturas solo-cal ao longo do tempo de cura.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

As Tabelas A.1 a A.9 do apêndice A, apresentam as características de todos os corpos-de-prova de caulim-cal submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. Os corpos-de-prova contendo 17% de umidade ensaiados com 28, 90 e 360 dias de cura são apresentados nas tabelas A.1, A.2 e A.3, respectivamente. Os corpos-de-prova contendo 20% de umidade ensaiados com 28, 90 e 360 dias de cura são apresentados nas tabelas A.4, A.5 e A.6, respectivamente. Os corpos-de-prova contendo 23% de umidade ensaiados com 28, 90 e 360 dias de cura são apresentados nas tabelas A.7, A.8 e A.9, respectivamente. Observa-se nestas tabelas que os dados foram agrupados a cada três linhas, pois correspondem às três repetições para um mesmo ponto de moldagem.

4.1.1 Amostras com 17% de umidade

A partir dos dados constantes nas Tabelas A.1, A.2 e A.3, foram elaboradas as Figuras 4.1 a 4.25, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento mecânico do solo-cal em estudo são evidenciados.

4.1.1.1 Efeito do teor da cal

Nas Figuras 4.1 a 4.3, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=17\%$).

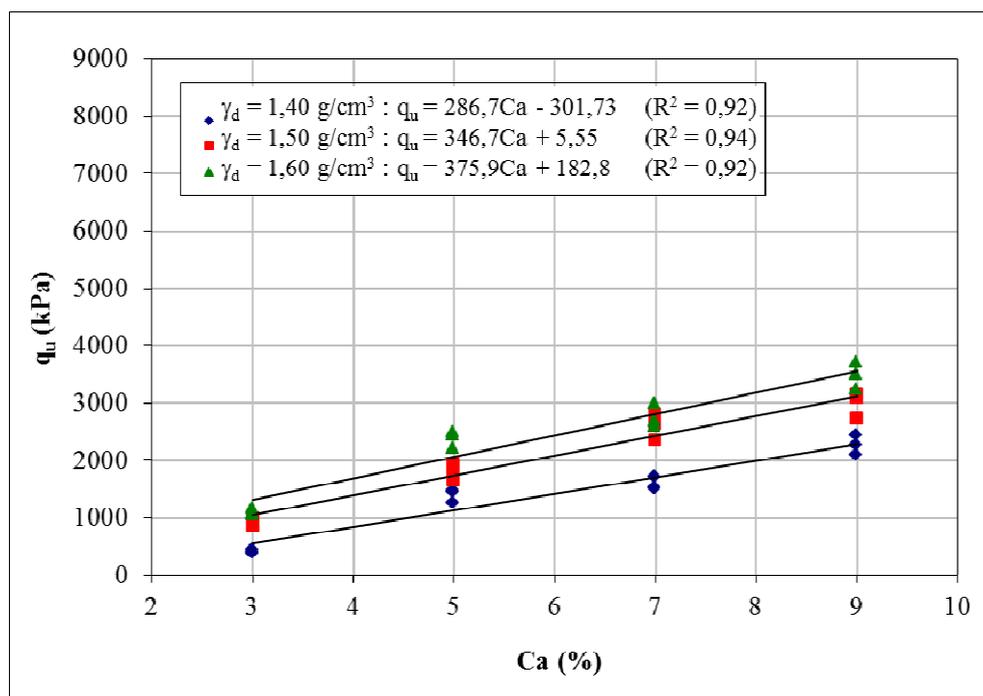


Figura 4.1 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

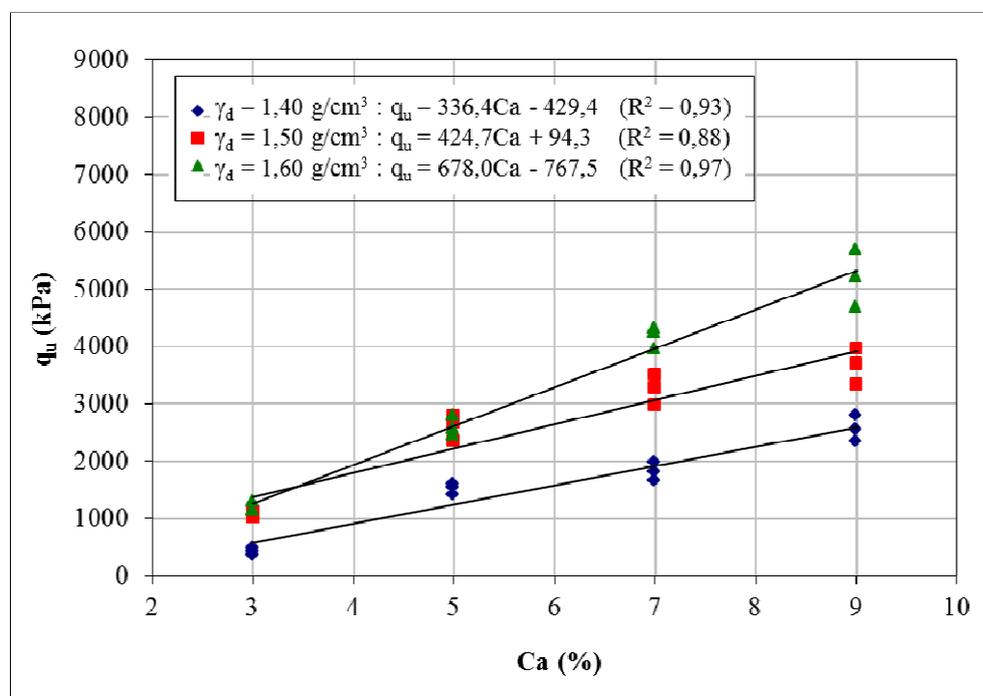


Figura 4.2 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

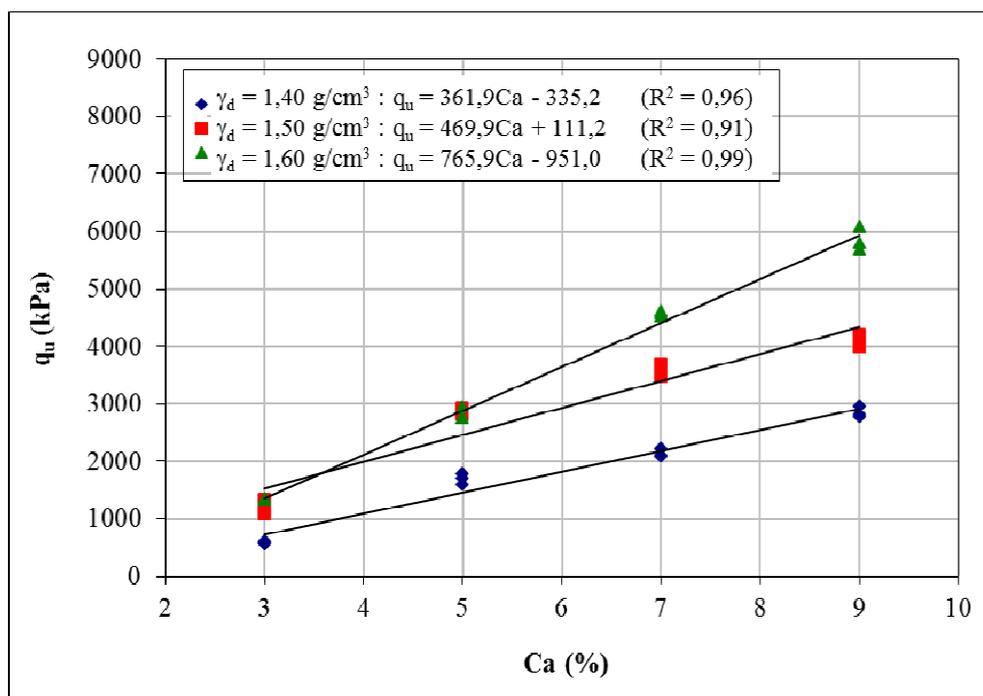


Figura 4.3 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a resistência à compressão simples do material, tanto para corpos-de-prova ensaiados a 28 dias como para as amostras de 90 e 360 dias de cura. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a resistência à compressão simples, em média, teve um acréscimo de 291%, 359% e 322% para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal.

4.1.1.2 Efeito da porosidade

Nas Figuras 4.4 a 4.6, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade do caulim-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=17\%$).

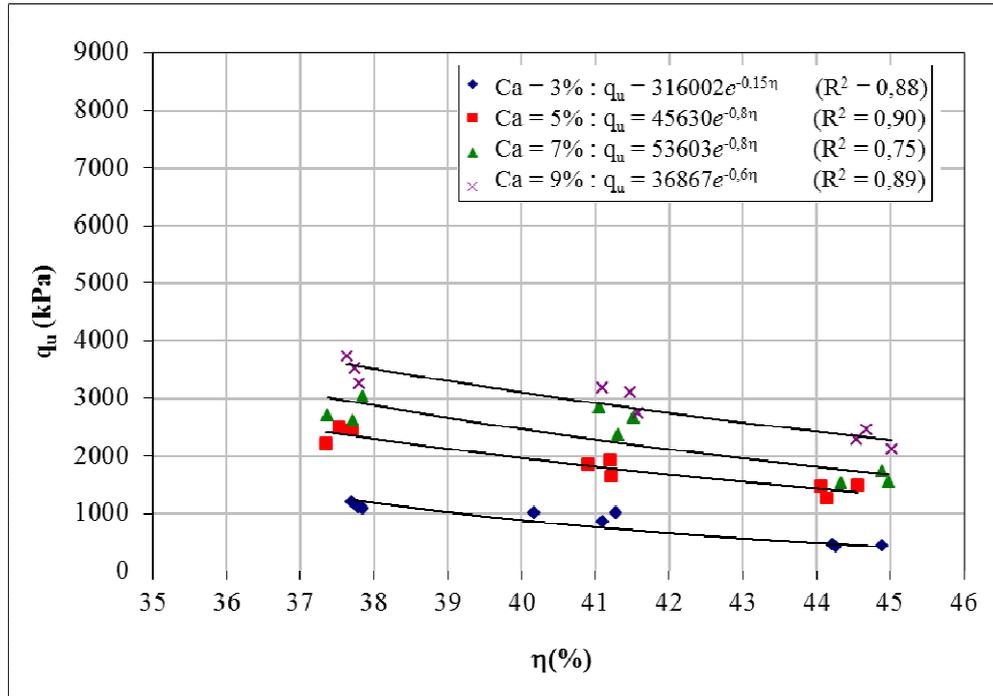


Figura 4.4 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

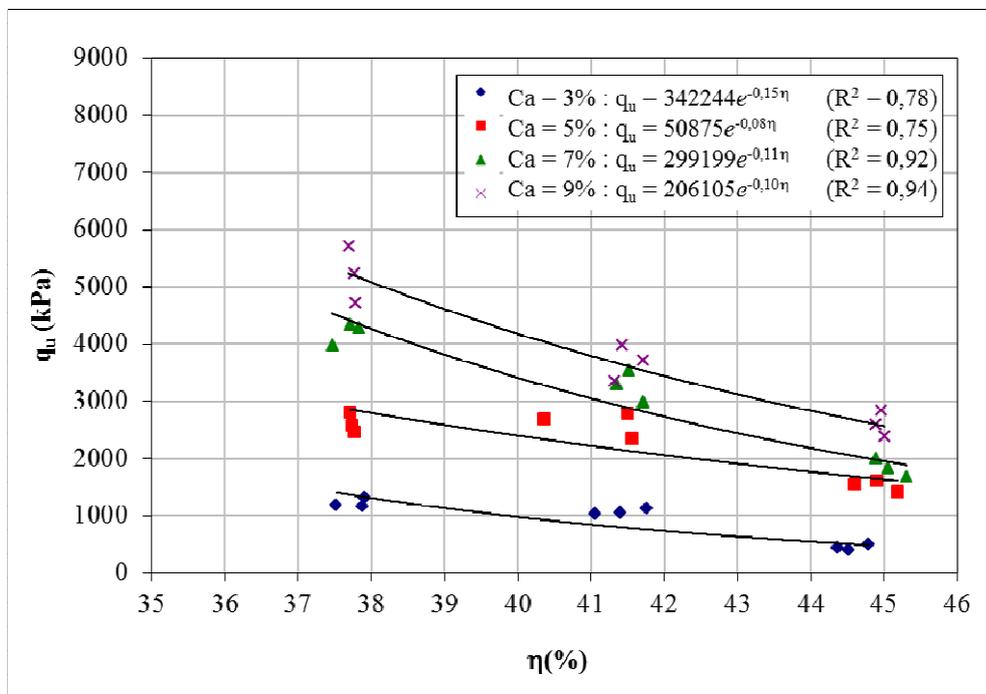


Figura 4.5 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

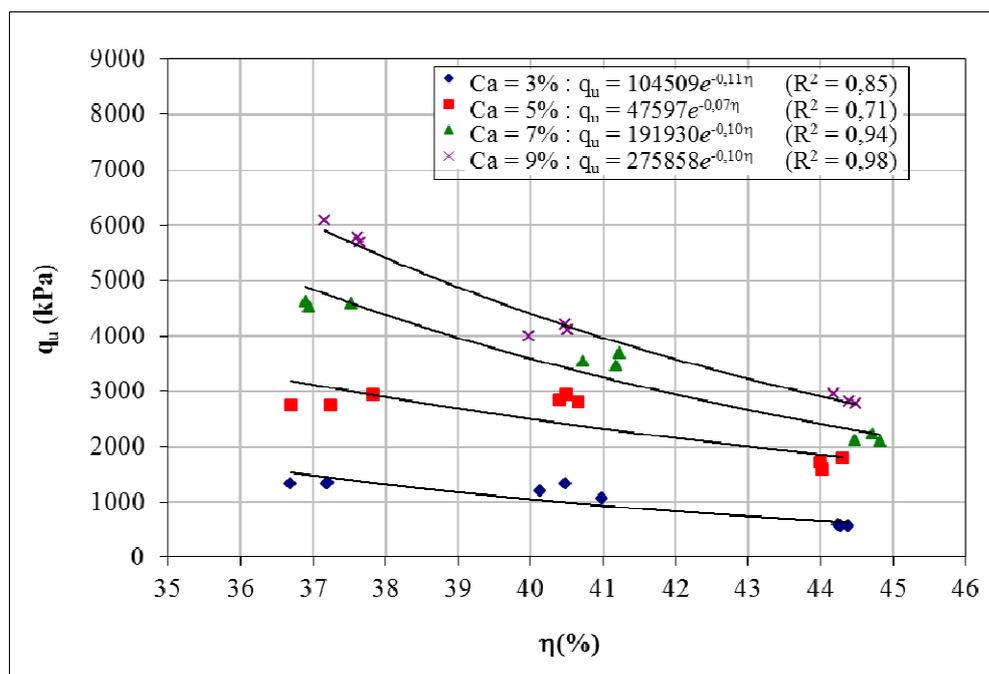


Figura 4.6 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a resistência à compressão simples das misturas de caulim-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de resistência. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou em 2,0 vezes, 2,3 vezes e 2,0 vezes a resistência à compressão simples do caulim-cal testado para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente.

Pode-se observar também, que a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

4.1.1.3 Relação vazios/cal

Nas Figura 4.7 a 4.9 é apresentada a variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cal dos corpos-de-prova com 17% de umidade e 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, tendo como base a definição apresentada por Lopes Junior (2007):

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

Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=17\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

Pode-se observar nas Figuras 4.7 a 4.9 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

Verifica-se claramente que pontos com mesma relação vazios/cal obtidos de modos diferentes (um por densificação e outro por aumento do teor de cal), apresentam resistências distintas, sendo que os pontos com menor porosidade e menor quantidade de cal atingem, sistematicamente, resistências maiores.

Ocorre que dada uma variação no volume de vazios, uma variação proporcional no volume de cal assume que seria suficiente para contrabalançar a perda ou ganho na resistência. Em termos matemáticos tem-se:

$$\frac{V_v}{V_{ca}} = K \text{ e } \frac{V_v + \Delta V_v}{V_{ca} + \Delta V_{ca}} = K, \text{ então } \Delta V_{ca} = \frac{V_{ca}}{V_v} \times \Delta V_v.$$

Onde: ΔV_v = variação no volume de vazios.

ΔV_{ca} = variação no volume de cal.

K = constante.

Mesma tendência verificada em Larnach (1960), Foppa (2005), Lopes Junior (2007), Dalla Rosa (2009) e Lopes Junior (2011), tanto em amostras de solo-cal como em amostras de solo-cimento.

Observando-se agora as Figuras 4.10 a 4.12, que mostram a relação das grandezas volume de vazios (V_v), e as Figuras 4.13 a 4.15, que relacionam o inverso do volume de cal ($1/V_{ca}$) com a resistência à compressão simples, para amostras com 17% de umidade e 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente, pode-se notar que as taxas de variação q_u em relação a cada uma dessas grandezas são substancialmente diferentes.

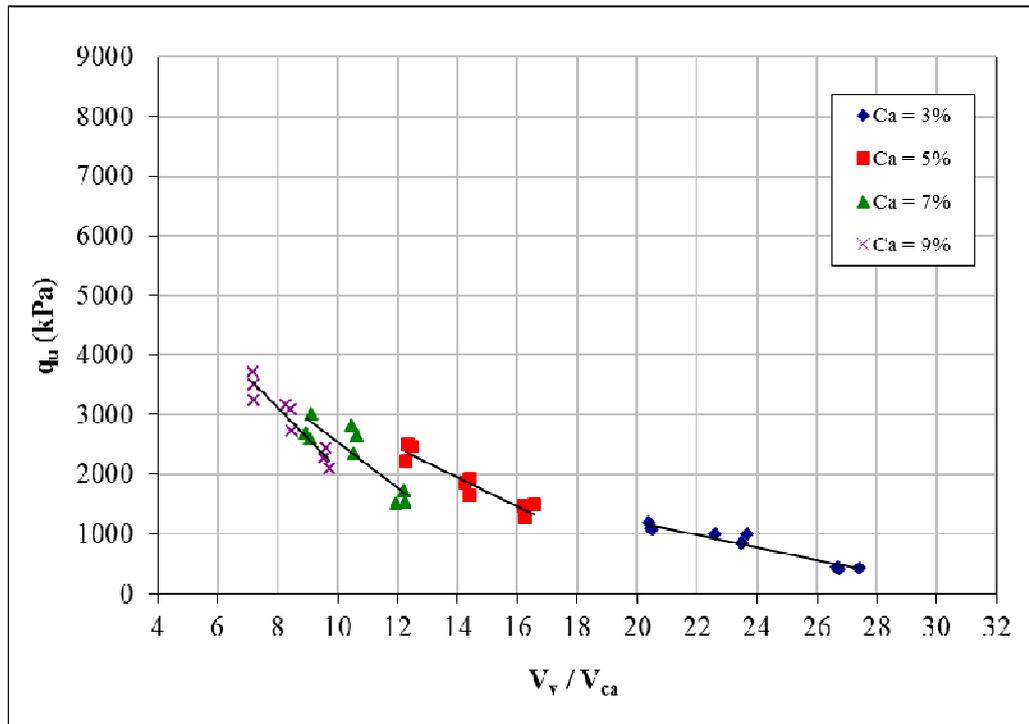


Figura 4.7 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal para as amostras com 17% de umidade e 28 dias de cura

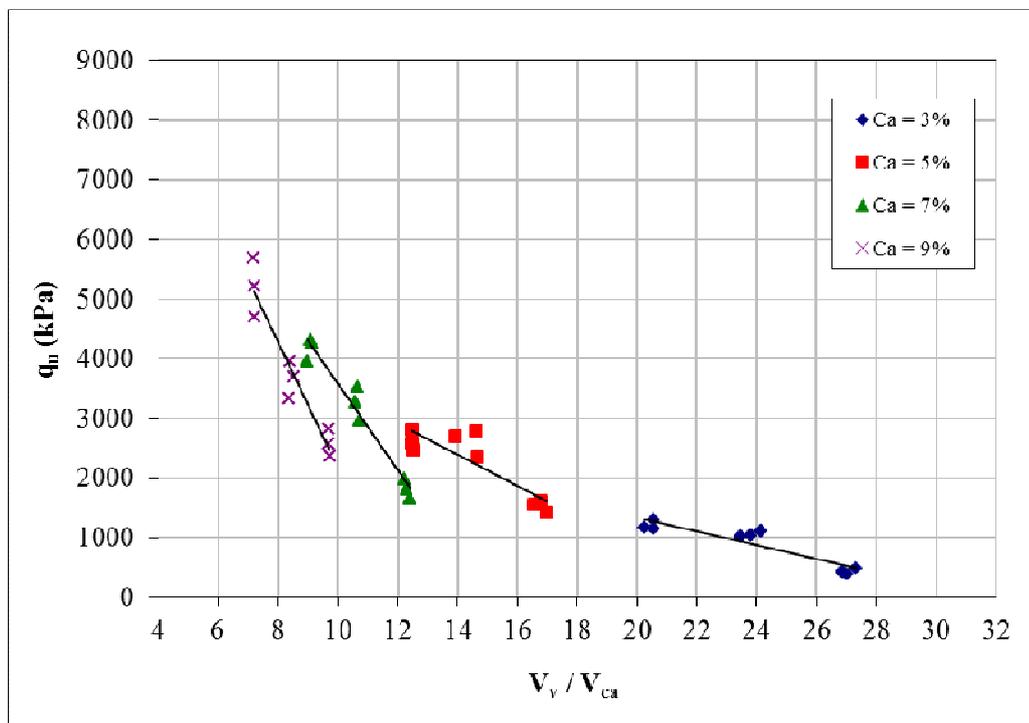


Figura 4.8 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal para as amostras com 17% de umidade e 90 dias de cura

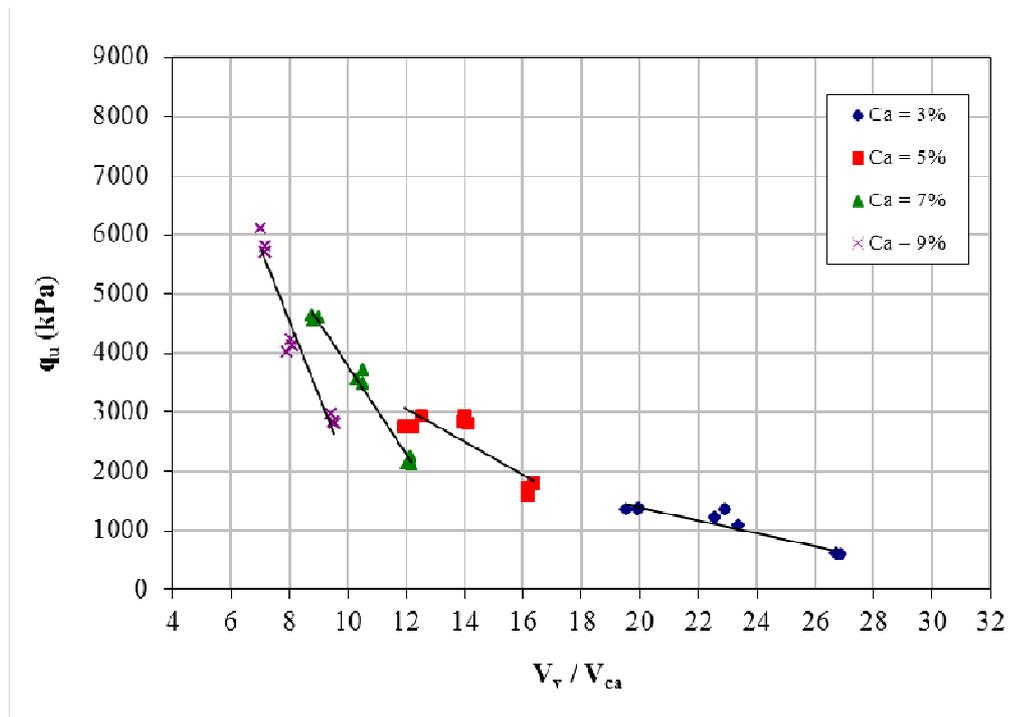


Figura 4.9 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal para as amostras com 17% de umidade e 360 dias de cura

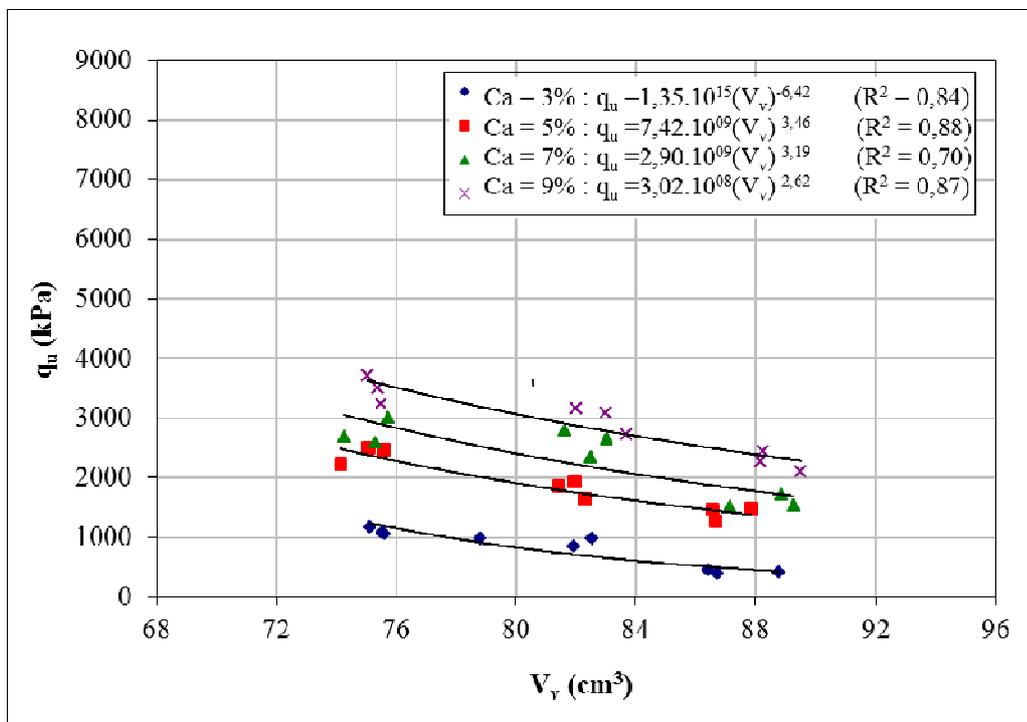


Figura 4.10 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

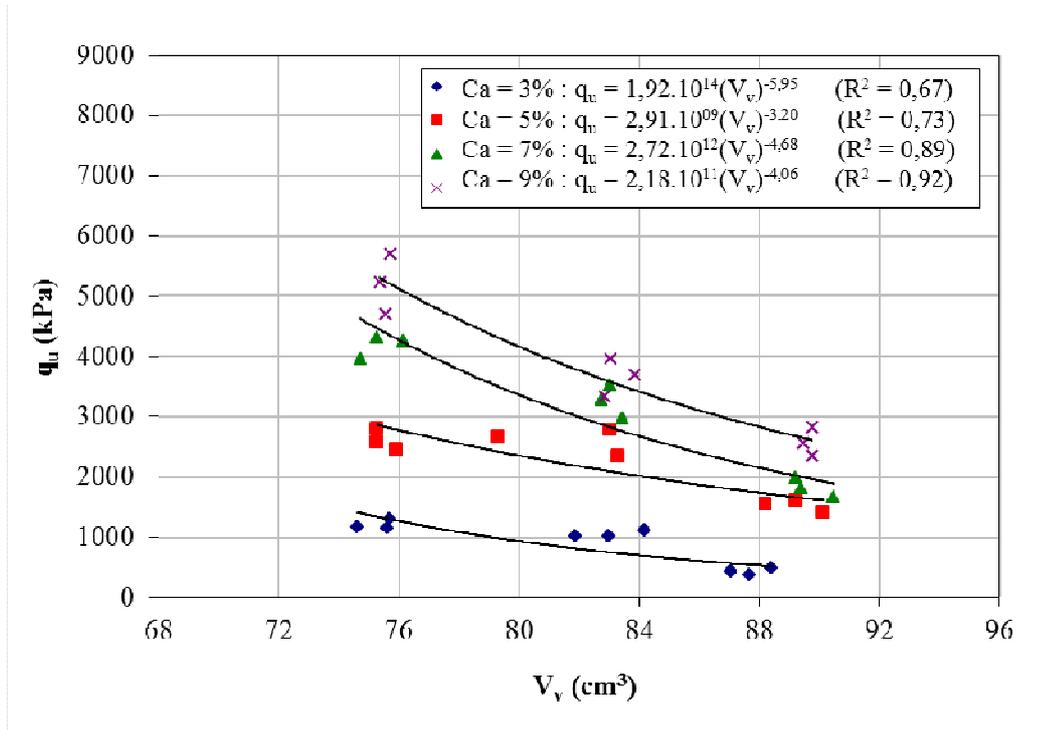


Figura 4.11 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

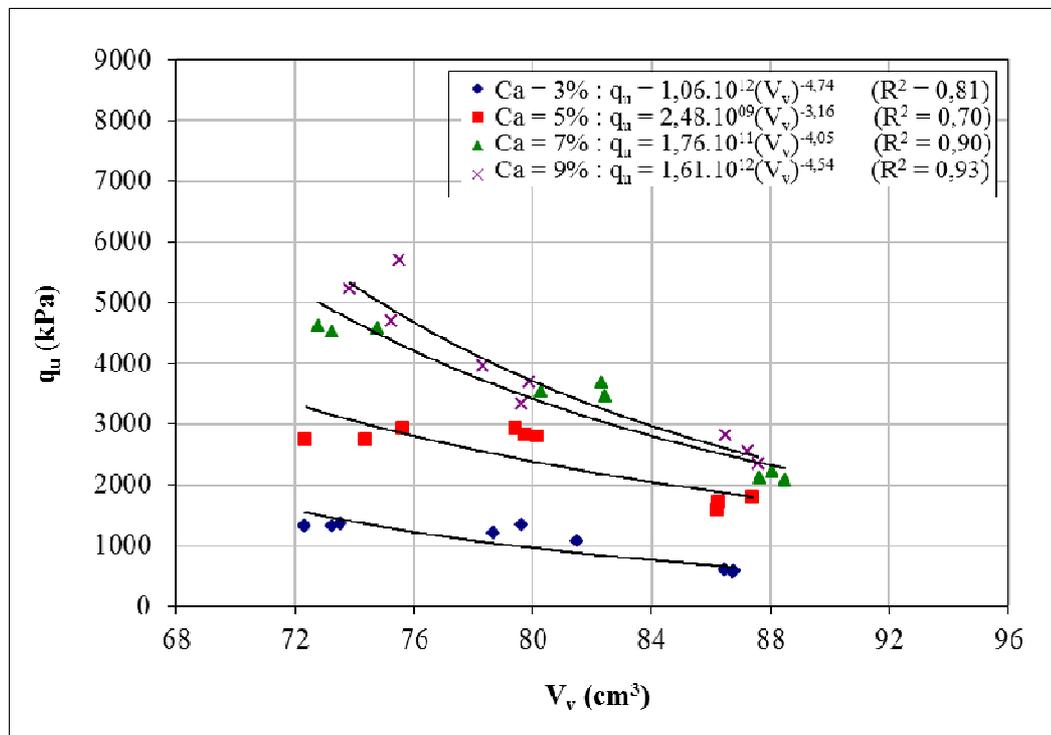


Figura 4.12 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

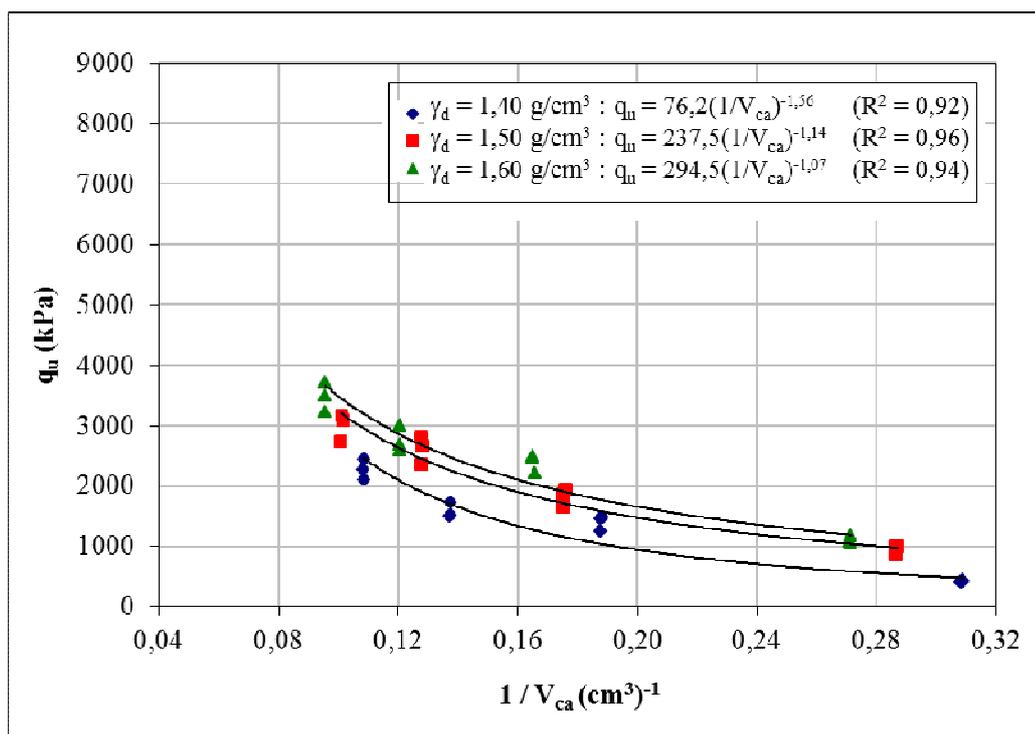


Figura 4.13 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

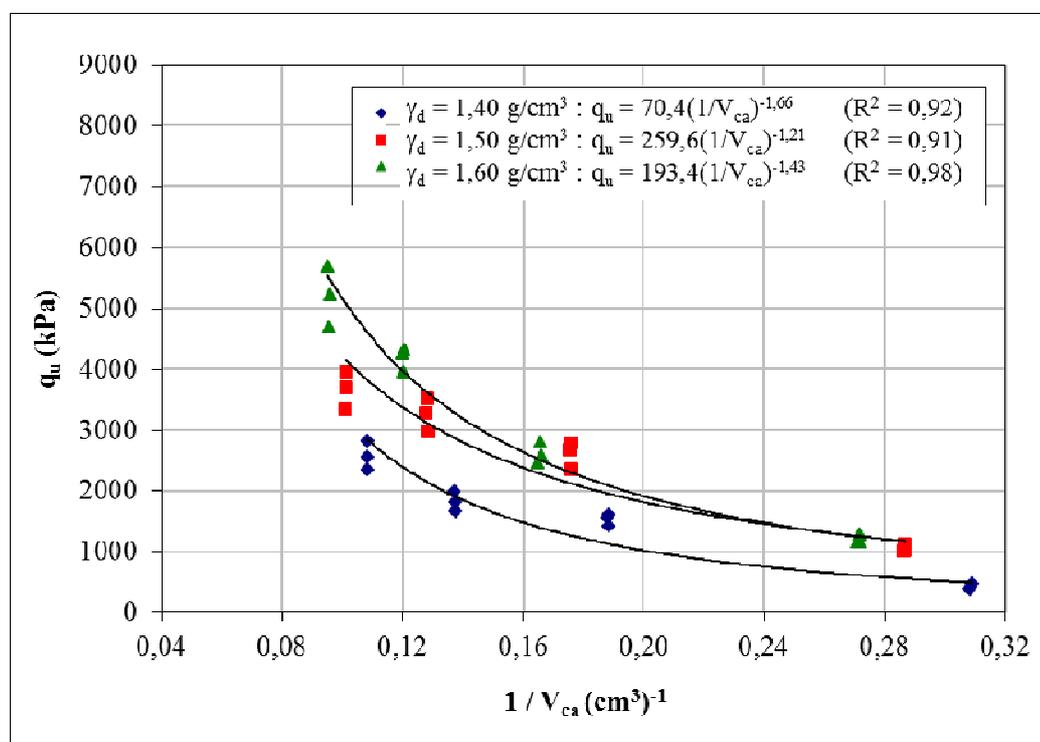


Figura 4.14 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

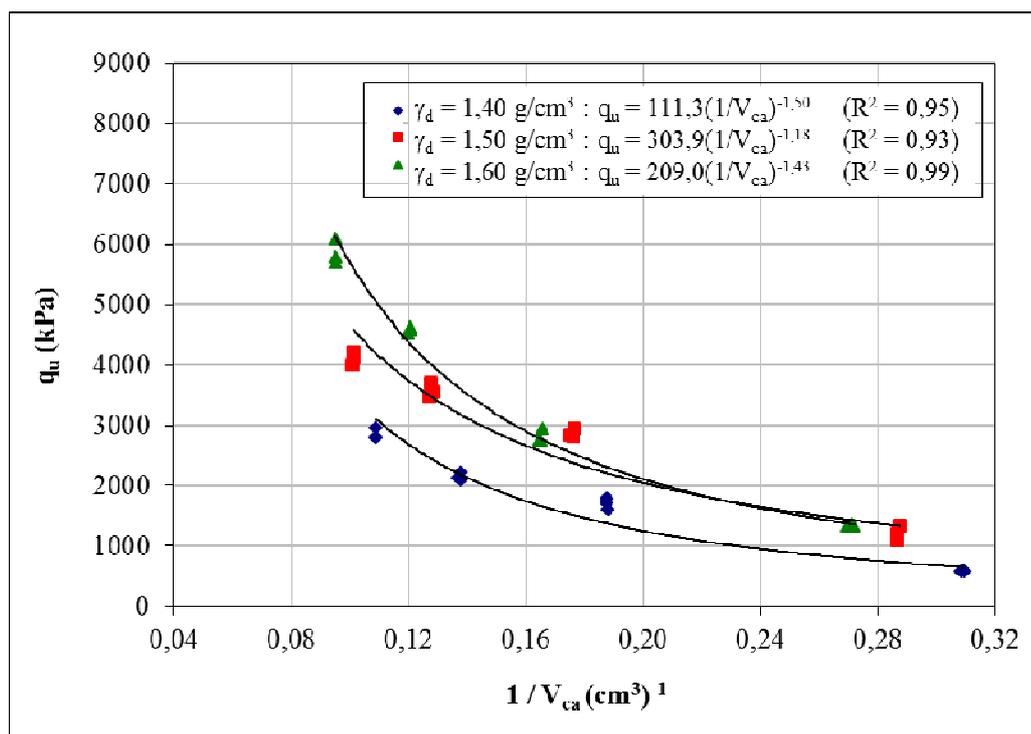


Figura 4.15 – Relação entre o inverso do volume de cal e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

Uma maneira de compatibilizarmos as taxas de variação das grandezas acima citadas é através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Após diversas tentativas, em todos os resultados do experimento, obteve-se que, aplicando uma potência igual a 0,45 sobre o parâmetro V_{ca} , haveria uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, resultando em um melhor ajuste para a relação vazios/cal (para todas as umidades estudadas com todos os tempos de cura estudados), tanto para os ensaios de resistência como para os ensaios de rigidez inicial.

As Figuras 4.16 a 4.18 apresentam a variação da resistência à compressão simples *versus* $1/(V_{ca})^{0,45}$, para amostras com 17% de umidade e 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Pode-se observar agora, comparando as Figuras 4.10 a 4.12 com as Figuras 4.16 a 4.18, que a taxa de variação dos dois fatores são similares.

Aplicando a formulação obtida para a relação vazios/cal obtemos os gráficos das Figuras 4.19 a 4.21, onde pode-se verificar o melhor ajuste dos pontos a essa nova relação. Foi utilizado no ajuste curva tipo potência, a qual apresentou melhores coeficientes de correlação R^2 .

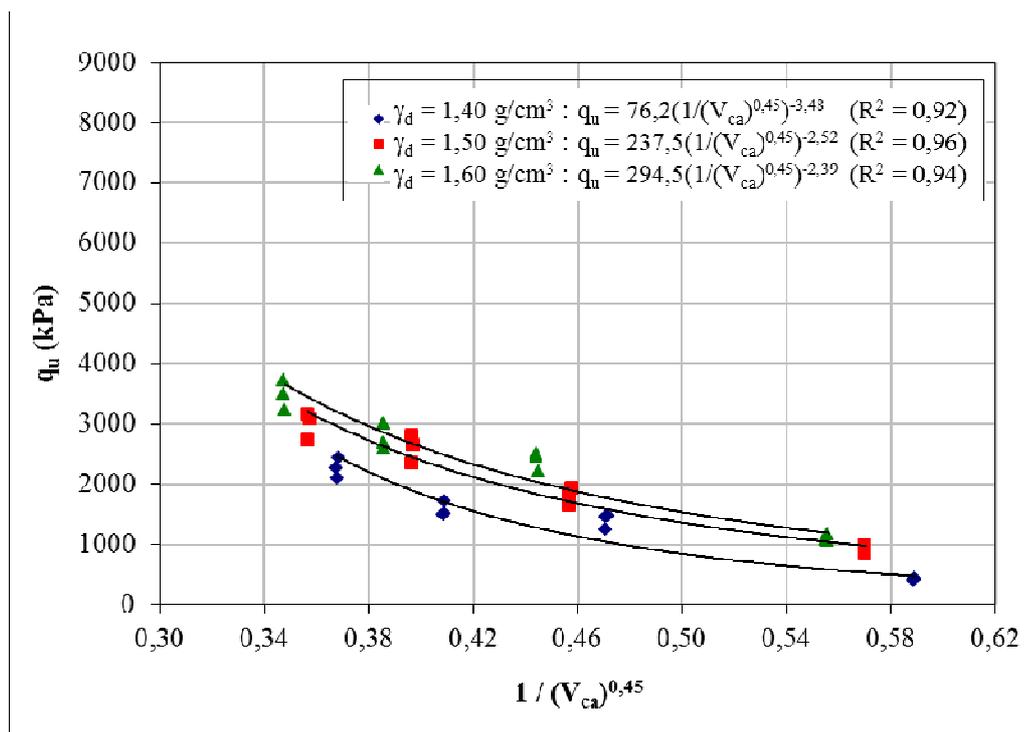


Figura 4.16 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

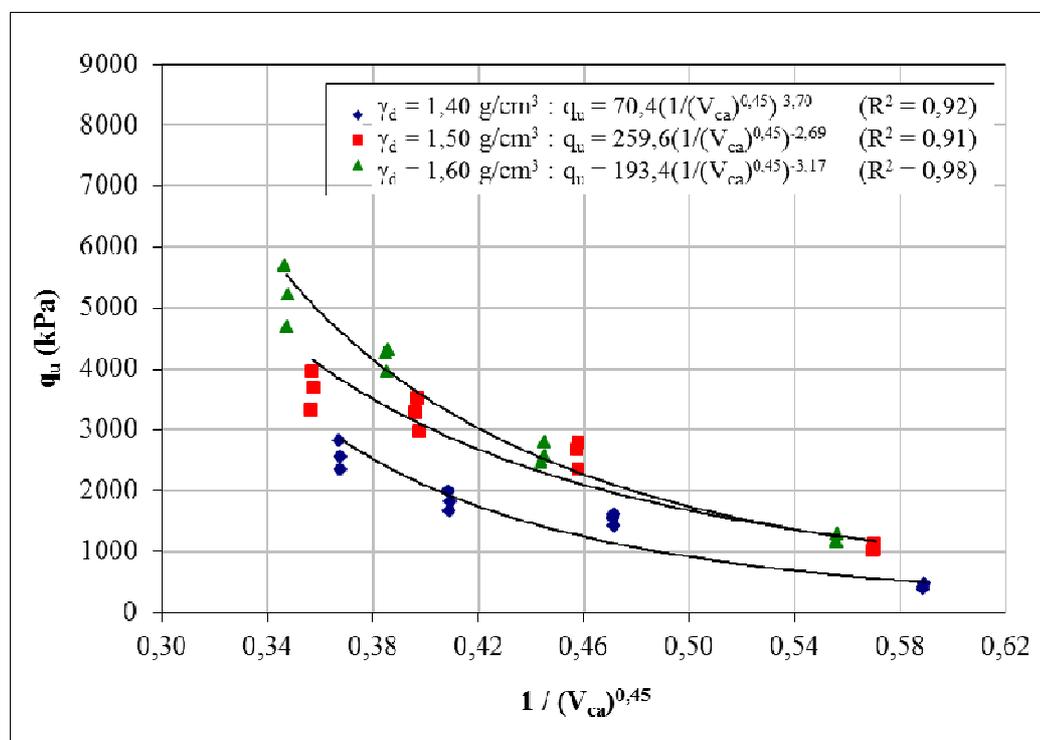


Figura 4.17 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

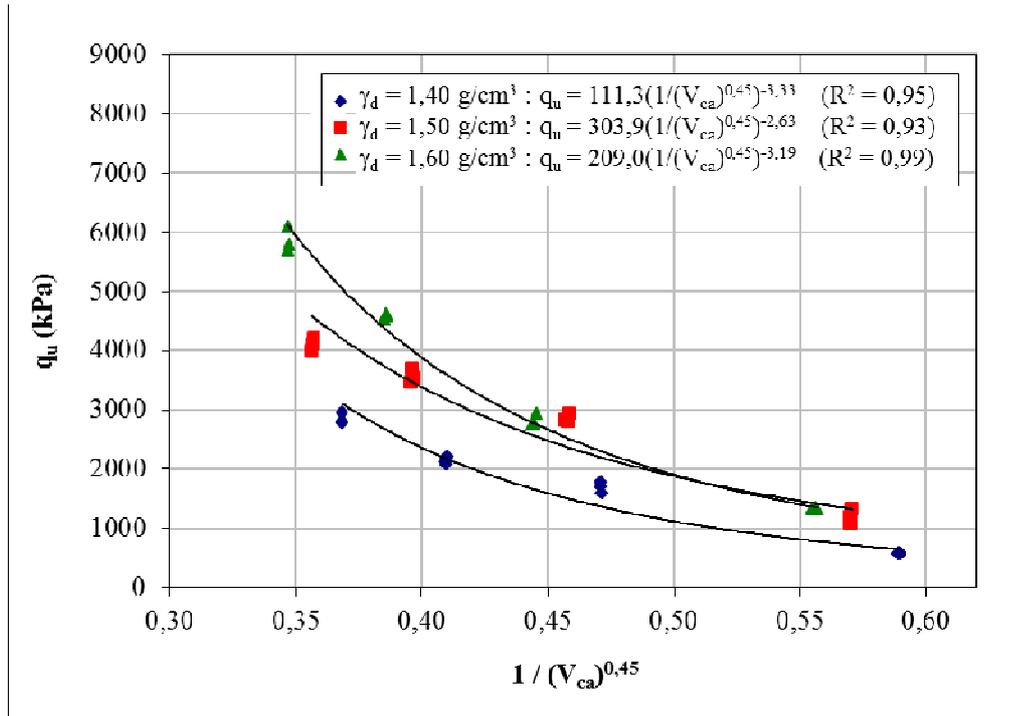


Figura 4.18 – Relação entre o inverso do volume de cal (ajustado) e a resistência à compressão simples para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

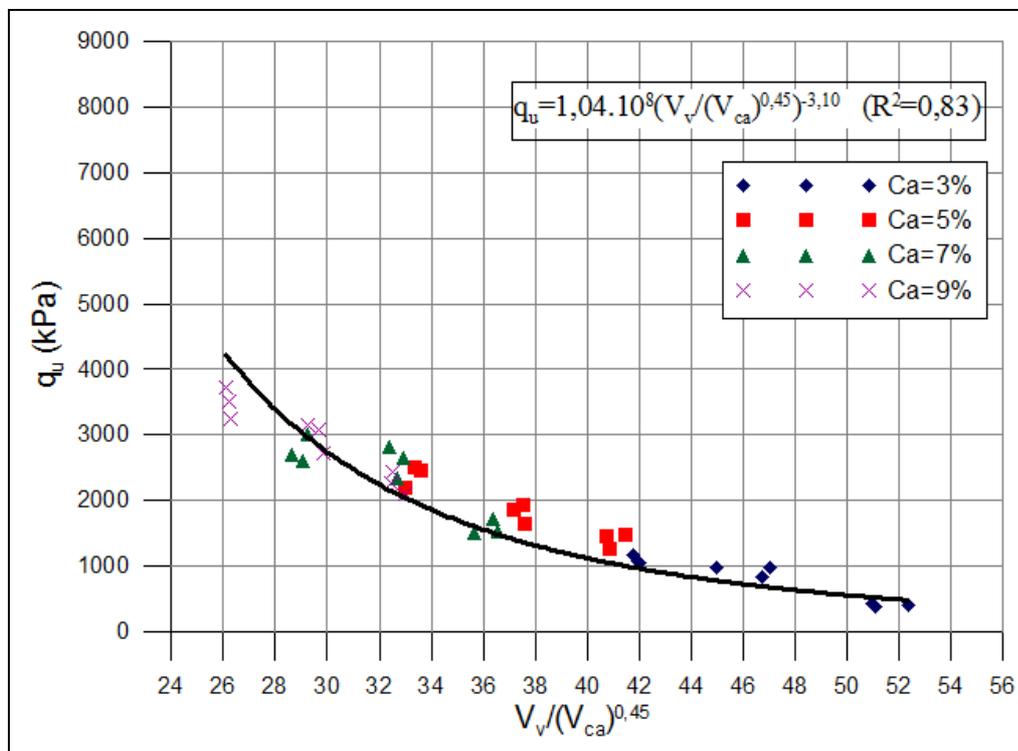


Figura 4.19 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal ajustado para as amostras com 17% de umidade e 28 dias de cura

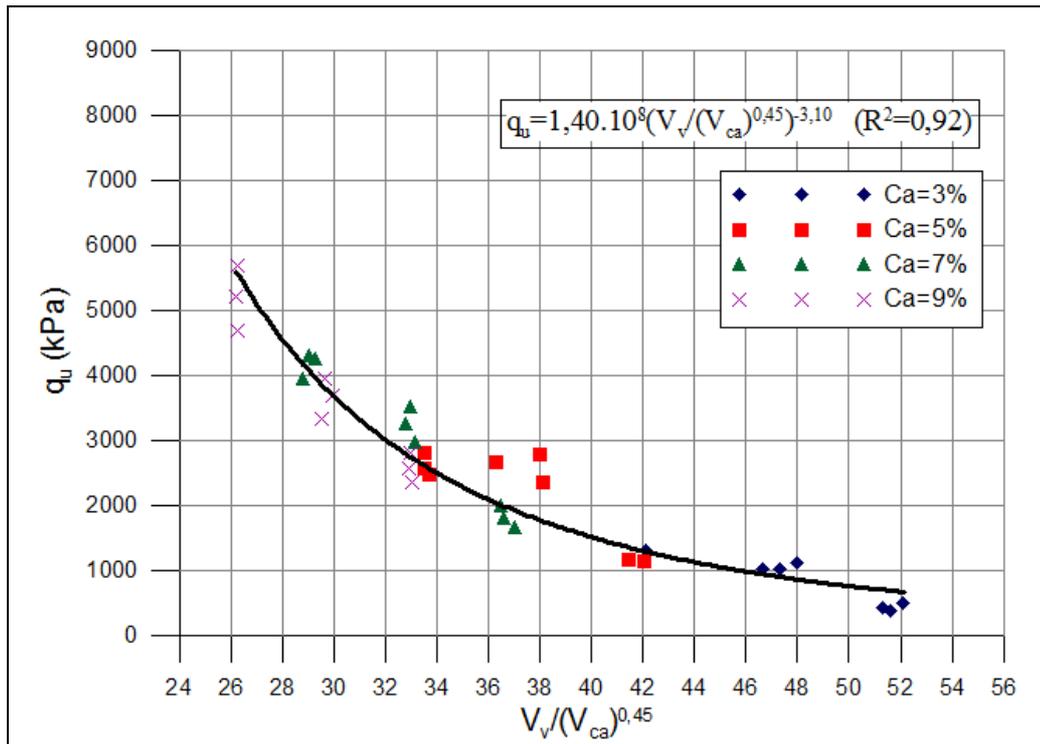


Figura 4.20 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal ajustado para as amostras com 17% de umidade e 90 dias de cura

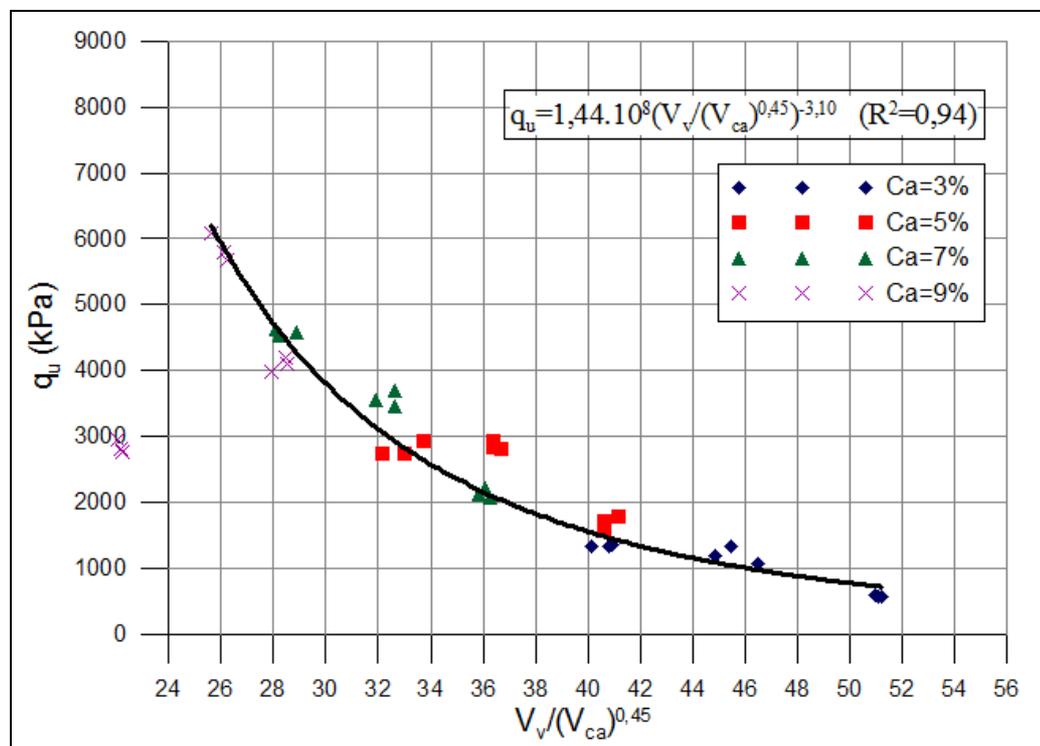


Figura 4.21 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal ajustado para as amostras com 17% de umidade e 360 dias de cura

Pelas Figuras 4.19 a 4.21, nota-se que a resistência à compressão simples do material em estudo pode ser avaliada, com um excelente grau de precisão, através da relação vazios/cal ajustado pelo expoente 0,45. Entretanto, uma forma mais elegante de expressar a relação vazios/cal pode ser feita utilizando, ao invés do volume de vazios, a porosidade do material (η) expressa em porcentagem e, ao invés do volume de cal, o teor volumétrico de cal expresso em porcentagem do volume total (C_{av}).

As Figuras 4.22 a 4.24 apresentam o novo ajuste utilizando essa relação $[\eta/(C_{av})^{0,45}]$, para as amostras com 17% de umidade com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Percebe-se que não ocorre alteração na qualidade dos ajustes dos dados, uma vez que as novas variáveis são proporcionais às utilizadas anteriormente.

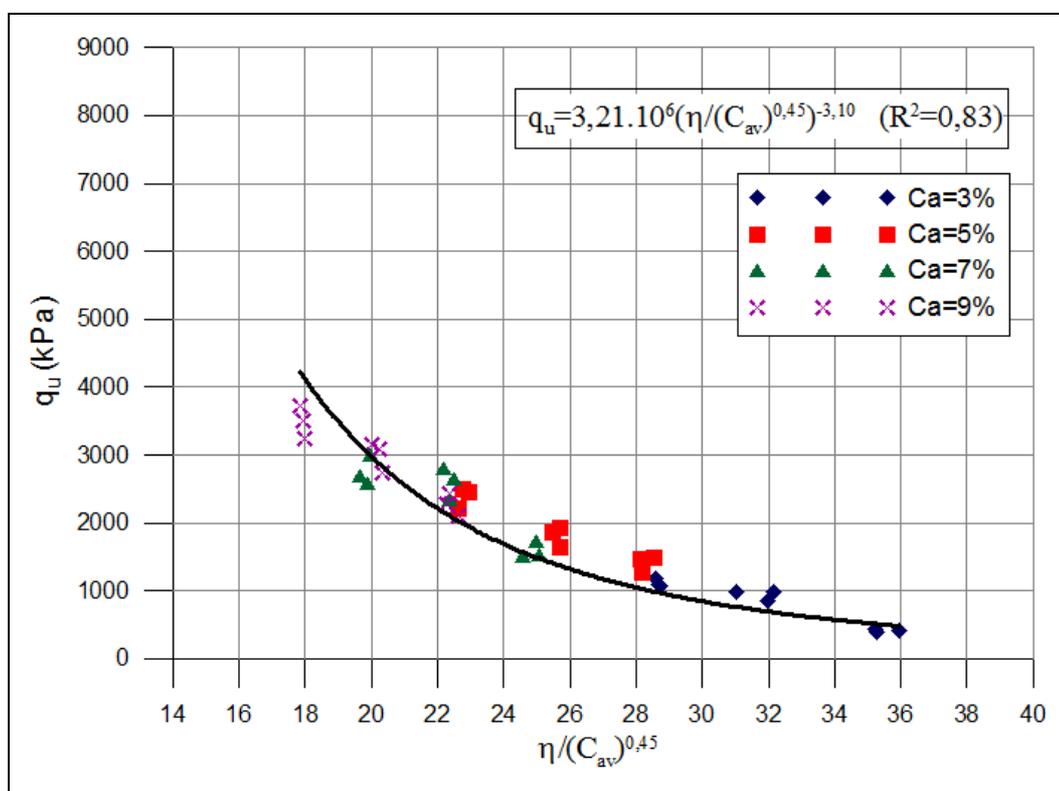


Figura 4.22 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 17% de umidade e 28 dias de cura

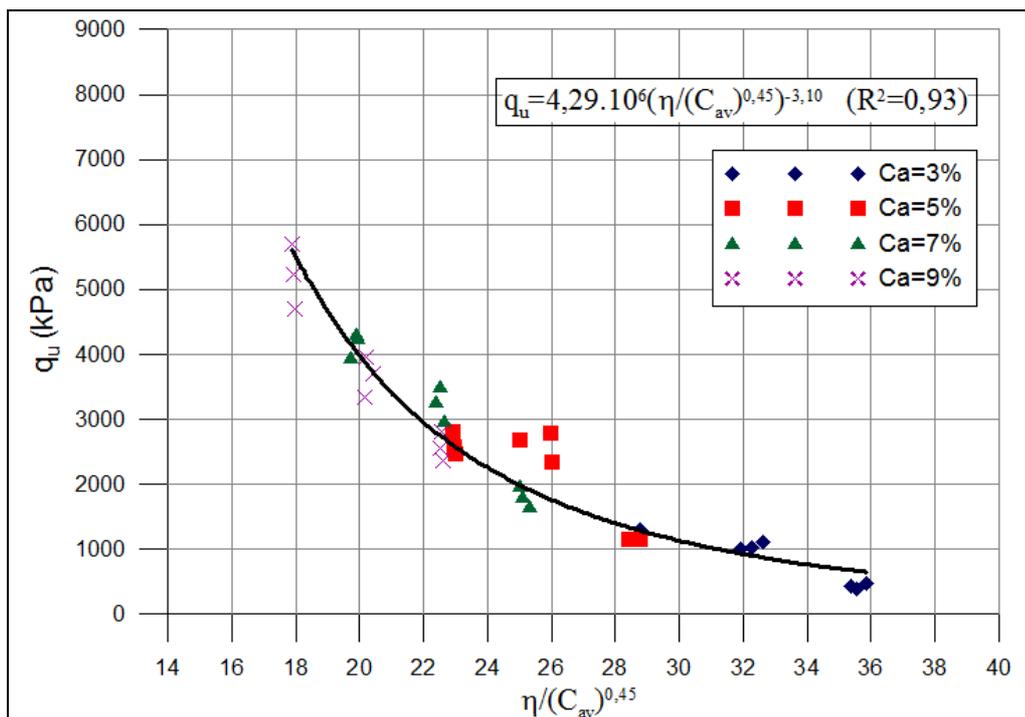


Figura 4.23 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 17% de umidade e 90 dias de cura

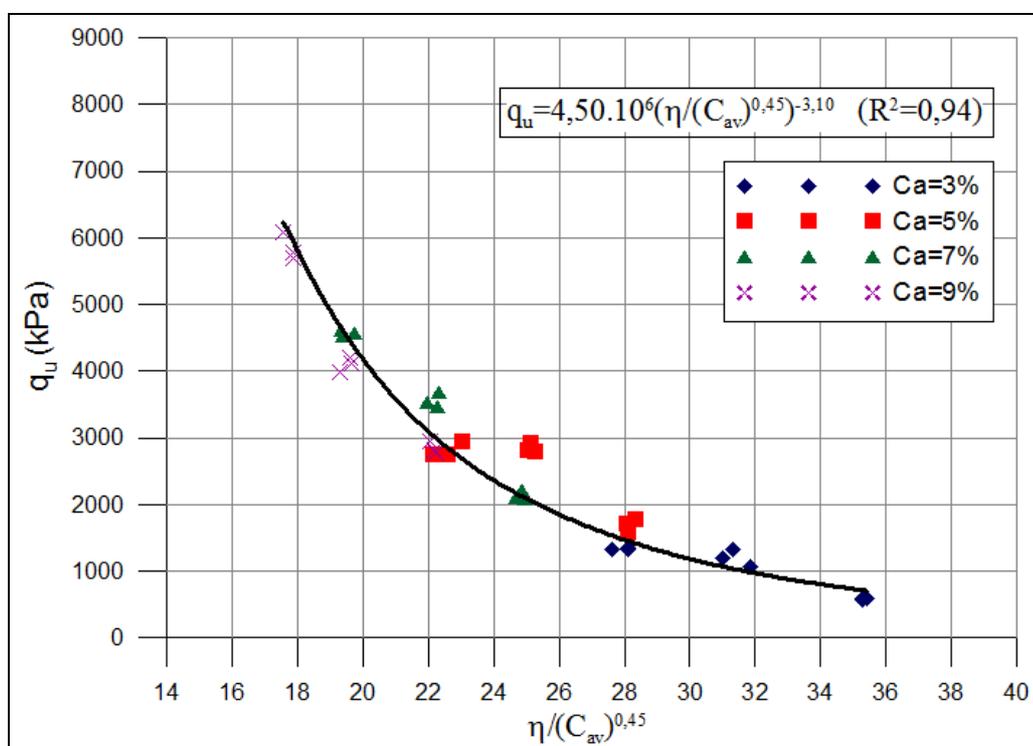


Figura 4.24 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras com 17% de umidade e 360 dias de cura

4.1.1.4 Efeito do tempo de cura

Na Figura 4.25 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustados) pela resistência à compressão simples das amostras com 17% de umidade ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura. Pode ser observado que as curvas que definem a relação η/C_{av} das amostras ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura têm a mesma tendência exponencial.

Os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 360 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 13% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 90 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Por sua vez, as amostras ensaiadas com 90 dias de cura, apresentam, em média, resistências em torno de 22% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Sendo que, as amostras com 360 dias de cura, apresentam, em média, resistências em torno de 38% mais altas que as amostras com 28 dias de cura.

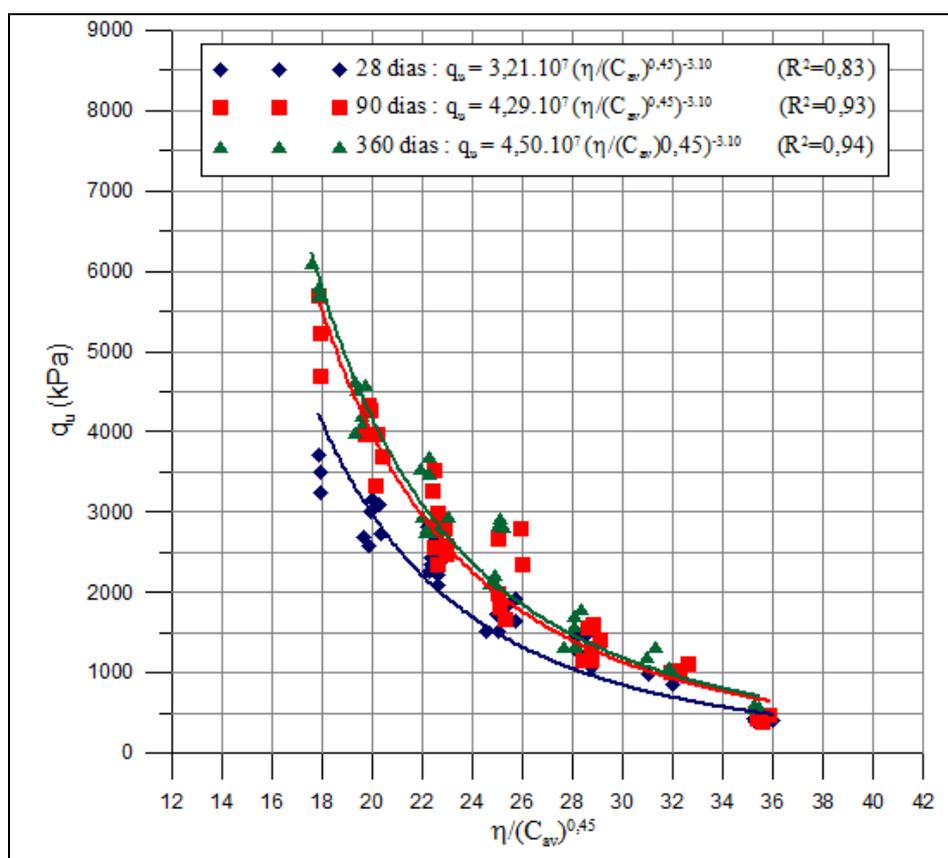


Figura 4.25 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 17% de umidade submetidas aos ensaio de resistência à compressão simples com 28, 90 e 360 dias de cura

4.1.2 Amostras com 20% de umidade

A partir dos dados constantes nas Tabelas A.4, A.5 e A.6, foram elaboradas as Figuras 4.26 a 4.38, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento mecânico do solo-cal em estudo são evidenciados.

4.1.2.1 Efeito do teor da cal

Nas Figuras 4.26 a 4.28, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=20\%$).

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a resistência à compressão simples do material, tanto para corpos-de-prova ensaiados a 28 dias como para as amostras de 90 e 360 dias de cura. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a resistência à compressão simples, em média, teve um acréscimo de 380%, 354% e 324% para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal.

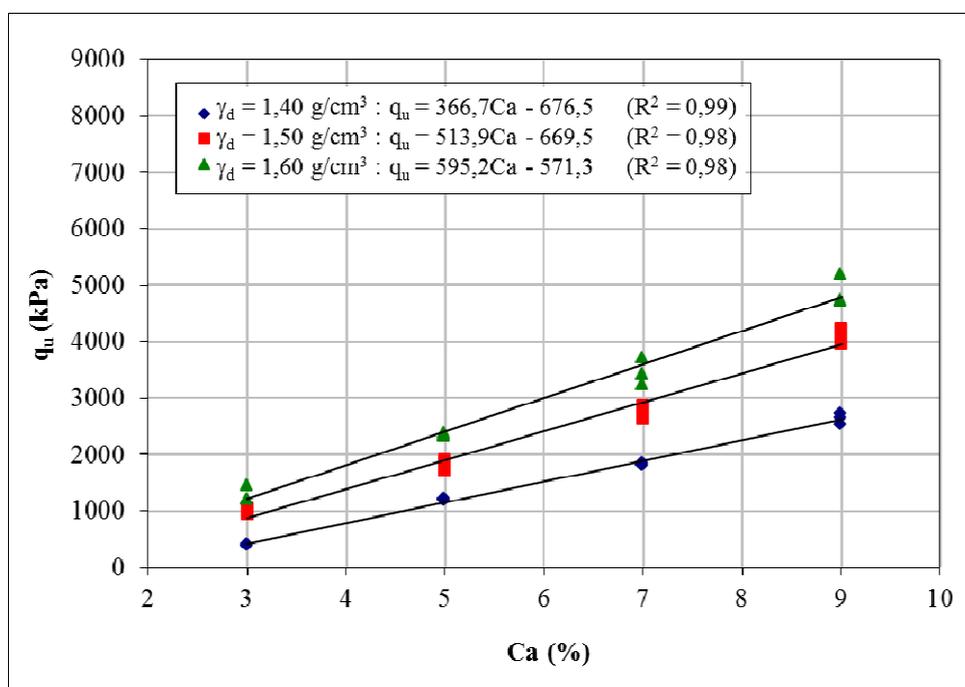


Figura 4.26 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

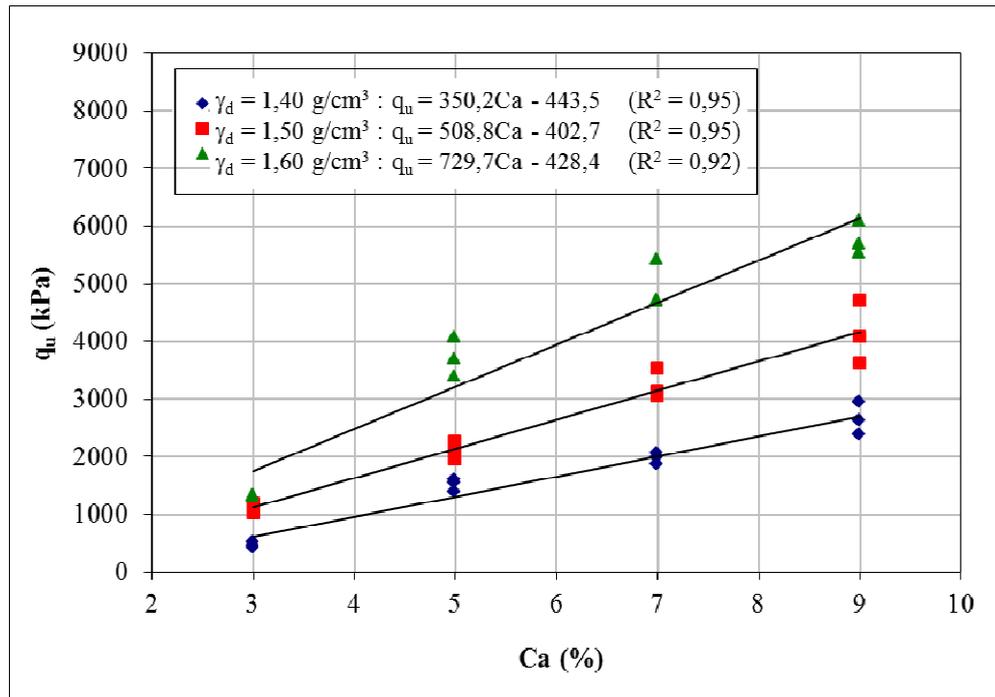


Figura 4.27 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

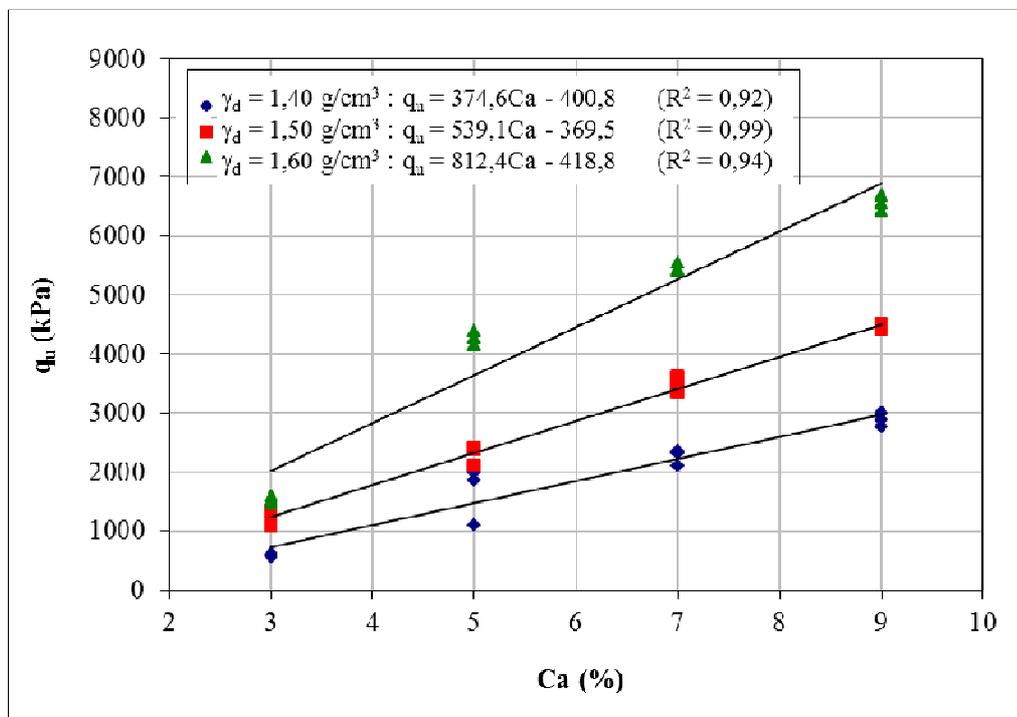


Figura 4.28 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

4.1.2.2 Efeito da porosidade

Nas Figuras 4.29 a 4.31, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade do caulim-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=20\%$).

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a resistência à compressão simples das misturas de caulim-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de resistência. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou em 2,2 vezes, 2,5 vezes e 2,5 vezes a resistência à compressão simples do caulim-cal testado para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente.

Pode-se observar também, que a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

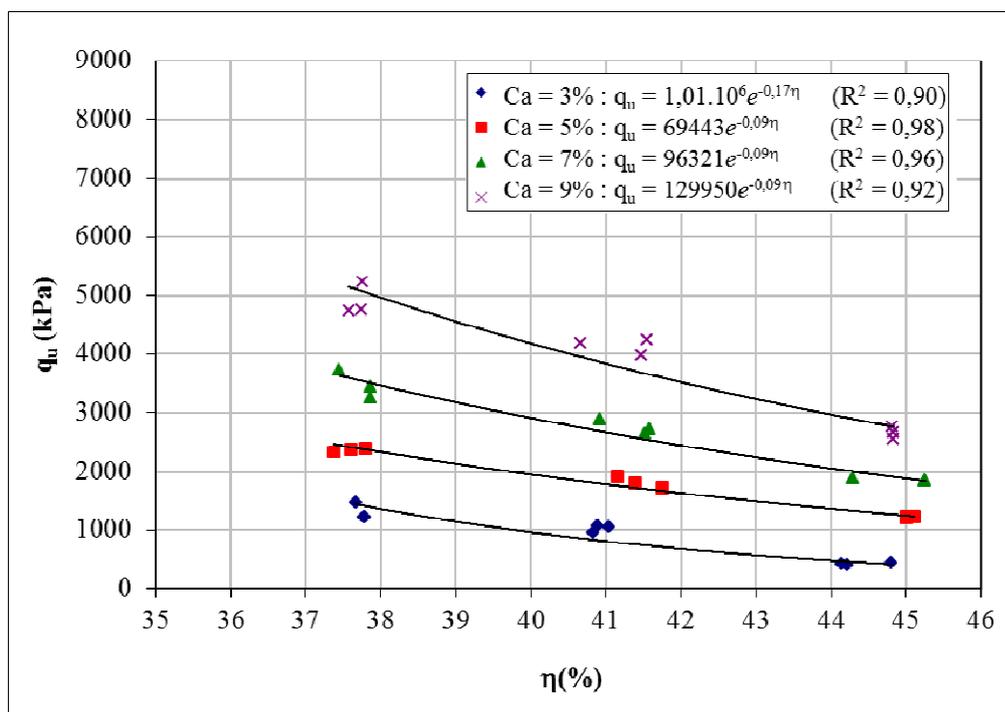


Figura 4.29 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

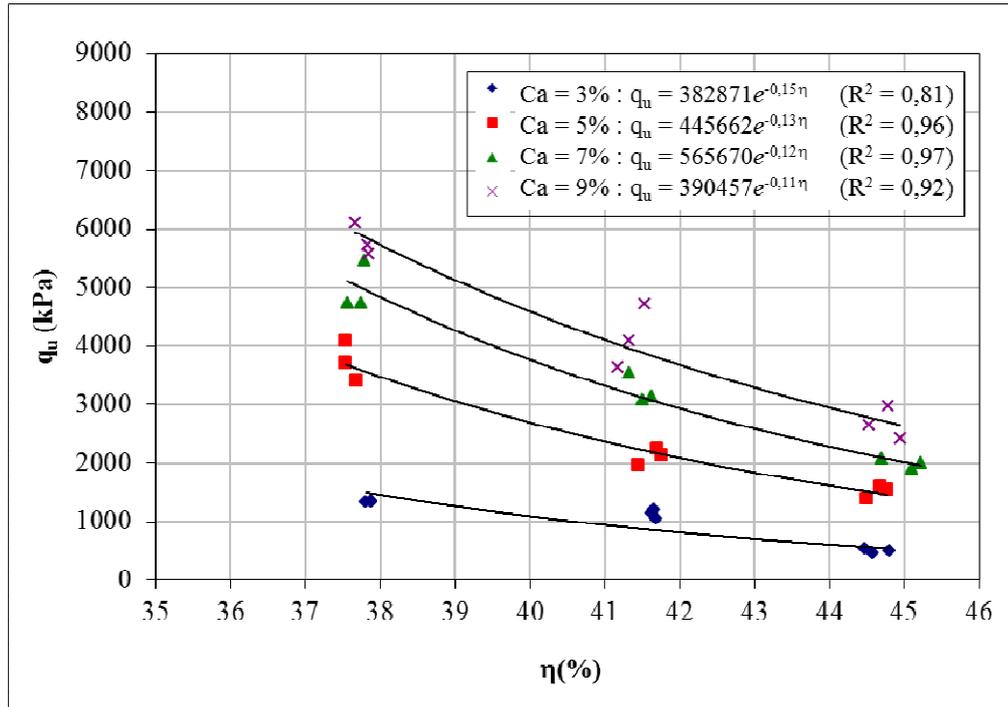


Figura 4.30 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

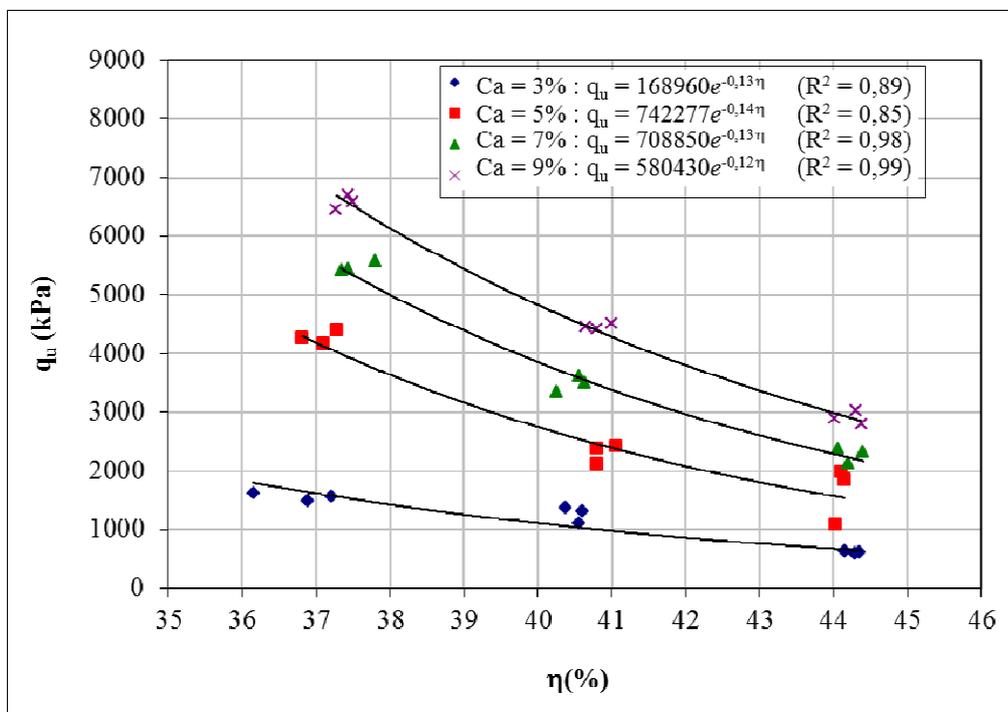


Figura 4.31 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

4.1.2.3 Relação vazios/cal

Nas Figura 4.32 a 4.34 é apresentada a variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cal dos corpos-de-prova com 20% de umidade e 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=20\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

Pode-se observar nas Figuras 4.32 a 4.34 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

Esta mesma tendência foi verificada para as amostras com 17% de umidade. Assim, as Figuras 4.35 e 4.37 apresentam as curvas de variação da resistência à compressão simples m função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,45, para as amostras com 20% de umidade com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente.

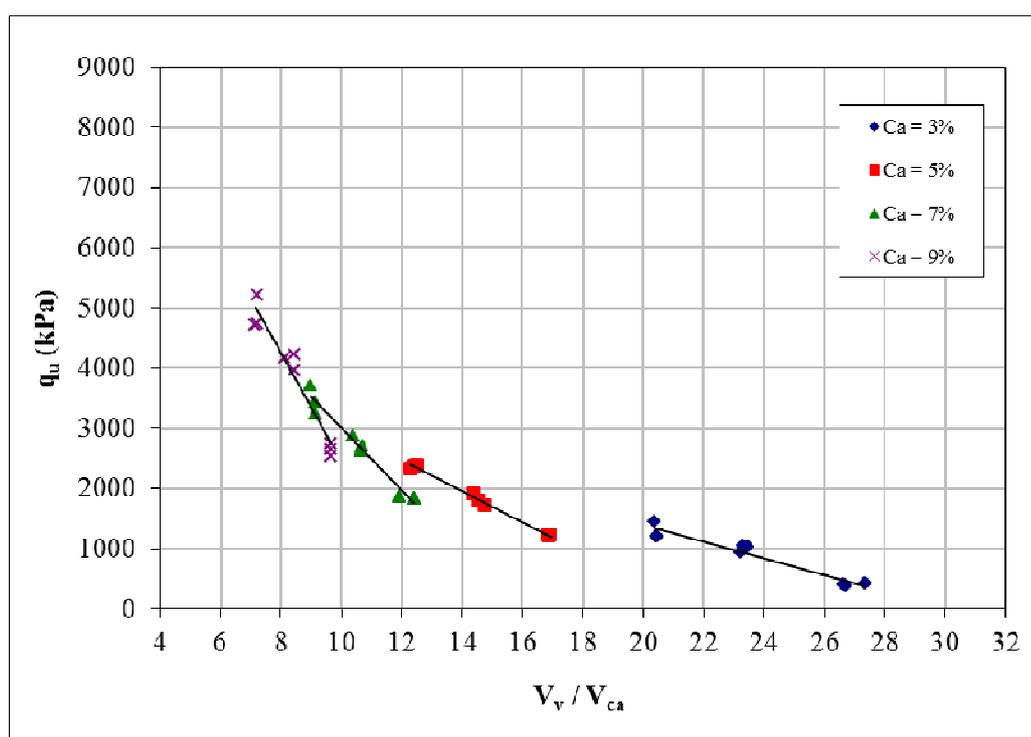


Figura 4.32 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal para as amostras com 20% de umidade e 28 dias de cura

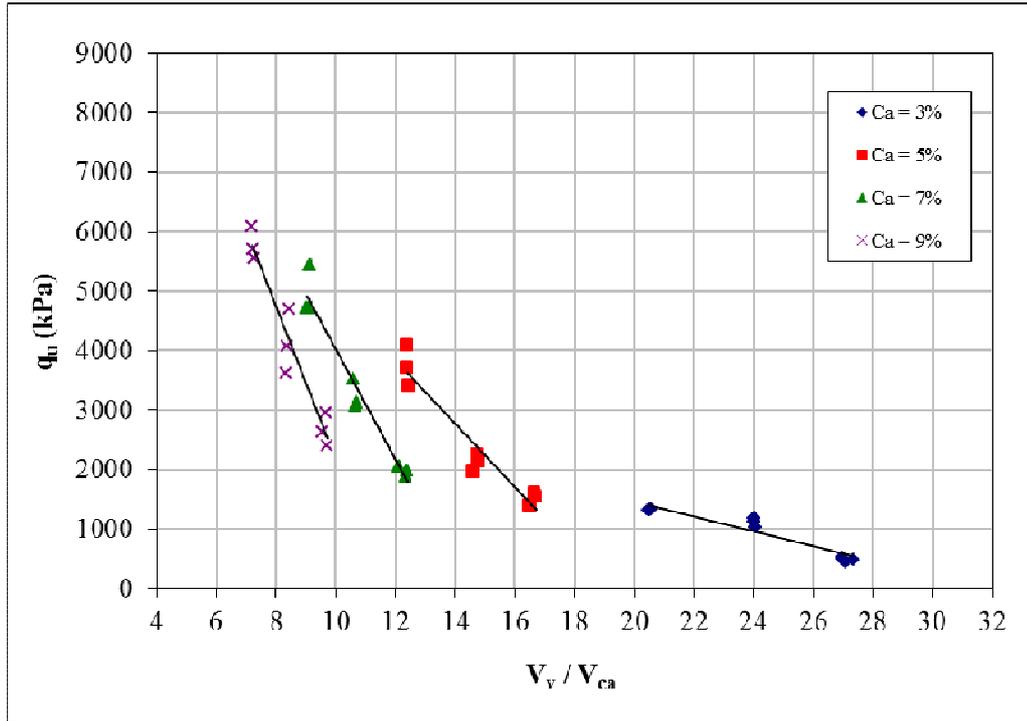


Figura 4.33 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal para as amostras com 20% de umidade e 90 dias de cura

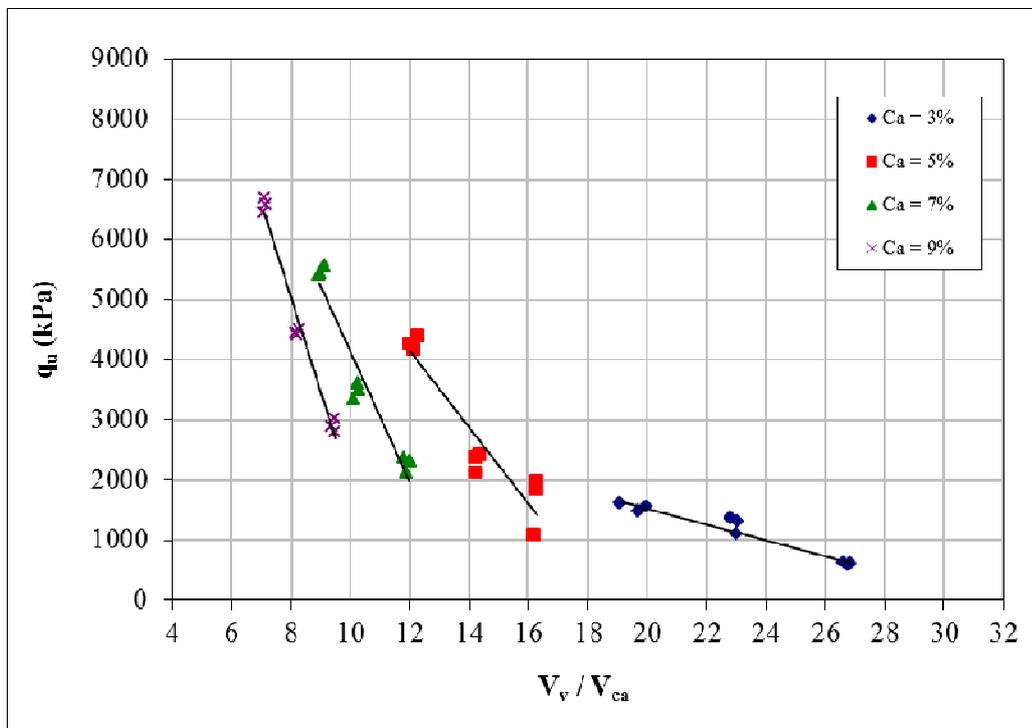


Figura 4.34 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal para as amostras com 20% de umidade e 360 dias de cura

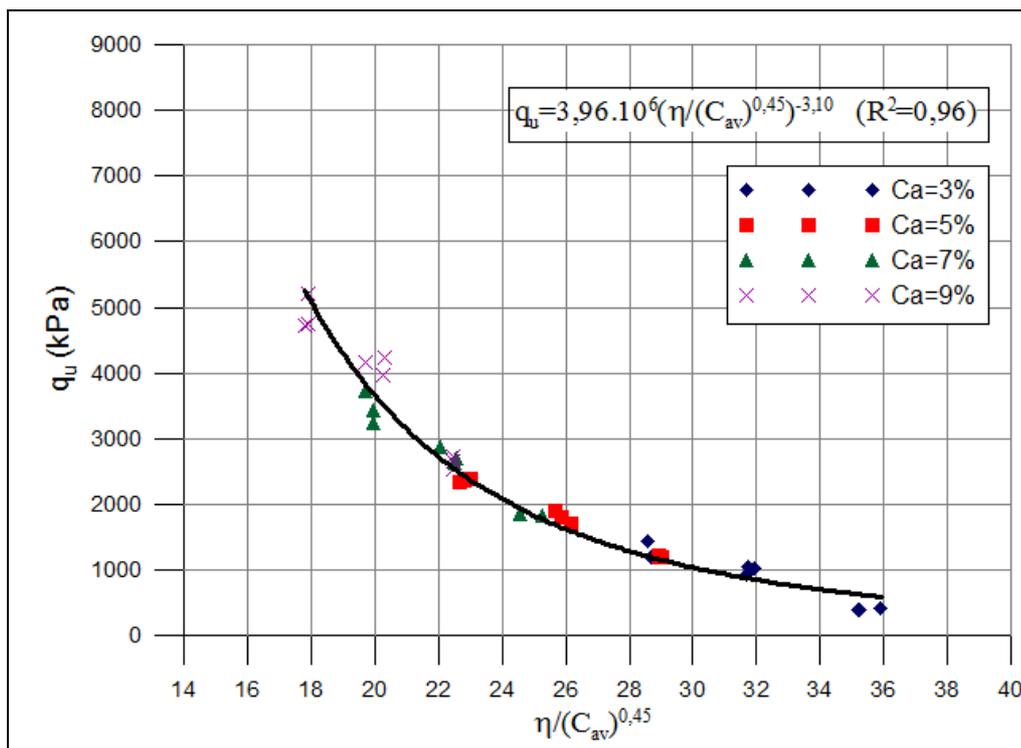


Figura 4.35 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de cura

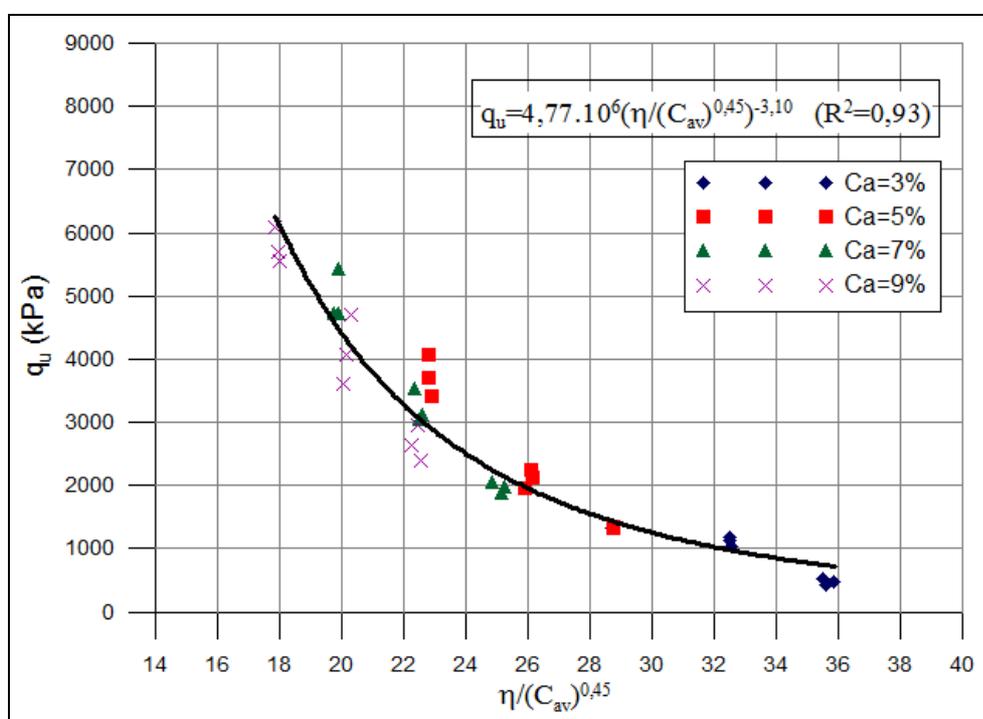


Figura 4.36 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 90 dias de cura

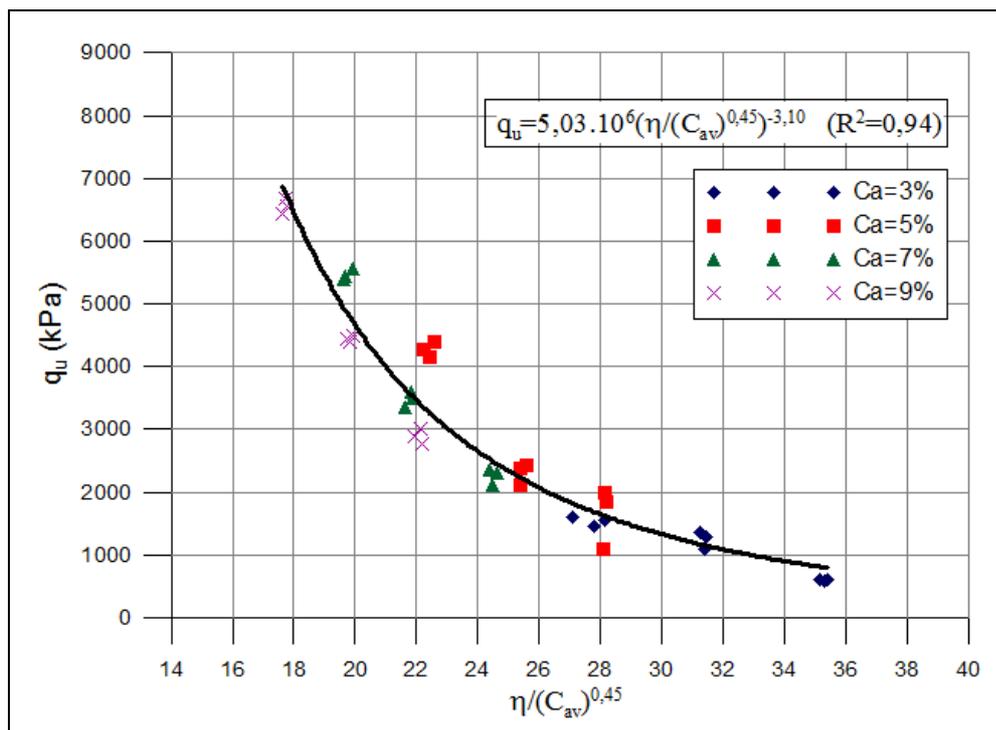


Figura 4.37 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 360 dias de cura

4.1.2.4 Efeito do tempo de cura

Na Figura 4.38 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustados) pela resistência à compressão simples das amostras com 20% de umidade ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura. Pode ser observado que as curvas que definem a relação η/C_{av} das amostras ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura têm a mesma tendência exponencial.

Os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 360 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 12% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 90 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Por sua vez, as amostras ensaiadas com 90 dias de cura, apresentam, em média, resistências em torno de 18% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Sendo que, as amostras com 360 dias de cura, apresentam, em média, resistências em torno de 33% mais altas que as amostras com 28 dias de cura.

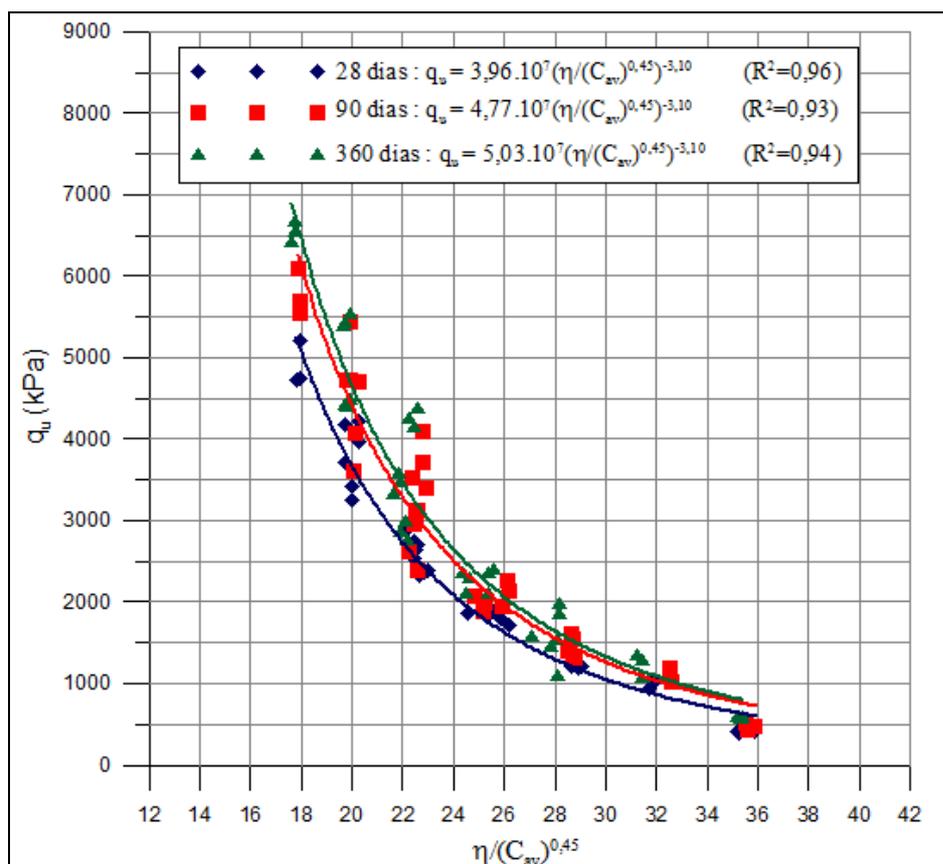


Figura 4.38 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 20% de umidade submetidas aos ensaio de resistência à compressão simples com 28, 90 e 360 dias de cura

4.1.3 Amostras com 23% de umidade

A partir dos dados constantes nas Tabelas A.7, A.8 e A.9, foram elaboradas as Figuras 4.39 a 4.52, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento mecânico do solo-cal em estudo são evidenciados.

4.1.3.1 Efeito do teor da cal

Nas Figuras 4.39 a 4.41, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=23\%$).

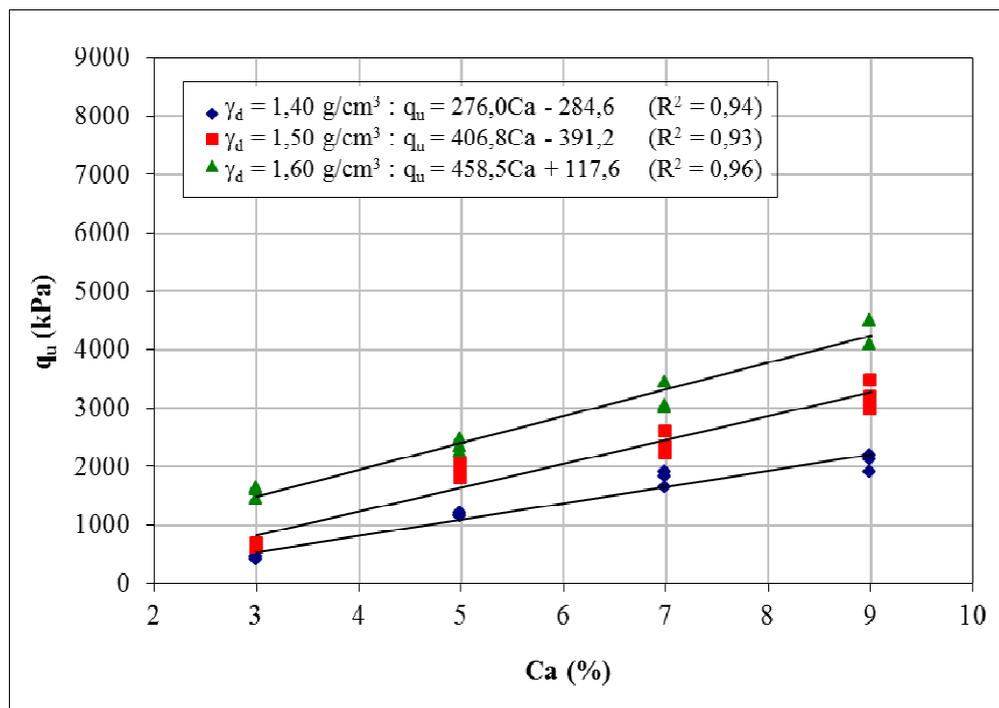


Figura 4.39 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

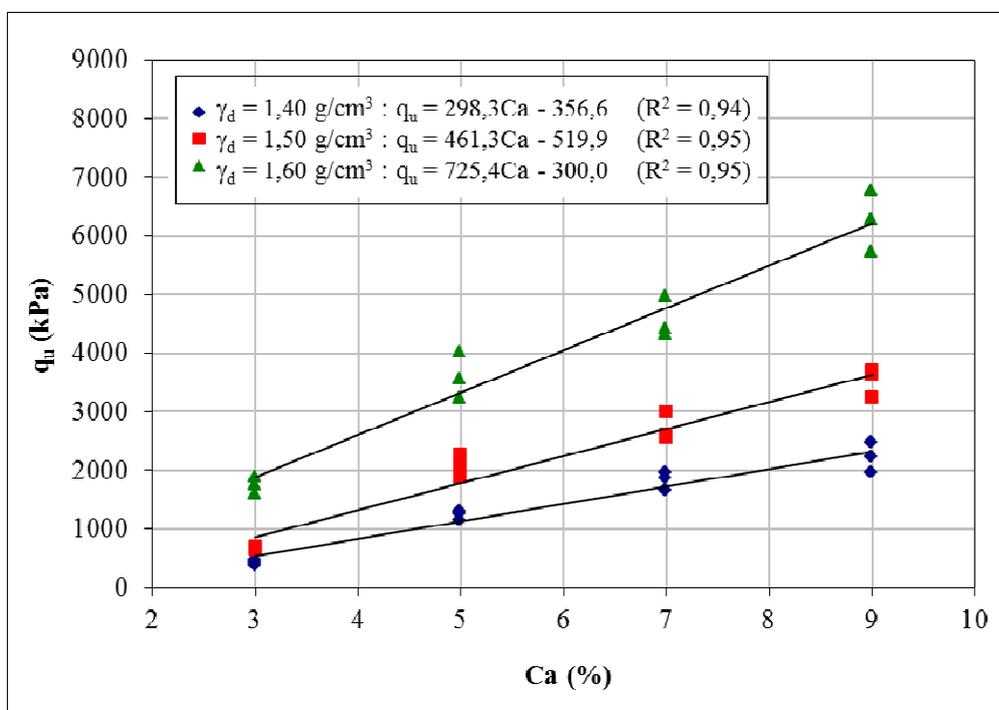


Figura 4.40 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 223% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

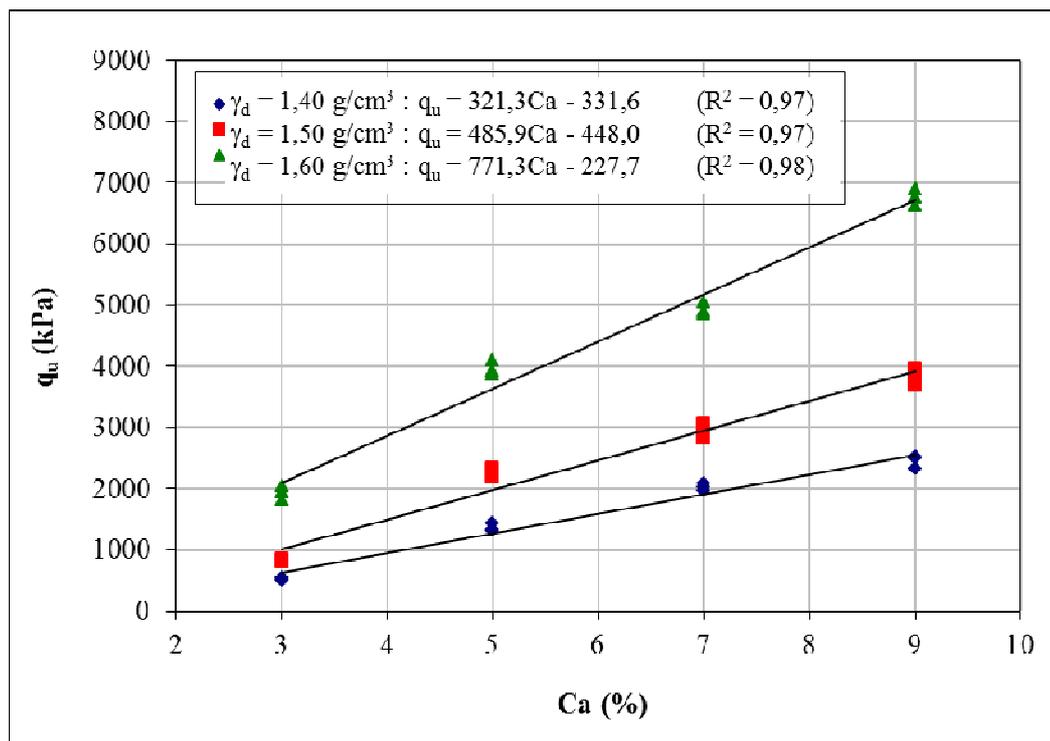


Figura 4.41 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a resistência à compressão simples do material, tanto para corpos-de-prova ensaiados a 28 dias como para as amostras de 90 e 360 dias de cura. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a resistência à compressão simples, em média, teve um acréscimo de 318%, 366% e 323% para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal.

4.1.3.2 Efeito da porosidade

Nas Figuras 4.43 a 4.45, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade do caulim-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=23\%$).

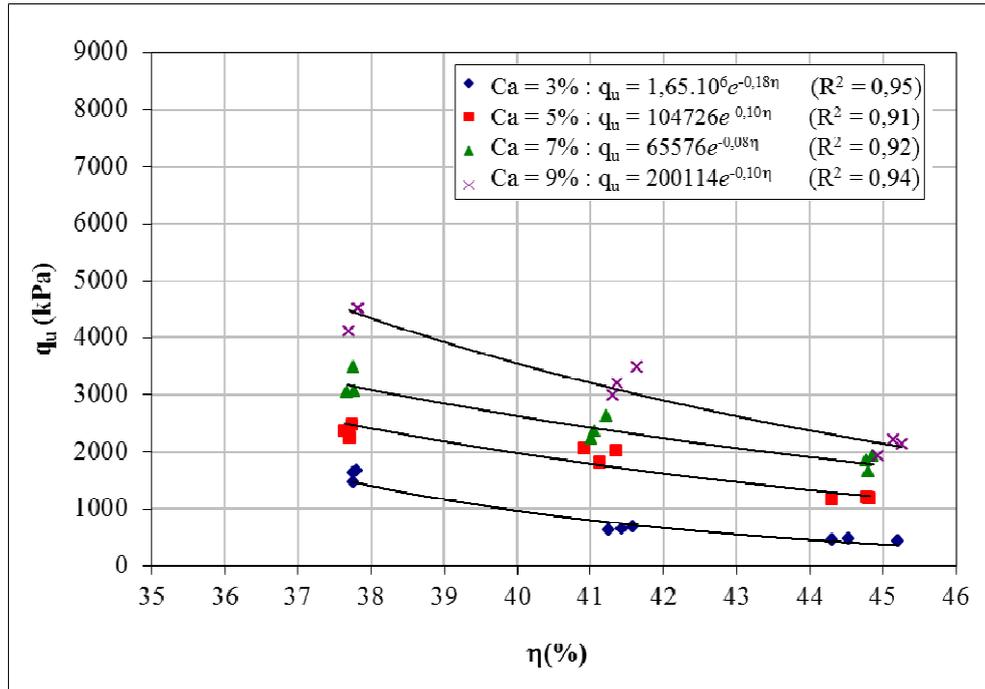


Figura 4.43 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

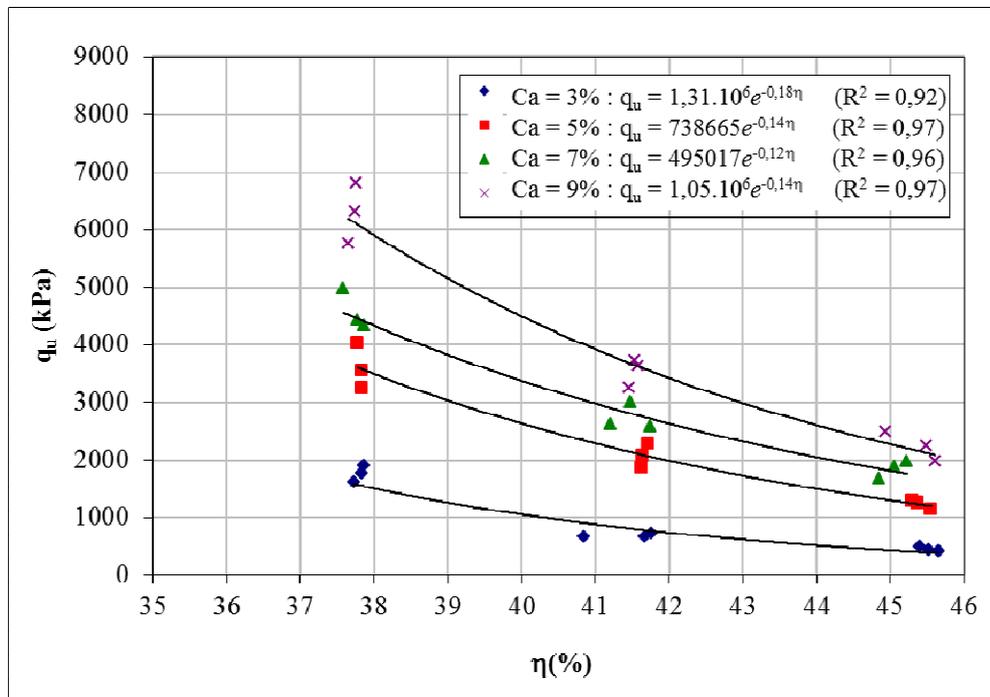


Figura 4.44 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

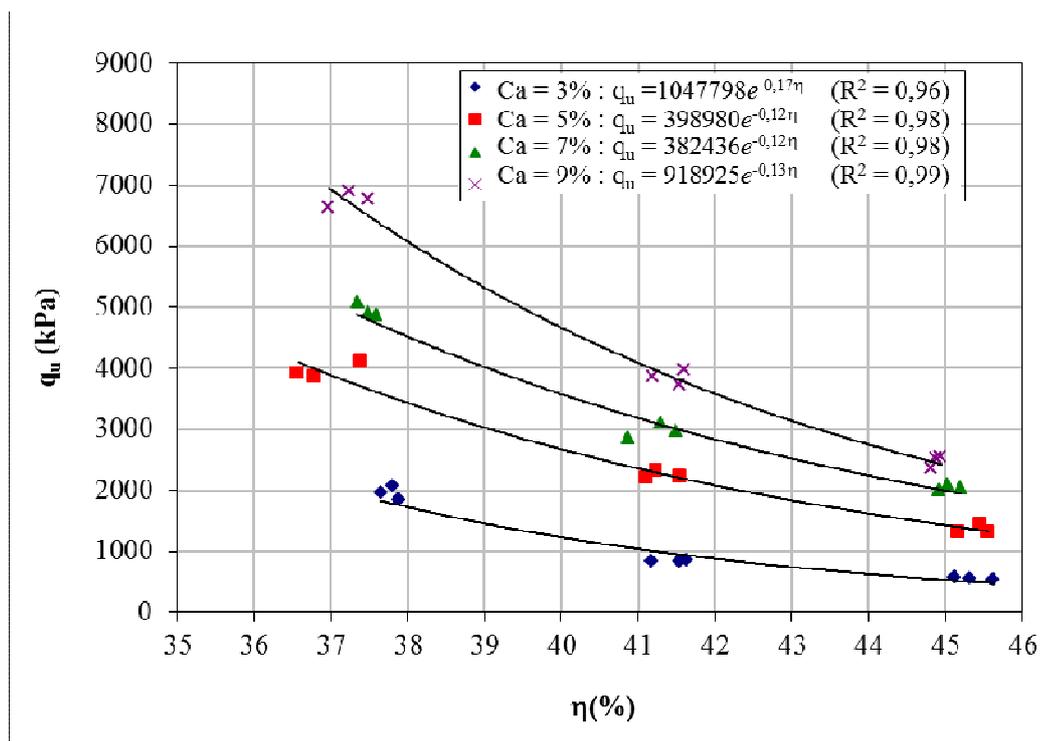


Figura 4.45 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a resistência à compressão simples das misturas de caulim-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de resistência. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou em 2,4 vezes, 3,1 vezes e 2,9 vezes a resistência à compressão simples do caulim-cal testado para 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Pode-se observar também, que a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

4.1.3.3 Relação vazios/cal

Nas Figuras 4.46 a 4.48 é apresentada a variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cal dos corpos-de-prova com 23% de umidade e 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=23\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

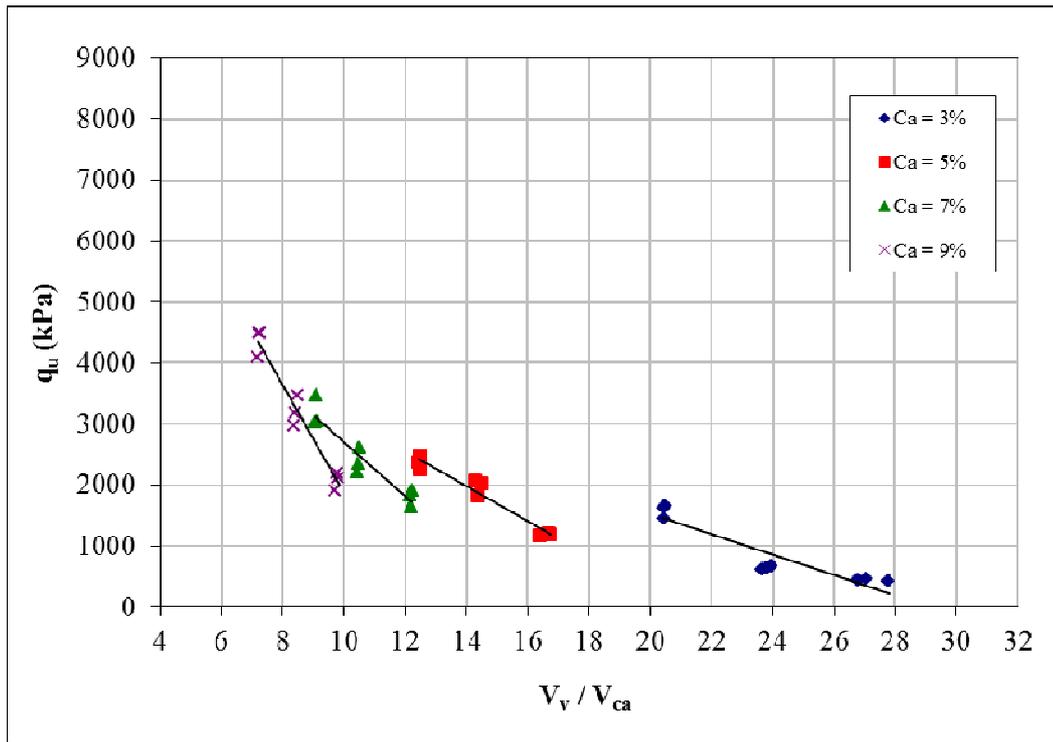


Figura 4.46 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

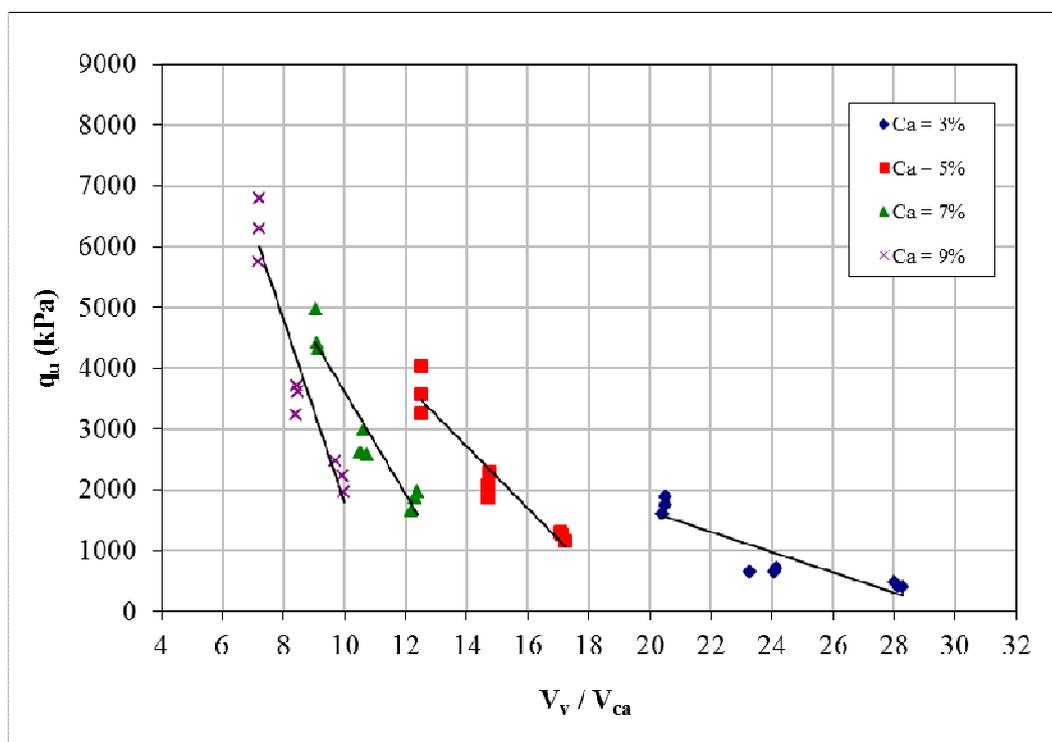


Figura 4.47 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

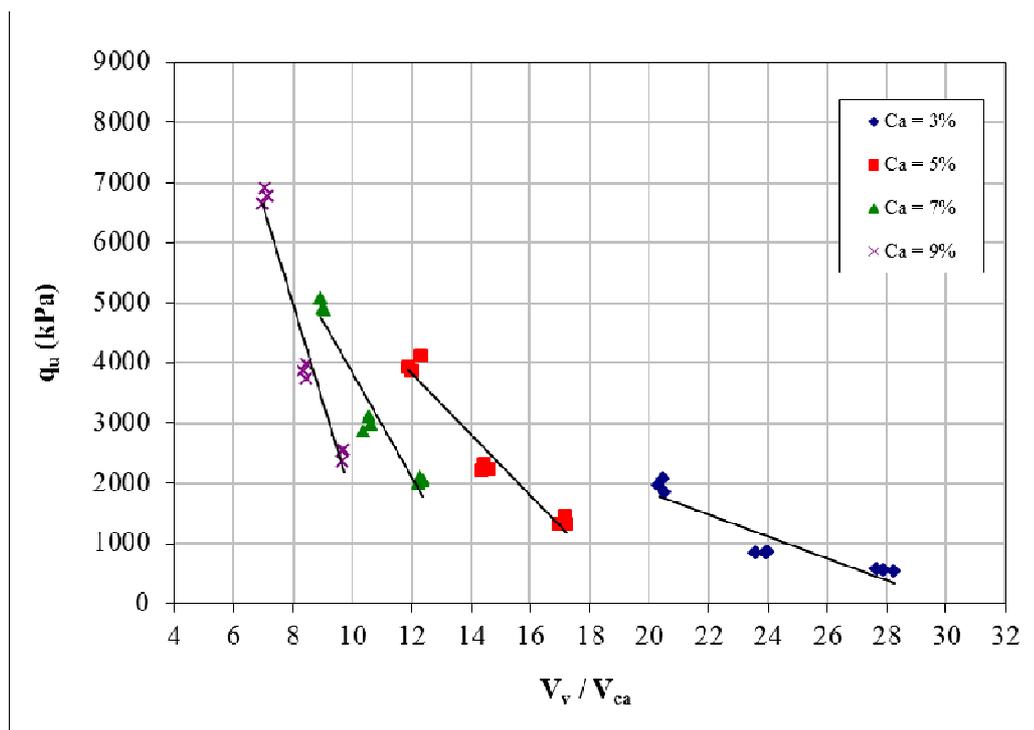


Figura 4.48 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

Pode-se observar nas Figuras 4.46 a 4.48 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

Esta mesma tendência foi verificada para as amostras com 17% e 20% de umidade. Assim, as Figuras 4.49 e 4.51 apresentam as curvas de variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,45, para as amostras com 23% de umidade com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente.

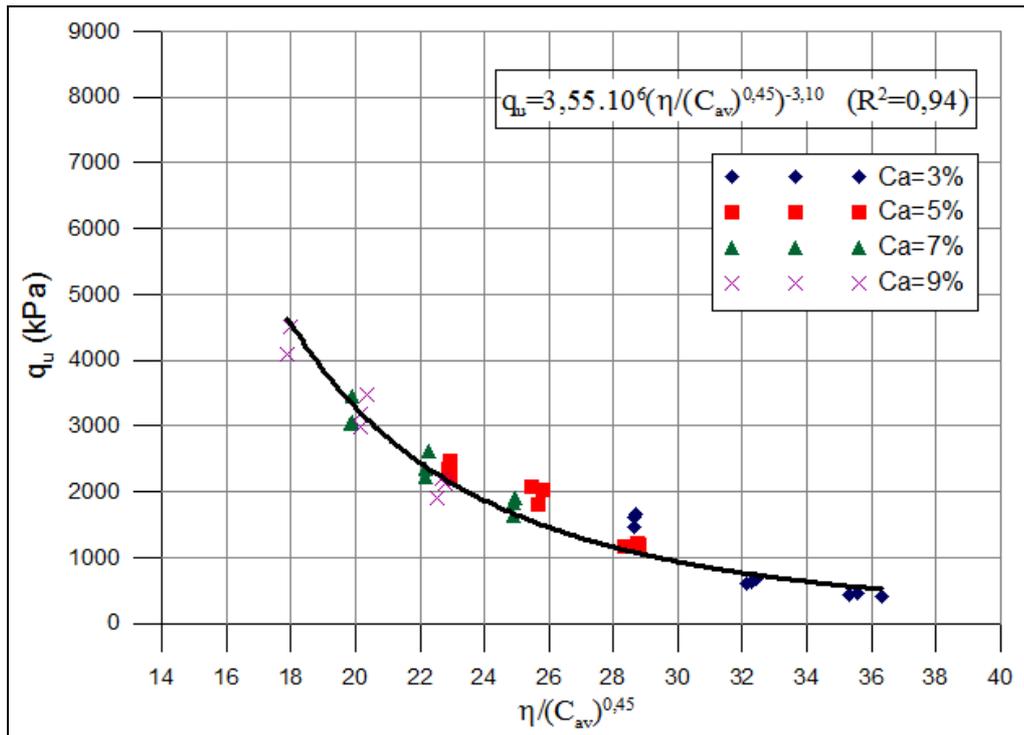


Figura 4.49 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal ajustado para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

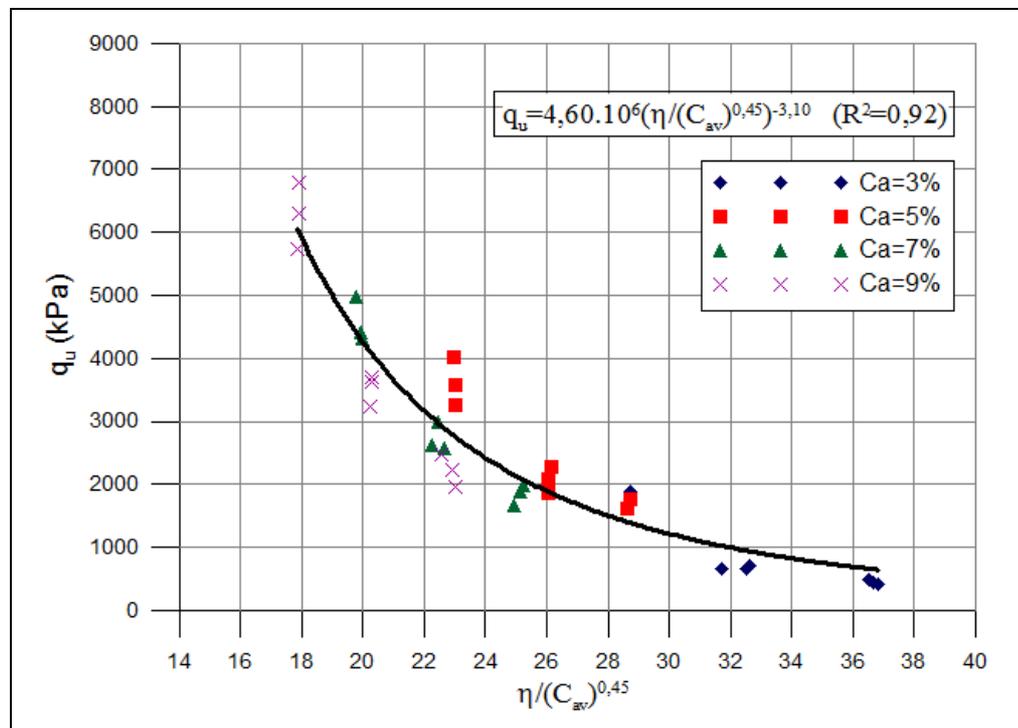


Figura 4.50 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal ajustado para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

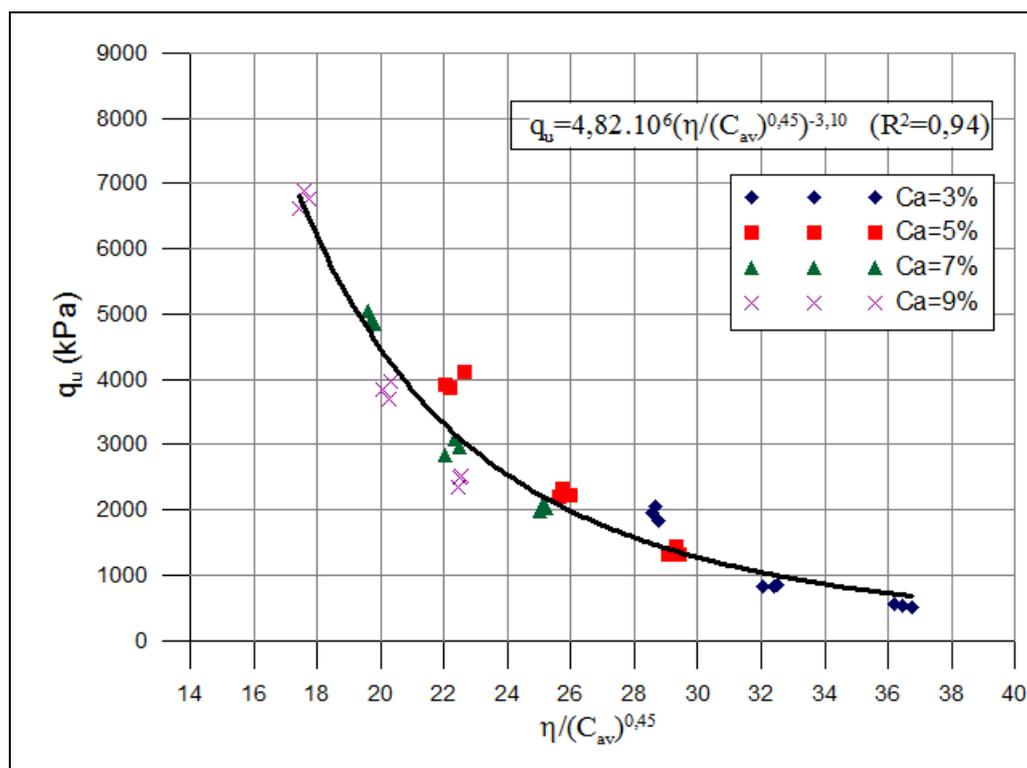


Figura 4.51 – Resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

4.1.3.4 Efeito do tempo de cura

Na Figura 4.52 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustados) pela resistência à compressão simples das amostras com 23% de umidade ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura. Pode ser observado que as curvas que definem a relação η/C_{av} das amostras ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura têm a mesma tendência exponencial.

Os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 360 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 12% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 90 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Por sua vez, as amostras ensaiadas com 90 dias de cura, apresentam, em média, resistências em torno de 17% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Sendo que, as amostras com 360 dias de cura, apresentam, em média, resistências em torno de 30% mais altas que as amostras com 28 dias de cura.

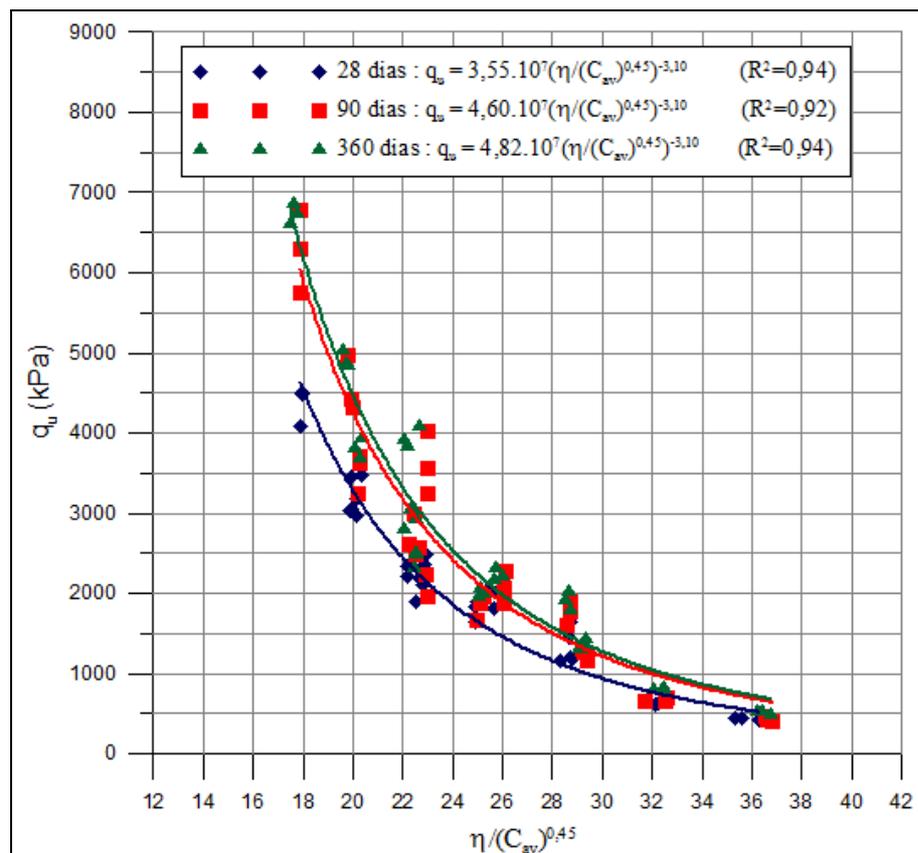


Figura 4.52 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 23% de umidade submetidas aos ensaio de resistência à compressão simples com 28, 90 e 360 dias de cura

A mesma tendência foi observada para as amostras de caulim-cal com 17% e 20% de umidade. A explicação para esse comportamento consiste em que as reações pozolânicas, as quais proporcionam ganhos efetivos de resistências às misturas compactadas de solo e cal são lentas, estendendo-se por anos e só se iniciam certo tempo depois da compactação. O ganho de resistência só ocorre se houver pH suficientemente elevado para dissolução da sílica e da alumina dos argilo-minerais do solo e se a combinação delas com a cal derem origem a novos compostos cimentantes. Pois tanto para a manutenção do pH elevado, como para a formação de aluminatos, silicatos e/ou alumino-silicatos de cálcio, é fundamental a participação da cal. A mesma tendência foi verificada por Lopes Junior (2007, 2011) em amostras de solo-cal e Dalla Rosa (2009) em amostras de solo-cinza-cal e solo-cal.

4.1.4 Efeito do teor de umidade

Nas Figuras 4.53, 4.54 e 4.55 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustados) pela resistência à compressão simples das amostras com 17%, 20% e 23% de umidade ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Pode ser observado que as curvas que definem a relação η/C_{av} das amostras com 17%, 20% e 23% de umidade têm a mesma tendência exponencial, independente do tempo de cura.

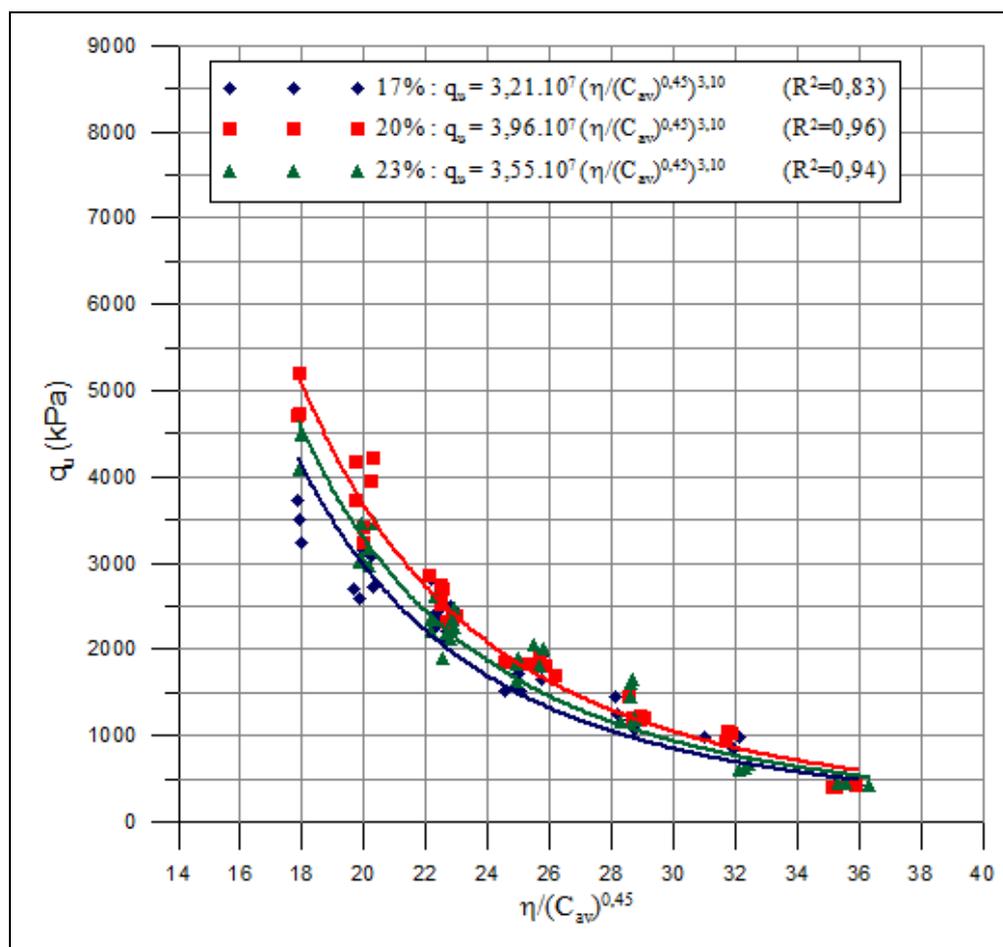


Figura 4.53 – Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade e 28 dias de cura submetidas aos ensaios de resistência à compressão simples

Na Figura 4.53 observa-se que os pontos que formam a curva das amostras com 20% umidade e 28 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 13% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 17% de umidade e resistências em torno de 10% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 23% de umidade, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Os pontos que formam a curva das

amostras com 23% umidade e 28 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 5% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 17% de umidade.

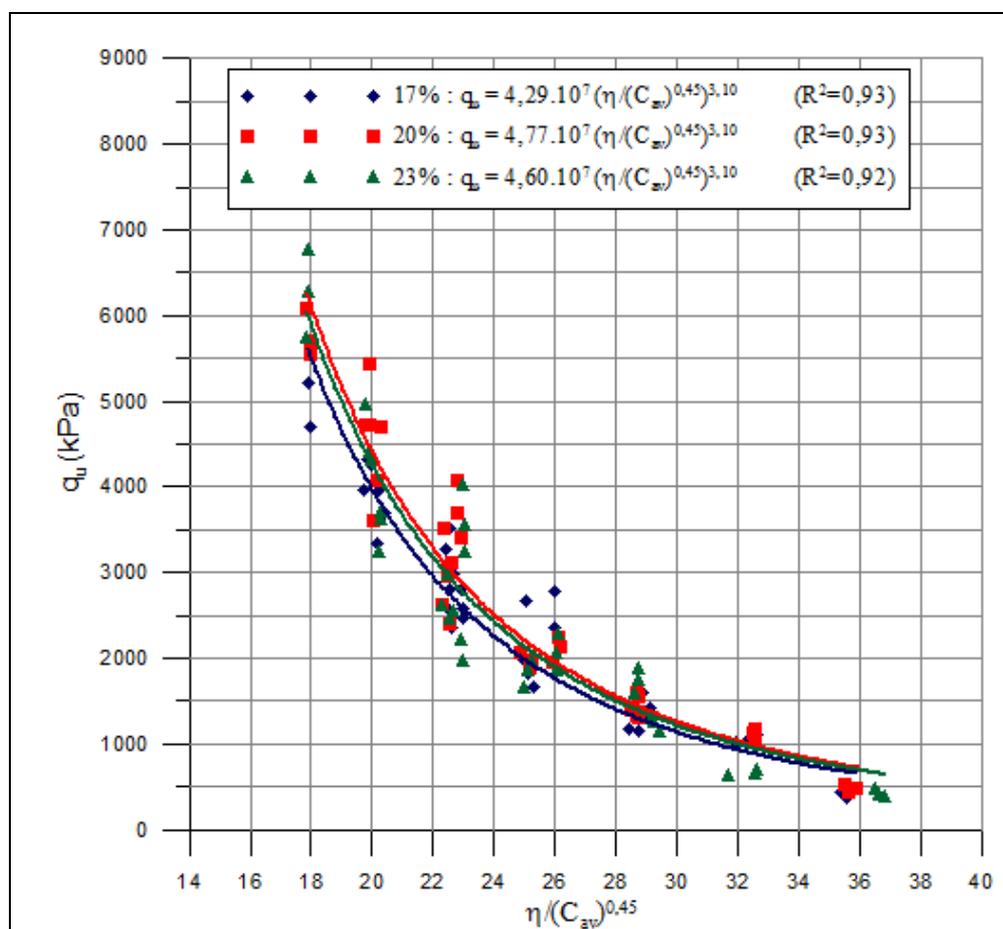


Figura 4.54 – Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade e 90 dias de cura submetidas aos ensaios de resistência à compressão simples

Na Figura 4.54 observa-se que os pontos que formam a curva das amostras com 20% umidade e 90 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 12% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 17% de umidade e resistências em torno de 9% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 23% de umidade, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Os pontos que formam a curva das amostras com 23% umidade e 90 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 1% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 17% de umidade.

Na Figura 4.55 observa-se que os pontos que formam a curva das amostras com 20% umidade e 360 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 12% mais altas que os

pontos que formam a curva das amostras com 17% de umidade e resistências em torno de 8% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 23% de umidade, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Os pontos que formam a curva das amostras com 23% umidade e 360 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 1% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 17% de umidade.

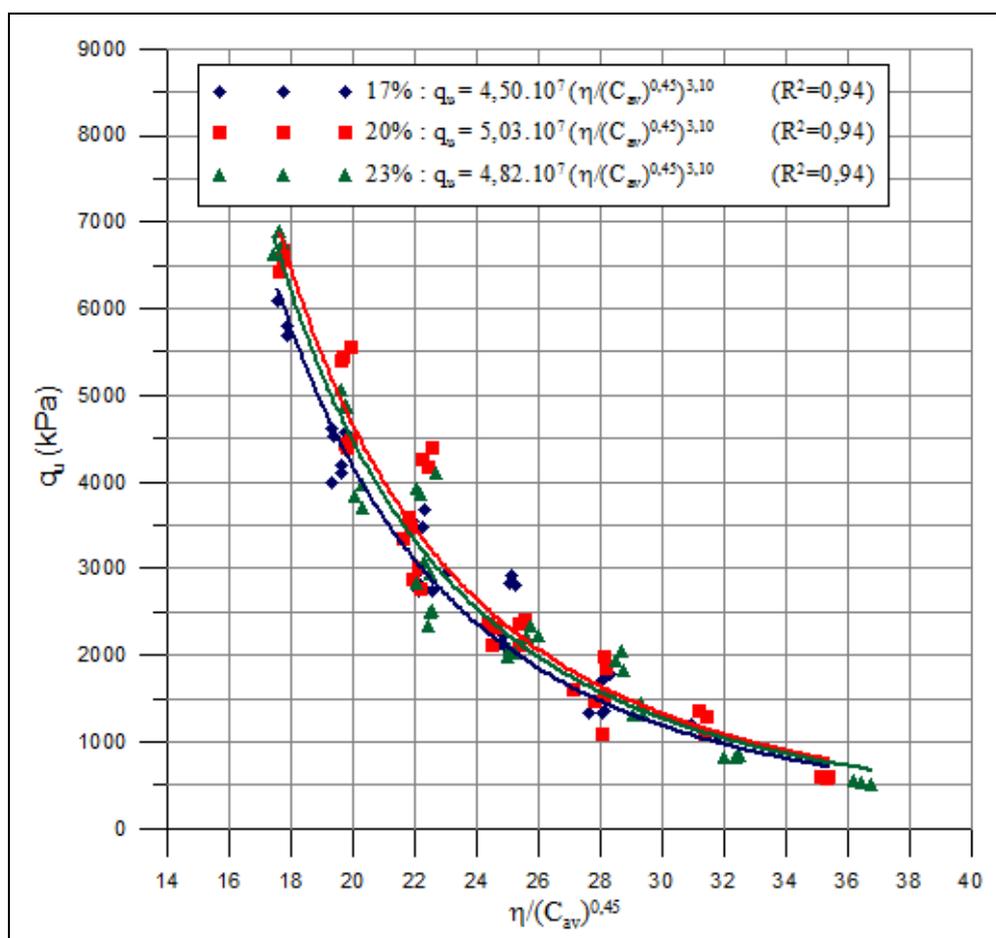


Figura 4.55 – Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade e 360 dias de cura submetidas aos ensaios de resistência à compressão simples

A partir das análises realizadas observa-se um aumento da resistência à compressão simples com o aumento do teor de umidade até um valor ótimo (20%), a partir do qual a resistência passa a diminuir. A mesma tendência foi relatada por Foppa (2005) estudando amostras de solo-cimento.

Além disso, observando-se as curvas de compactação do caulim-cal e os pontos definidos no programa de ensaios (Figura 3.19), observa-se que o teor de umidade de 20% é um pouco

inferior ao teor de umidade ótimo do ensaio de compactação, verifica-se então que o teor de umidade que gerou a maior resistência, para as misturas desta pesquisa, é ligeiramente inferior (ramo seco) ao teor ótimo obtido no ensaio de compactação. Mesmas tendências relatadas por Foppa (2005) em amostras de solo-cimento e Carraro (1997) em amostras de uma areia siltosa estabilizada com cal e cinza volante.

4.1.5 Relações únicas no controle da resistência à compressão simples do solo estudado

Os resultados apresentados na Figura 4.53, indicam a existência de relações distintas e únicas para as amostras ensaiadas com 28 dias de cura com 17% de umidade (equação 4.1), 20% de umidade (equação 4.2) e 23% de umidade (equação 4.3).

$$q_u = 3,21 \cdot 10^7 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (R^2=0,83) \quad (4.1)$$

$$q_u = 3,96 \cdot 10^7 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (R^2=0,96) \quad (4.2)$$

$$q_u = 3,55 \cdot 10^7 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (R^2=0,94) \quad (4.3)$$

Na Figura 4.54 também observa-se a existência de relações distintas e únicas para as amostras ensaiadas com 90 dias de cura com 17% de umidade (equação 4.4), 20% de umidade (equação 4.5) e 23% de umidade (equação 4.6).

$$q_u = 4,29 \cdot 10^7 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (R^2=0,93) \quad (4.4)$$

$$q_u = 4,77 \cdot 10^7 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (R^2=0,93) \quad (4.5)$$

$$q_u = 4,60 \cdot 10^7 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (R^2=0,92) \quad (4.6)$$

Os resultados apresentados na Figura 4.55, também, indicam a existência de relações distintas e únicas para as amostras ensaiadas com 360 dias de cura com 17% de umidade (equação 4.7), 20% de umidade (equação 4.8) e 23% de umidade (equação 4.9).

$$q_u = 4,50 \cdot 10^7 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (R^2=0,94) \quad (4.7)$$

$$q_u = 5,03 \cdot 10^7 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (R^2=0,94) \quad (4.8)$$

$$q_u = 4,82 \cdot 10^7 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (R^2=0,94) \quad (4.9)$$

Comparando as equações obtidas em cada tempo de cura, pode-se observar que a resistência à compressão simples tem um relacionamento direto com $[\eta/(C_{av})^{0,45}]$ para as três umidades estudadas (17%, 20% e 23%) e para os três tempos de cura, tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito da umidade. Portanto, uma relação única pode ser conseguida relacionando a resistência a compressão simples com a porosidade (η), com o teor volumétrico de cal (C_{av}) e com a umidade (ω), como apresentado na Figura 4.56, podendo-se observar as equações obtidas para 28 dias de cura (equação 4.10), 90 dias de cura (equação 4.11) e 360 dias de cura (equação 4.12).

$$q_u = [-7,28.10^5(\omega)^2 + 2,97.10^7(\omega) - 2,61.10^8].[(\eta/(C_{av})^{0,45})^{-3,10}] \quad (R^2=1,00) \quad (4.10)$$

$$q_u = [-3,61.10^5(\omega)^2 + 1,50.10^7(\omega) - 1,07.10^8].[(\eta/(C_{av})^{0,45})^{-3,10}] \quad (R^2=1,00) \quad (4.11)$$

$$q_u = [-4,11.10^5(\omega)^2 + 1,70.10^7(\omega) - 1,25.10^8].[(\eta/(C_{av})^{0,45})^{-3,10}] \quad (R^2=1,00) \quad (4.12)$$

A Figura 4.56 demonstra também, que para as misturas estudadas na presente pesquisa, a resistência à compressão simples atinge seu valor máximo com 20% de umidade, nos tempos de cura e teores de umidade estudados.

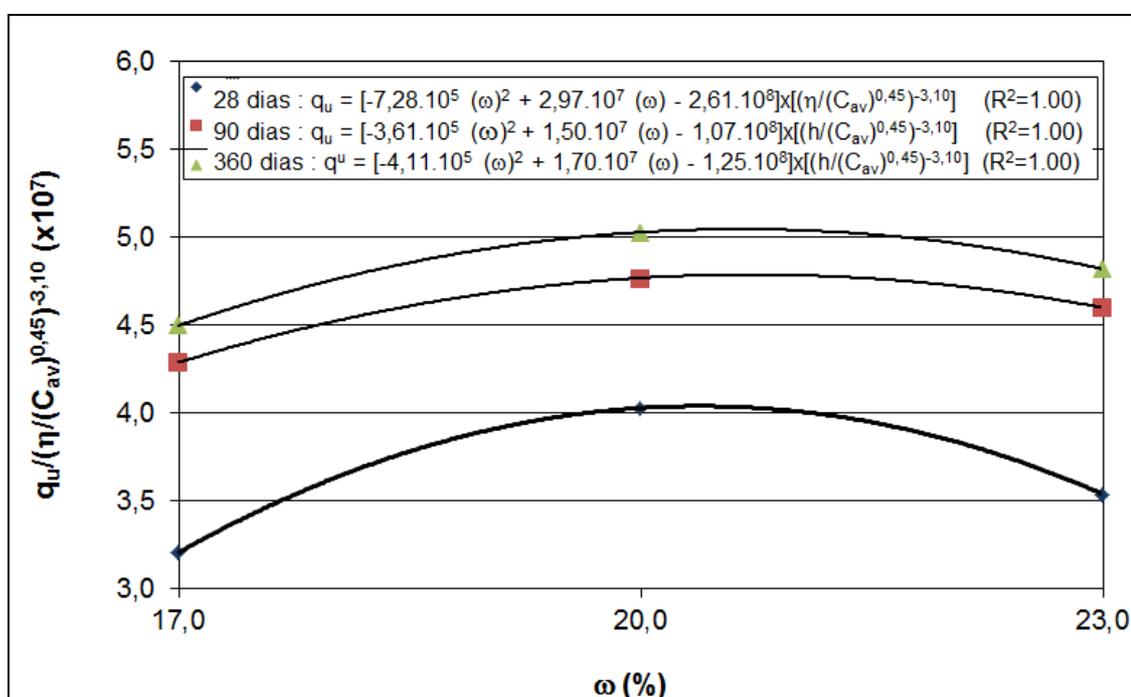


Figura 4.56 – Variação da resistência à compressão simples com a porosidade (η), com o teor volumétrico de cal (C_{av}) e com a porcentagem de umidade (ω) para 28, 90 e 360 dias de cura

Assim, as equações 4.10 a 4.12 podem ser utilizadas em relações de dosagem. Para o estudo de misturas de caulim-cal, existem várias maneiras para alcançar um valor-alvo de resistência à compressão simples para um determinado projeto: redução da porosidade e/ou aumento da quantidade de cal e/ou aumento/diminuição do teor de umidade. Os resultados apresentados neste trabalho, portanto, sugerem que pode-se escolher a quantidade de cal, a porcentagem de umidade e o esforço de compactação adequado para fornecer uma mistura que resulte na resistência à compressão simples desejada (em kPa).

4.1.6 Modo de ruptura dos corpos-de-prova de caulim-cal submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples

A Figura 4.57 mostra corpos-de-prova de caulim-cal submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples.



Figura 4.57a – Corpo-de-prova de caulim-cal submetido ao ensaio de resistência à compressão simples (LEGG/ENVIRONGEO – UFRGS)



Figura 4.57b – Corpo-de-prova de caulim-cal submetido ao ensaio de resistência à compressão simples (LABGEO – FEUP)

Na maioria dos ensaios de resistência à compressão simples realizados observou-se um modo de ruptura frágil com a formação de um ou mais planos de ruptura bem definidos, sendo que para os corpos-de-prova com maior porcentagem de cal e maior massa específica aparente seca a ruptura foi mais frágil, ocorrendo às vezes o “estilhaçamento” do corpo-de-prova. Não

foram notadas diferenças significativas entre o tipo de ruptura apresentado por corpos-de-prova com mesma relação vazios/cal.

4.1.7 Medidas de Sucção matricial

Nas tabelas A.1 a A.9, do apêndice A são apresentados os resultados das medidas de sucção matricial feitas sobre as amostras ensaiadas à resistência à compressão simples, onde:

S = grau de saturação de moldagem;

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

ω = teor de umidade de moldagem;

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

4.1.7.1 Amostras com 17% de umidade

As Tabelas A.1, A.2 e A.3, do apêndice A, apresentam os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 17% de umidade com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Verificou-se que o grau de saturação de moldagem das amostras com 28, 90 e 360 dias de cura variou, em média, de 45% até 71%. Após a imersão por 24 horas, os corpos-de-prova de menor índice de vazios absorveram menor quantidade de água, como era de se esperar. Entretanto, o grau de saturação obtido após a imersão apresentou pequena variação em relação ao índice de vazios, girando em torno de 75% para todos os corpos-de-prova. O valor médio obtido para a sucção matricial de todos os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 17% de umidade e 28, 90 e 360 dias de cura ficou em 122 kPa.

A Figura 4.58 apresenta a tendência e a relação existente entre a medida de sucção matricial e o índice de vazios. Apesar da dispersão dos pontos pode-se verificar que a sucção matricial tende a aumentar à medida que diminui o índice de vazios, para qualquer tempo de cura estudado.

Na Figura 4.59 é apresentada a variação da resistência à compressão simples pela relação entre a sucção e a resistência à compressão simples (em porcentagem). Nota-se que a influência da sucção varia de 1 a 9% da resistência à compressão simples nos corpos-de-prova ensaiados com 28, 90 e 360 dias de cura.

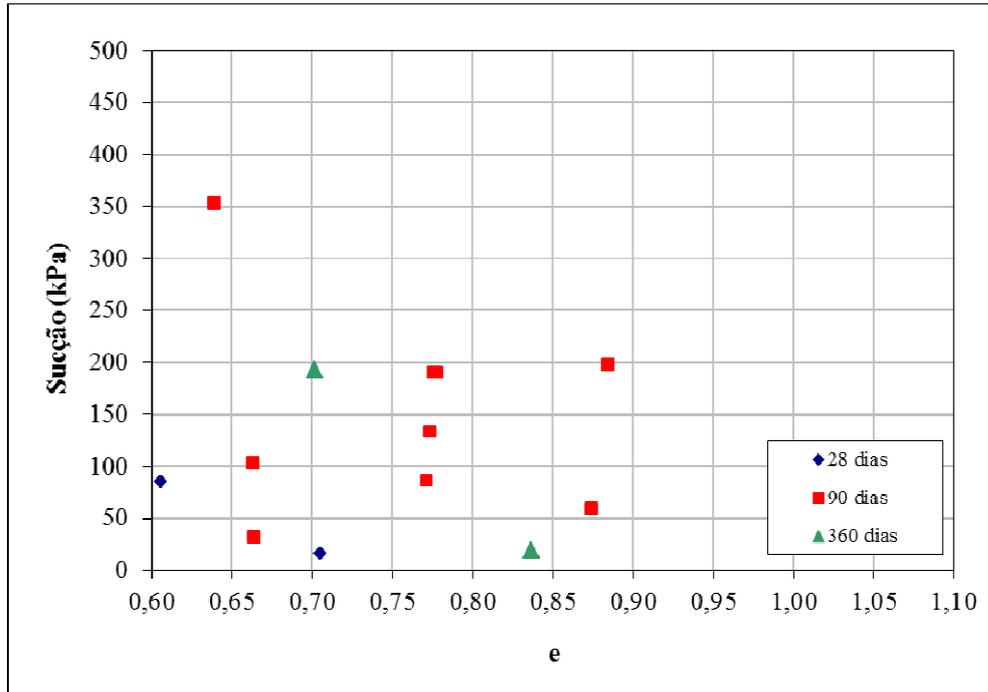


Figura 4.58 – Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nas amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura

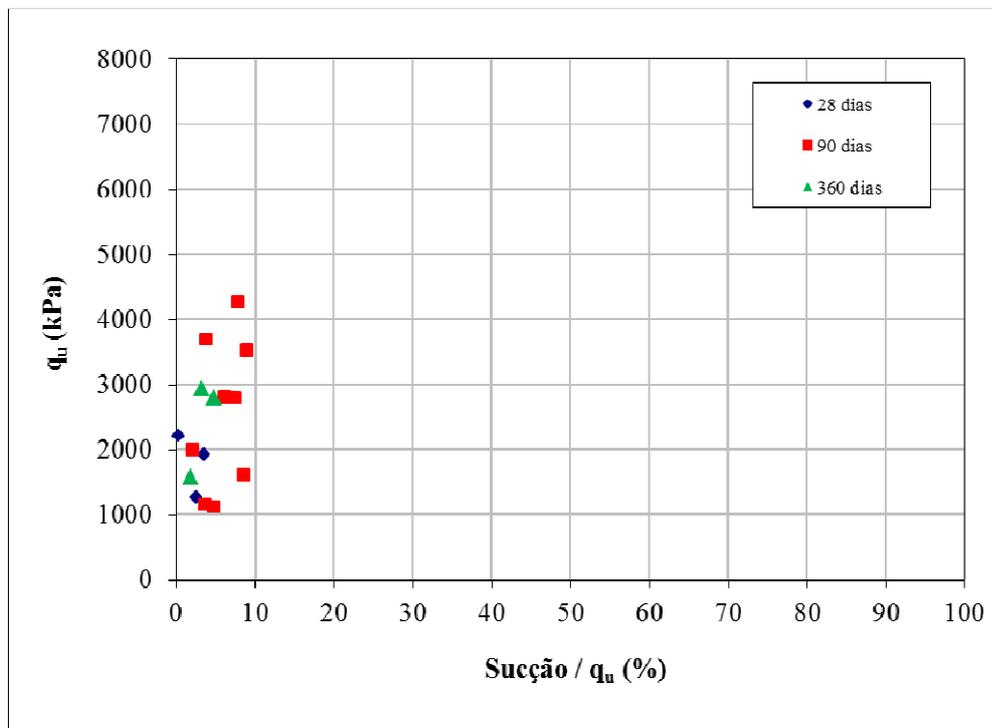


Figura 4.59 – Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas 28, 90 e 360 dias de cura

Nota-se também, na Figura 4.59 que a influência da sucção não passa de 10% da resistência à compressão simples em todos os corpos-de-prova ensaiados. Assim, observa-se que os corpos-de-prova não apresentaram grandes variações em relação a sucção.

4.1.7.2 Amostras com 20% de umidade

As Tabelas A.4, A.5 e A.6, do apêndice A, apresentam os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 20% de umidade com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Verificou-se que o grau de saturação de moldagem das amostras com 28, 90 e 360 dias de cura variou de 53% até 83%. Após a imersão por 24 horas, os corpos-de-prova de menor índice de vazios absorveram menor quantidade de água, como era de se esperar. Entretanto, o grau de saturação obtido após a imersão apresentou pequena variação em relação ao índice de vazios, girando em torno de 78% para todos os corpos-de-prova. O valor médio obtido para a sucção matricial de todos os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 20% de umidade e 28, 90 e 360 dias de cura ficou em 129 kPa.

A Figura 4.60 apresenta a tendência e a relação existente entre a medida de sucção matricial e o índice de vazios. Apesar da dispersão dos pontos pode-se verificar que a sucção matricial tende a aumentar à medida que diminui o índice de vazios, para qualquer tempo de cura estudado.

Na Figura 4.61 é apresentada a variação da resistência à compressão simples pela relação entre a sucção e a resistência à compressão simples (em porcentagem). Nota-se que a influência da sucção varia de 1 a 14% da resistência à compressão simples nos corpos-de-prova ensaiados com 28, 90 e 360 dias de cura.

Nota-se também, na Figura 4.61 que a influência da sucção não passa de 10% da resistência à compressão simples em mais de 83% dos corpos-de-prova ensaiados. Entretanto, para os outros corpos-de-prova ensaiados a sucção não passa de 14% da sua resistência à compressão simples. Assim, observa-se que os corpos-de-prova não apresentaram grandes variações em relação a sucção.

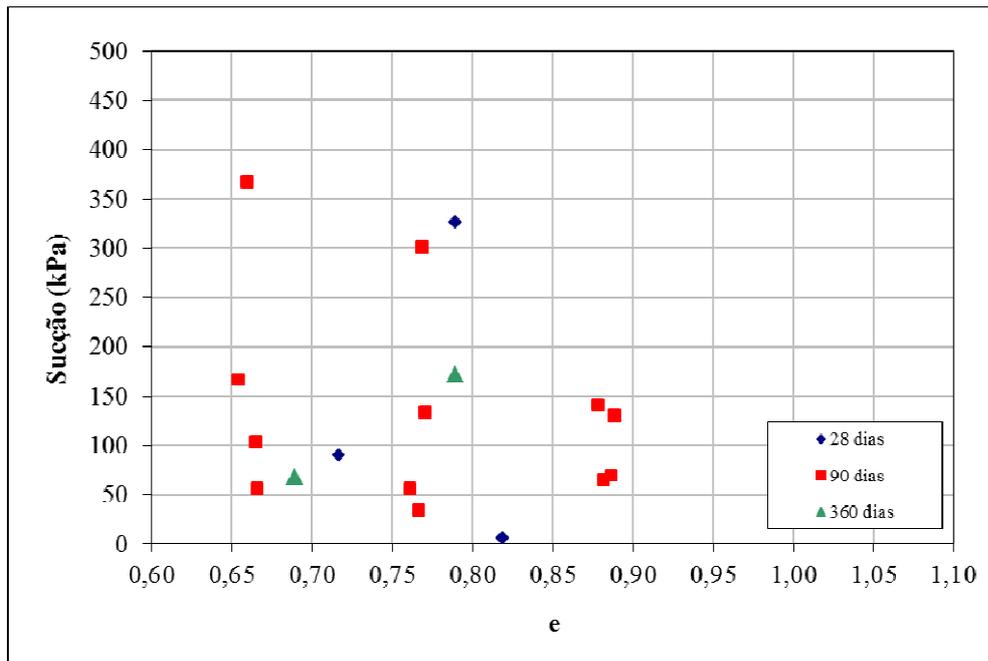


Figura 4.60 – Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nas amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura

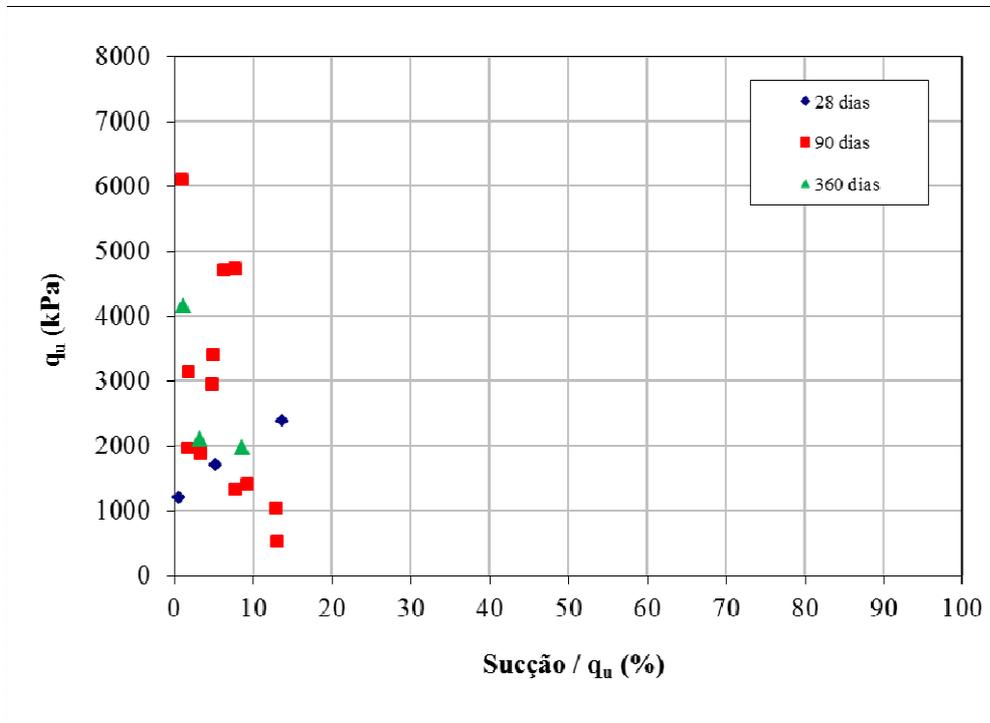


Figura 4.61 – Influência da sucção nos valores de resistência à compressão simples das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas 28, 90 e 360 dias de cura

4.1.7.3 Amostras com 23% de umidade

As Tabelas A.7, A.8 e A.9, do apêndice A, apresentam os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 23% de umidade com 28, 90 e 360 dias de cura, respectivamente. Verificou-se que o grau de saturação de moldagem das amostras com 28, 90 e 360 dias de cura variou de 64% até 95%. Após a imersão por 24 horas, os corpos-de-prova de menor índice de vazios absorveram menor quantidade de água, como era de se esperar. Entretanto, o grau de saturação obtido após a imersão apresentou pequena variação em relação ao índice de vazios, girando em torno de 81% para todos os corpos-de-prova. O valor médio obtido para a sucção matricial de todos os corpos-de-prova da linha “A” das amostras com 23% de umidade e 28, 90 e 360 dias de cura ficou em 130 kPa.

A Figura 4.62 apresenta a tendência e a relação existente entre a medida de sucção matricial e o índice de vazios. Apesar da dispersão dos pontos pode-se verificar que a sucção matricial tende a aumentar à medida que diminui o índice de vazios, para qualquer tempo de cura estudado.

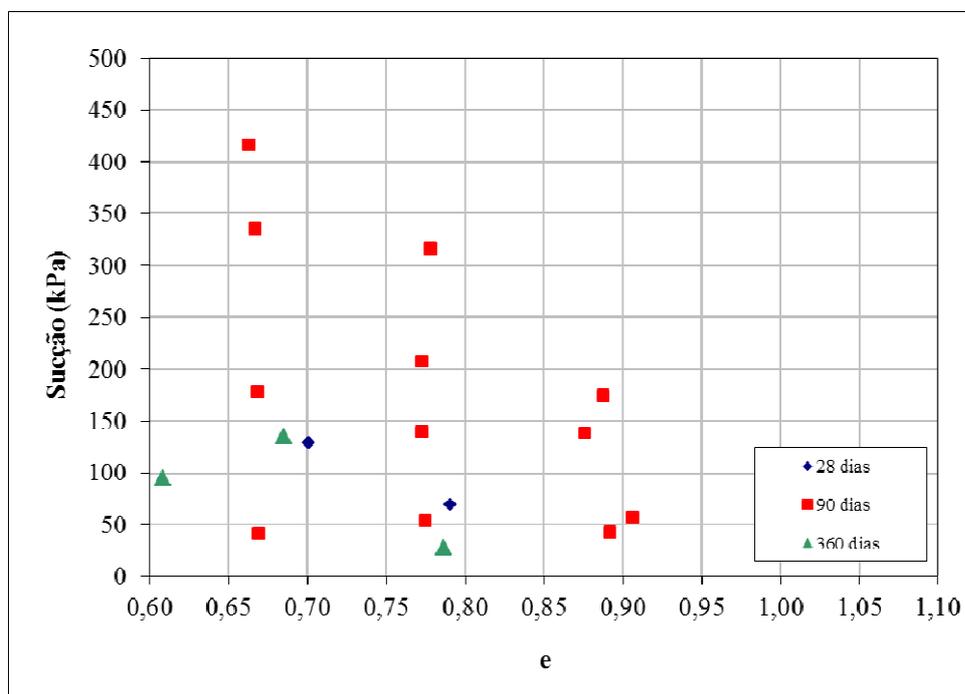


Figura 4.62 – Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nas amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28, 90 e 360 dias de cura

Na Figura 4.63 é apresentada a variação da resistência à compressão simples pela relação entre a sucção e a resistência à compressão simples (em porcentagem). Nota-se que a influência da sucção varia de 1 a 15% da resistência à compressão simples nos corpos-de-prova ensaiados com 28, 90 e 360 dias de cura.

Nota-se também, na Figura 4.63 que a influência da sucção não passa de 10% da resistência à compressão simples em mais de 88% dos corpos-de-prova ensaiados. Entretanto, para os outros corpos-de-prova ensaiados a sucção não passa de 15% da sua resistência à compressão simples. Assim, observa-se que os corpos-de-prova não apresentaram grandes variações em relação a sucção.

Estas mesmas tendências foram observadas por Lopes Junior (2007, 2011) e Dalla Rosa (2009). Além disso, de acordo com Cruz (2001), em geral, os solos compactados próximos ao teor ótimo de umidade apresentam grau de saturação variando entre 70% e 90%, com valores de sucção compreendidos entre 0 kPa e 1000 kPa. O autor também apresenta medidas de sucção de treze solos residuais lateríticos compactados, para os quais encontrou valores de sucção variando de 30 kPa até 250 kPa. Da mesma forma, Marinho e Silva (2001) citam que a maioria dos solos compactados apresentam, no teor ótimo de umidade, sucções variando de 50 kPa a 300 kPa.

Em função do elevado grau de saturação, obtido após a imersão dos corpos-de-prova por 24 horas antes de serem submetidos à compressão simples (em média 78%), valores de sucção abaixo de 200 kPa eram esperados para todos os corpos-de-prova. Isso ocorreu para 82% das amostras. Como o processo de imersão dos corpos-de-prova por 24 horas se mostrou satisfatório no aumento e uniformização do grau de saturação das amostras, acredita-se também que os corpos-de-prova não apresentaram grandes variações na sucção, permitindo, assim, desconsiderar a sucção como mais uma variável nas análises das variáveis investigadas. Além disso, observou-se que um aumento da sucção matricial está diretamente relacionado à uma diminuição do índice de vazios que conseqüentemente proporciona um aumento da resistência à compressão simples da amostra, o que resulta em uma relação $Sucção/q_u$ entorno de 10% (independente do índice de vazios e da umidade utilizada). Sendo assim, optou-se também, por não medi-la nos ensaios seguintes.

4.2.1 Amostras com 17% de umidade

4.2.1.1 Efeito do teor de cal

Na Figura 4.64, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à tração em função da quantidade de cal para 28 dias de cura. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=17\%$).

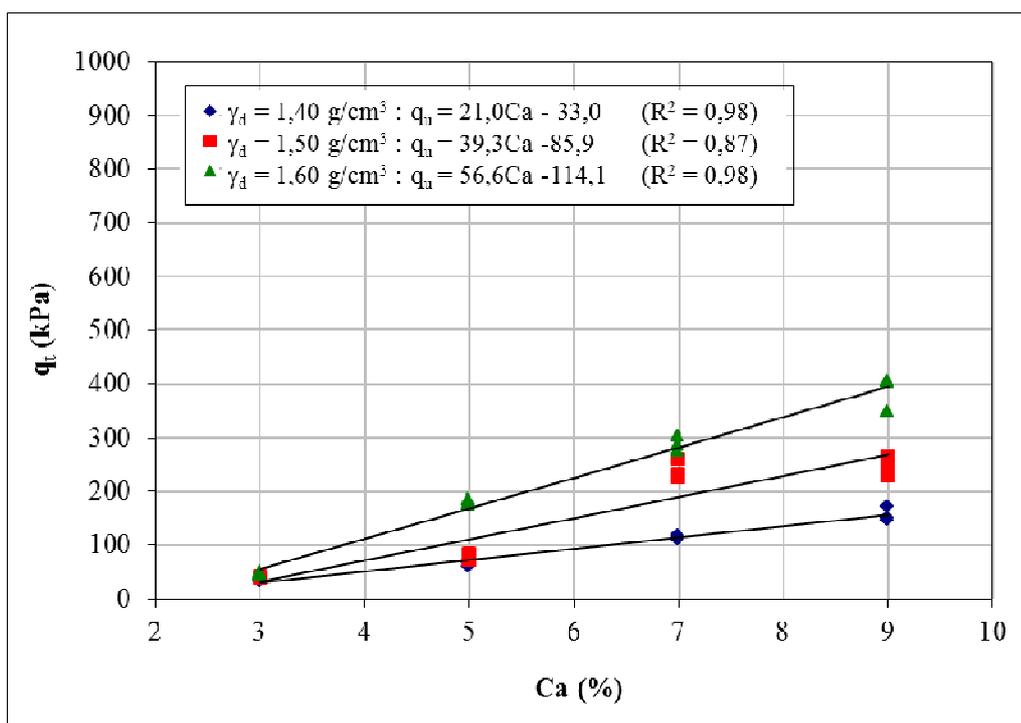


Figura 4.64 – Variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a resistência à tração do material ensaiado com 28 dias de cura. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a resistência à tração, em média, teve um acréscimo de 547%. Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à tração aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal.

As amostras ensaiadas com 360 dias de cura e 7% de cal apresentam resistências em torno de 18% mais altas que as amostras com 9% de cal, para o peso específico aparente seco de 1,5 g/cm³.

4.2.1.2 Efeito da porosidade

Na Figura 4.65, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à tração em função da porosidade do caulim-cal compactado para corpos-de-prova 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 ($\omega=17\%$).

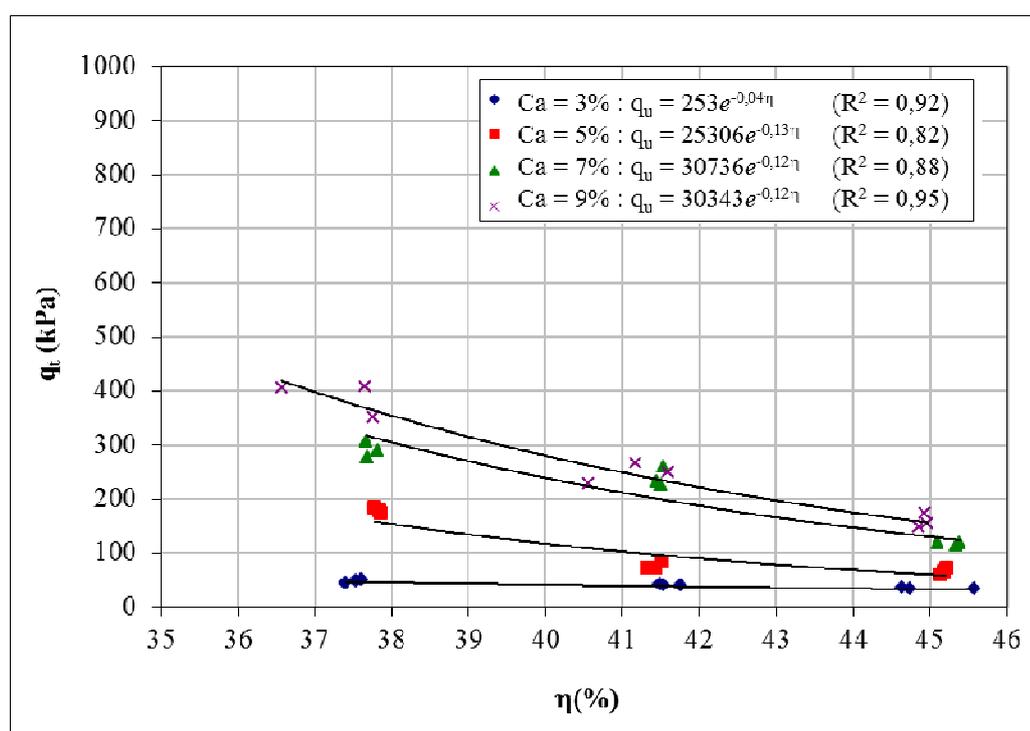


Figura 4.65 – Variação da resistência à tração em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a resistência à compressão simples das misturas de caulim-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de resistência. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou em 2,3 vezes a resistência à tração do caulim-cal testado para 28 dias de cura.

Pode-se observar também, que a resistência à tração aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

Não foi possível analisar a influência da porosidade nas amostras com 17% de umidade e 360 dias de cura, pois neste caso somente foram rompidas amostras com o peso específico aparente seco de 1,5 g/cm³.

4.2.1.3 Relação vazios/cal

Na Figura 4.66 é apresentada a variação da resistência à tração em função da relação vazios/cal dos corpos-de-prova com 17% de umidade e 28 dias de cura. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=17\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

Pode-se observar na Figura 4.66 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

Esta mesma tendência foi verificada para as amostras ensaiadas à resistência à compressão simples com 17% de umidade. Assim, a Figura 4.67 apresenta a curva de variação da resistência à tração em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,45, para as amostras com 17% de umidade e 28 dias de cura.

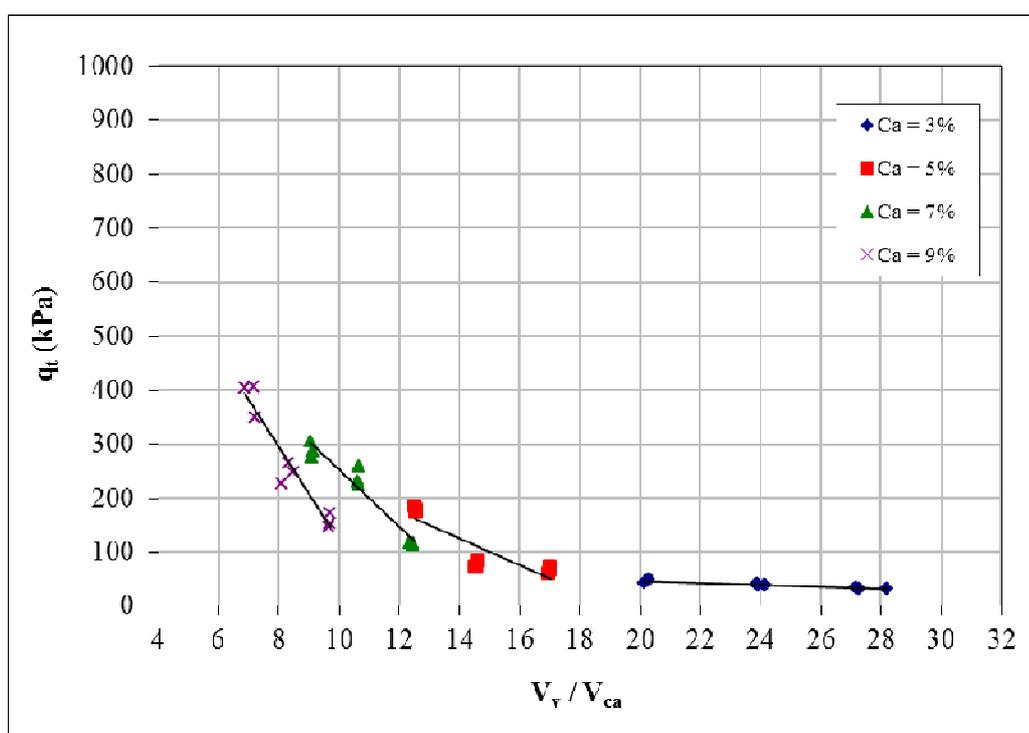


Figura 4.66 – Resistência à tração *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

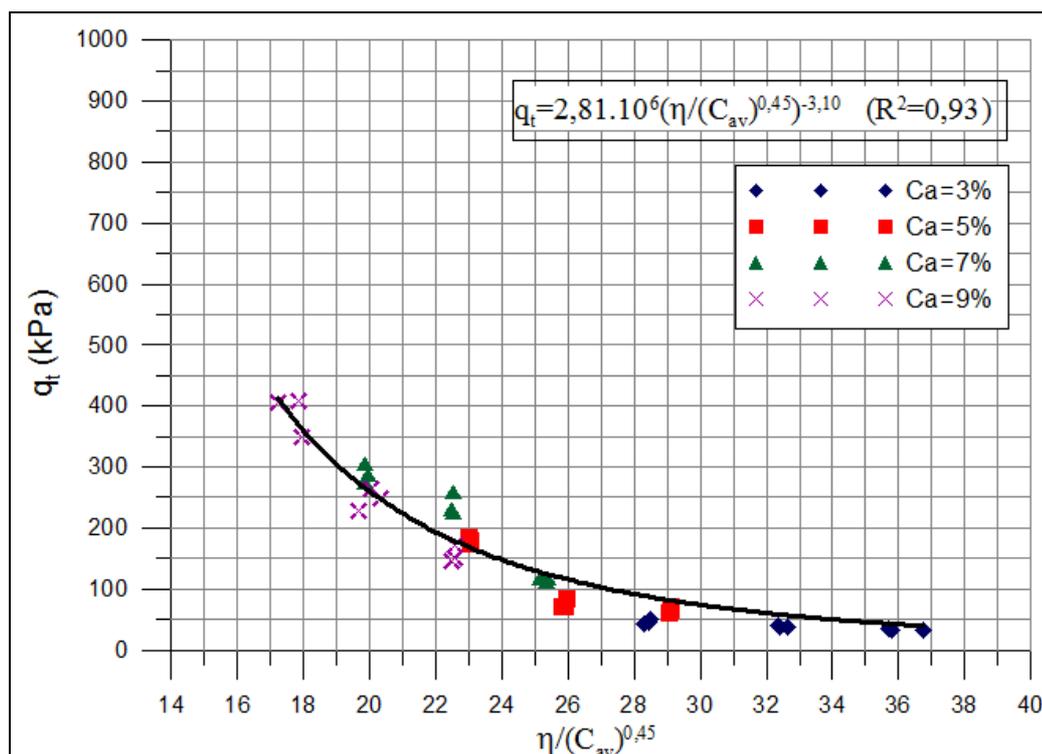


Figura 4.67 – Resistência à tração *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

Não foi possível analisar o uso da relação vazios/cal nas amostras com 17% de umidade e 360 dias de cura, pois neste caso somente foram rompidas amostras com o peso específico aparente seco de $1,5 \text{ g/cm}^3$ e com os teores de cal de 7 e 9%, sendo um número insuficiente de amostras para esta análise.

4.2.1.4 Efeito do tempo de cura

Na Figura 4.68 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustados) pela resistência à tração das amostras com 17% de umidade ensaiadas com 28 e 360 dias de cura.

Os pontos que representam as amostras ensaiadas com 360 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 23% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 28 dias de cura.

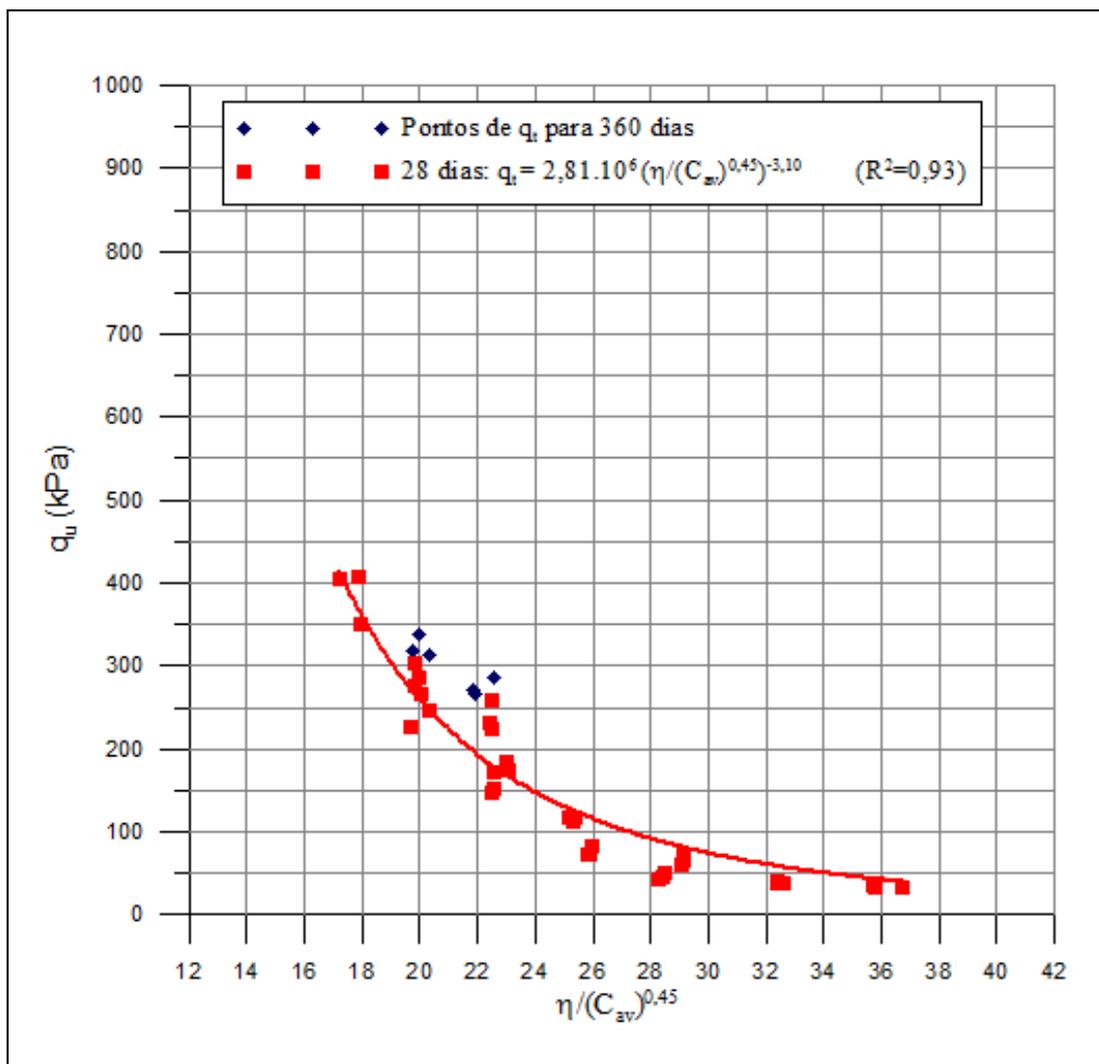


Figura 4.68 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 17% de umidade submetidas aos ensaio de resistência à tração com 28 e 360 dias de cura

4.2.2 Amostras com 20% de umidade

4.2.2.1 Efeito do teor de cal

Na Figura 4.69, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à tração em função da quantidade de cal para 28 dias de cura. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=20\%$).

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a resistência à tração do material ensaiado com 28 dias de cura. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a resistência à tração, em média, teve um acréscimo de 419%. Verifica-se também que, na faixa

de teores estudados, a resistência à tração aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal.

Não foi possível analisar a influência da quantidade de cal nas amostras com 20% de umidade e 360 dias de cura, pois neste caso somente foram rompidas amostras com o teor de cal de 9%.

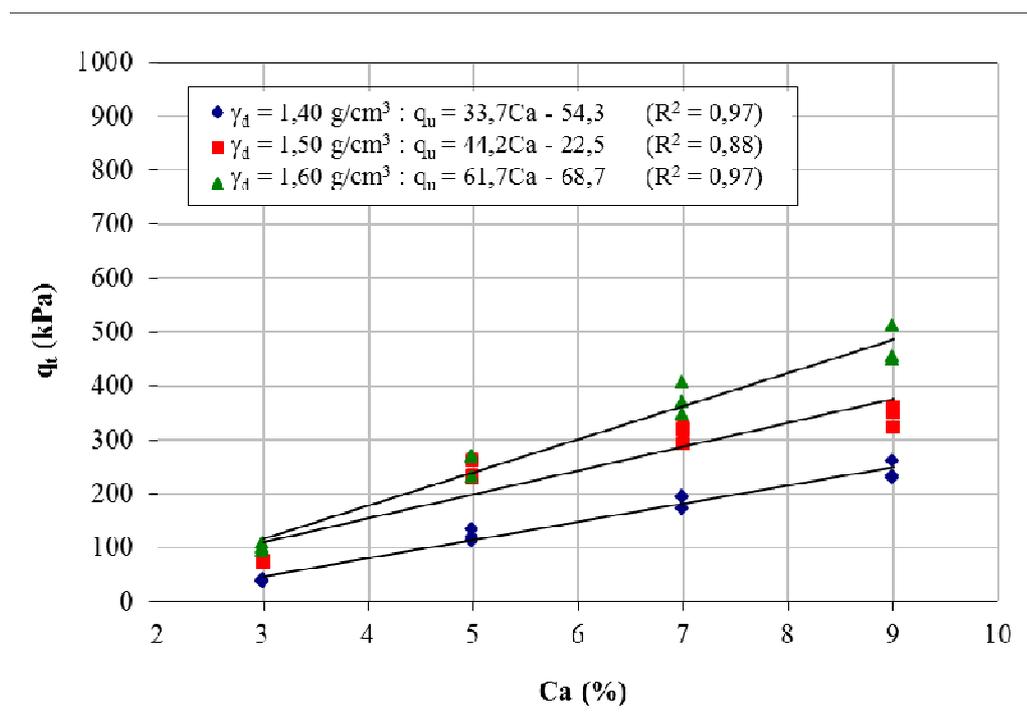


Figura 4.69 – Variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

4.2.2.2 Efeito da porosidade

Na Figura 4.70, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à tração em função da porosidade do caulim-cal compactado para corpos-de-prova 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 ($\omega=20\%$).

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a resistência à compressão simples das misturas de caulim-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de resistência. Em média a redução de 10 pontos percentuais

na porosidade do material aumentou em 2,2 vezes a resistência à tração do caulim-cal testado para 28 dias de cura.

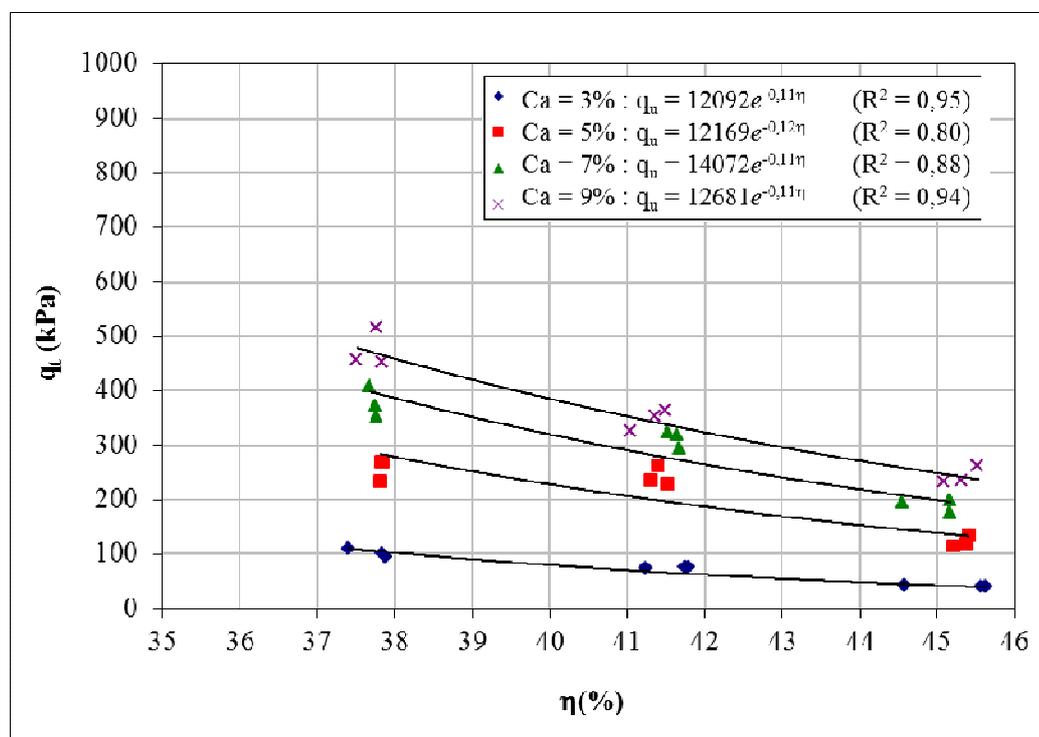


Figura 4.70 – Variação da resistência à tração em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

Pode-se observar também, que a resistência à tração aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

Não foi possível analisar a influência da porosidade nas amostras com 20% de umidade e 360 dias de cura, pois neste caso somente foram rompidas amostras com o peso específico aparente seco de 1,5 g/cm³.

4.2.2.3 Relação vazios/cal

Na Figura 4.71 é apresentada a variação da resistência à tração em função da relação vazios/cal dos corpos-de-prova com 20% de umidade e 28 dias de cura. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=20\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

Pode-se observar na Figura 4.71 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

Esta mesma tendência foi verificada nas amostras ensaiadas à resistência à compressão simples com 20% de umidade e nas amostras ensaiadas à resistência à tração com 17% de umidade. Assim, a Figura 4.72 apresenta a curva de variação da resistência à tração em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,45, para as amostras com 20% de umidade e 28 dias de cura.

Não foi possível analisar o uso da relação vazios/cal nas amostras com 20% de umidade e 360 dias de cura, pois neste caso somente foram rompidas amostras com peso específico aparente seco de $1,5 \text{ g/cm}^3$ e com teor de cal de 9%, sendo um número insuficiente de amostras para esta análise.

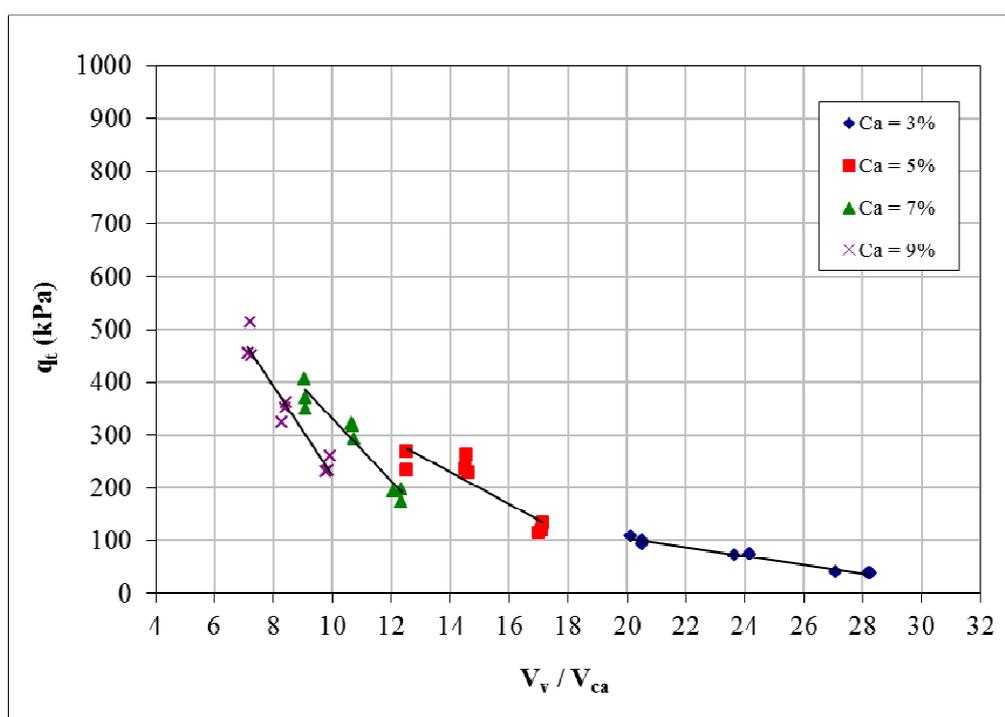


Figura 4.71 – Resistência à tração *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

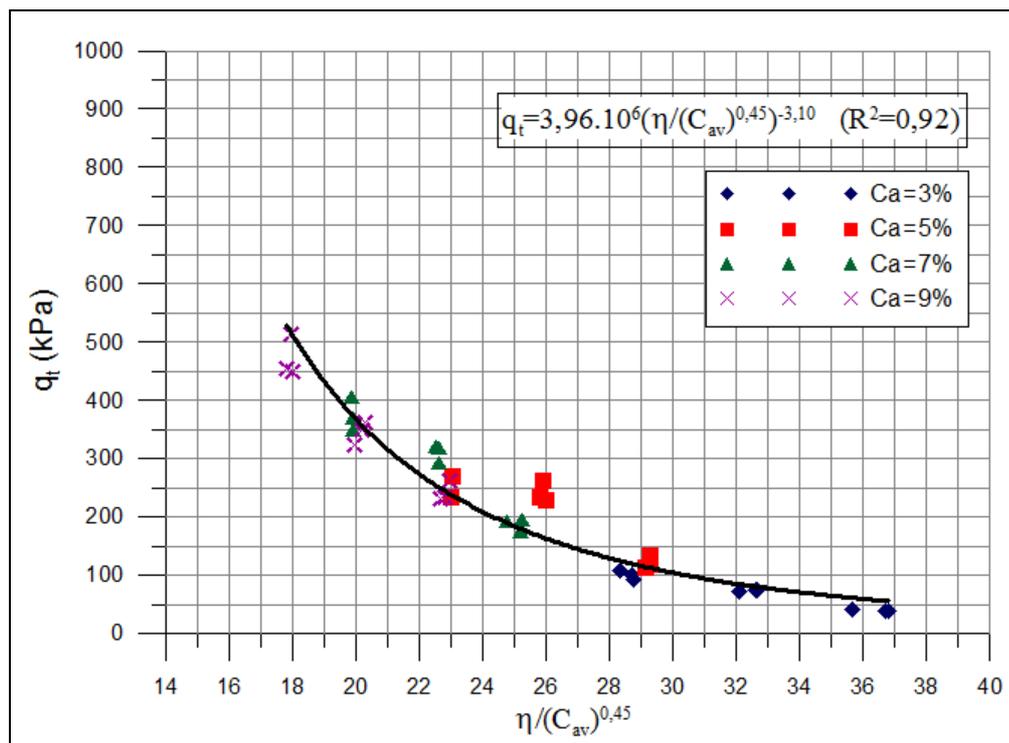


Figura 4.72 – Resistência à tração *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

4.2.2.4 Efeito do tempo de cura

Na Figura 4.73 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustados) pela resistência à tração das amostras com 20% de umidade ensaiadas com 28 e 360 dias de cura.

Os pontos que representam as amostras ensaiadas com 360 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 12% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 28 dias de cura.

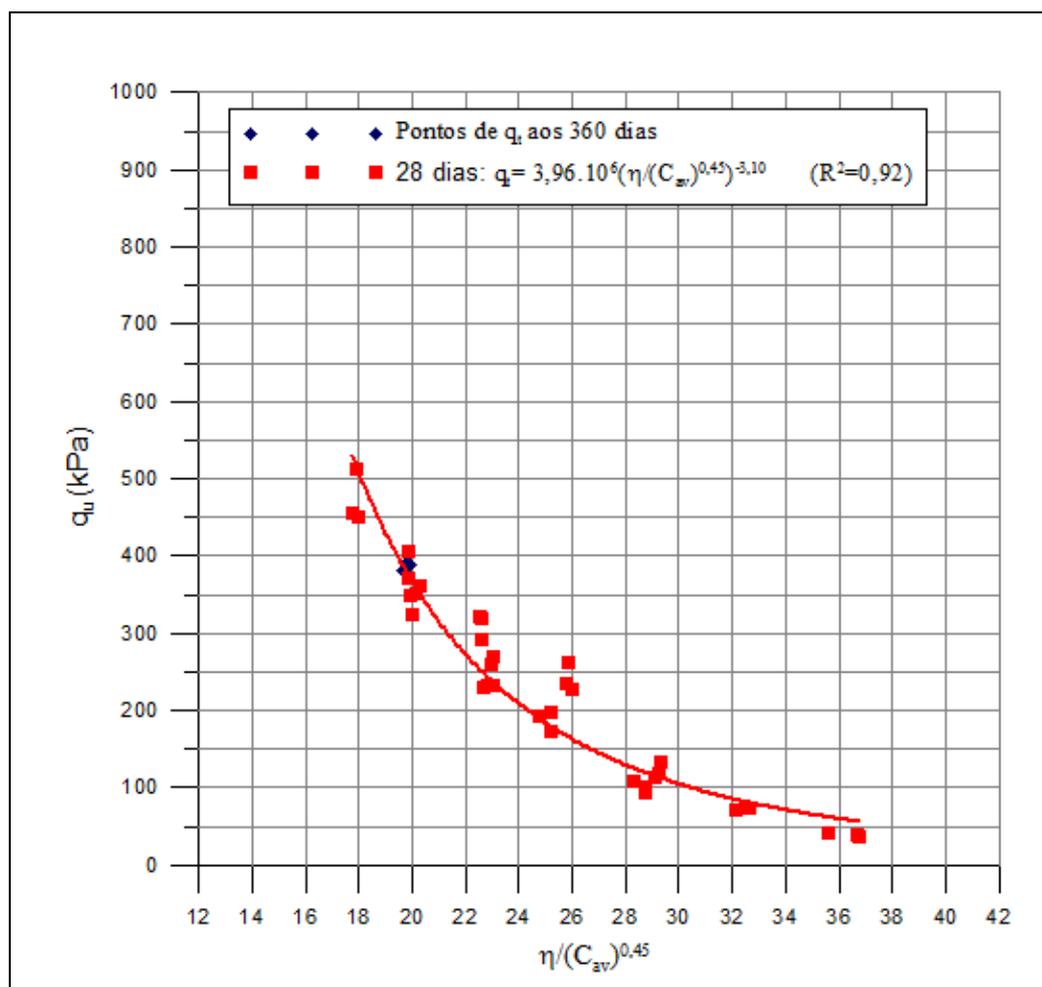


Figura 4.73 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 20% de umidade submetidas aos ensaio de resistência à tração com 28, 90 e 360 dias de cura

4.2.3 Amostras com 23% de umidade

4.2.3.1 Efeito do teor de cal

Nas Figuras 4.74 e 4.75, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à tração em função da quantidade de cal para 28 e 360 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=23\%$).

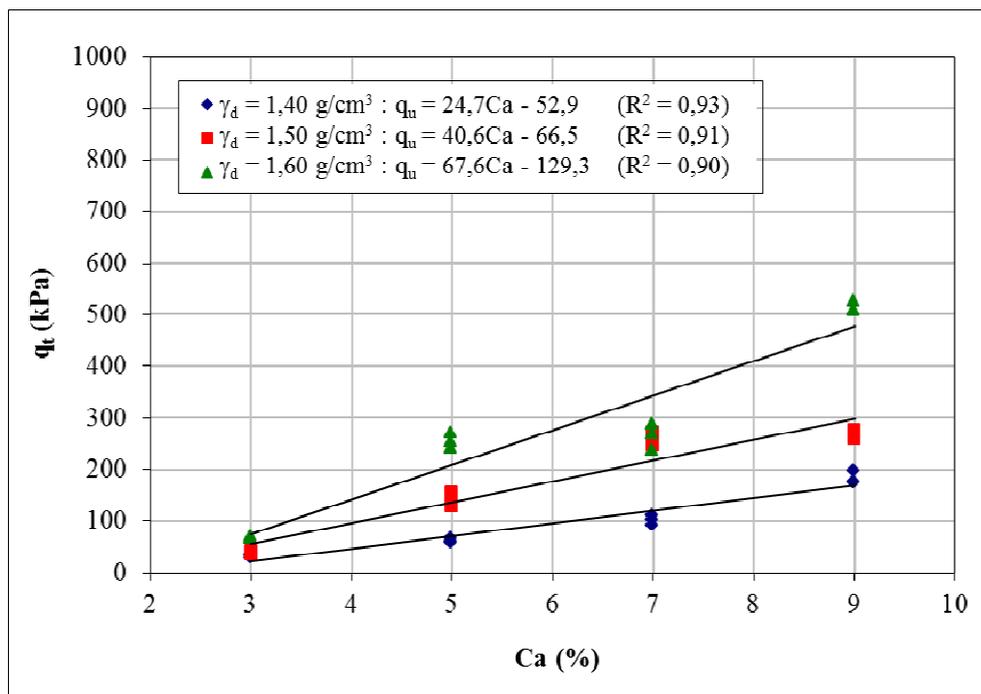


Figura 4.74 – Variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

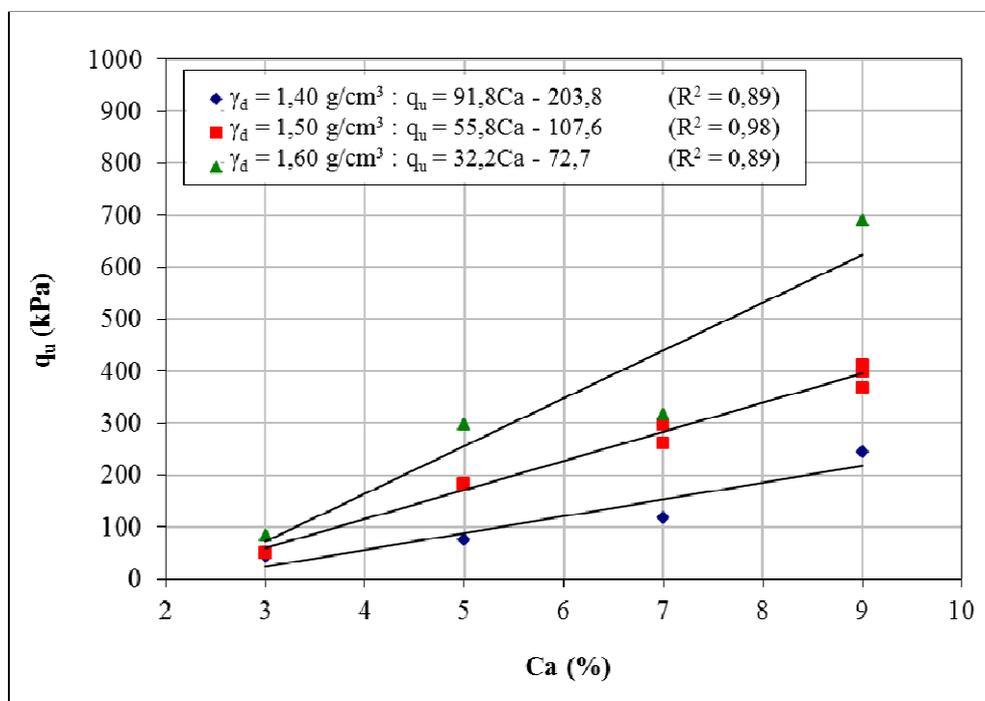


Figura 4.75 – Variação da resistência à tração em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a resistência à tração do material ensaiado com 28 e 360 dias de cura. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a resistência à tração, em média, teve um acréscimo de 578% e 618% para 28 e 360 dias de curas, respectivamente. Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à tração aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal.

4.2.3.2 Efeito da porosidade

Nas Figuras 4.76 e 4.77 são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à tração em função da porosidade do caulim-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 28 e 360 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=23\%$).

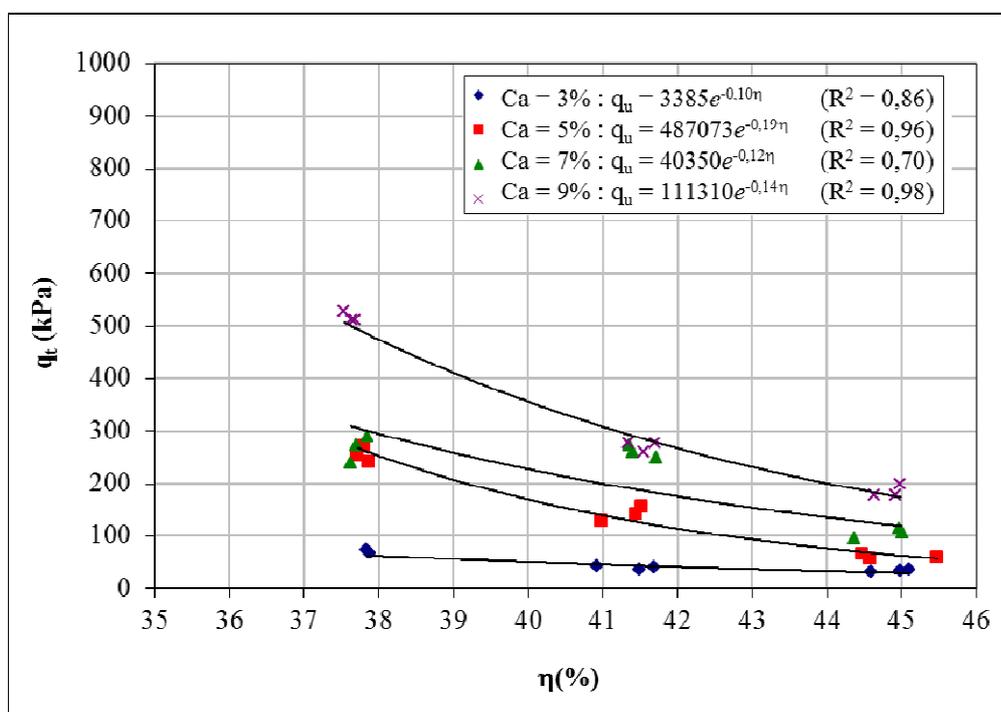


Figura 4.76 – Variação da resistência à tração em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

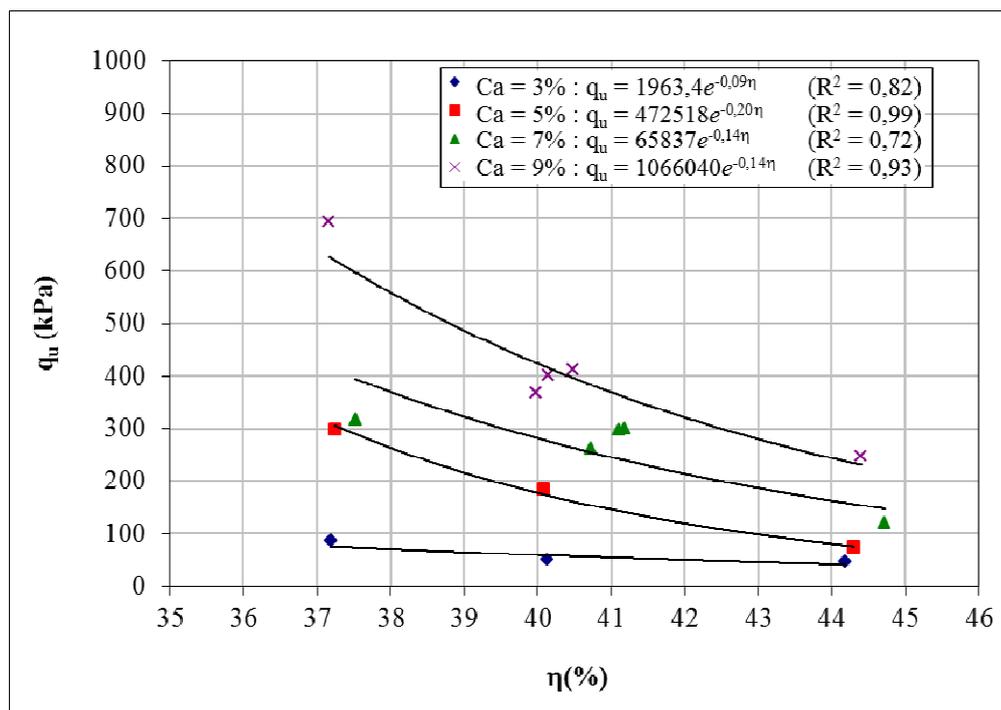


Figura 4.77 – Variação da resistência à tração em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a resistência à compressão simples das misturas de caulim-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de resistência. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou em 2,9 vezes e 2,1 vezes a resistência à tração do caulim-cal testado para 28 e 360 dias de cura, respectivamente.

Pode-se observar também, que a resistência à tração aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

4.2.3.3 Relação vazios/cal

Nas Figuras 4.78 e 4.79 são apresentadas as curvas de variação da resistência à tração em função da relação vazios/cal dos corpos-de-prova com 20% de umidade e 28 e 360 dias de cura. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=23\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

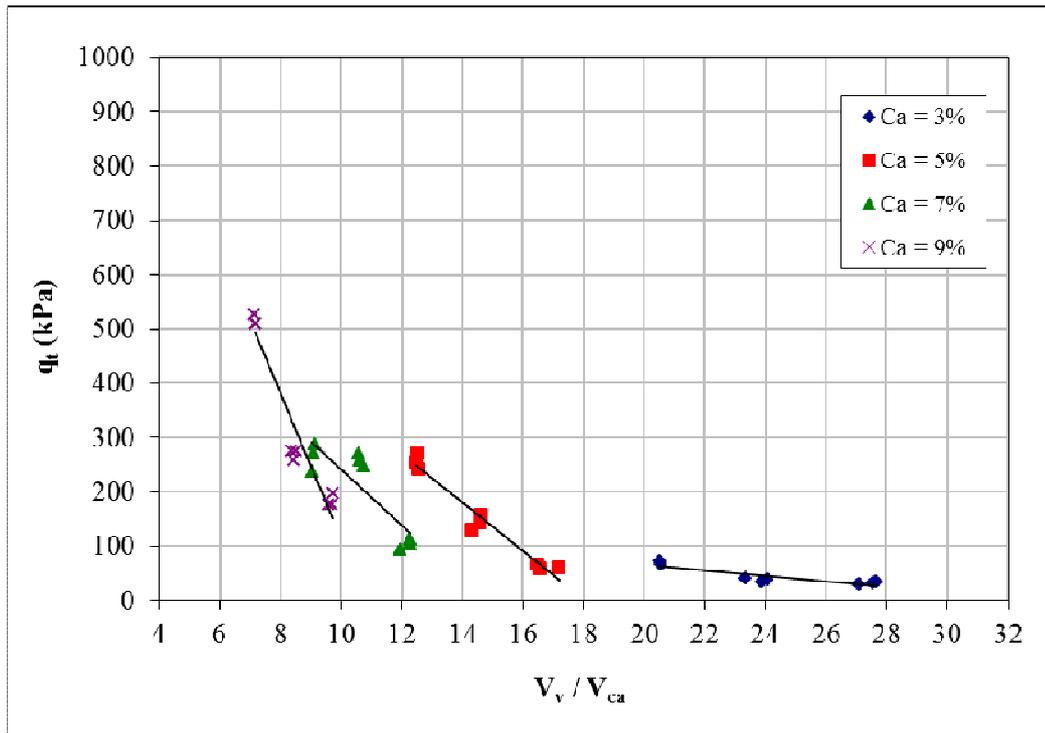


Figura 4.78 – Resistência à tração *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

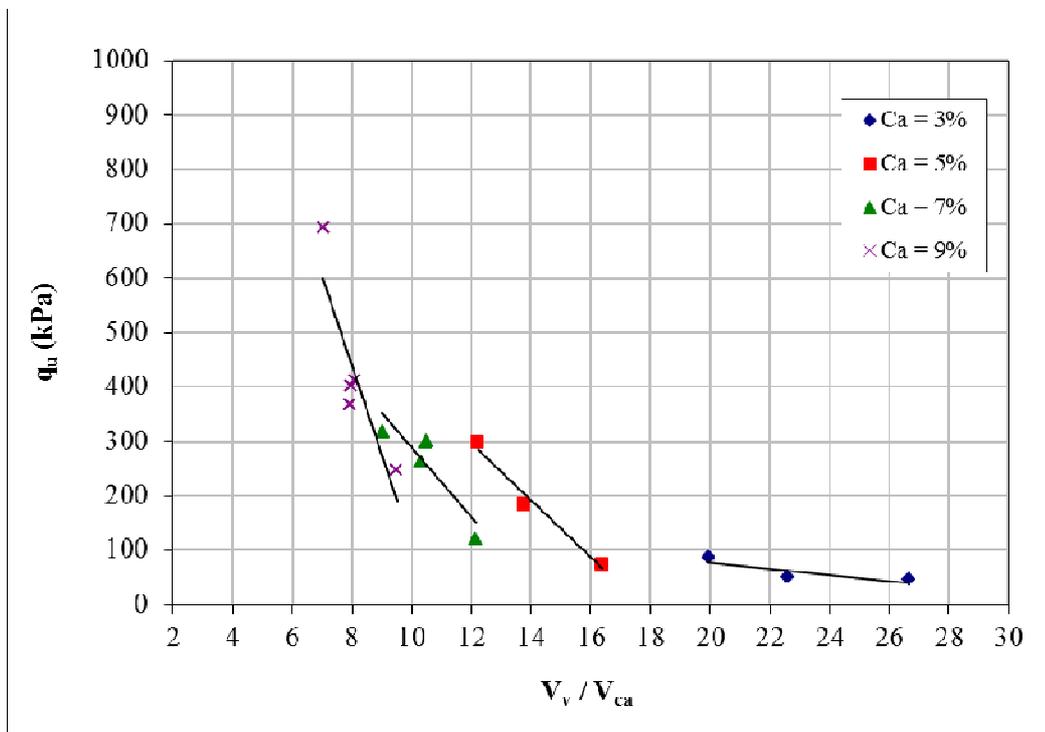


Figura 4.79 – Resistência à tração *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

Observa-se nas Figuras 4.78 e 4.79 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

Esta mesma tendência foi verificada para as amostras ensaiadas à resistência à compressão simples com 23% de umidade e para as amostras ensaiadas à resistência à tração com 17% e 20% de umidade. Assim, as Figura 4.80 e 4.81 apresentam a curva de variação da resistência à tração em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,45, para as amostras com 23% de umidade ensaiadas com 28 e 360 dias de cura.

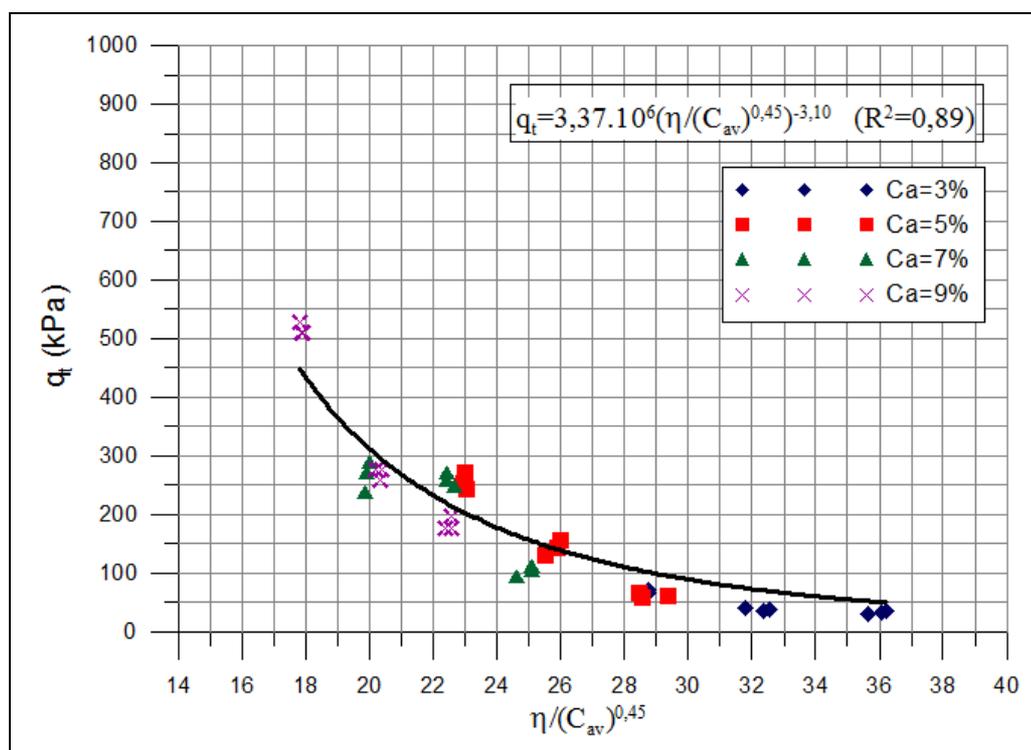


Figura 4.80 – Resistência à tração *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

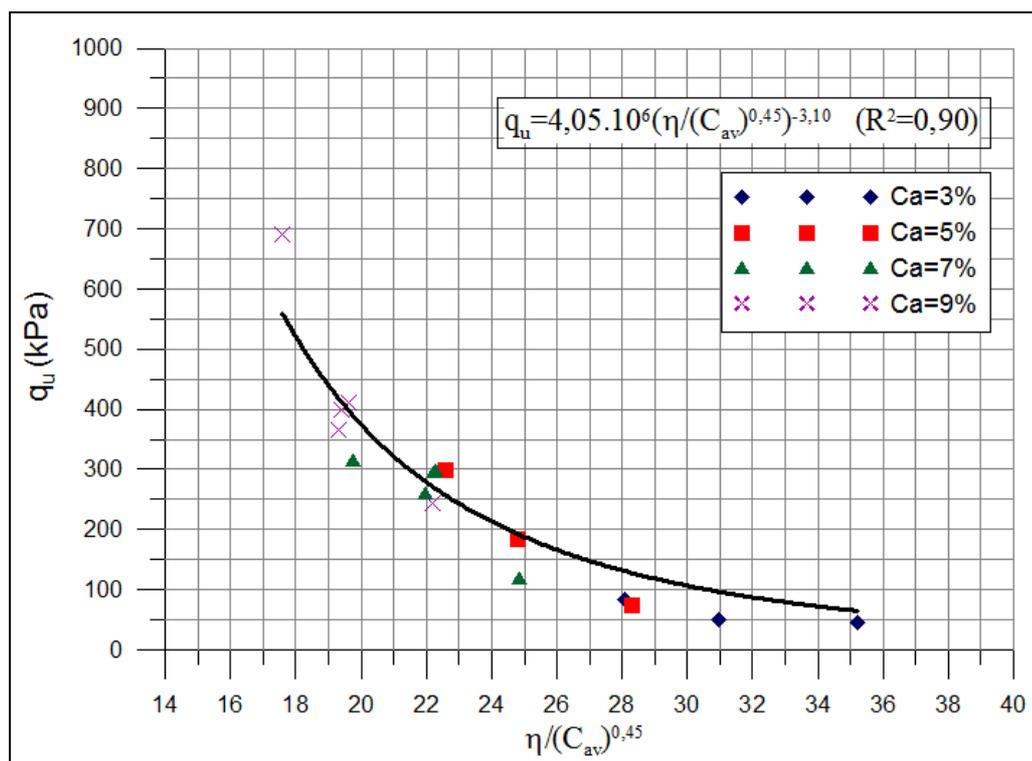


Figura 4.81 – Resistência à tração *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 360 dias de cura

4.2.3.4 Efeito do tempo de cura

Na Figura 4.82 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustados) pela resistência à tração das amostras com 23% de umidade ensaiadas com 28 e 360 dias de cura. Pode ser observado que as curvas que definem a relação η/C_{av} das amostras ensaiadas com 28 e 360 dias de cura têm a mesma tendência exponencial.

Os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 360 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 28% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} .

As mesmas tendências foram verificadas para as amostras de caulim-cal rompidas à compressão simples e para as amostras com 17% e 23% de umidade submetidas ao ensaio de tração. A explicação para esse comportamento consiste em que as reações pozolânicas, as quais proporcionam ganhos efetivos de resistências às misturas compactadas de solo e cal são lentas, estendendo-se por anos e só se iniciam certo tempo depois da compactação. O ganho

de resistência só ocorre se houver pH suficientemente elevado para dissolução da sílica e da alumina dos argilo-minerais do solo e se a combinação delas com a cal derem origem a novos compostos cimentantes. Pois tanto para a manutenção do pH elevado, como para a formação de aluminatos, silicatos e/ou alumino-silicatos de cálcio, é fundamental a participação da cal. A mesma tendência foi verificada por Lopes Junior (2007, 2011) em amostras de solo-cal e Dalla Rosa (2009) em amostras de solo-cinza-cal e solo-cal.

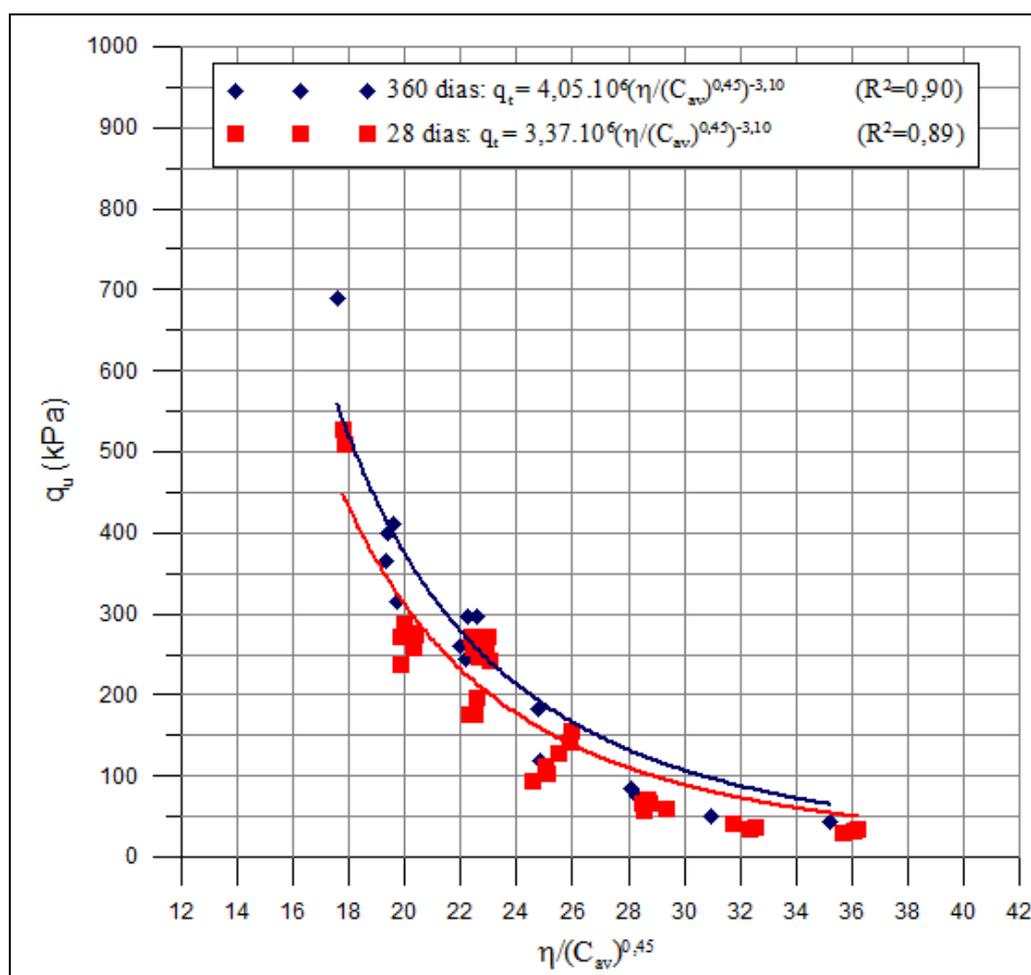


Figura 4.82 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 23% de umidade submetidas aos ensaio de resistência à tração com 28, 90 e 360 dias de cura

4.2.4 Efeito do teor de umidade

Na Figura 4.83 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustados) pela resistência à tração das amostras com 17%, 20% e 23% de umidade ensaiadas e 28 dias de cura. Pode ser

observado que as curvas que definem a relação η/C_{av} das amostras com 17%, 20% e 23% de umidade têm a mesma tendência exponencial, independente do tempo de cura.

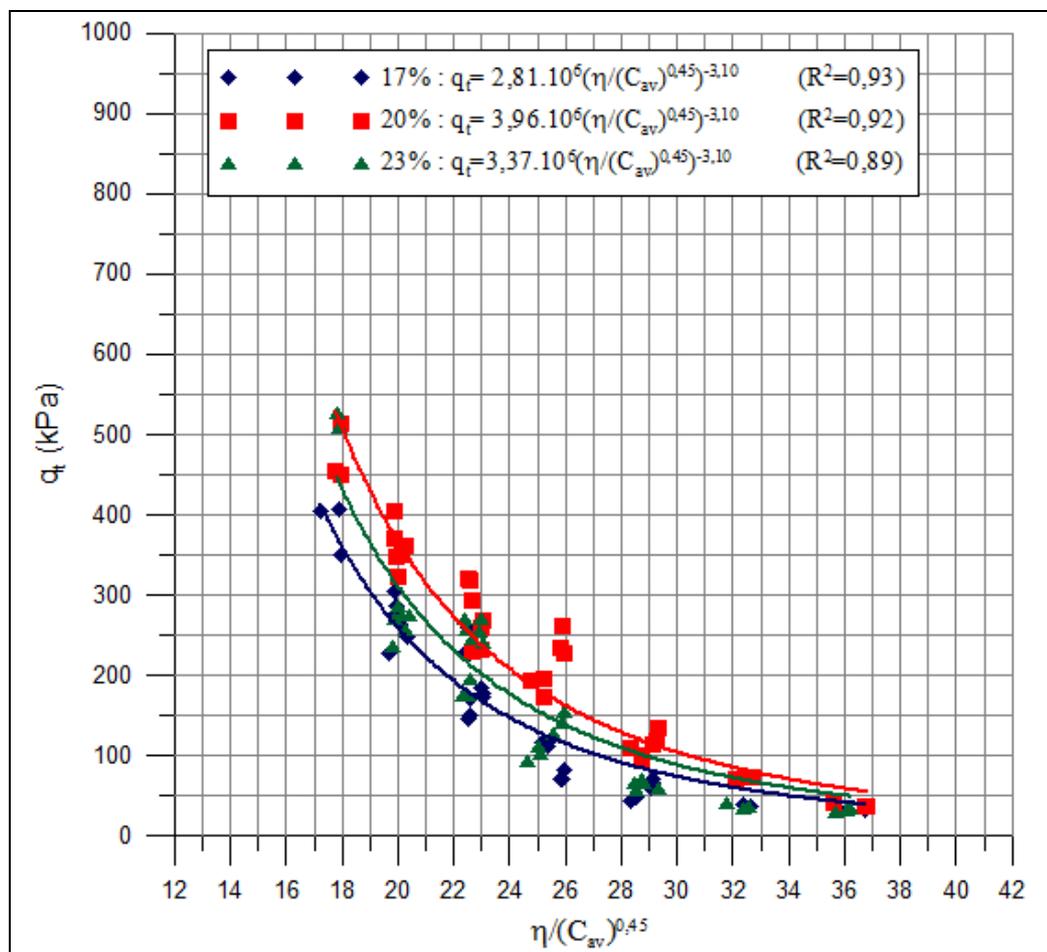


Figura 4.83 – Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade e 28 dias de cura submetidas aos ensaios de resistência à tração

Na Figura 4.83 observa-se que os pontos que formam a curva das amostras com 20% umidade e 28 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 68% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 17% de umidade e resistências em torno de 44% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 23% de umidade, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Os pontos que formam a curva das amostras com 23% umidade e 28 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 18% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 17% de umidade.

As amostras com 360 dias de cura também apresentam a mesma tendência. Sendo que, as amostras ensaiadas com 20% de umidade e 360 dias de cura apresentam, em média,

resistências em torno de 20% mais altas que os pontos que representam as amostras com 17% de umidade e resistências em torno de 4% mais altas que os pontos que representam as amostras com 23% de umidade. Por sua vez, os pontos que formam a curva das amostras com 23% umidade e 28 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 13% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 17% de umidade.

A partir das análises realizadas observa-se um aumento da resistência à tração com o aumento do teor de umidade até um valor ótimo (20%), a partir do qual a resistência passa a diminuir. Além disso, observando-se as curvas de compactação do caulim-cal e os pontos definidos no programa de ensaios (Figura 3.19), observa-se que o teor de umidade de 20% é inferior ao teor de umidade ótimo do ensaio de compactação, verifica-se então que o teor de umidade que gerou a maior resistência, para as misturas desta pesquisa, é ligeiramente inferior (ramo seco) ao teor ótimo obtido no ensaio de compactação. Mesmas tendências observadas nas amostras de caulim-cal submetidas aos ensaios de resistência à compressão simples, e mesmas tendências relatadas por Foppa (2005) em amostras de solo-cimento e Carraro (1997) em amostras de uma areia siltosa estabilizada com cal e cinza volante, submetidas ao ensaio de resistência à compressão simples.

4.2.5 Relações únicas no controle da resistência à tração do solo estudado

Os resultados apresentados na Figura 4.83, indicam a existência de relações distintas e únicas para as amostras ensaiadas com 28 dias de cura com 17% de umidade (equação 4.13), 20% de umidade (equação 4.14) e 23% de umidade (equação 4.15).

$$q_t = 2,81 \cdot 10^6 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (R^2=0,93) \quad (4.13)$$

$$q_t = 3,96 \cdot 10^6 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (R^2=0,92) \quad (4.14)$$

$$q_t = 3,37 \cdot 10^6 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (R^2=0,89) \quad (4.15)$$

Comparando as equações obtidas em cada tempo de cura, pode-se observar que a resistência à tração tem um relacionamento direto com $[\eta / (C_{av})^{0,45}]$ para as três umidades estudadas (17%, 20% e 23%) e para o tempo de cura de 28 dias, tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito da umidade. Portanto, uma relação única pode ser conseguida relacionando a resistência a compressão simples com a porosidade (η), com o teor volumétrico de cal (C_{av}) e com a

umidade (ω), como apresentado na Figura 4.84, podendo-se observar a equação obtida (equação 4.16).

$$Q_t = [-9,67 \cdot 10^4 (\omega)^2 + 3,96 \cdot 10^4 (\omega) - 3,66 \cdot 10^7] \cdot [(\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10}] \quad (R^2=1,00) \quad (4.16)$$

A Figura 4.84 demonstra também, que para as misturas estudadas na presente pesquisa, a resistência à tração atinge seu valor máximo com 20% de umidade, no tempo de cura e no teor de umidade estudados.

Assim, a equação 4.16 pode ser utilizada em relações de dosagem. Para o estudo de misturas de caulim-cal, existem várias maneiras para alcançar um valor-alvo de resistência à tração para um determinado projeto: redução da porosidade e/ou aumento da quantidade de cal e/ou aumento/diminuição da umidade. Os resultados apresentados neste trabalho, portanto, sugerem que pode-se escolher a quantidade de cal, a porcentagem de umidade e o esforço de compactação adequado para fornecer uma mistura que resulte na resistência à tração desejada (em kPa).

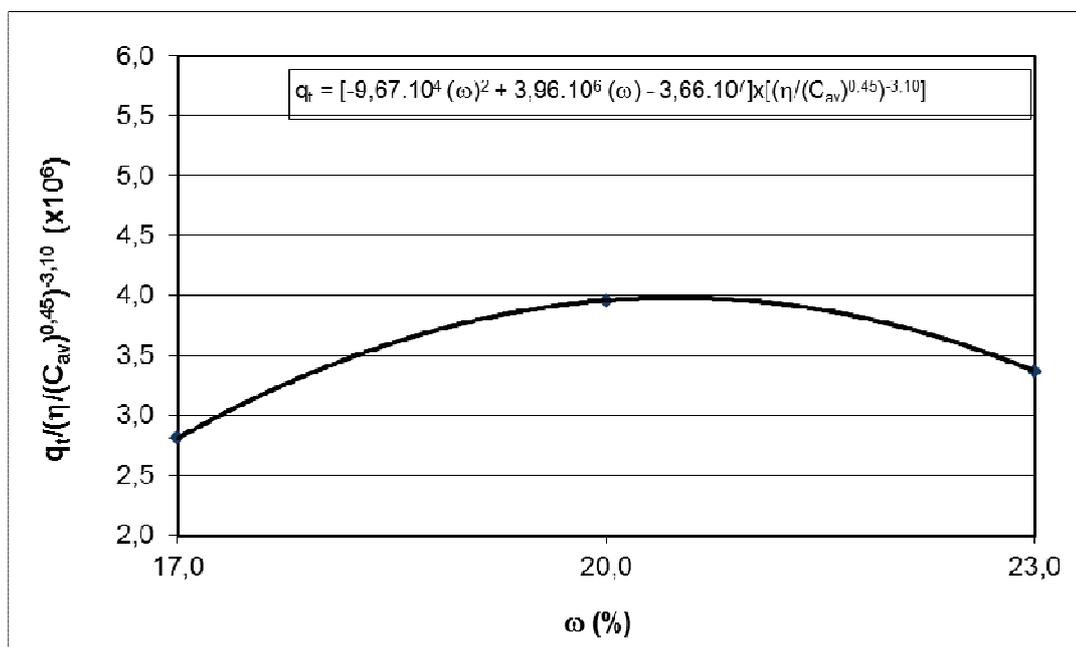


Figura 4.84 – Variação da resistência à tração com a porosidade (η), com o teor volumétrico de cal (C_{av}) e com a porcentagem de umidade (ω) para 28 dias de cura

4.2.6 Modo de ruptura dos corpos-de-prova de caulim-cal submetidos ao ensaio de resistência à tração

A Figura 4.85a mostra um corpo-de-prova de caulim-cal submetido ao ensaio de resistência à tração.

Na maioria dos ensaios de resistência à tração realizados observou-se um modo de ruptura frágil, com a formação de um plano de ruptura bem definido no sentido longitudinal da amostra, partindo a amostra ao meio (como é observado na Figura 4.85b). Não foram notadas diferenças significativas entre o tipo de ruptura apresentado por corpos-de-prova de diferentes relações vazios/cal.

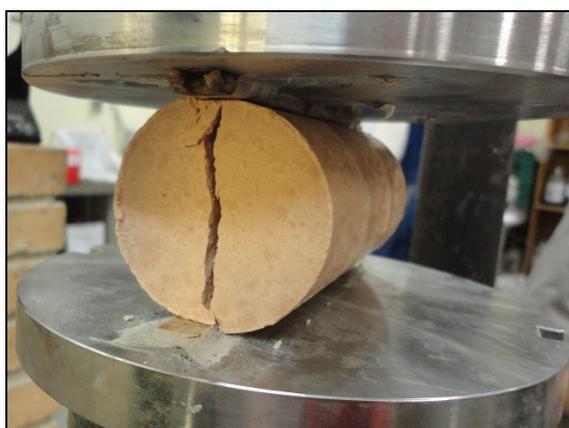


Figura 4.85a – Corpo-de-prova de caulim-cal submetido ao ensaio de resistência à tração



Figura 4.85b – Corpo-de-prova de caulim-cal submetido ao ensaio de resistência à tração

4.2.7 Relação da Resistência à Tração com a Resistência à Compressão Simples

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 4.22 e 4.67, das Figuras 4.35 e 4.72 e das Figuras 4.49 e 4.80 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 as misturas com 17%, 20% e 23% de umidade e 28 dias de cura, respectivamente.

Nas Figuras 4.86, 4.87 e 4.88 são apresentadas as curvas da resistência à compressão simples e da resistência à tração *versus* a relação η/C_{av} (ajustado) para as amostras com 17%, 20% e 23% de umidade e 28 dias de cura, respectivamente.

A mesma tendência foi observada para os ensaios de 23% de umidade e 360 dias de cura. Através das Figuras 4.54 e 4.81 e as respectivas equações das tendências geradas, utilizou-se a relação vazio/cal para correlacionar a resistência à compressão simples com a resistência à tração para as misturas com 23% de umidade e 360 dias de cura.

Na Figura 4.89 são apresentadas as curvas da resistência à compressão simples e da resistência à tração *versus* a relação η/C_{av} (ajustado), para as amostras com 23% de umidade e 360 dias de cura.

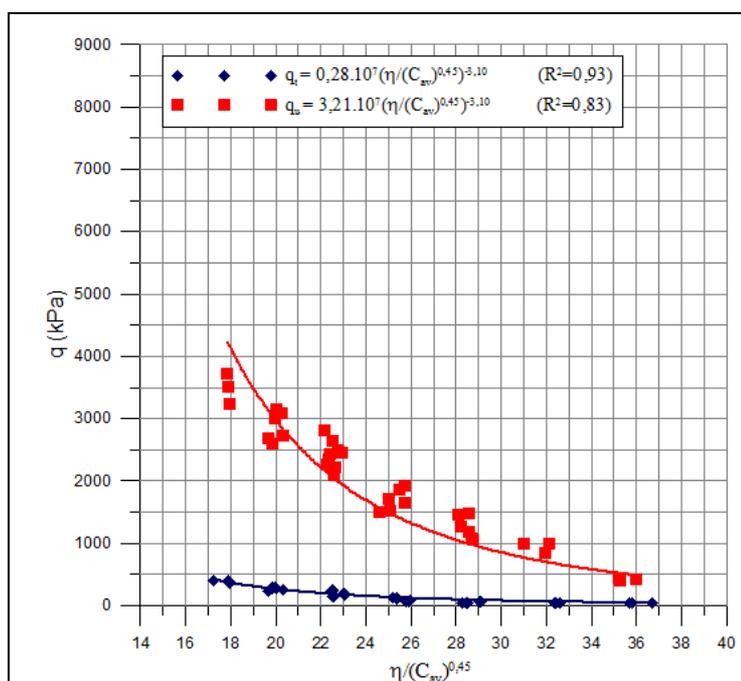


Figura 4.86 – Resistência à tração e resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 17% de umidade e 28 dias de cura

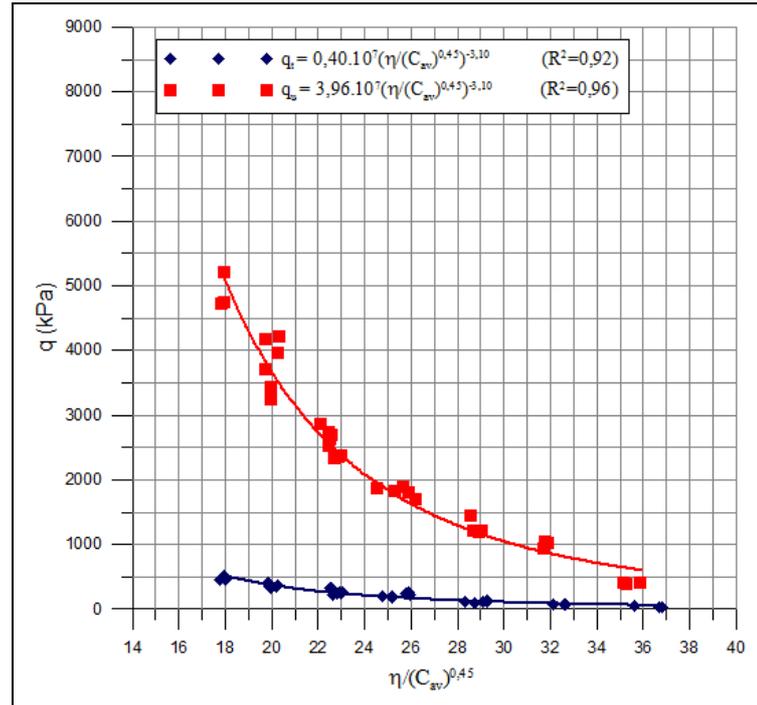


Figura 4.87 – Resistência à tração e resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de cura

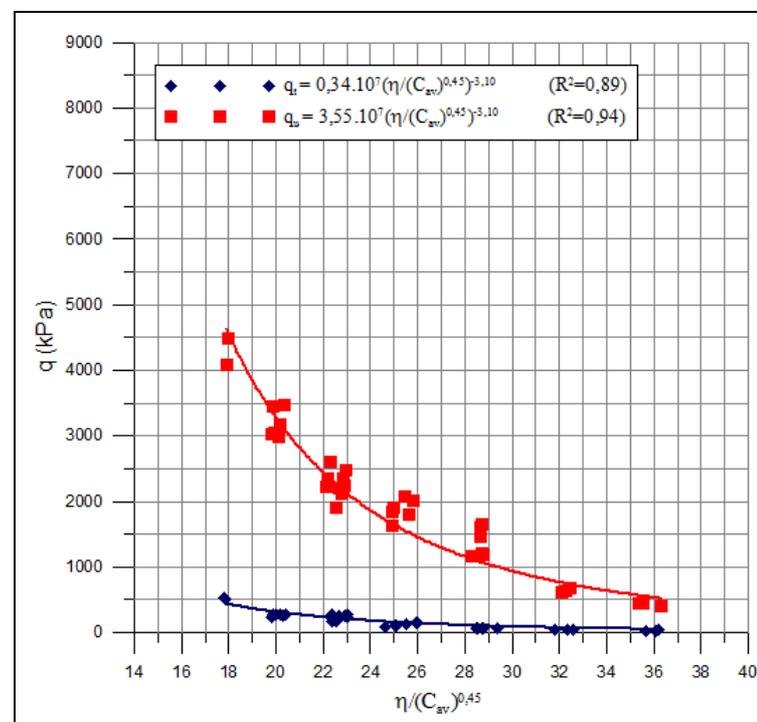


Figura 4.88 – Resistência à tração e resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 23% de umidade e 28 dias de cura

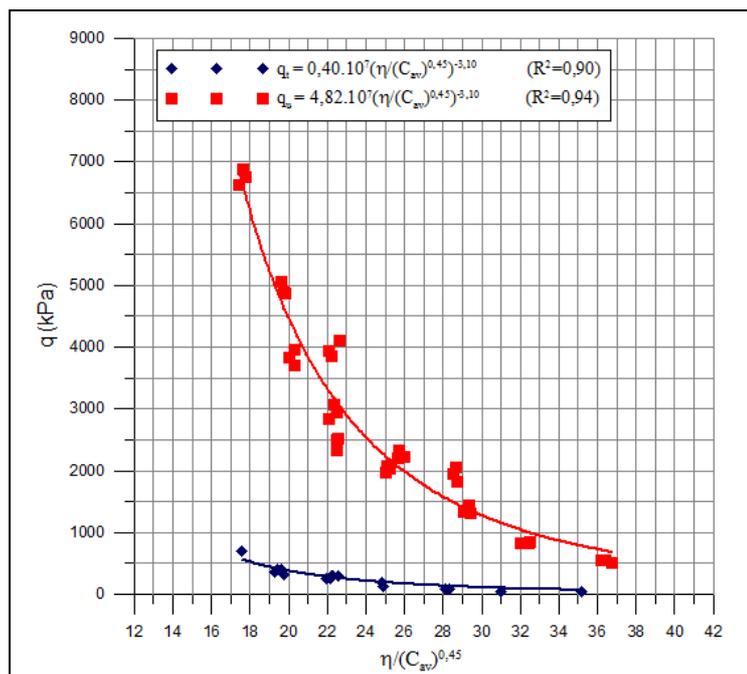


Figura 4.89 – Resistência à tração e resistência à compressão simples *versus* relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 23% de umidade e 360 dias de cura

A partir das Figuras 4.86 a 4.88 verificou-se que a razão entre as equações da resistência à tração e da resistência à compressão simples (q_t/q_u) é, em média, 8,7%, 10,1% e 9,6% para as umidades de 17%, 20% e 23% aos 28 dias de cura, respectivamente. Aos 360 dias de cura, a partir das equações da Figura 4.89, verificou-se que a razão q_t/q_u é, em média, 8,4% para as amostras com 23% de umidade. Sendo que, os pontos que representam as resistências à tração e as resistências à compressão simples aos 360 dias de cura, para as umidades de 17% e 20%, possuem uma razão q_t/q_u em torno de 8,3%.

Assim, a resistência à tração das amostras de caulim-cal estudadas representam, em média, 9% da sua resistência à compressão simples, para os tempos de cura estudados.

Estas mesmas tendências também foram relatadas por Núñez (1991), Thompson (1975), Carraro (1997) e Consoli *et al* (2010).

4.3 ENSAIOS DE MEDIDAS DE RIGIDEZ INICIAL

As Figuras 4.90 a 4.98 apresentam os resultados dos ensaios de medidas de rigidez inicial das amostras de caulim-cal ao longo do tempo (3, 7, 14, 28, 45, 60, 75 e 90 dias de cura). Os corpos-de-prova contendo 17% de umidade e pesos específicos aparente seco de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm³ são apresentados nas Figuras 4.90, 4.91 e 4.92, respectivamente. Os corpos-de-prova contendo 20% de umidade e pesos específicos aparente seco de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm³ são apresentados nas Figuras 4.93, 4.94 e 4.95, respectivamente. Os corpos-de-prova contendo 23% de umidade e pesos específicos aparente seco de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm³ são apresentados nas Figuras 4.96, 4.97 e 4.98, respectivamente.

Observa-se nas Figuras 4.90 a 4.98 que o aumento do tempo de cura provoca o aumento da rigidez inicial das amostras estudadas. Isto se deve ao fato de que a onda “S” está relacionada com a rigidez do material, por isso a sua velocidade (e consequentemente o G_0 do material estudado) cresce continuamente com o tempo, juntamente com o aumento da resistência do material, proporcionada pela cal.

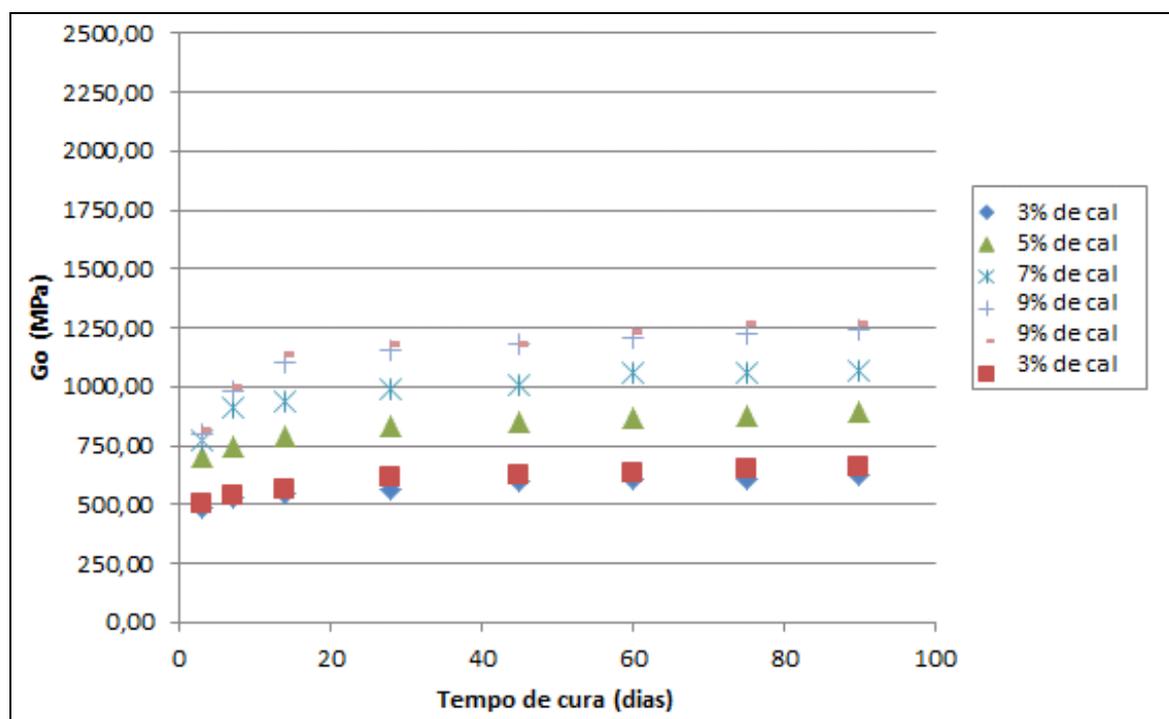


Figura 4.93 – Rigidez inicial *versus* tempo de cura para as amostras com 17% de umidade e peso específico aparente seco de 1,4 g/cm³

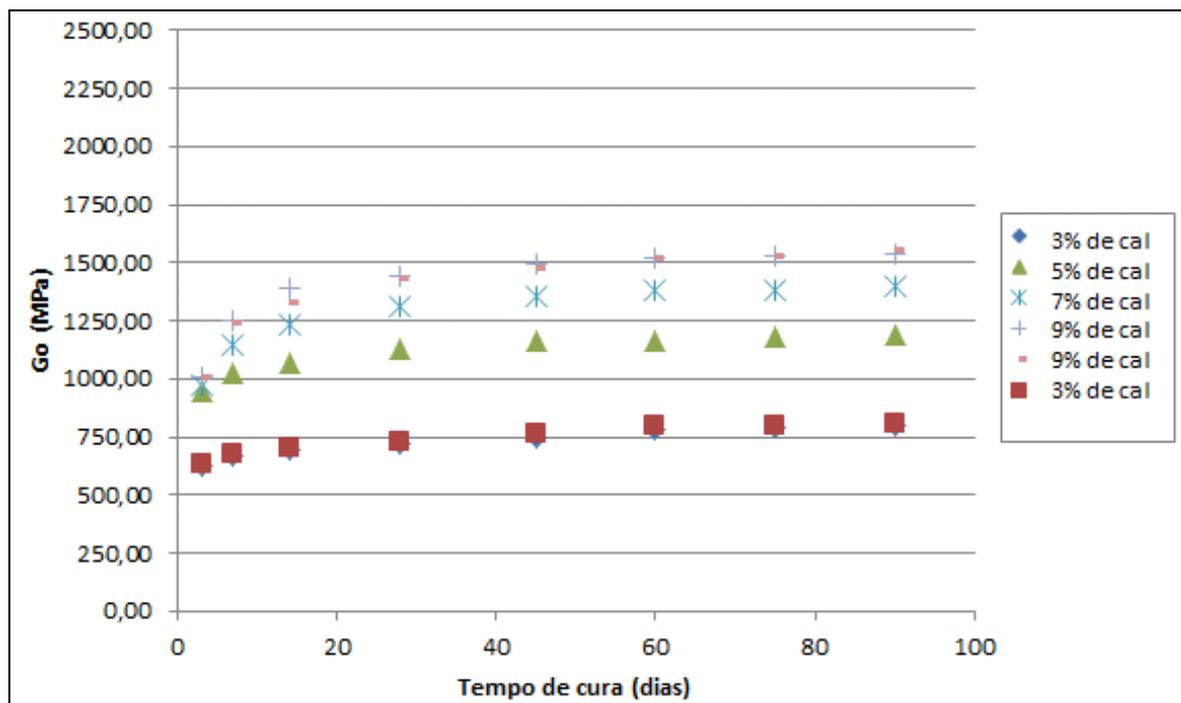


Figura 4.94 – Rigidez inicial *versus* tempo de cura para as amostras com 17% de umidade e peso específico aparente seco de 1,5 g/cm³

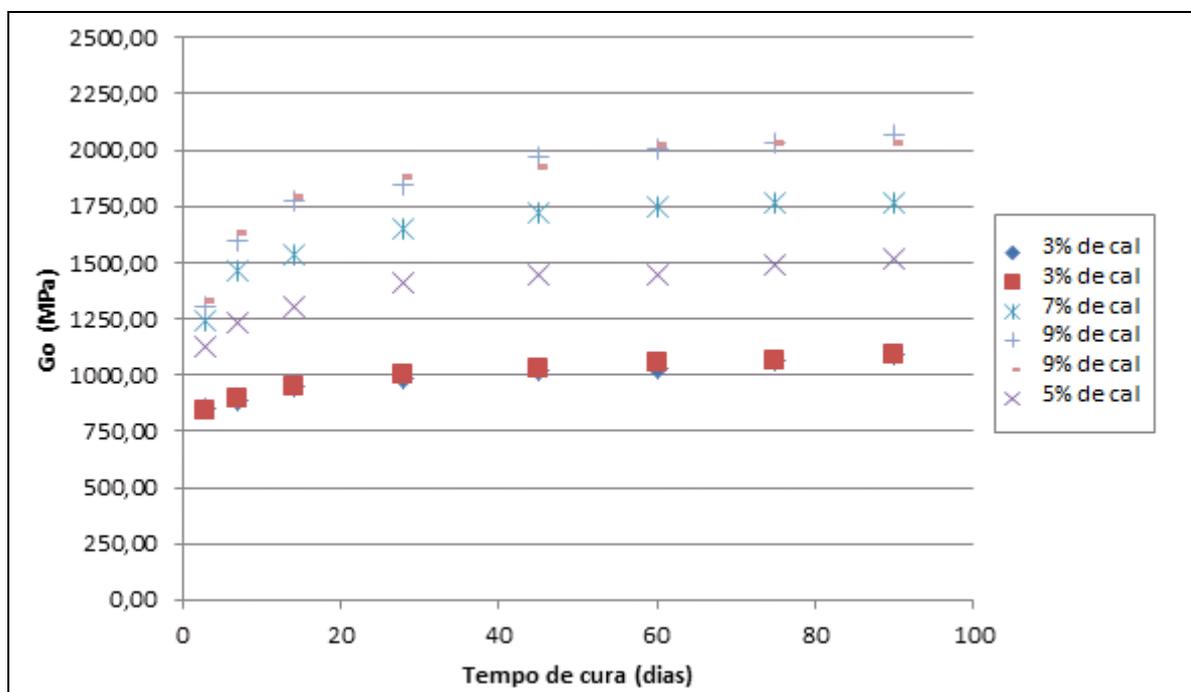


Figura 4.95 – Rigidez inicial *versus* tempo de cura para as amostras com 17% de umidade e peso específico aparente seco de 1,6 g/cm³

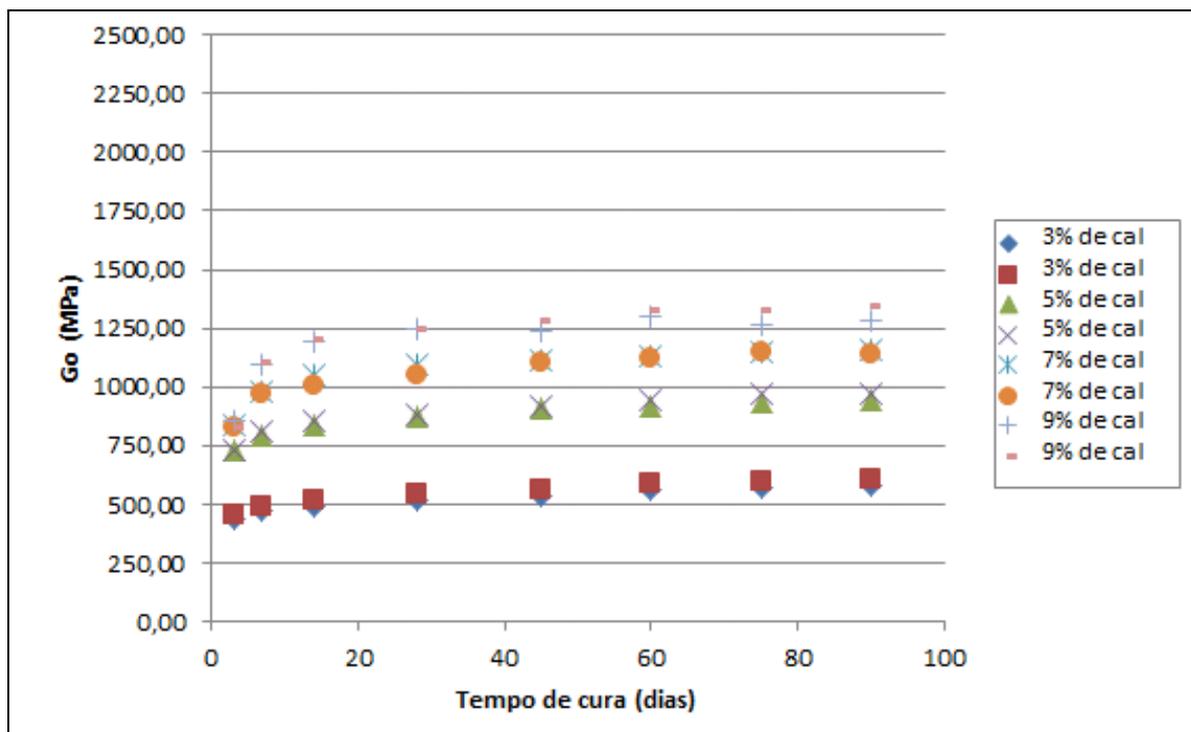


Figura 4.90 – Rigidez inicial *versus* tempo de cura para as amostras com 20% de umidade e peso específico aparente seco de 1,4 g/cm³

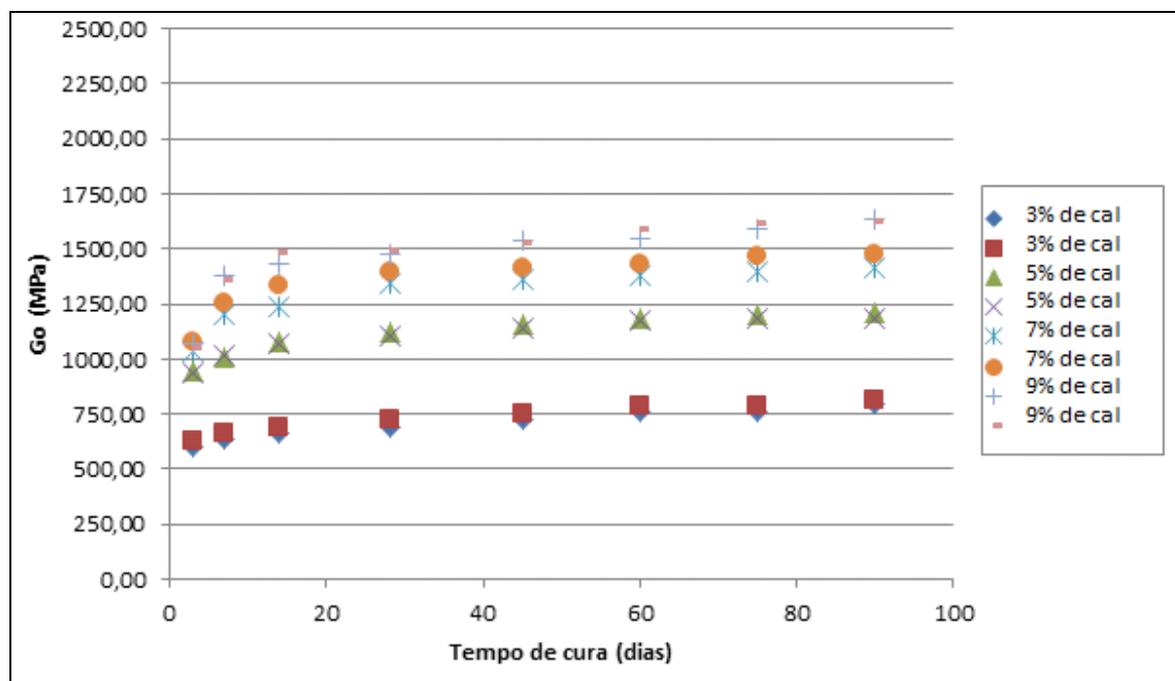


Figura 4.91 – Rigidez inicial *versus* tempo de cura para as amostras com 20% de umidade e peso específico aparente seco de 1,5 g/cm³

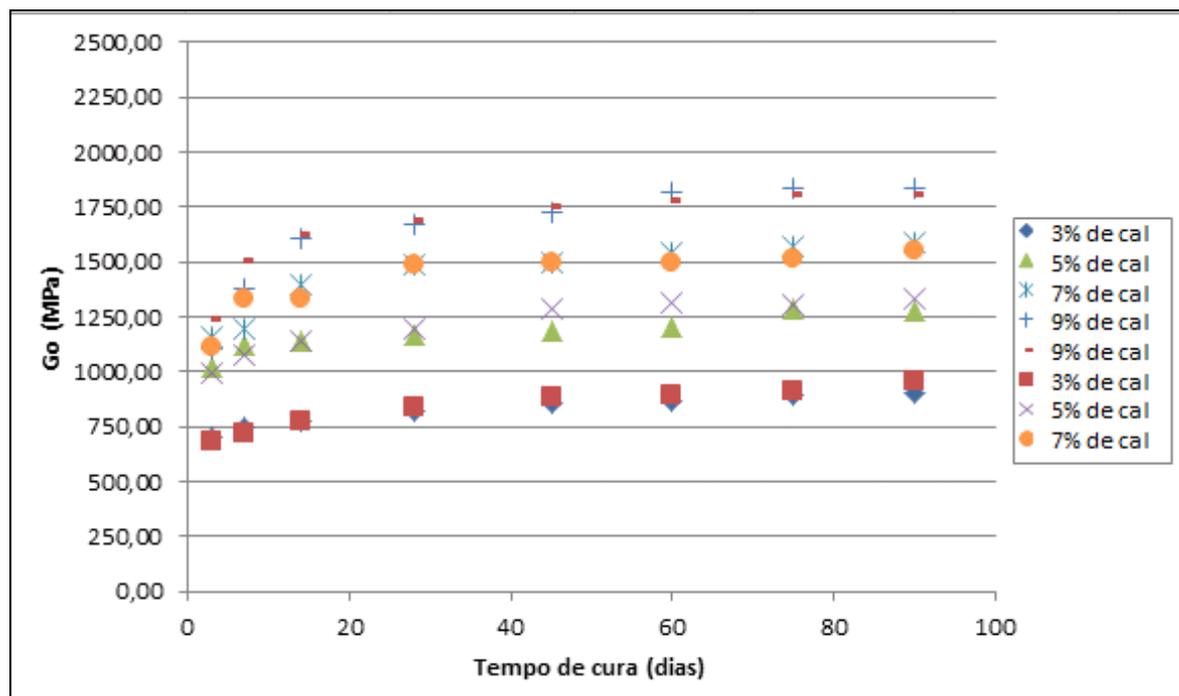


Figura 4.92 – Rigidez inicial *versus* tempo de cura para as amostras com 20% de umidade e peso específico aparente seco de $1,6 \text{ g/cm}^3$

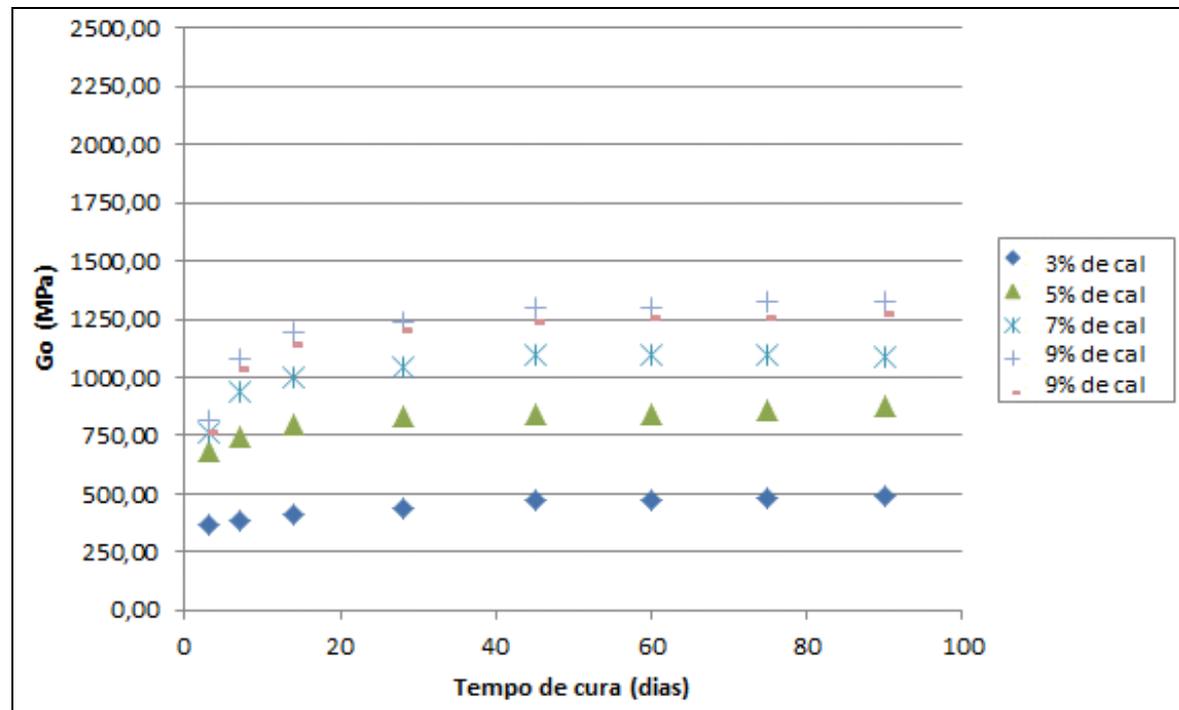


Figura 4.96 – Rigidez inicial *versus* tempo de cura para as amostras com 23% de umidade e peso específico aparente seco de $1,4 \text{ g/cm}^3$

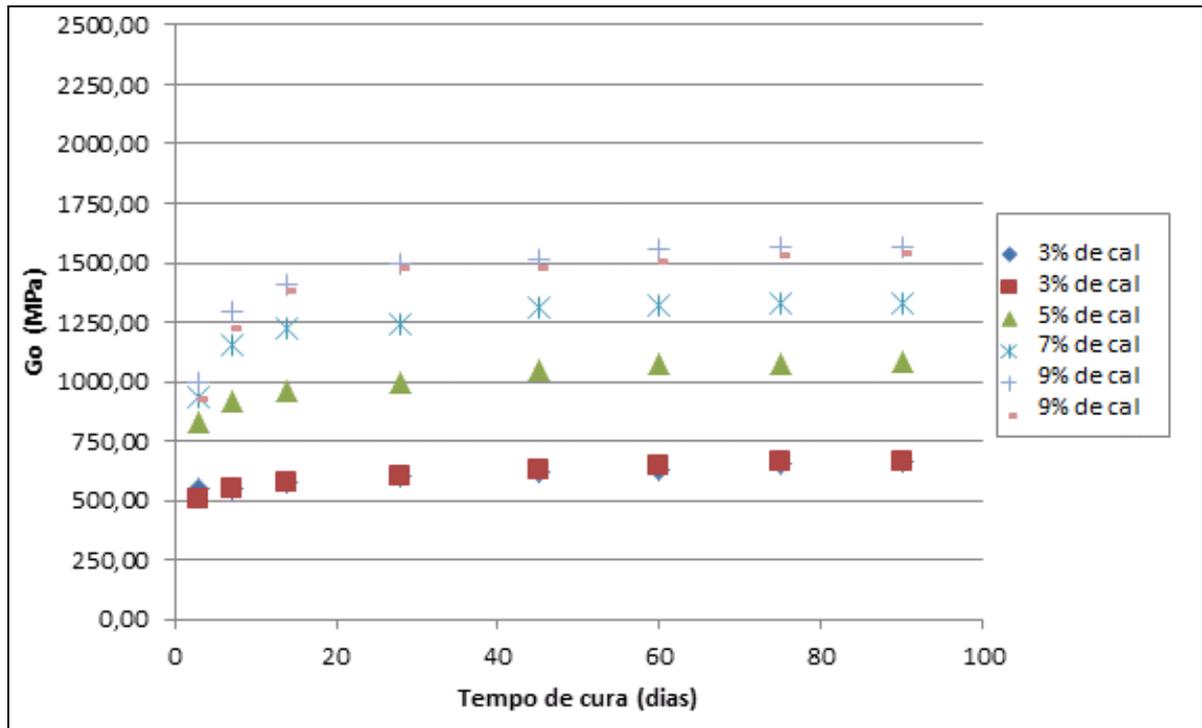


Figura 4.97 – Rigidez inicial *versus* tempo de cura para as amostras com 23% de umidade e peso específico aparente seco de 1,5 g/cm³

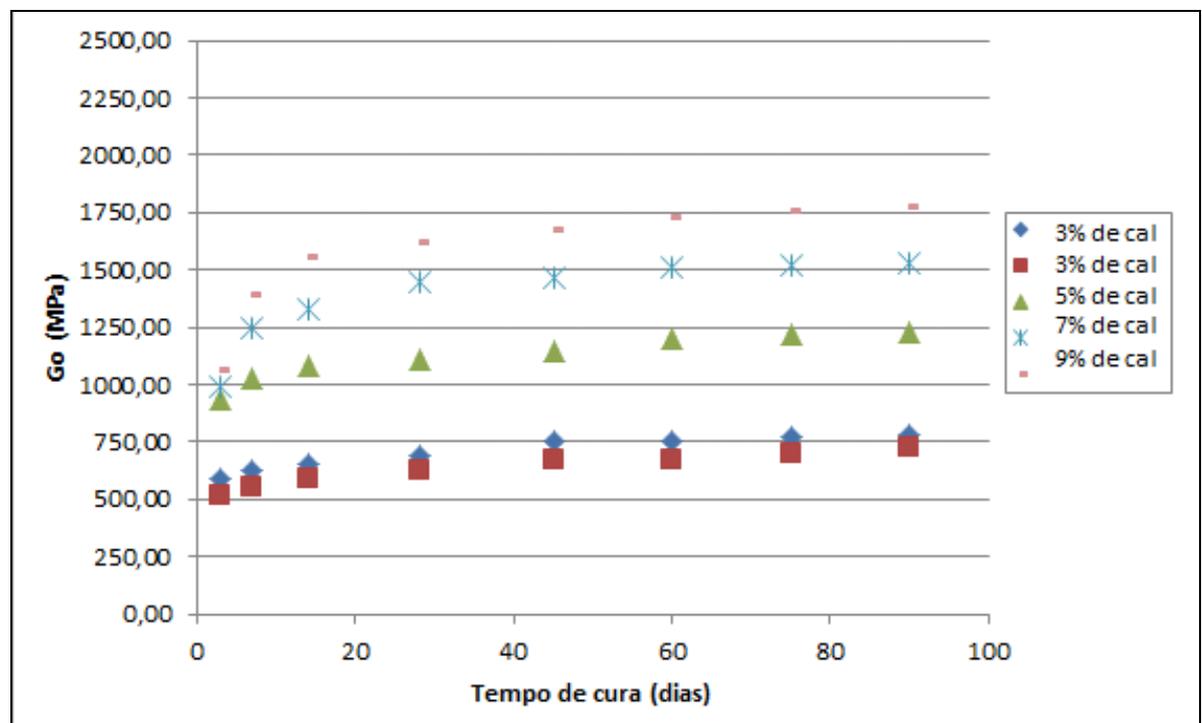


Figura 4.98 – Rigidez inicial *versus* tempo de cura para as amostras com 23% de umidade e peso específico aparente seco de 1,6 g/cm³

Além disso, nota-se um aumento brusco da rigidez inicial dos 3 dias de cura para os 14 dias de cura, sendo que aos 3 dias de cura os valores de G_0 das amostras com 7% e 9% de cal não são coerentes com a tendência apresentada a partir dos 7 dias de cura. Isto se deve ao fato de que nos primeiros dias de cura, a hidratação da cal ainda está ocorrendo.

Apenas os resultados de 28 e 90 dias de cura serão analisados no item a seguir, pois serão relacionados com a resistência à compressão simples e com a resistência à tração, das misturas caulim-cal, nos itens subsequentes. As leituras dos outros tempos de cura (3, 7, 14, 45, 60 e 75 dias), que foram realizadas com o objetivo de obter uma análise mais confiável aos 28 e 90 dias de cura, apresentaram tendências semelhantes.

Nas tabelas C.1 a A.6, do apêndice C são apresentados os resultados de G_0 , a partir da realização dos ensaios de medidas de rigidez inicial, para 28 e 90 dias de cura.

4.3.1 Amostras com 17% de umidade

4.3.1.1 Efeito do teor de cal

Nas Figuras 4.99 e 4.100, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da rigidez inicial (G_0) em função da quantidade de cal para 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=17\%$).

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a rigidez inicial do material ensaiado com 28 e 90 dias de cura. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a rigidez inicial, em média, teve um acréscimo de 92% e 90% para 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a rigidez inicial aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal.

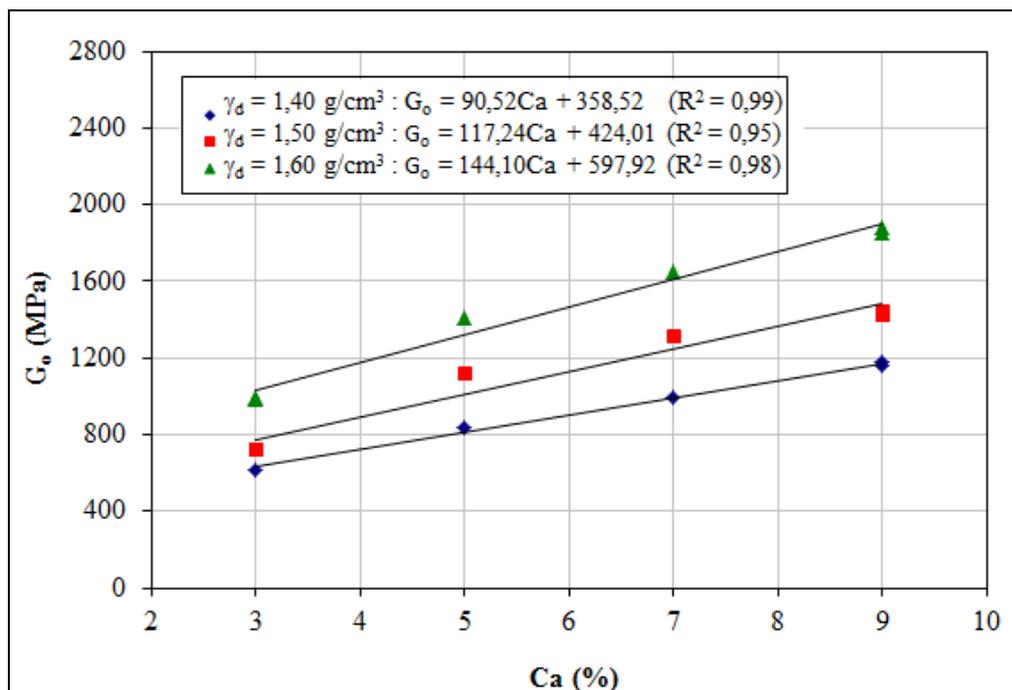


Figura 4.99 – Variação da rigidez inicial em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

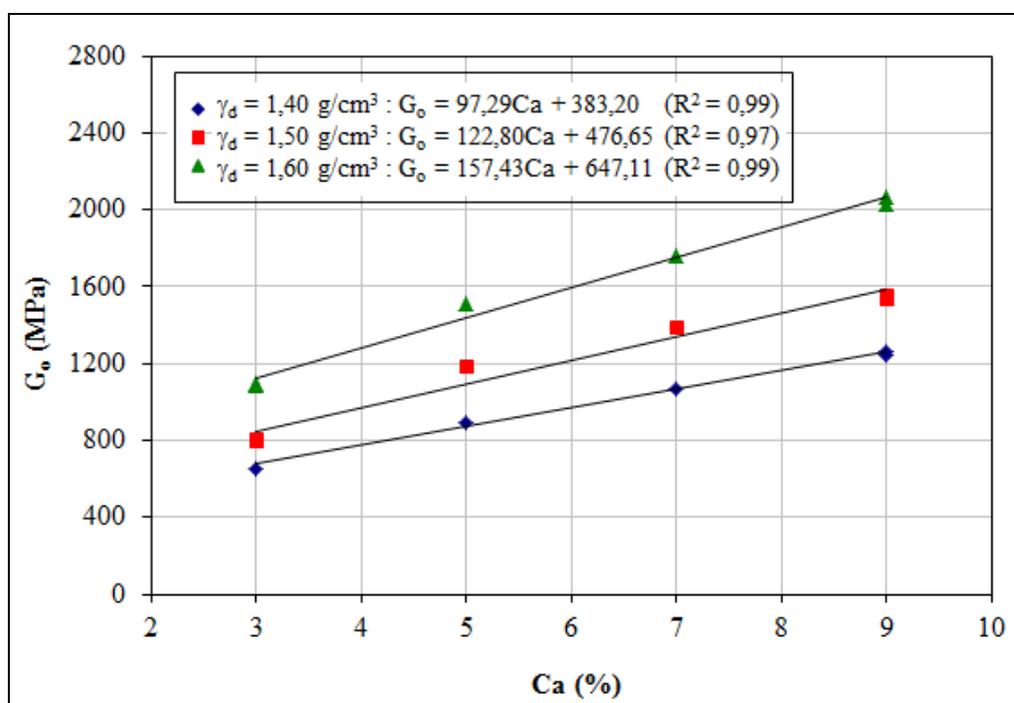


Figura 4.100 – Variação da rigidez inicial em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

4.3.1.2 Efeito da porosidade

Nas Figuras 4.101 e 4.102 são apresentadas as curvas de ajuste da variação da rigidez inicial (G_o) em função da porosidade do caulim-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=17\%$).

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a rigidez inicial das misturas de caulim-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de rigidez inicial. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou em 1,64 vezes e 1,66 vezes a rigidez inicial do caulim-cal testado para 28 e 90 dias de cura, respectivamente.

Pode-se observar também, que a rigidez inicial aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

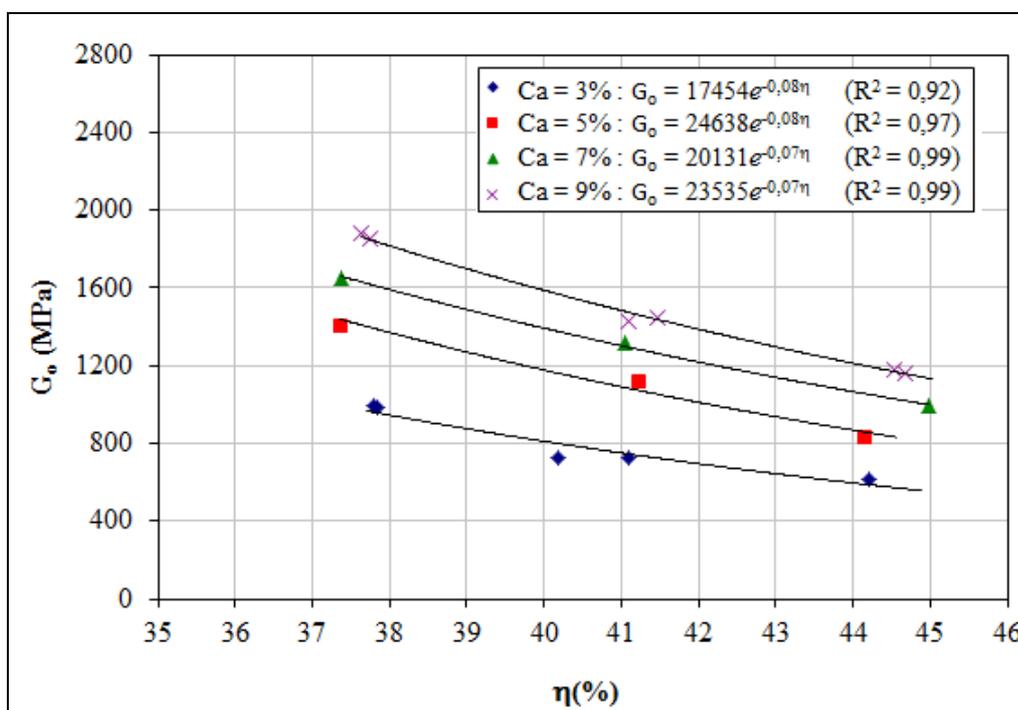


Figura 4.101 – Variação da rigidez inicial em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

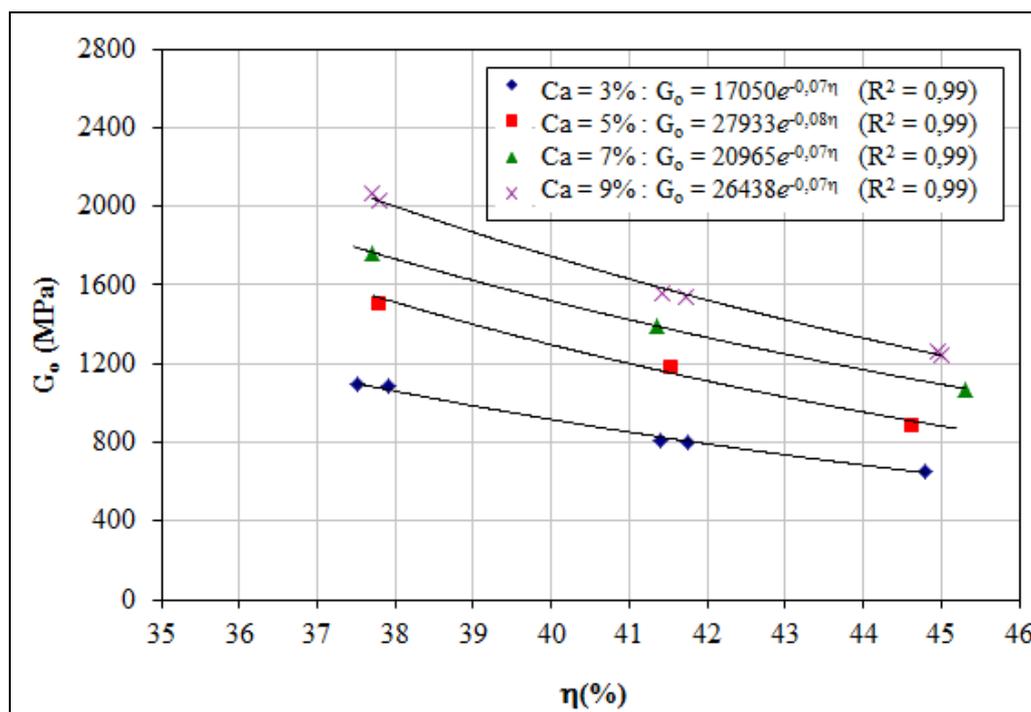


Figura 4.102 – Variação da rigidez inicial em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

4.3.1.3 Relação vazios/cal

Nas Figuras 4.103 e 4.104 são apresentadas as curvas de variação da rigidez inicial (G_o) em função da relação vazios/cal dos corpos-de-prova com 17% de umidade e 28 e 90 dias de cura. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=17\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

Observa-se nas Figuras 4.103 e 4.104 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

Esta mesma tendência foi verificada nos resultados de resistência à compressão simples e nos resultados de resistência à tração para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade. Assim, as Figura 4.105 e 4.106 apresentam a curva de variação da rigidez inicial em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,45, para as amostras com 17% de umidade ensaiadas com 28 e 90 dias de cura.

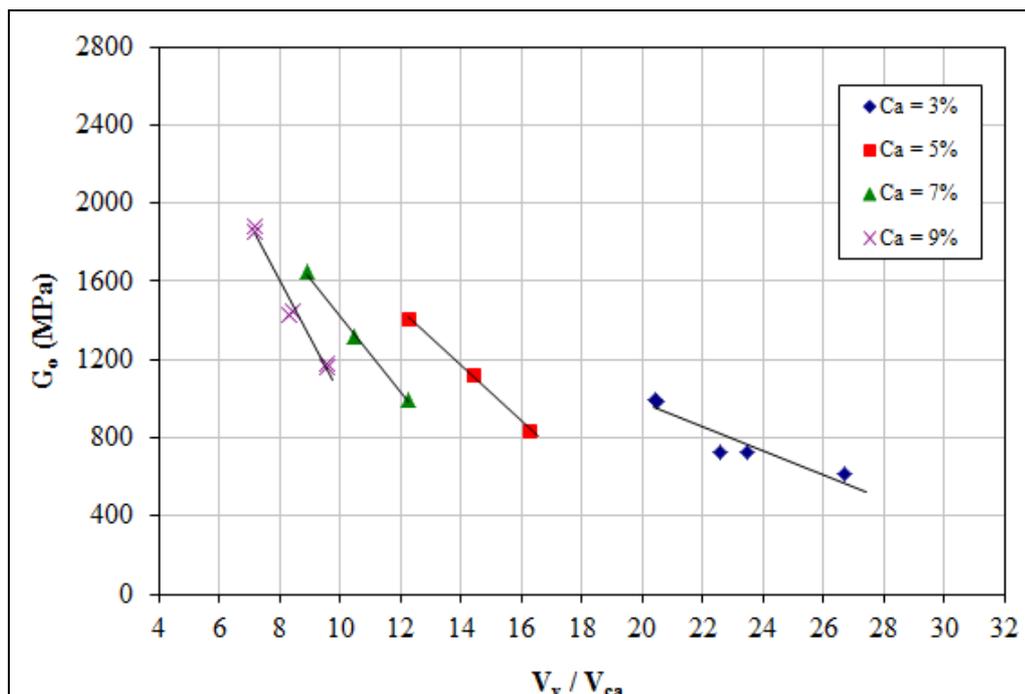


Figura 4.103 – Rigidez inicial *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

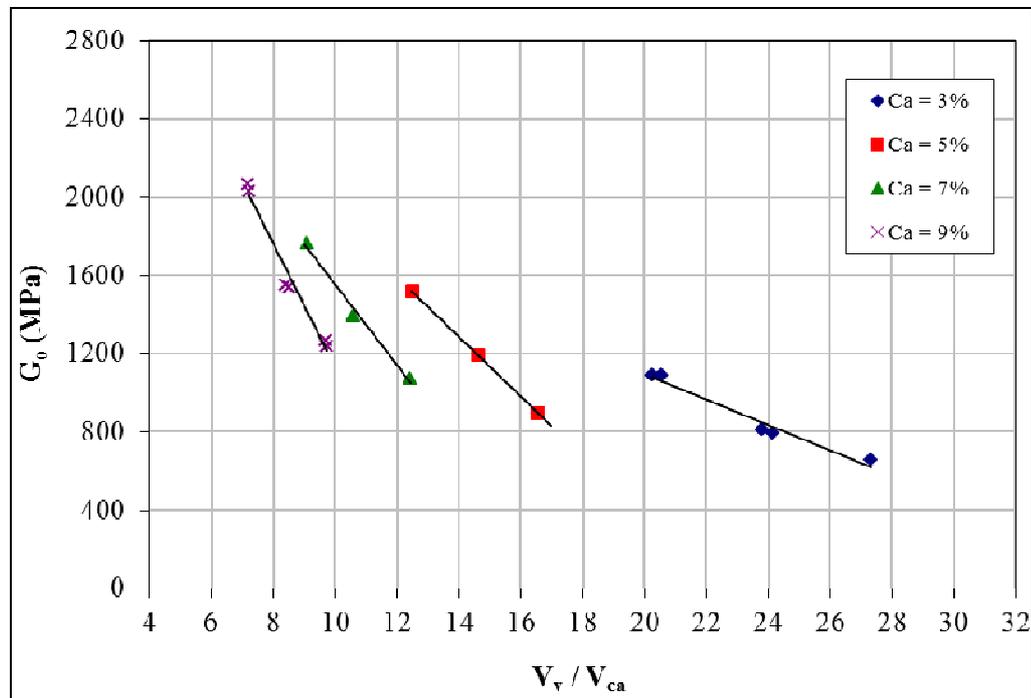


Figura 4.104 – Rigidez inicial *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

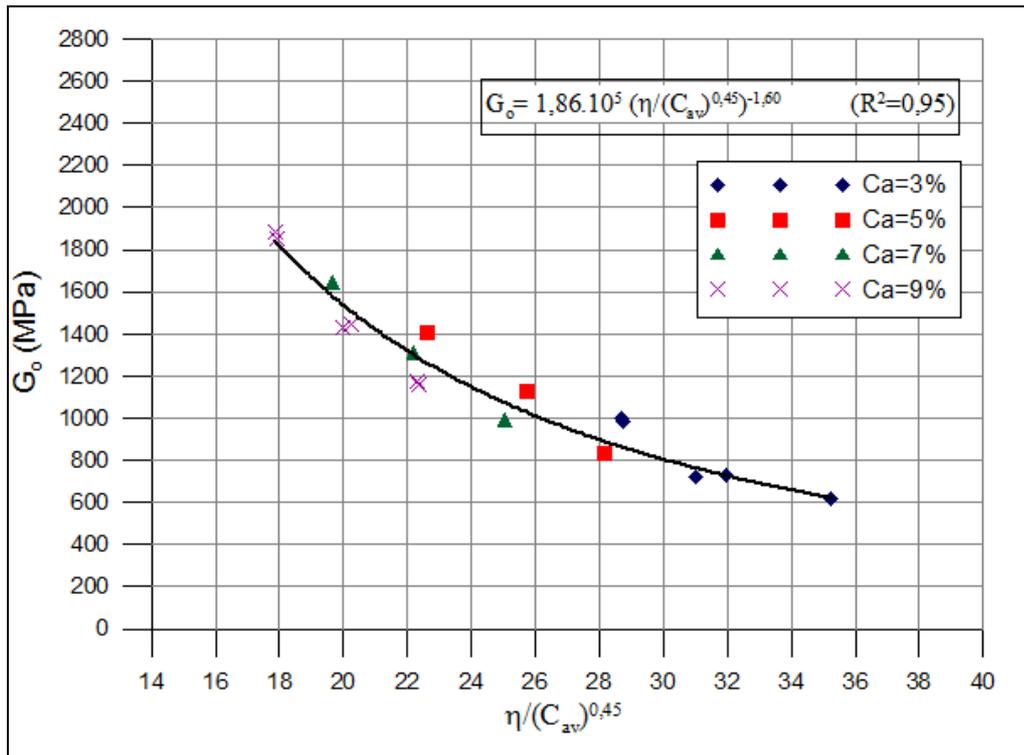


Figura 4.105 – Rigidez inicial *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

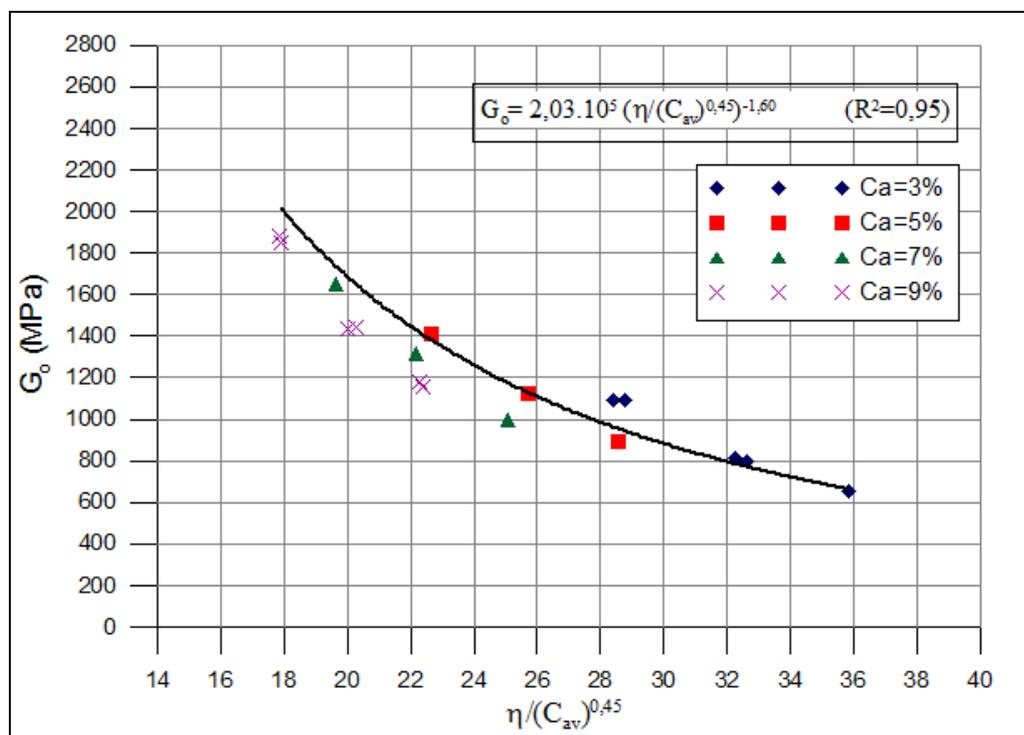


Figura 4.106 – Rigidez inicial *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 17% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

4.3.1.4 Efeito do tempo de cura

Na Figura 4.107 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustados) pela rigidez inicial das amostras com 17% de umidade ensaiadas com 28 e 90 dias de cura. Pode ser observado que as curvas que definem a relação η/C_{av} das amostras ensaiadas com 28 e 90 dias de cura têm a mesma tendência exponencial.

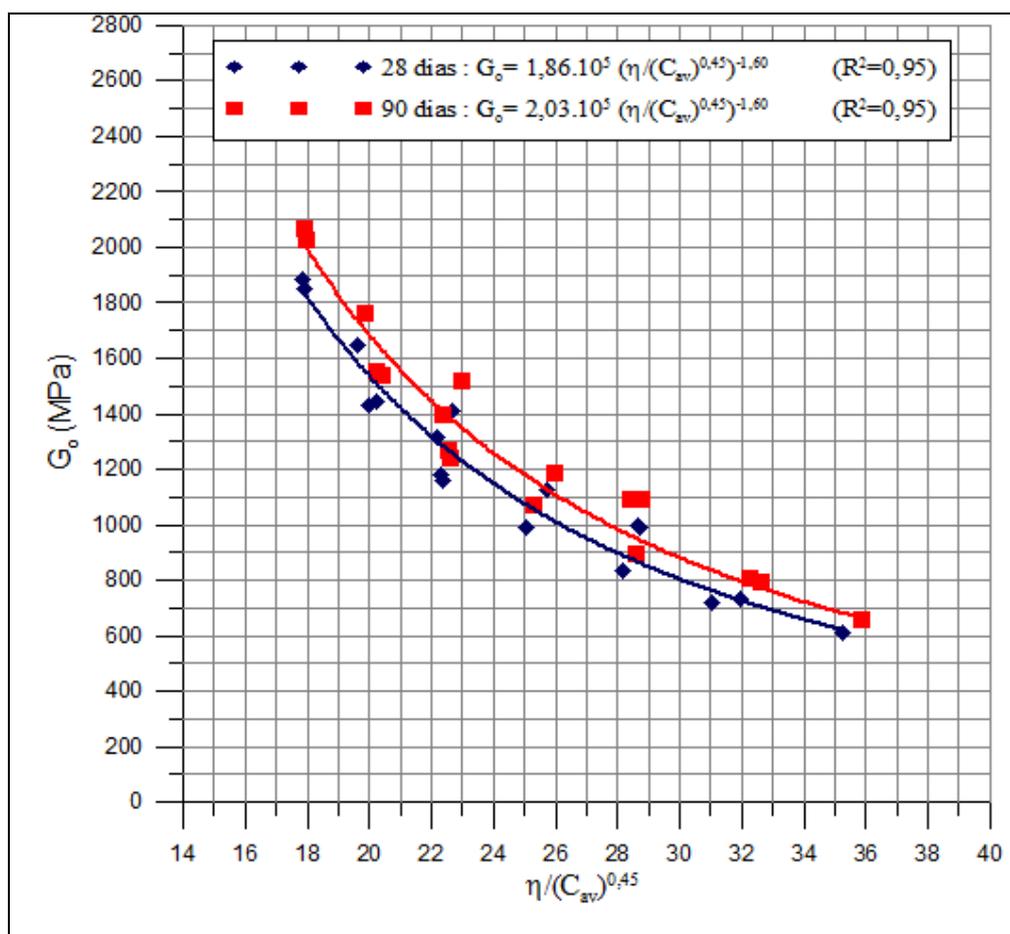


Figura 4.107 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 17% de umidade e 28 e 90 dias de cura submetidas aos ensaios de medidas de rigidez inicial

Os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 90 dias de cura apresentam, em média, medidas de rigidez inicial em torno de 8% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} .

Como observado nas Figuras 4.90 a 4.98, a explicação para este comportamento consiste em que a onda “S” está relacionada com a rigidez do material, por isso a sua velocidade (e

consequentemente o G_o do material estudado) cresce continuamente com o tempo, juntamente com o aumento da resistência do material, proporcionada pela cal.

A mesma tendência foi verificada por Lopes Junior (2011) em amostras de solo-cal e Fonini (2012) em amostras de solo-cimento.

4.3.2 Amostras com 20% de umidade

4.3.2.1 Efeito do teor de cal

Nas Figuras 4.108 e 4.109, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da rigidez inicial (G_o) em função da quantidade de cal para 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=20\%$).

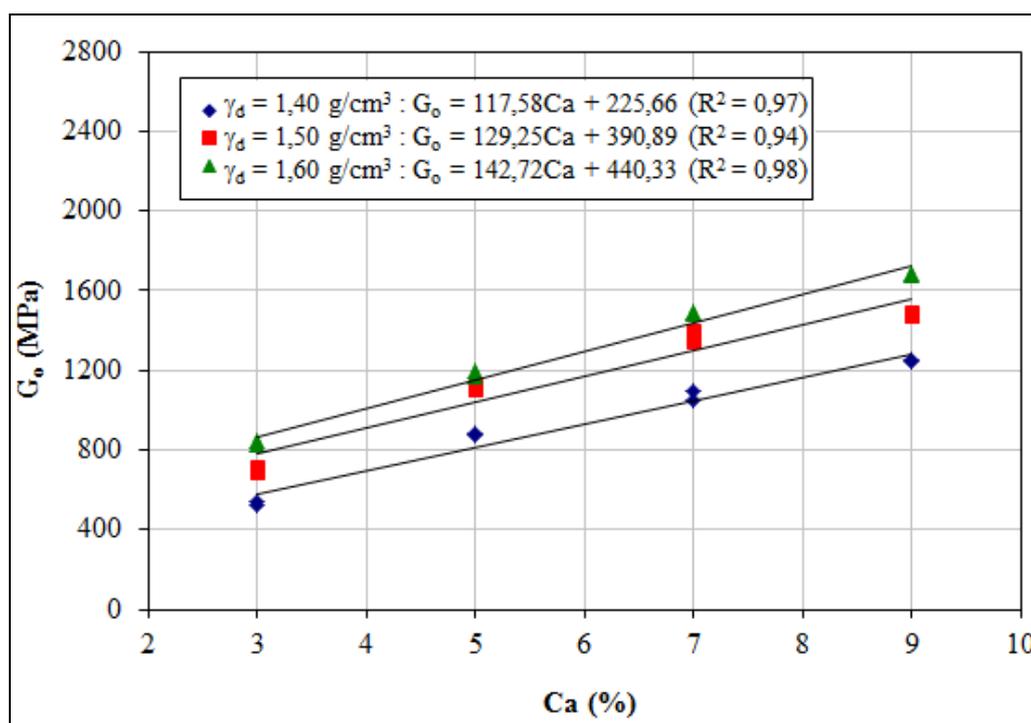


Figura 4.108 – Variação da rigidez inicial em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

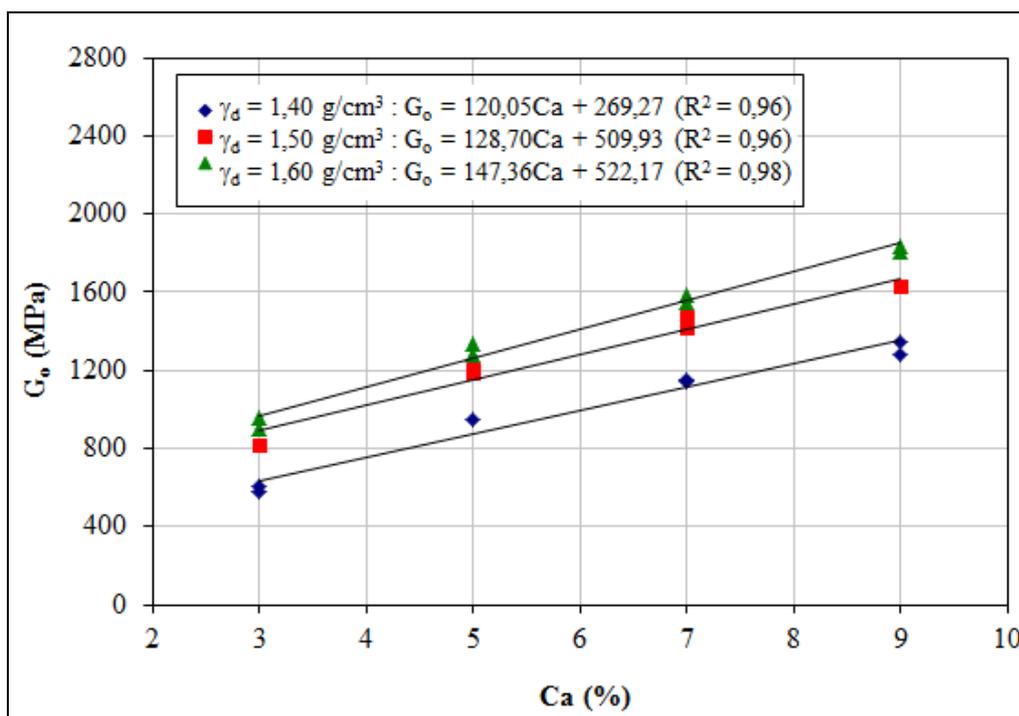


Figura 4.109 – Variação da rigidez inicial em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a rigidez inicial do material ensaiado com 28 e 90 dias de cura. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a rigidez inicial, em média, teve um acréscimo de 116% e 106% para 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a rigidez inicial aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal.

4.3.2.2 Efeito da porosidade

Nas Figuras 4.110 e 4.111 são apresentadas as curvas de ajuste da variação da rigidez inicial (G_0) em função da porosidade do caulim-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=20\%$).

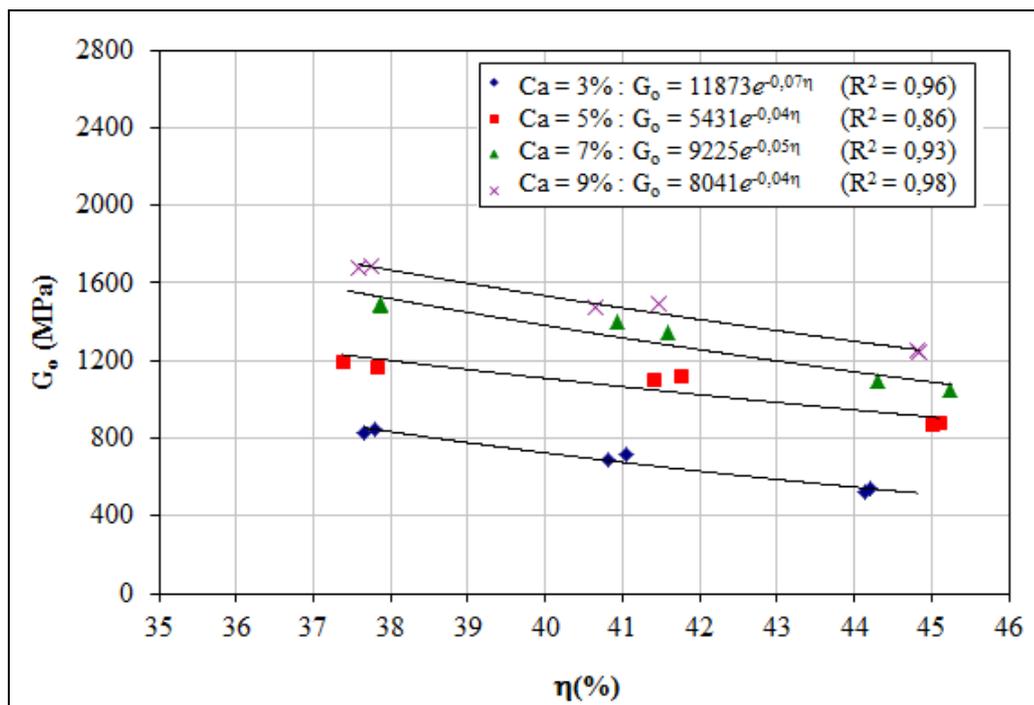


Figura 4.110 – Variação da rigidez inicial em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

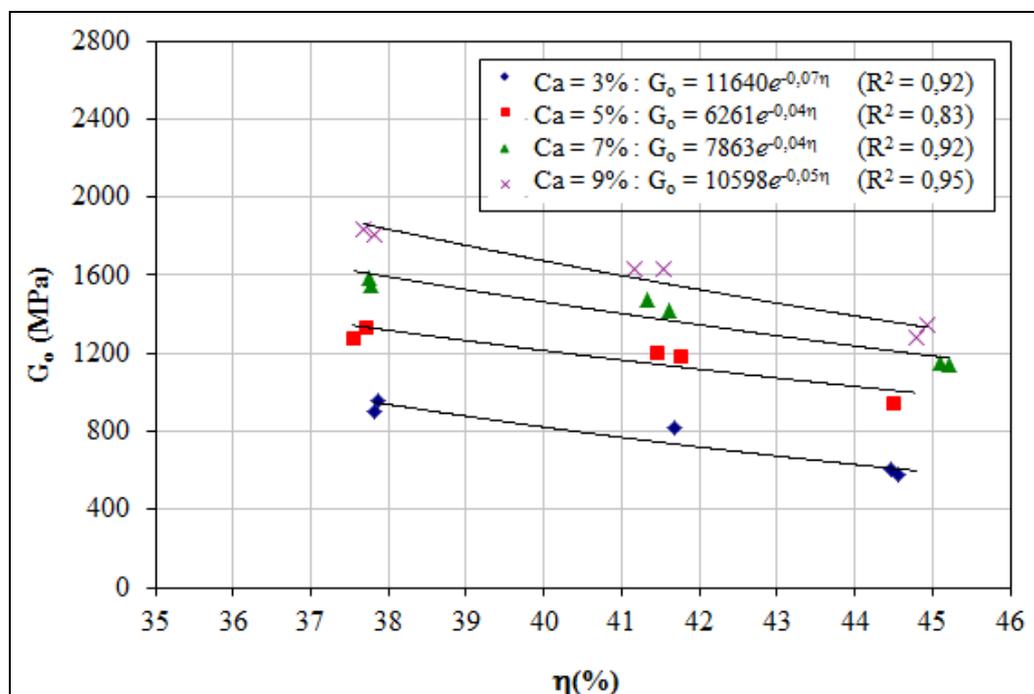


Figura 4.111 – Variação da rigidez inicial em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a rigidez inicial das misturas de caulim-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de rigidez inicial. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou em 1,4 vezes a rigidez inicial do caulim-cal testado para 28 e 90 dias de cura.

Pode-se observar também, que a rigidez inicial aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

4.3.2.3 Relação vazios/cal

Nas Figuras 4.112 e 4.113 são apresentadas as curvas de variação da rigidez inicial (G_0) em função da relação vazios/cal dos corpos-de-prova com 20% de umidade e 28 e 90 dias de cura. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=20\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

Observa-se nas Figuras 4.112 e 4.113 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

Esta mesma tendência foi verificada nos resultados de medidas de rigidez inicial das amostras de caulim-cal com 17% de umidade. Assim, as Figura 4.114 e 4.115 apresentam a curva de variação da rigidez inicial em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,45, para as amostras com 20% de umidade ensaiadas com 28 e 90 dias de cura.

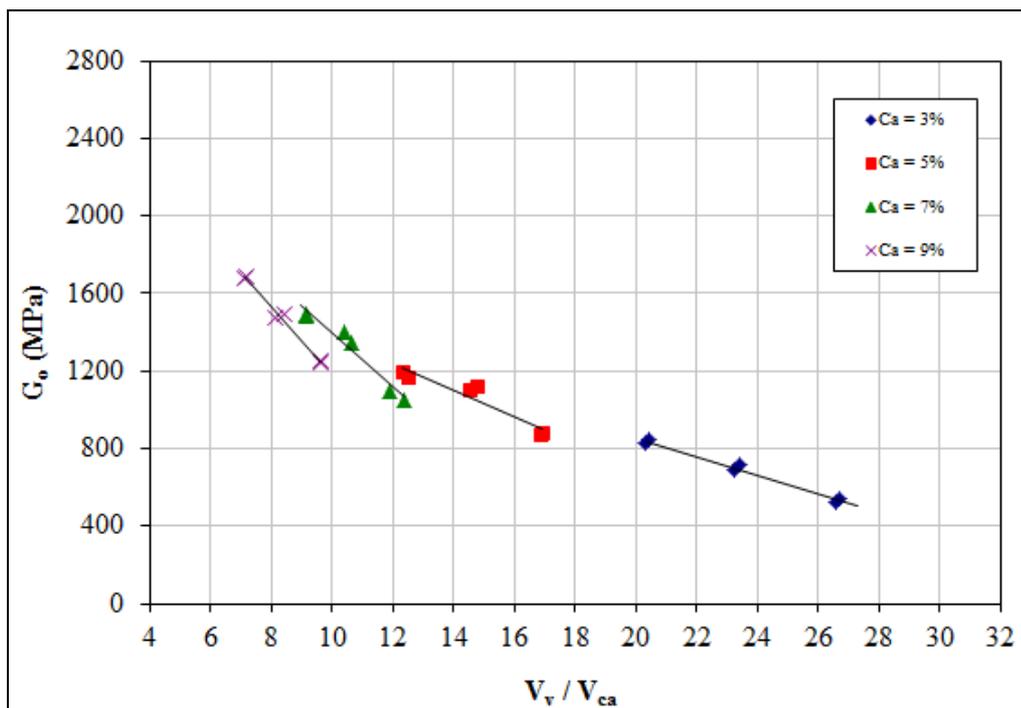


Figura 4.112 – Rigidez inicial *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

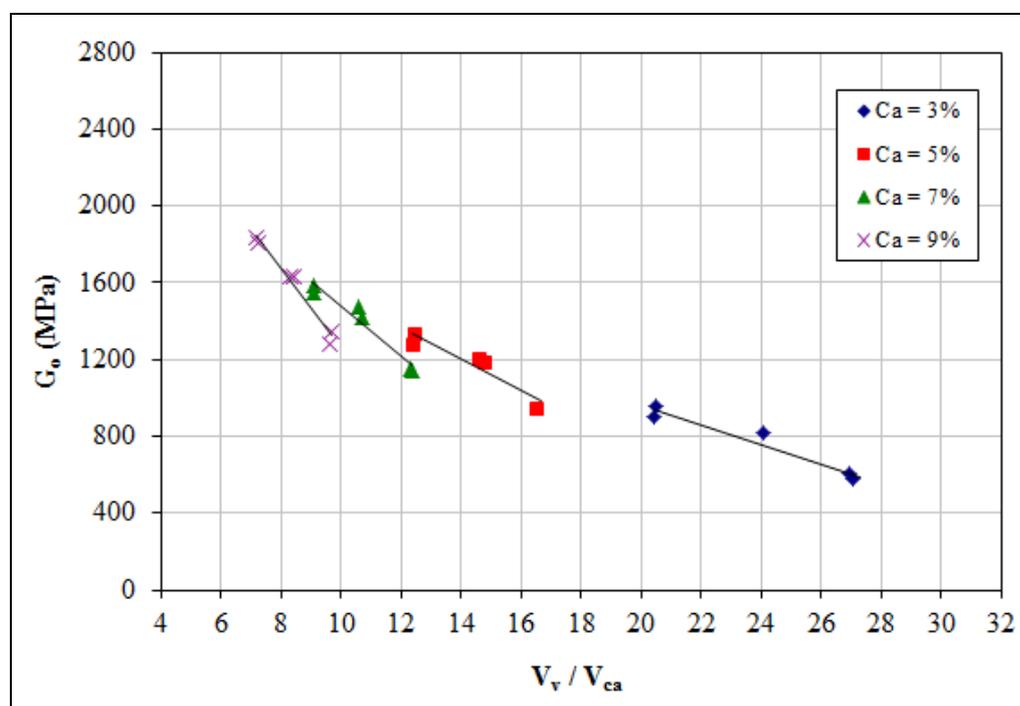


Figura 4.113 – Rigidez inicial *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

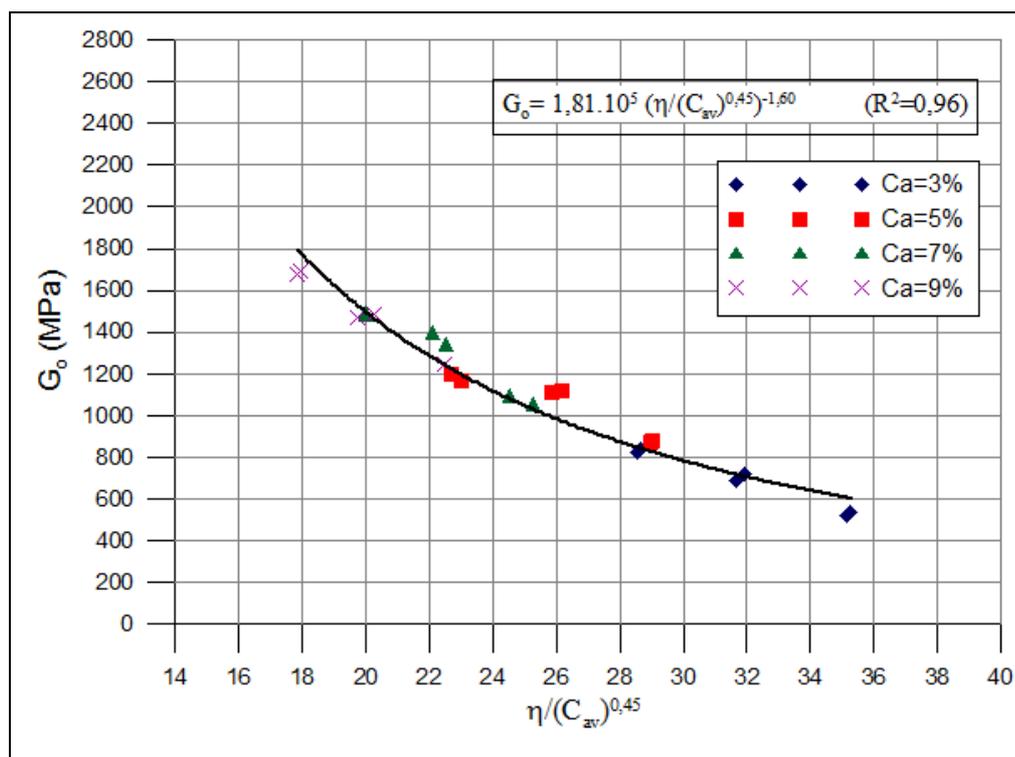


Figura 4.114 – Rigidez inicial *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

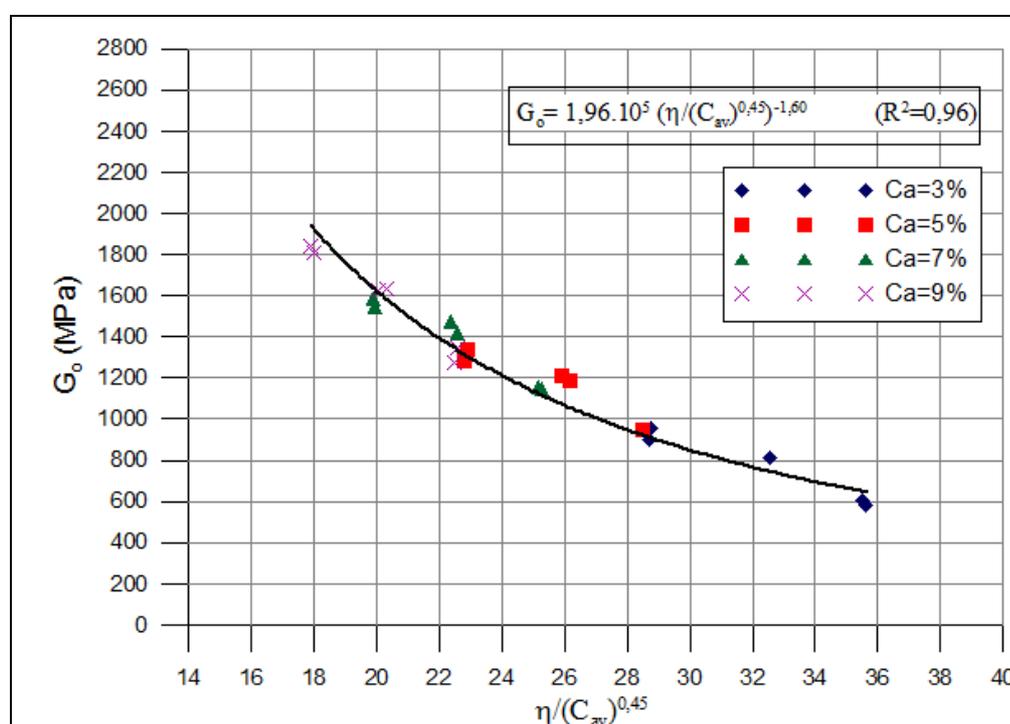


Figura 4.115 – Rigidez inicial *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 20% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

4.3.2.4 Efeito do tempo de cura

Na Figura 4.116 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustados) pela rigidez inicial das amostras com 20% de umidade ensaiadas com 28 e 90 dias de cura. Pode ser observado que as curvas que definem a relação η/C_{av} das amostras ensaiadas com 28 e 90 dias de cura têm a mesma tendência exponencial.

Os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 90 dias de cura apresentam, em média, medidas de rigidez inicial em torno de 9% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} .

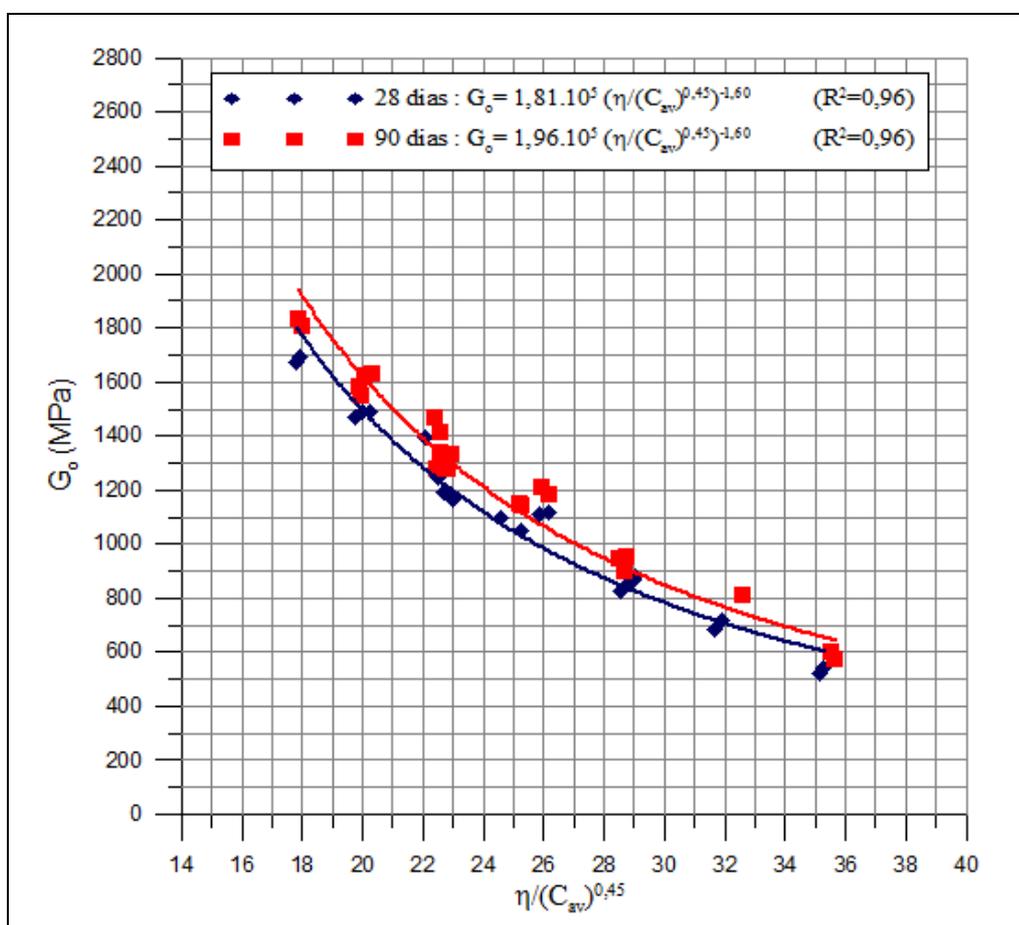


Figura 4.116 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 28 e 90 dias de cura submetidas aos ensaios de medidas de rigidez inicial

Como observado nas Figuras 4.90 a 4.98, a explicação para este comportamento consiste em que a onda “S” está relacionada com a rigidez do material, por isso a sua velocidade (e

Metodologias para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura

consequentemente o G_0 do material estudado) cresce continuamente com o tempo, juntamente com o aumento da resistência do material, proporcionada pela cal.

A mesma tendência foi verificada por Lopes Junior (2011) em amostras de solo-cal e Fonini (2012) em amostras de solo-cimento.

4.3.3 Amostras com 23% de umidade

4.3.3.1 Efeito do teor de cal

Nas Figuras 4.117 e 4.118, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da rigidez inicial (G_0) em função da quantidade de cal para 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=23\%$).

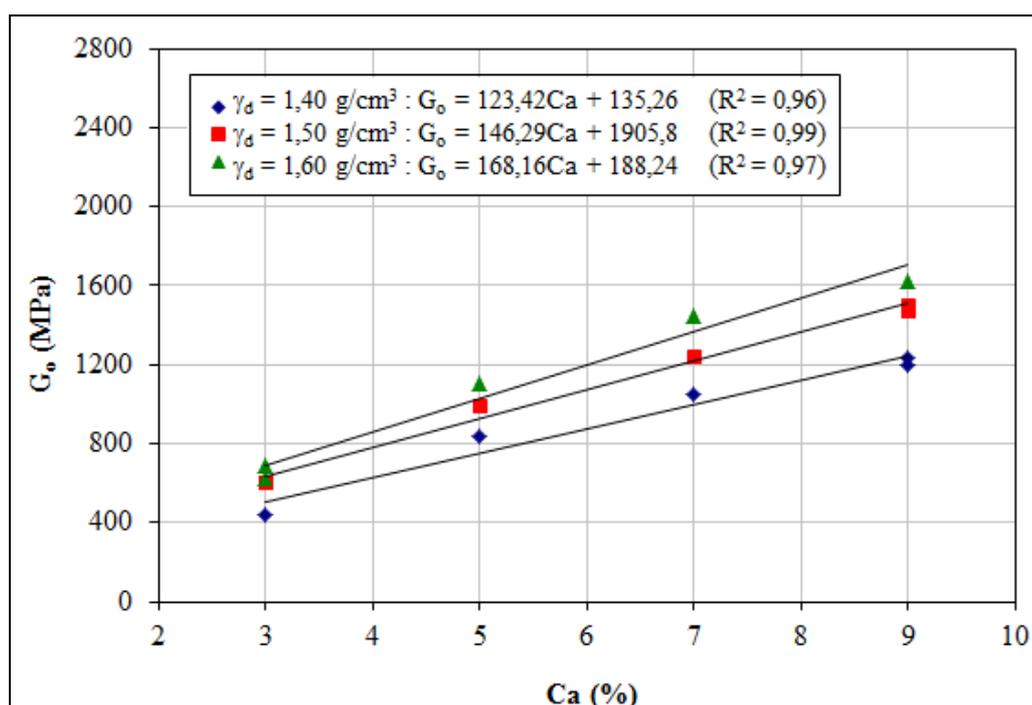


Figura 4.117 – Variação da rigidez inicial em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a rigidez inicial do material ensaiado com 28 e 90 dias de cura. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a rigidez inicial, em média, teve um acréscimo de 158% e 144% para 28 e 90 dias de cura,

respectivamente. Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a rigidez inicial aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal.

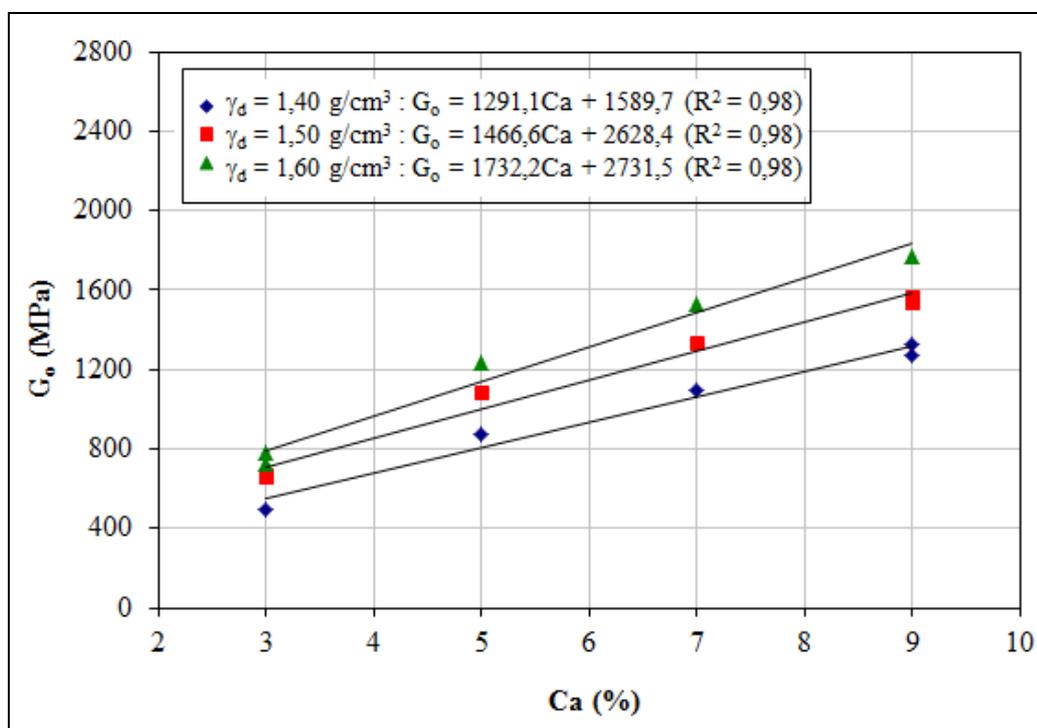


Figura 4.118 – Variação da rigidez inicial em relação à quantidade de cal das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

4.3.3.2 Efeito da porosidade

Nas Figuras 4.119 e 4.120 são apresentadas as curvas de ajuste da variação da rigidez inicial (G_0) em função da porosidade do caulim-cal compactado para corpos-de-prova ensaiados com 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=23\%$).

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a rigidez inicial das misturas de caulim-cal. Independentemente da quantidade de cal utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de rigidez inicial. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou em 1,4 vezes a rigidez inicial do caulim-cal testado para 28 e 90 dias de cura.

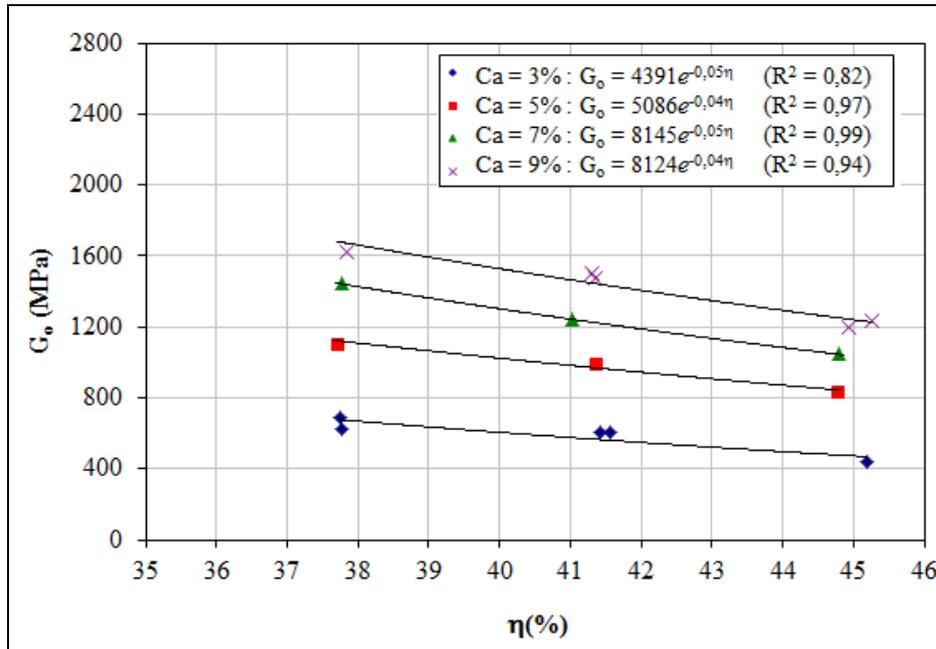


Figura 4.119 – Variação da rigidez inicial em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

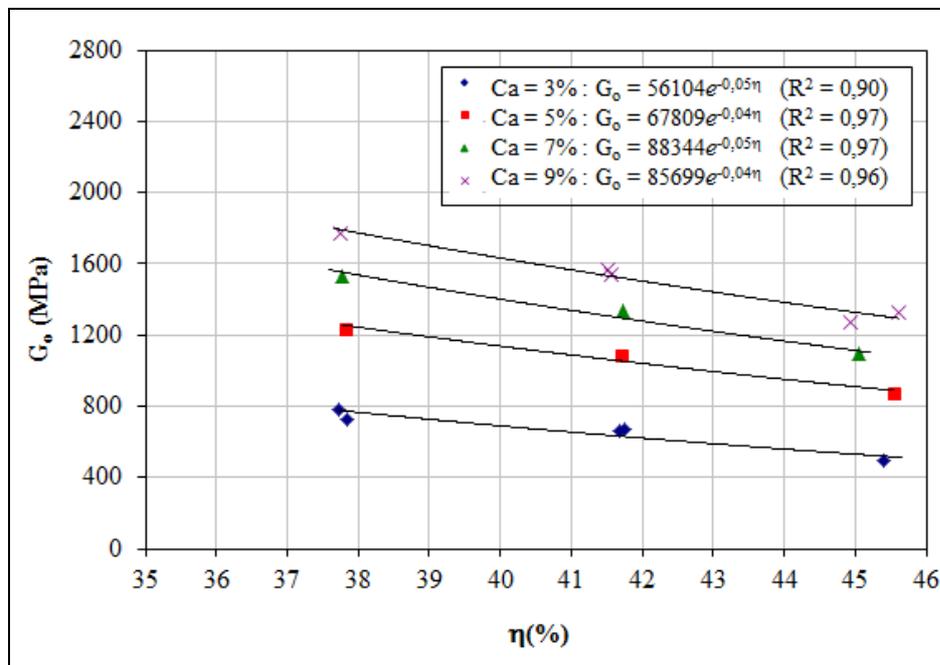


Figura 4.120 – Variação da rigidez inicial em relação à porosidade das amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

Pode-se observar também, que a rigidez inicial aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

4.3.3.3 Relação vazios/cal

Nas Figuras 4.121 e 4.122 são apresentadas as curvas de variação da rigidez inicial (G_0) em função da relação vazios/cal dos corpos-de-prova com 23% de umidade e 28 e 90 dias de cura. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=23\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

Observa-se nas Figuras 4.121 e 4.122 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma leve tendência exponencial.

Esta mesma tendência foi verificada nos resultados de medidas de rigidez inicial das amostras de caulim-cal com 17% e 20% de umidade. Assim, as Figuras 4.123 e 4.124 apresentam a curva de variação da rigidez inicial em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,45, para as amostras com 23% de umidade ensaiadas com 28 e 90 dias de cura.

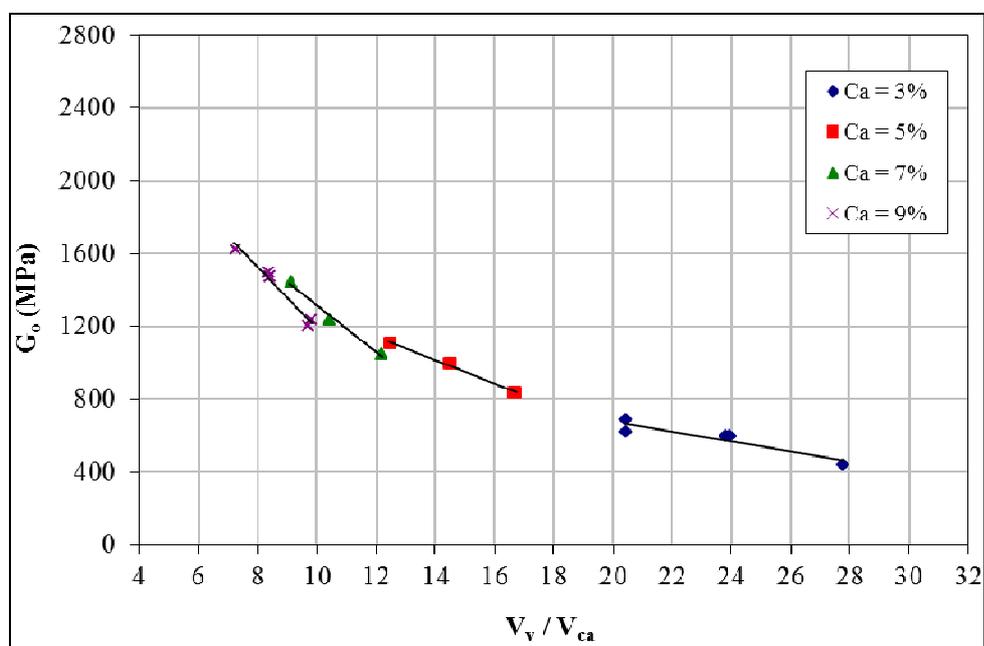


Figura 4.121 – Rigidez inicial *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

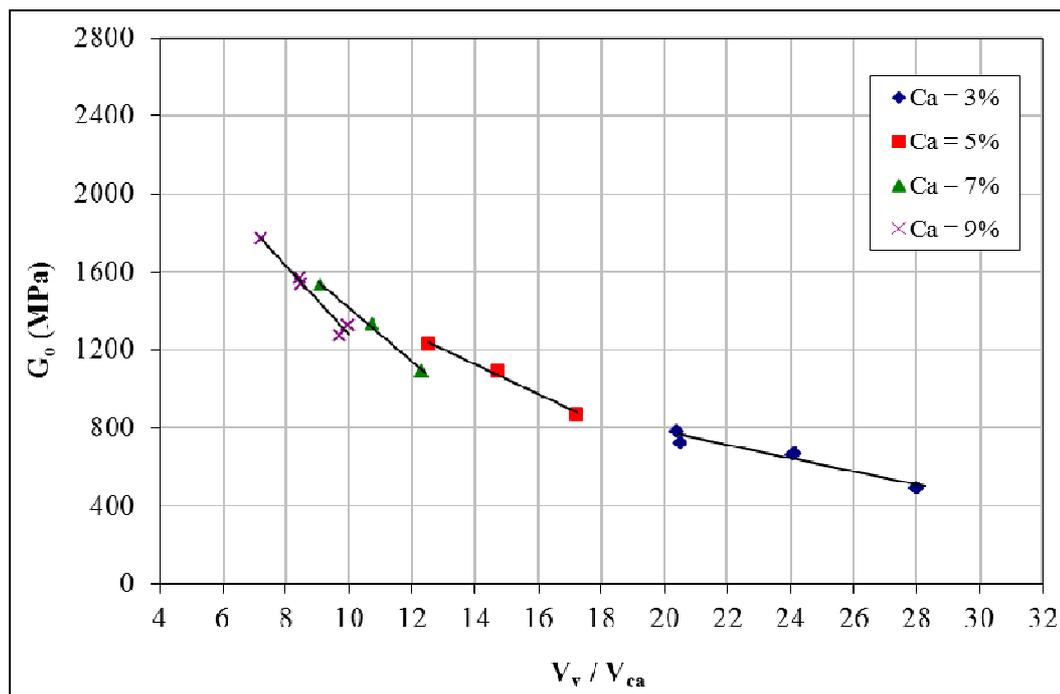


Figura 4.122 – Rigidez inicial *versus* relação vazios/cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

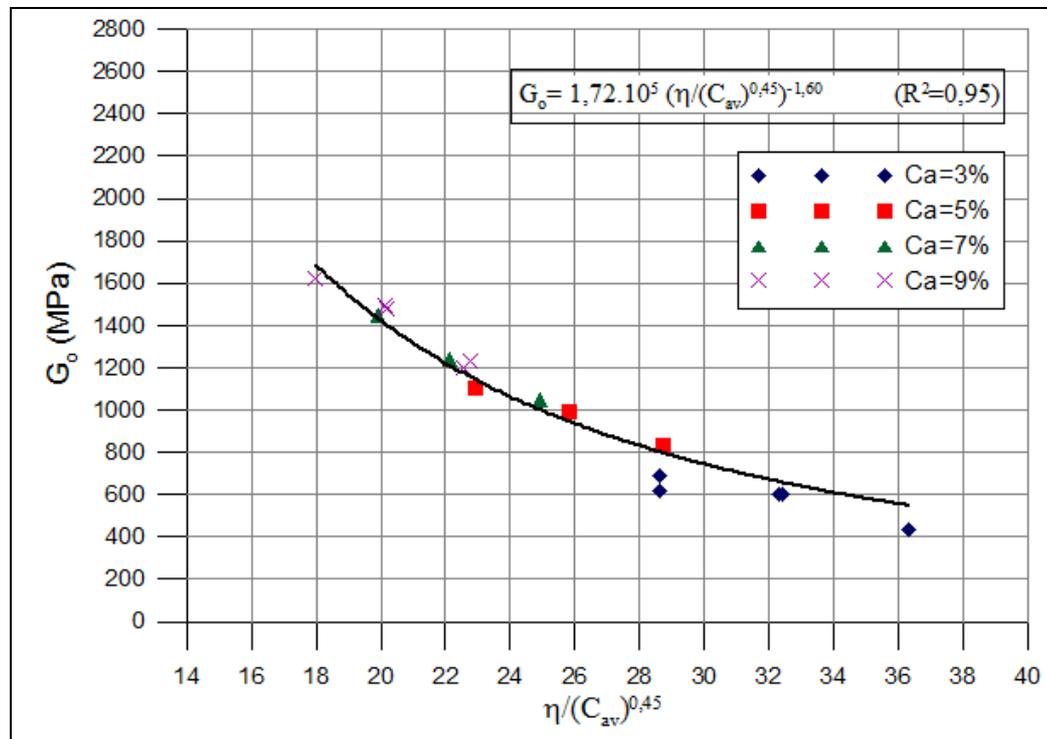


Figura 4.123 – Rigidez inicial *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 28 dias de cura

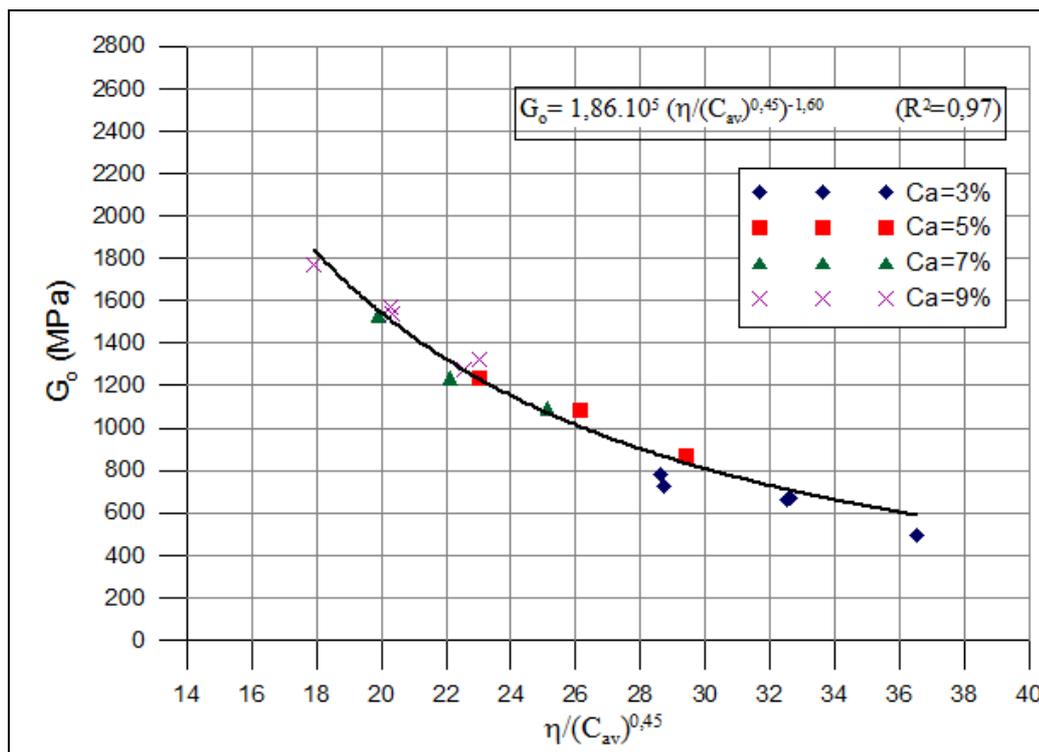


Figura 4.124 – Rigidez inicial *versus* relação vazios/cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para as amostras de caulim-cal com 23% de umidade ensaiadas com 90 dias de cura

4.3.3.4 Efeito do tempo de cura

Na Figura 4.125 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustados) pela rigidez inicial das amostras com 23% de umidade ensaiadas com 28 e 90 dias de cura. Pode ser observado que as curvas que definem a relação η/C_{av} das amostras ensaiadas com 28 e 90 dias de cura têm a mesma tendência exponencial.

Os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 90 dias de cura apresentam, em média, medidas de rigidez inicial em torno de 8,5% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras ensaiadas com 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} .

Como observado nas Figuras 4.90 a 4.98, a explicação para este comportamento consiste em que a onda “S” está relacionada com a rigidez do material, por isso a sua velocidade (e consequentemente o G_0 do material estudado) cresce continuamente com o tempo, juntamente com o aumento da resistência do material, proporcionada pela cal.

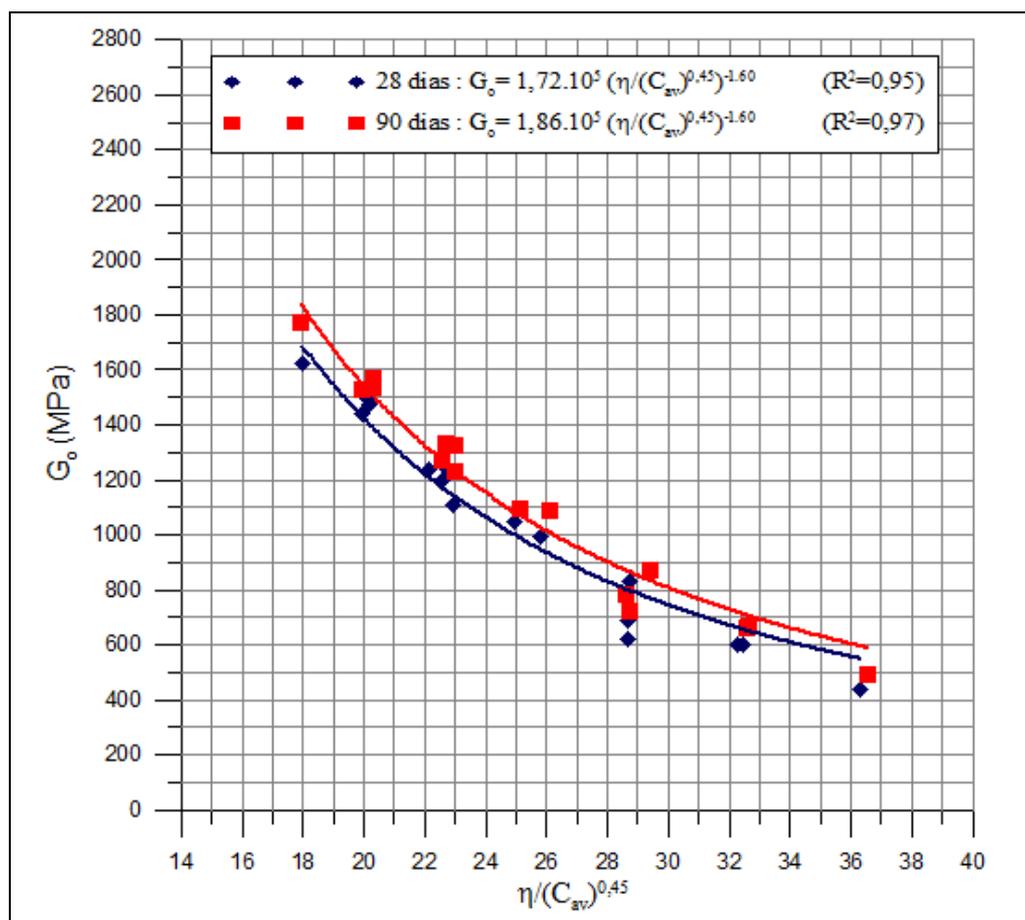


Figura 4.125 – Efeito do tempo de cura nas amostras de caulim-cal com 23% de umidade e 28 e 90 dias de cura submetidas aos ensaios de medidas de rigidez inicial

A mesma tendência foi verificada por Lopes Junior (2011) em amostras de solo-cal e Fonini (2012) em amostras de solo-cimento.

4.3.4 Efeito do teor de umidade

Nas Figuras 4.126 e 4.127 são apresentados os resultados das relações η/C_{av} (ajustados) pela rigidez inicial das amostras com 17%, 20% e 23% de umidade ensaiadas com 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Pode ser observado que as curvas que definem a relação η/C_{av} das amostras com 17%, 20% e 23% de umidade têm a mesma tendência exponencial, independente do tempo de cura.

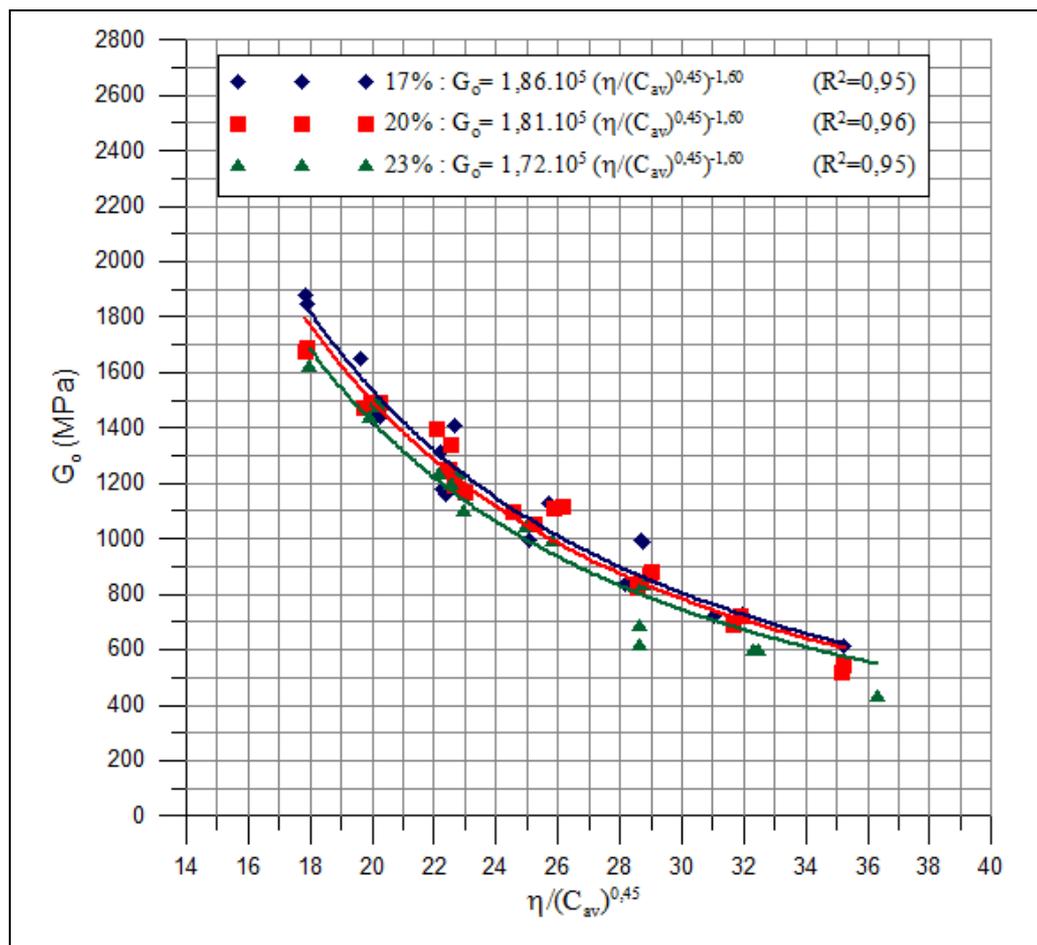


Figura 4.126 – Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade e 28 dias de cura submetidas aos ensaios de medidas de rigidez inicial

Na Figura 4.126 observa-se que os pontos que formam a curva das amostras com 17% umidade e 28 dias de cura apresentam, em média, medidas de rigidez inicial em torno de 5% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 20% de umidade, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Por sua vez, os pontos que formam a curva das amostras com 20% umidade e 28 dias de cura apresentam, em média, medidas de rigidez inicial em torno de 10% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 23% de umidade. Além disso, os pontos que formam a curva das amostras com 17% umidade e 28 dias de cura apresentam, em média, medidas de rigidez inicial em torno de 15% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 23% de umidade.

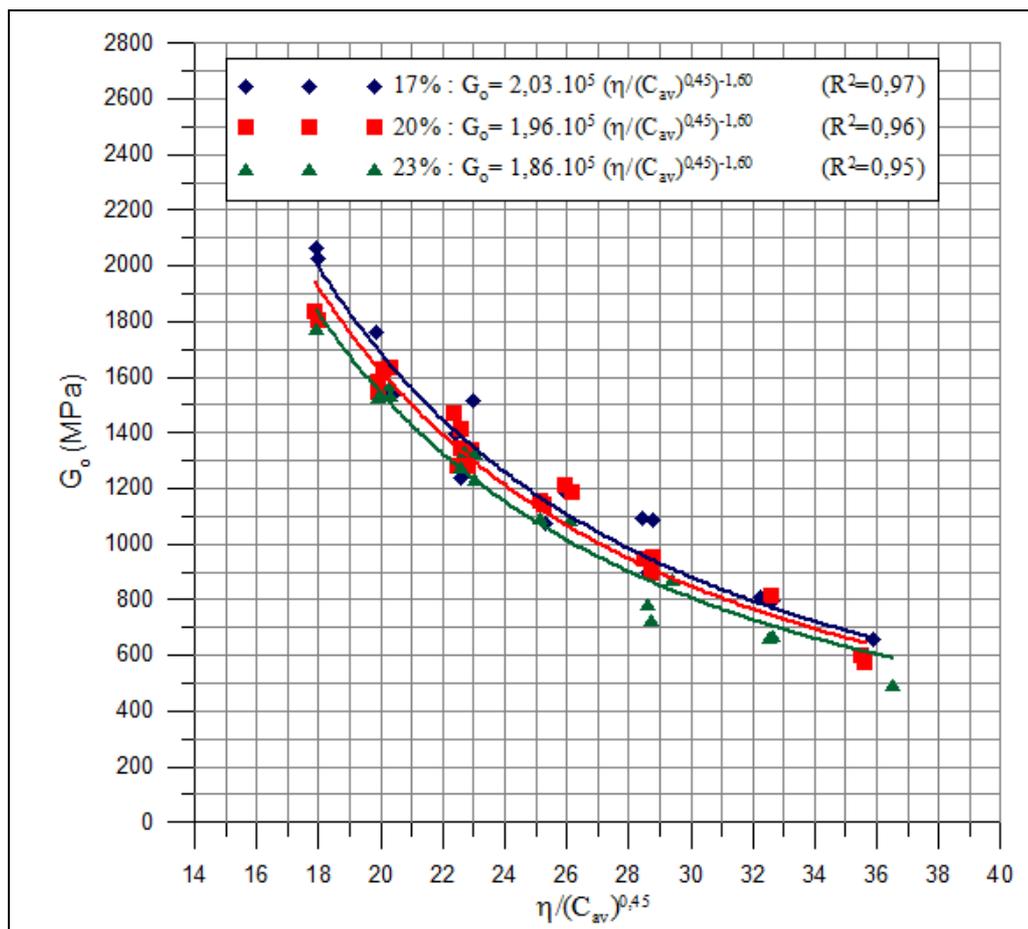


Figura 4.127 – Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade e 90 dias de cura submetidas aos ensaios de medidas de rigidez inicial

Na Figura 4.127 observa-se que os pontos que formam a curva das amostras com 17% umidade e 90 dias de cura apresentam, em média, medidas de rigidez inicial em torno de 5% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 20% de umidade, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Por sua vez, os pontos que formam a curva das amostras com 20% umidade e 90 dias de cura apresentam, em média, medidas de rigidez inicial em torno de 9% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 23% de umidade. Além disso, os pontos que formam a curva das amostras com 17% umidade e 90 dias de cura apresentam, em média, medidas de rigidez inicial em torno de 16% mais altas que os pontos que formam a curva das amostras com 23% de umidade.

A partir das análises realizadas observa-se um aumento da rigidez inicial com a diminuição do teor de umidade, para 28 e 90 dias de cura. Além disso, observando-se as curvas de compactação do caulim-cal e os pontos definidos no programa de ensaios (Figura 3.19),

observa-se que o teor de umidade de 17% (que proporciona a rigidez máxima das amostras estudadas) é muito inferior ao teor de umidade ótimo das curvas de compactação, estando localizado no ramo seco.

Esta mesma tendência foi observada por Consoli *et al* (2001), em amostras de solo-cinza-cal moldadas com diferentes teores de umidade, e por Galaa *et al* (2011), ao estudar dois grupos de amostras de solo-cimento, um submerso em água e outro não submerso em água. Segundo Galaa *et al* (2011), o fato de amostras com umidades menores obterem valores de rigidez inicial maiores, reflete o efeito da sucção nas medidas de rigidez inicial.

4.3.5 Relações únicas no controle da rigidez inicial do solo estudado

Os resultados apresentados na Figura 4.83, indicam a existência de relações distintas e únicas para as amostras ensaiadas com 28 dias de cura com 17% de umidade (equação 4.17), 20% de umidade (equação 4.18) e 23% de umidade (equação 4.19).

$$G_o = 1,72.10^5(\eta/(C_{av})^{0,45})^{-1,60} \quad (R^2=0,95) \quad (4.17)$$

$$G_o = 1,81.10^5(\eta/(C_{av})^{0,45})^{-1,60} \quad (R^2=0,96) \quad (4.18)$$

$$G_o = 1,86.10^5(\eta/(C_{av})^{0,45})^{-1,60} \quad (R^2=0,95) \quad (4.19)$$

Os resultados apresentados na Figura 4.83, indicam a existência de relações distintas e únicas para as amostras ensaiadas com 90 dias de cura com 17% de umidade (equação 4.20), 20% de umidade (equação 4.21) e 23% de umidade (equação 4.22).

$$G_o = 1,86.10^5(\eta/(C_{av})^{0,45})^{-1,60} \quad (R^2=0,97) \quad (4.20)$$

$$G_o = 1,96.10^5(\eta/(C_{av})^{0,45})^{-1,60} \quad (R^2=0,96) \quad (4.21)$$

$$G_o = 2,03.10^5(\eta/(C_{av})^{0,45})^{-1,60} \quad (R^2=0,95) \quad (4.22)$$

Comparando as equações obtidas em cada tempo de cura, pode-se observar que a rigidez inicial tem um relacionamento direto com $[\eta/(C_{av})^{0,45}]$ para as três umidade estudadas (17%, 20% e 23%) e para os tempos de cura de 28 e 90 dias, tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito da umidade. Portanto, uma relação única pode ser conseguida relacionando a rigidez inicial com a porosidade (η), com o teor volumétrico de cal (C_{av}) e com a umidade

(ω), como apresentado na Figura 4.128, podendo-se observar as retas obtidas para 28 dias (equação 4.23) e para 90 dias de cura (Equação 4.24).

$$G_o = [2,33.10^3(\omega) + 2,26.10^5].[(\eta/(C_{av})^{0,45})^{-1,60}] \quad (R^2=0,97) \quad (4.23)$$

$$G_o = [2,83.10^3(\omega) + 2,52.10^5].[(\eta/(C_{av})^{0,45})^{-1,60}] \quad (R^2=0,99) \quad (4.24)$$

A Figura 4.128 demonstra também, que para as misturas estudadas na presente pesquisa, a rigidez inicial aumenta linearmente com a diminuição da umidade, no tempo de cura estudado.

Assim, as equações 4.23 e 4.25 podem ser utilizadas em relações de dosagem. Para o estudo de misturas de caulim-cal, existem várias maneiras para alcançar um valor-alvo de rigidez inicial para um determinado projeto: redução da porosidade e/ou aumento da quantidade de cal e/ou diminuição da umidade. Os resultados apresentados neste trabalho, portanto, sugerem que pode-se escolher a quantidade de cal, a porcentagem de umidade e o esforço de compactação adequado para fornecer uma mistura que resulte na rigidez inicial desejada (em MPa).

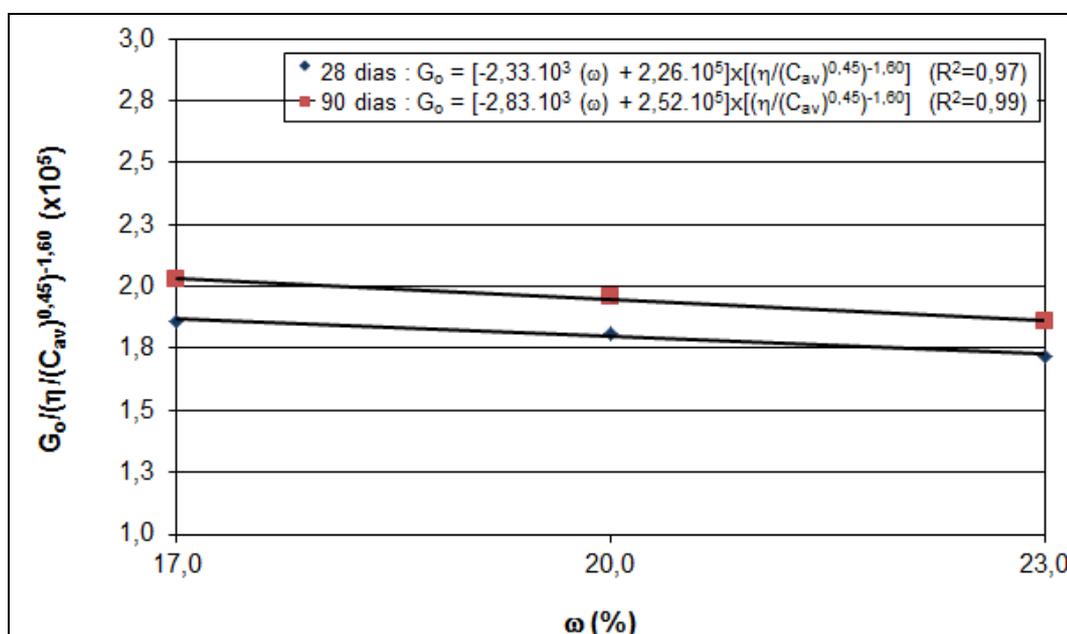


Figura 4.128 – Variação da rigidez inicial com a porosidade (η), com o teor volumétrico de cal (C_{av}) e com a porcentagem de umidade (ω) para 28 e 90 dias de cura

4.2.6 Relação da Rigidez Inicial com a Resistência à Compressão Simples

Observa-se nos resultados das correlações de rigidez inicial 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 4.22 e 4.105, das Figuras 4.35 a 4.114 e das Figuras 4.49 a 4.123 e as respectivas equações das tendências geradas, utilizou-se a relação vazios/cal para correlacionar a rigidez inicial com a resistência à compressão simples para as misturas com 17%, 20% e 23% de umidade e 28 dias de cura, respectivamente.

Nas Figuras 4.129, 4.130 e 4.131 são apresentados os resultados obtidos do relacionamento direto da rigidez inicial e da resistência à compressão simples com a relação η/C_{av} (ajustado), para amostras com 17%, 20% e 23% de umidade e 28 dias de cura, respectivamente.

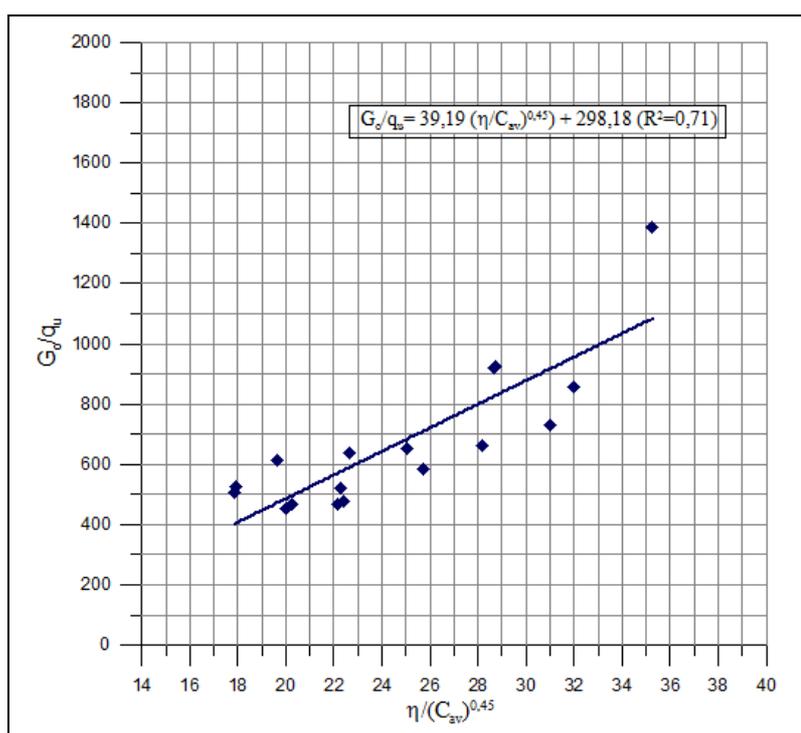


Figura 4.129 – Razão G_0/q_u versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 17% de umidade e 28 dias de cura

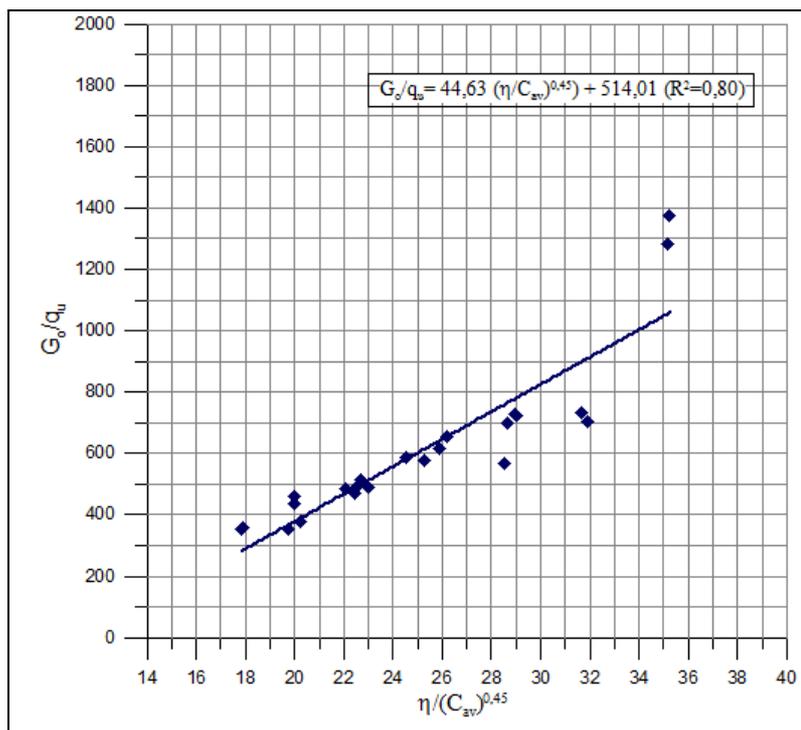


Figura 4.130 – Razão G_o/q_u versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de curas

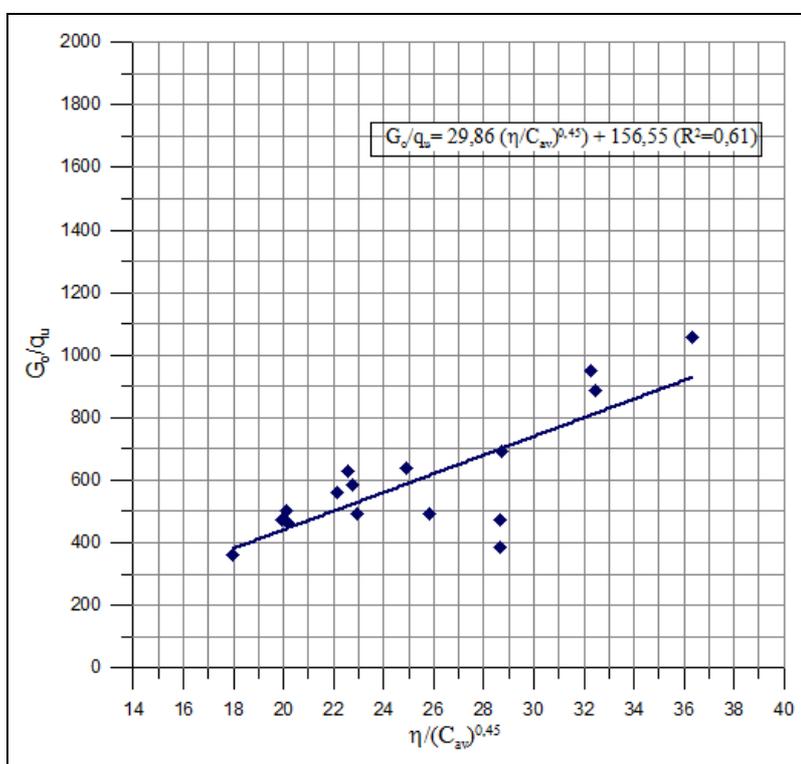


Figura 4.131 – Razão G_o/q_u versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 23% de umidade e 28 dias de cura

A mesma tendência foi observada para as amostras com 90 dias de cura. Assim, através das Figuras 4.24 e 4.106, das Figuras 4.37 e 4.115 e das Figuras 4.51 e 4.124 e as respectivas equações das tendências geradas, utilizou-se a relação vazio/cal para correlacionar a rigidez inicial com a resistência à compressão simples para as misturas com 17%, 20% e 23% de umidade e 90 dias de cura, respectivamente.

Nas Figuras 4.132, 4.133 e 4.134 são apresentados os resultados obtidos do relacionamento direto da rigidez inicial e da resistência à compressão simples com a relação η/C_{av} (ajustado), para amostras com 17%, 20% e 23% de umidade e 90 dias de cura, respectivamente.

Apesar das dispersões existentes entre os pontos das Figuras 4.129 a 4.134 (R^2 em torno de 0,74), é interessante essa relação G_o/q_u , pois é possível ter uma ideia da magnitude dos parâmetros a partir das expressões resultantes deles, onde conhecendo apenas um parâmetro (q_u ou G_o) é possível determinar o outro.

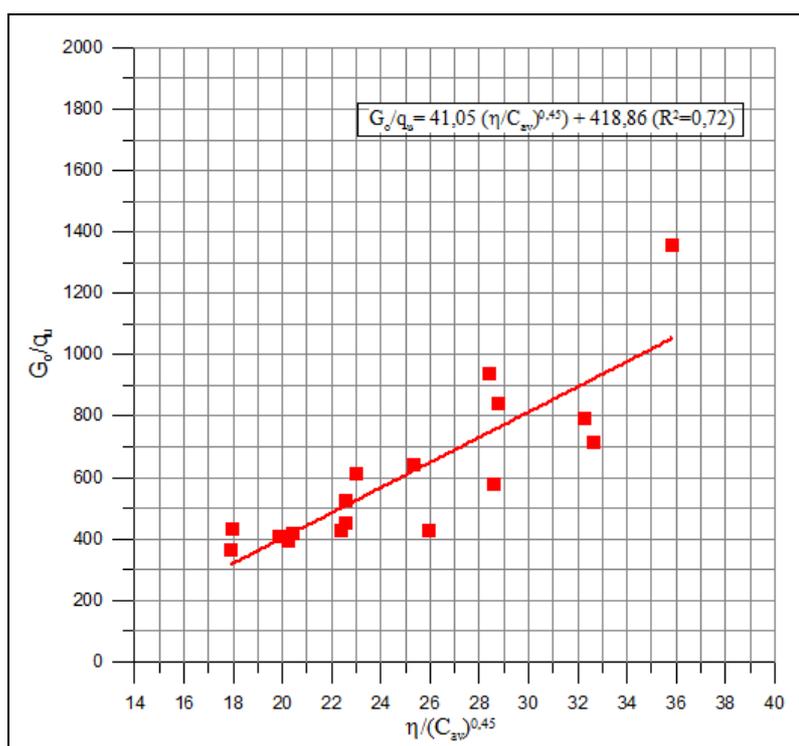


Figura 4.132 – Razão G_o/q_u versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 17% de umidade e 90 dias de cura

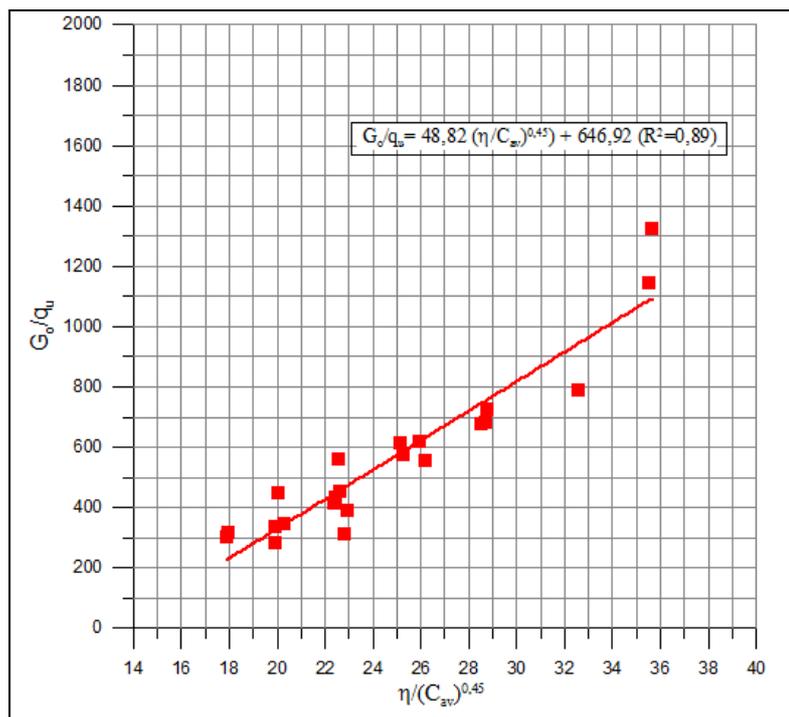


Figura 4.133 – Razão G_o/q_u versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 90 dias de cura

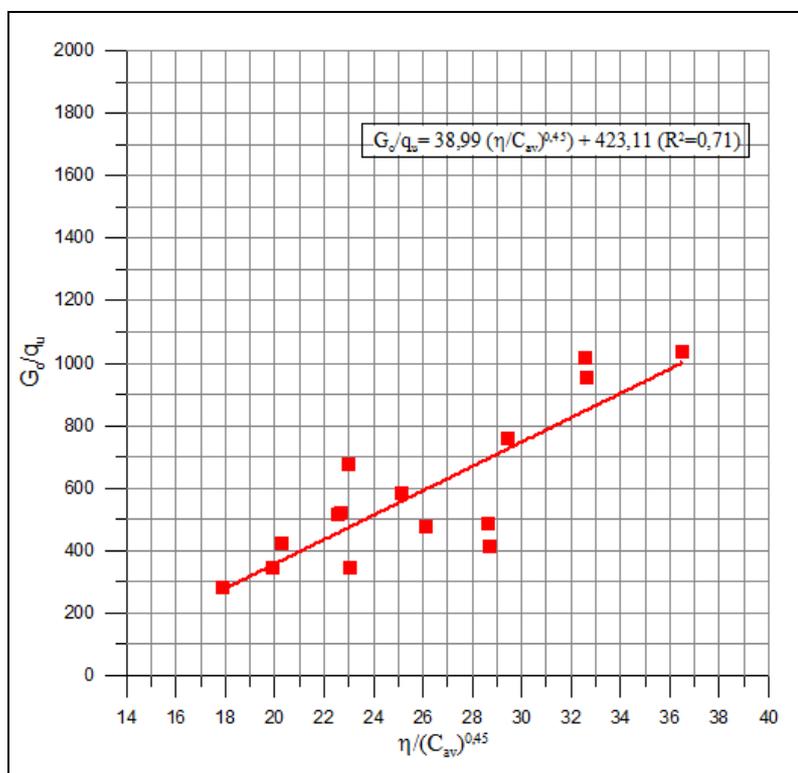


Figura 4.134 – Razão G_o/q_u versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 23% de umidade e 90 dias de cura

4.2.7 Relação da Rigidez Inicial com a Resistência à Tração

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

Através das Figuras 4.67 e 4.105, das Figuras 4.72 e 4.114 e das Figuras 4.80 e 4.123 e as respectivas equações das tendências geradas, utilizou-se a relação vazios/cal para correlacionar a rigidez inicial com a resistência à tração para as misturas com 17%, 20% e 23% de umidade e 28 dias de cura, respectivamente.

Nas Figuras 4.135, 4.136 e 4.137 são apresentados os resultados obtidos do relacionamento direto da rigidez inicial e da resistência à tração com a relação η/C_{av} (ajustado), para amostras com 17%, 20% e 23% de umidade e 28 dias de cura, respectivamente.

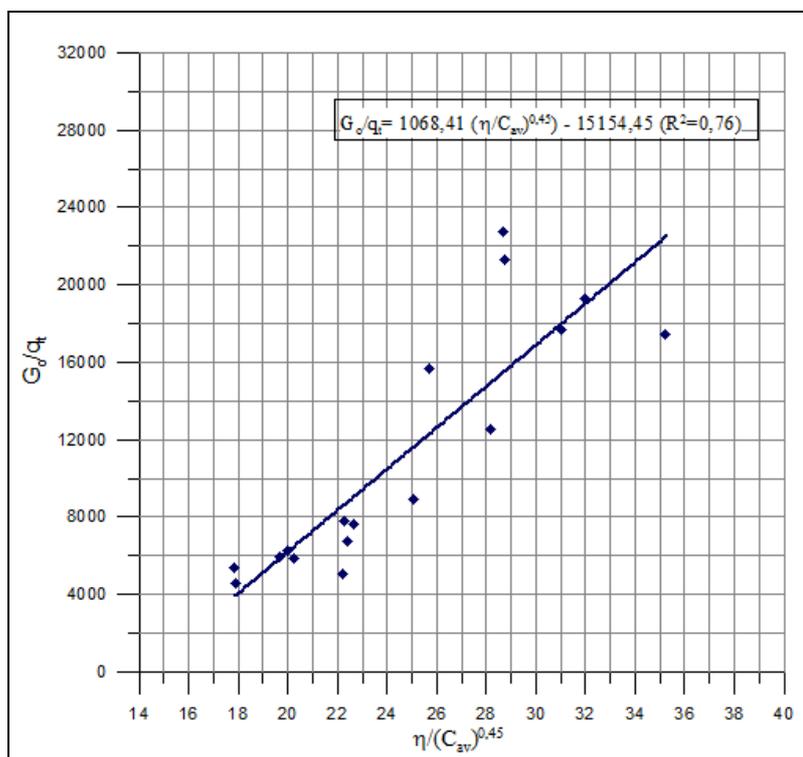


Figura 4.135 – Razão G_0/q_t versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 17% de umidade e 28 dias de cura

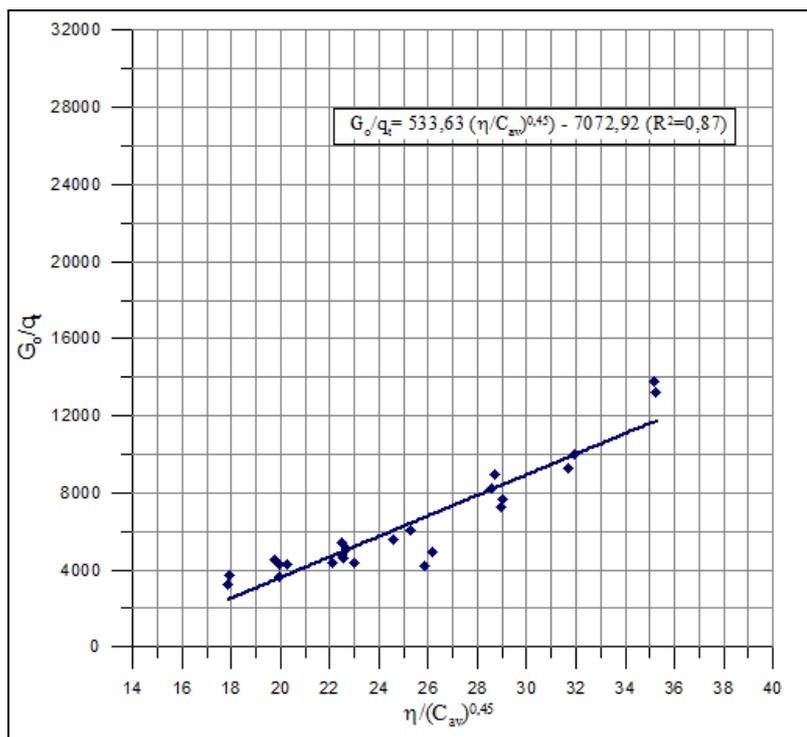


Figura 4.136 – Razão G_0/q_t versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de cura

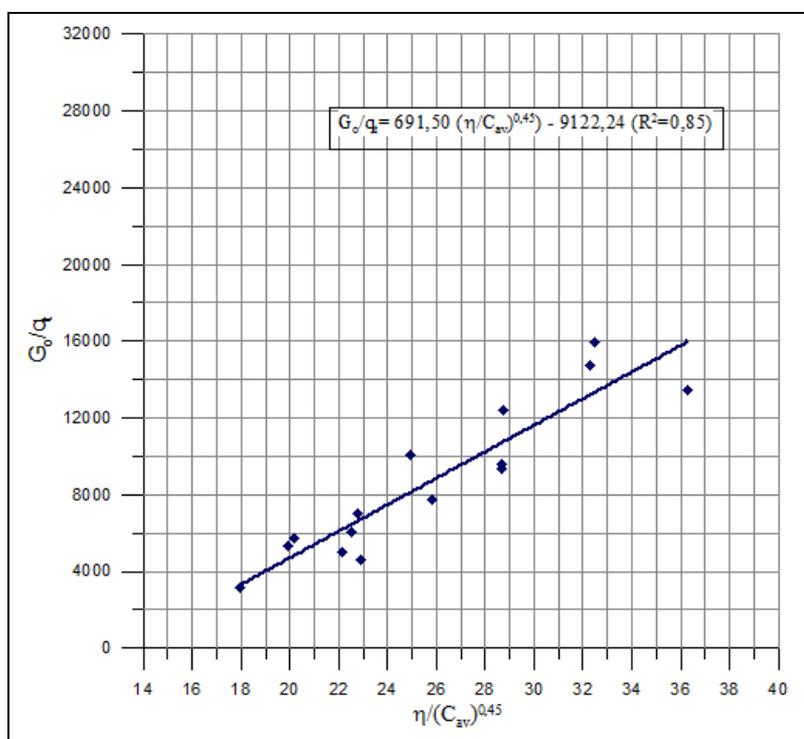


Figura 4.137 – Razão G_0/q_t versus relação vazios/cal (ajustado) das amostras de caulim-cal com 23% de umidade e 28 dias de cura

Apesar das dispersões existentes entre os pontos das Figuras 4.135 a 4.137 (R^2 em torno de 0,83), é interessante essa relação G_o/q_t , pois é possível ter uma ideia da magnitude dos parâmetros a partir das expressões resultantes deles, onde conhecendo apenas um parâmetro (q_t ou G_o) é possível determinar o outro.

4.4 ANÁLISE DA VARIÂNCIA – ANOVA

4.4.1 Análise da Variância para a Resistência à Compressão Simples

A análise da variância para os resultados de resistência à compressão simples foi realizada a partir da Tabela ANOVA com 4 fatores controláveis (quantidade cal, porosidade, teor de umidade e tempo de cura), que consiste na análise dos fatores controláveis e das interações dos fatores controláveis para um nível de significância de 95%.

A Tabela 4.1 apresenta a Tabela ANOVA realizada para o experimento em estudo, onde SQ é a soma quadrada correspondente a variabilidade causada por cada um dos fatores controláveis, suas interações e o erro residual, GDL é o número de graus de liberdade correspondente a cada termo, MQ a média quadrada, Teste F o valor da coordenada correspondente da distribuição F, dada por $MQ(\text{fator})/MQ(\text{erro})$ e Prob o valor da probabilidade de que resultados obtidos ao se modificar o nível do fator controlável correspondente pertençam a uma mesma distribuição, considerando-se então que probabilidades inferiores a 5% indicam que os resultados pertencem a distribuições diferentes, ou seja, o fator controlável provoca alteração significativa nos resultados.

Analisando a Tabela 4.1 observa-se que todos os fatores, as interações de 2ª e 3ª ordem são significativos. Observa-se também, que todas as interações de 1ª ordem são significativas, exceto a interação AD. O Fator A corresponde ao fator controlável umidade, o Fator B corresponde ao fator controlável cal, o Fator C corresponde ao fator controlável massa específica aparente seca e o Fator D corresponde ao fator controlável tempo de cura.

Contudo, pode-se perceber que os efeitos dos fatores A, B, C e D são, em geral, mais fortemente significativos que os efeitos das interações de 1ª ordem, que por sua vez são, em geral, mais fortemente significativas que as interações de 2ª ordem por apresentarem um teste F de maior valor. Sendo que, por este mesmo motivo, as interações de 2ª ordem são também, em geral, mais fortemente significativas que a interação de 3ª ordem. Neste mesmo contexto,

observa-se que os fatores controláveis B e C são mais fortemente significativos que os fatores controláveis A e D, sendo que o fator B (cal) se destaca, sendo o mais significativo. O fator A (umidade) é o menos significativo. Quando os dois fatores menos significativos interagem (A e D), um não tem efeito significativo no outro, isso é justificado pelo fato de estes dois fatores possuírem um pequeno teste F.

Tabela 4.1 – Tabela ANOVA para os resultados de Resistência à Compressão Simples do caulim-cal estudado

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob	SIG
A	4540677,39	2	2270338,70	65,64	0,0000%	significante
B	382080707,01	3	127360235,67	3682,28	0,0000%	significante
C	213095164,88	2	106547582,44	3080,54	0,0000%	significante
D	32205728,70	2	16102864,35	465,57	0,0000%	significante
AB	2367338,07	6	394556,34	11,41	0,0000%	significante
AC	9674265,81	4	2418566,45	69,93	0,0000%	significante
AD	139416,69	4	34854,17	1,01	40,4355%	não gera efeito significativo
BC	29249543,42	6	4874923,90	140,95	0,0000%	significante
BD	6695799,70	6	1115966,62	32,27	0,0000%	significante
CD	12940620,81	4	3235155,20	93,54	0,0000%	significante
ABC	3623306,44	12	301942,20	8,73	0,0000%	significante
ABD	1606328,48	12	133860,71	3,87	0,0022%	significante
ACD	1293376,78	8	161672,10	4,67	0,0027%	significante
BCD	4534492,37	12	377874,36	10,93	0,0000%	significante
ABCD	1654715,00	24	68946,46	1,99	0,5268%	significante
Erro	7505447,21	217	34587,31			
Total	713206928,76	324				

4.4.2 Análise da Variância para a Resistência à Tração

A análise da variância para os resultados de resistência à tração foi realizada a partir da Tabela ANOVA com 3 fatores controláveis (quantidade cal, porosidade e teor de umidade), que consiste na análise dos fatores controláveis e das interações dos fatores controláveis para um nível de significância de 95%. A Tabela 4.2 apresenta a Tabela ANOVA realizada para o experimento em estudo.

Analisando a Tabela 4.2 observa-se que todos os fatores e as interações de 1ª e 2ª ordem são significativos. O Fator A corresponde ao fator controlável umidade, o Fator B corresponde ao fator controlável cal e o Fator C corresponde ao fator controlável massa específica aparente seca.

Tabela 4.2 – Tabela ANOVA para os resultados de Resistência à Tração do caulim-cal estudado

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob	SIG
A	102594,99	2	51297,50	233,69	0,0000%	significante
B	1016333,33	3	338777,78	1543,34	0,0000%	significante
C	436653,12	2	218326,56	994,61	0,0000%	significante
AB	22862,16	6	3810,36	17,36	0,0000%	significante
AC	10969,42	4	2742,36	12,49	0,0000%	significante
BC	141053,37	6	23508,90	107,10	0,0000%	significante
ABC	24890,78	12	2074,23	9,45	0,0000%	significante
Erro	16024,19	73	219,51			
Total	1771381,36	108				

Contudo, pode-se perceber que os efeitos dos fatores A, B e C são mais fortemente significativos que os efeitos das interações de 1ª ordem, que por sua vez são, em geral, mais fortemente significativas que as interações de 2ª ordem por apresentarem um teste F de maior valor. Neste mesmo contexto, observa-se que os fatores controláveis B e C são mais fortemente significativos que o fator controlável A, sendo que o fator B (cal) se destaca, sendo o mais significativo. O fator A (umidade) é o menos significativo.

4.4.3 Análise da Variância para a Rigidez Inicial (G_0)

A análise da variância para os resultados de rigidez inicial foi realizada a partir da Tabela ANOVA com 4 fatores controláveis (quantidade cal, porosidade, teor de umidade e tempo de cura), que consiste na análise dos fatores controláveis e das interações dos fatores controláveis para um nível de significância de 95%. A Tabela 4.3 apresenta a Tabela ANOVA realizada para o experimento em estudo.

Analisando a Tabela 4.3 observa-se que todos os fatores, as interações de 1ª e 2ª ordem são significativos. Observa-se também, que todas as interações de 3ª ordem são significativas. O Fator A corresponde ao fator controlável umidade, o Fator B corresponde ao fator controlável cal, o Fator C corresponde ao fator controlável massa específica aparente seca e o Fator D corresponde ao fator controlável tempo de cura.

Contudo, pode-se perceber que os efeitos dos fatores A, B, C e D são, em geral, mais significativos que os efeitos das interações de 1ª ordem, que por sua vez são, em geral, mais significativas que as interações de 2ª ordem por apresentarem um teste F de maior valor. Sendo que, por este mesmo motivo, as interações de 2ª ordem são também, em geral, mais

significativas que a interação de 3ª ordem. Neste mesmo contexto, observa-se que os fatores controláveis B e C são mais fortemente significativos que os fatores controláveis A e D, sendo que o fator B (cal) é mais significativo e o fator D (tempo de cura) é o menos significativo.

Tabela 4.3 – Tabela ANOVA para os resultados de Rigidez Inicial do caulim-cal estudado

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob	SIG
A	2115801711,79	2	1057900855,90	107391,52	0,0000%	significante
B	3587757949,32	3	1195919316,44	121402,30	0,0000%	significante
C	2367887802,47	2	1183943901,23	120186,63	0,0000%	significante
D	915552909,73	1	915552909,73	92941,24	0,0000%	significante
AB	6507471480,21	6	1084578580,03	110099,68	0,0000%	significante
AC	4264219695,08	4	1066054923,77	108219,27	0,0000%	significante
AD	2277740590,23	2	1138870295,12	115611,03	0,0000%	significante
BC	6483744322,67	6	1080624053,78	109698,24	0,0000%	significante
BD	3373021662,86	3	1124340554,29	114136,07	0,0000%	significante
CD	2291793199,17	2	1145896599,58	116324,30	0,0000%	significante
ABC	12947046447,17	12	1078920537,26	109525,31	0,0000%	significante
ABD	6316710060,29	6	1052785010,05	106872,19	0,0000%	significante
ACD	4158319336,95	4	1039579834,24	105531,68	0,0000%	significante
BCD	6347208085,81	6	1057868014,30	107388,19	0,0000%	significante
ABCD	13034448859,86	12	1086204071,66	110264,69	0,0000%	significante
Erro	1428377,43	145	9850,88			
Total	76990152491,04	216				

Com a realização da ANOVA, para as variáveis de resposta resistência à compressão simples, resistência à tração e rigidez inicial, percebe-se que os quatro fatores controláveis (A, B, C e D) são significativos, sendo que o Fator A (cal) se destaca como o mais significativo para as três variáveis de resposta analisadas e o Fator B (umidade) se destaca como o menos significativo para as variáveis de resposta resistência à compressão simples e resistência à tração. Para a variável de resposta rigidez inicial, o fator controlável menos significativo foi o tempo de cura (Fator D).

4.5 ENSAIOS PARA A ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA POROSIDADE

4.5.1 Características das amostras de caulim-cal submetidas ao ensaio de Porosímetro por Intrusão de Mercúrio

A Tabela 4.4 apresenta a porosidade das amostras submetidas ao ensaio de porosímetro por intrusão de mercúrio. Como mencionado no programa experimental, as amostras foram moldadas com as massas específicas aparentes secas (γ_d) de 1,4 g/cm³, 1,5 g/cm³ e 1,6 g/cm³. O teor de umidade utilizado foi de 20% e a quantidade de cal foi de 9%. Para as amostras com 0 dia de cura, a cal foi substituída em volume por caulim (tomando cuidado para manter a porosidade requerida), evitando assim, que a hidratação da cal influenciasse na medida da porosidade, para este tempo de cura.

Na Tabela 4.4 observa-se que todas as amostras atingiram a porosidade (η) pré-estabelecida. Além disso, as amostras moldadas obedeceram todos os critérios de aceitação descritos no item 3.2.8.1.

Após a secagem das amostras em estufa, também, não observou-se alteração nas suas dimensões (0,7x0,7x2,5 cm) e ao final do ensaio foi observada a total integridade das amostras.

Tabela 4.4 – Porosidade (η) das amostras submetidas ao ensaio de porosímetro por intrusão de mercúrio

γ_d (g/cm ³)	Tempo de cura	η teórica	η real calculada
1,4	0	0,4671	0,4669
	28	0,4671	0,4640
1,5	0	0,4290	0,4201
	28	0,4290	0,4251
1,6	0	0,3909	0,3915
	28	0,3909	0,3940

4.5.2 Resultados dos ensaios de porosímetro por intrusão de mercúrio

A Figura 4.138 apresenta o volume acumulado total de mercúrio (cm³/g) para cada amostra ensaiada, que permite calcular a sua porosidade. A porosidade da amostra é obtida dividindo-se o volume de mercúrio deslocado (cm³) pelo volume total da amostra.

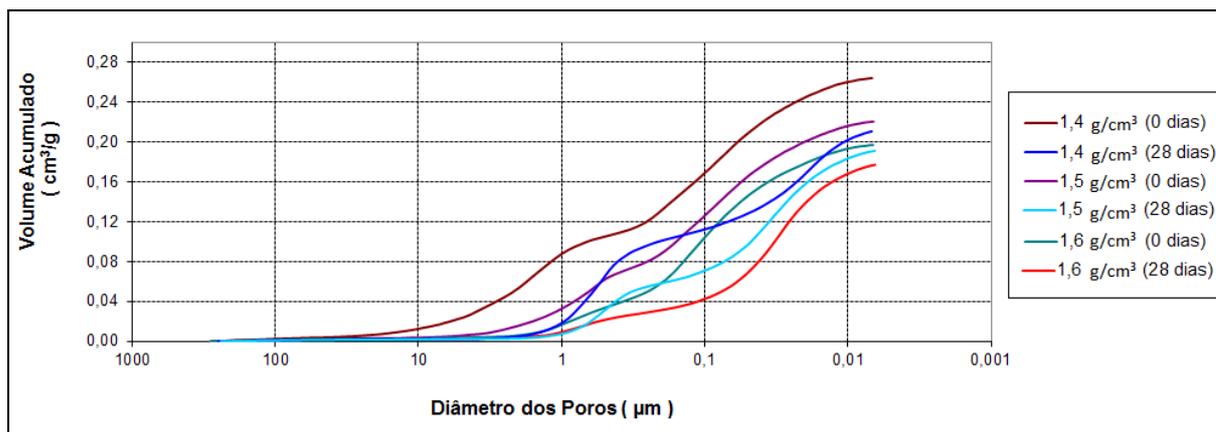


Figura 4.138 – Volume total acumulado de mercúrio (cm^3/g) para as amostras com peso específico aparente seco de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm^3 e 0 e 28 dias de cura

Na Figura 4.139 é apresentada a distribuição do volume total intrudido de mercúrio (cm^3/g), permitindo visualizar a distribuição dos poros (em macroporos, mesoporos e microporos). De acordo com a definição da International Union of Pure and Applied Chemistry - IUPAC (1972), os poros se classificam em três categorias: micro (menor que 0,02 μm), meso (entre 0,02 e 0,5 μm) e macro (maior que 0,5 μm).

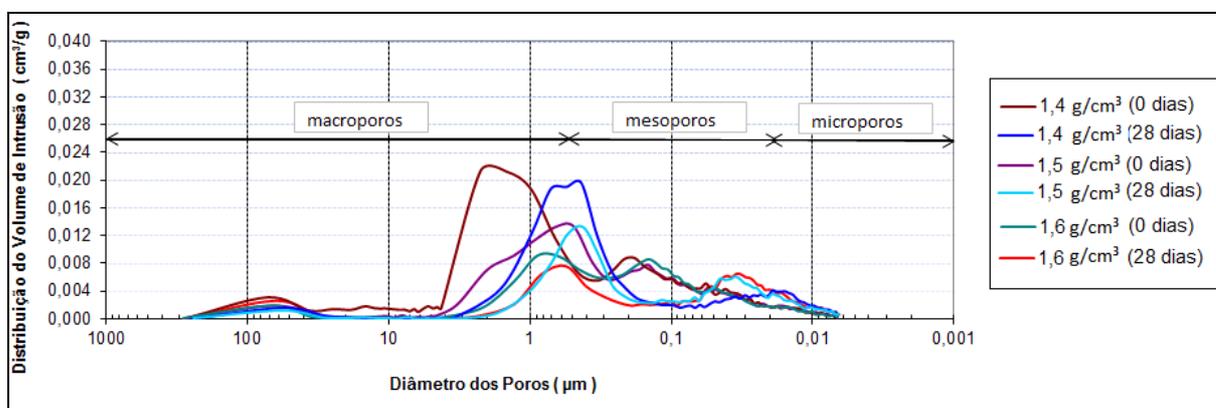


Figura 4.139 – Distribuição do volume total intrudido de mercúrio (cm^3/g) para as amostras com peso específico aparente seco de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm^3 e 0 e 28 dias de cura

Observa-se na Figura 4.138 que o volume intrudido de mercúrio é maior nas amostras com porosidades maiores, o que já era esperado. Na Figura 4.139 observa-se que há um concentração maior de macroporos nas amostras com porosidades maiores, o que também já

era esperado. Além disso, na Figura 4.138 observa-se que as amostras com 28 dias apresentam uma porosidade menor em comparação com as amostras com 0 dia de cura.

A partir dos ensaios realizados, foram elaboradas a Tabela 4.5 e a Figura 4.140, que apresentam a variação da porosidade das amostras de caulim-cal do 0 dia de cura para 28 dias de cura.

Tabela 4.5 – Variação da porosidade (η) das amostras de caulim-cal (com peso específico aparente seco de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm³) do 0 dia de cura para 28 dias de cura

γ_d (g/cm ³)	Tempo de cura	η
1,4	0	0,3676
	28	0,3097
1,5	0	0,3431
	28	0,2947
1,6	0	0,3195
	28	0,2838

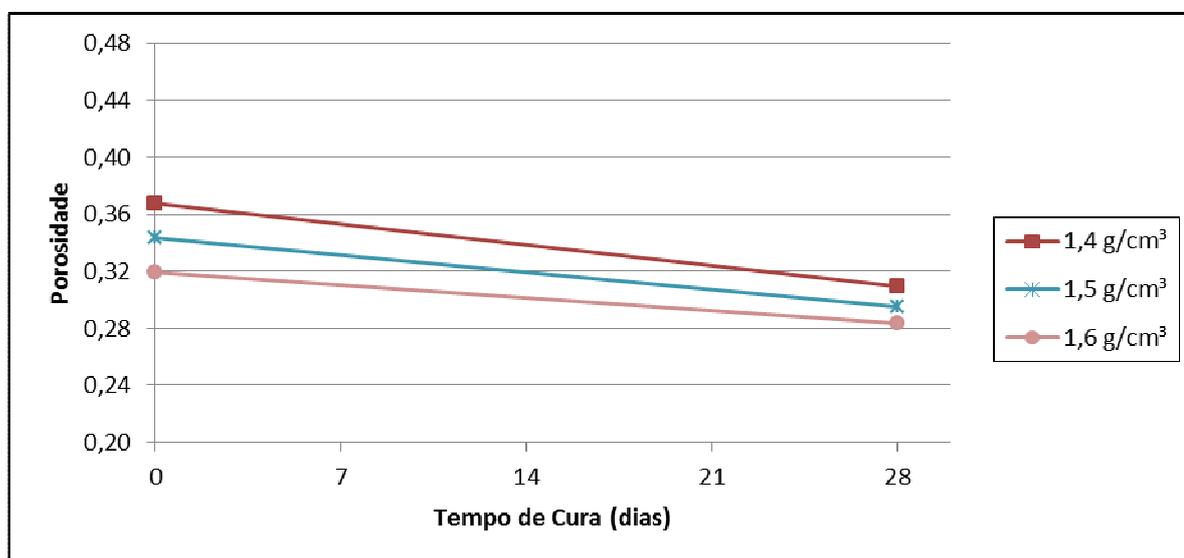


Figura 4.140 – Variação da porosidade (η) das amostras de caulim-cal (com peso específico aparente seco de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm³) do 0 dia de cura para 28 dias de cura

A Figura 4.140 apresenta a diminuição da porosidade das amostras estudadas com o tempo de cura (28 dias). Sendo que, a diferença da porosidade para as amostras de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm³, do 0 dia de cura para os 28 dias de cura, foi de 0,0579, 0,0483 e 0,0357, respectivamente.

As Figuras 4.141, 4.142 e 4.143 apresentam a distribuição dos poros para as amostras de caulim-cal com 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm³, respectivamente. A distribuição dos poros permite classificar os poros em micro, meso e macro.

Observa-se, na Figura 4.141, um pico de maior concentração de macroporos ao 0 dia de cura, sendo que aos 28 dias de cura este pico se desloca para a direita dividindo-se em macroporos e mesoporos.

Na Figura 4.142 observa-se um pico de maior concentração dividido em macroporos e mesoporos ao 0 dia de cura, sendo que aos 28 dias de cura este pico se desloca para a direita, tendo uma maior concentração de mesoporos.

Observa-se, na Figura 4.143, que ao 0 dia de cura ocorre uma maior concentração de mesoporos, sendo que aos 28 dias de cura estes picos se deslocam para a direita continuando com uma maior concentração de mesoporos, mas com um acréscimo na concentração de microporos.

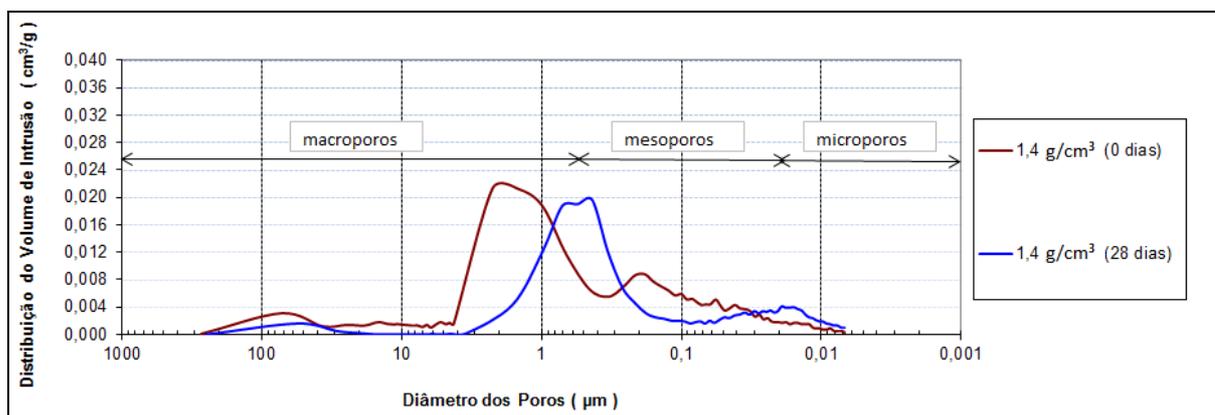


Figura 4.141 – Distribuição dos poros para as amostras com peso específico aparente seco de 1,4 g/cm³

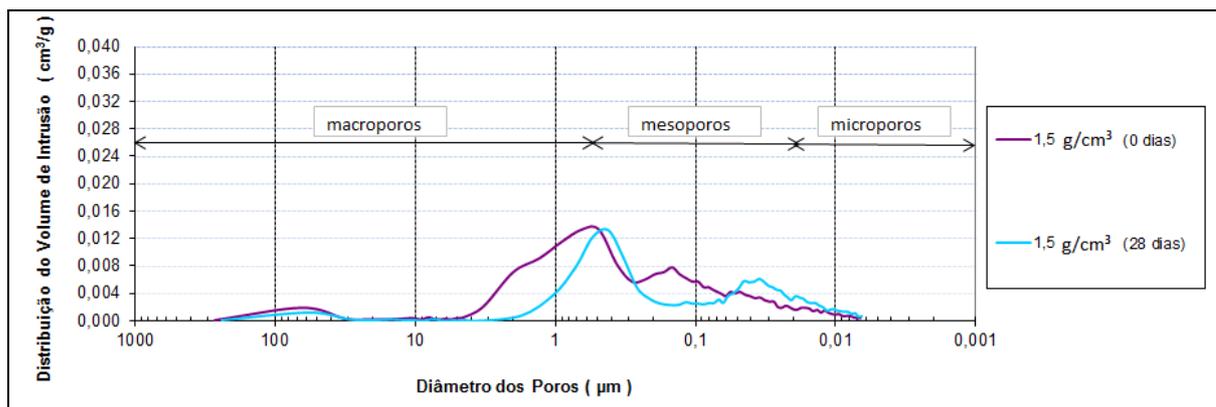


Figura 4.142 – Distribuição dos poros para as amostras com peso específico aparente seco de $1,5 \text{ g/cm}^3$

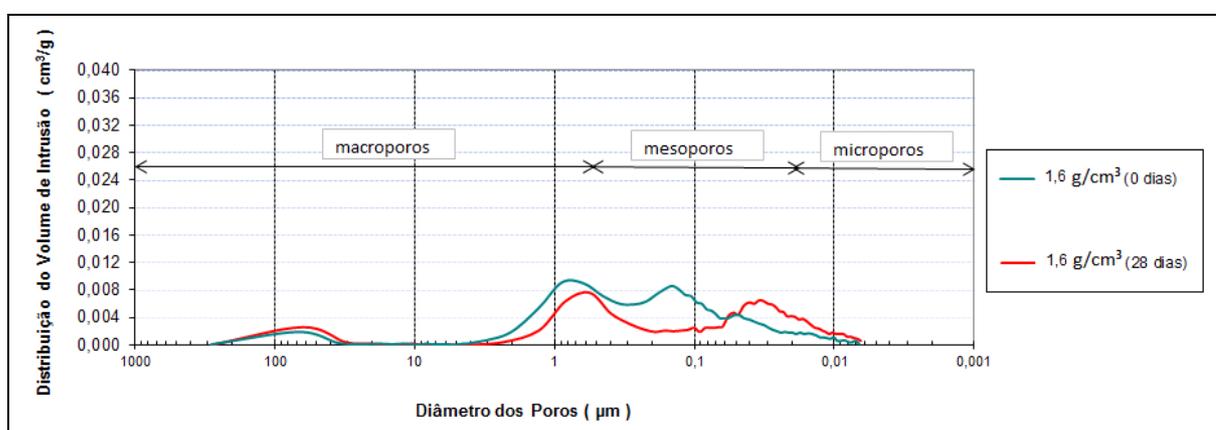


Figura 4.143 – Distribuição dos poros para as amostras com peso específico aparente seco de $1,6 \text{ g/cm}^3$

A partir dos resultados analisados até aqui, observa-se um comportamento característico da porosidade para estas misturas solo-cal: a diminuição da porosidade com o tempo de cura. Além disso, analisando-se as Figuras 4.141 a 4.143, outro comportamento característico é observado para as amostras estudadas: o deslocamento dos picos das curvas de 28 dias de cura para direita, fazendo com que os poros aos 28 dias de cura sejam de dimensões menores do que ao 0 dia de cura.

Assim, mesmo com poucos ensaios realizados, estes resultados apresentam tendências interessantes, e podem ser utilizados na adaptação de um modelo que permita prever a variação da porosidade destas misturas.

4.6 ADAPTAÇÃO DO MODELO DE POWERS PARA A PREVISÃO DA VARIAÇÃO DA POROSIDADE

Para a previsão da variação da porosidade das misturas estudadas, optou-se pela adaptação do Modelo de Powers (1960), por ser um modelo consagrado para a estimativa da porosidade de concretos e argamassas.

O modelo desenvolvido por Powers (1960) permite prever a porosidade através da relação gel/vazios, apresentada no capítulo 2 desta tese:

$$\frac{\text{gel}}{\text{vazios}} = \frac{2,06\alpha V_c}{1 - V_{fl} - V_c(1 - \alpha)} \quad (\text{Equação 4.25})$$

Onde V_c é o volume de cimento, V_{fl} é o volume de materiais sólidos por m^3 do concreto e α é o grau de hidratação do cimento.

O fator de hidratação 2,06 indica que, após a completa hidratação do cimento, o volume composto pelo gel de hidratação é praticamente duas vezes o volume de cimento utilizado. Este fato é explicado por Mehta & Monteiro (2001).

Segundo Mehta e Monteiro (2001), os vazios capilares representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da pasta hidratada de cimento. Sendo que, o volume total de uma mistura de cimento e água permanece essencialmente inalterado durante o processo de hidratação. A média da densidade dos produtos da hidratação do cimento (gel de hidratação) é consideravelmente menor do que a densidade do cimento, estima-se que 1 cm^3 de cimento, depois da sua completa hidratação, requer cerca de 2 cm^3 de espaço para acomodar o gel de hidratação. Assim, a hidratação do cimento pode ser considerada como um processo durante o qual o espaço originalmente ocupado por cimento e água está cada vez mais sendo substituído pelo espaço preenchido por produtos da hidratação. O espaço não absorvido pelo cimento ou pelos produtos de hidratação consiste em vazios capilares (popularmente conhecidos como porosidade).

A partir disso, buscou-se calcular o fator de hidratação (F_H) para a cal, a partir dos cálculos para o fator de hidratação (F_H) do cimento. Estes cálculos são baseados na variação da porosidade do material estudado:

- porosidade ao 0 dia de cura:

$$\eta_0 = 1 - \eta_s - \eta_{ca}^{ani} \quad (\text{Equação 4.26})$$

$$\eta_{ca}^{ani} = \frac{1}{1 + \frac{1}{ca} \cdot \frac{m_{ca}^{ani}}{m_s}} \quad (\text{Equação 4.27})$$

$$ca = \frac{m_{ca}^{ani}}{m_s} \quad (\text{Equação 4.28})$$

Sendo:

η_0 = porosidade inicial (ao 0 dia);

η_s = teor volumétrico de solo;

η_{ca}^{ani} = teor volumétrico de cal anidra;

m_{ca}^{ani} = massa específica da cal anidra;

m_s = massa específica do solo;

ca = teor em massa de cal.

- porosidade aos 28 dias de cura:

$$\eta_{28} = 1 - \eta_s - (F_H) \cdot \eta_{ca}^{ani} \quad (\text{Equação 4.29})$$

$$F_H = \frac{\eta_{ca}^{hid}}{\eta_{ca}^{ani}} \quad (\text{Equação 4.30})$$

Sendo:

F_H = fator de hidratação da cal

η_{ca}^{hid} = teor volumétrico de cal hidratada;

- Variação da porosidade $\Delta\eta$:

$$\Delta\eta = \eta_0 - \eta_{28} \quad (\text{Equação 4.31})$$

$$\Delta\eta = (F_H - 1) \cdot \eta_{ca}^{ani} \quad (\text{Equação 4.32})$$

$$F_H = 1 + \frac{\Delta\eta}{\eta_{ca}^{ani}} \quad (\text{Equação 4.33})$$

Sendo:

$\Delta\eta$ = variação da porosidade;

η_0 = porosidade ao 0 dia;

η_{28} = porosidade aos 28 dias de cura.

Porém, durante o programa experimental não foram realizados ensaios de massa específica para os materiais solo e cal. Sendo assim, o teor volumétrico de cal anidra (η_{ca}^{ani}) foi determinado considerando a massa específica real dos grãos da cal, ao invés da massa específica do material cal. Logo, o fator de hidratação (F_H) da cal calculado nesta pesquisa é um valor aproximado, pois não é baseado na massa específica dos materiais e sim na massa específica real dos grãos. Contudo, a relevância desta aproximação deve ser avaliada em trabalhos futuros.

- porosidade ao 0 dia de cura:

$$\eta_0 = 100\% - S_v - C_{av} \quad (\text{Equação 4.34})$$

Sendo:

S_v = teor volumétrico de solo (%), calculado a partir da massa específica real dos grãos;

C_{av} = teor volumétrico de cal (%), calculado a partir da massa específica real dos grãos.

- porosidade aos 28 dias cura:

$$\eta_o = 100\% - S_v - (F_H) \cdot C_{av} \quad (\text{Equação 4.35})$$

- Variação da porosidade ($\Delta\eta$):

$$\Delta \eta = \eta_0 - \eta_{28} \quad (\text{Equação 4.36})$$

$$\Delta \eta = (F_H - 1) \cdot C_{av} \quad (\text{Equação 4.37})$$

$$F_H = 1 + \frac{\Delta\eta}{C_{av}} \quad (\text{Equação 4.38})$$

Assim, a partir da fórmula para obter o fator de hidratação da cal $\left(F_H = 1 + \frac{\Delta\eta}{C_{av}}\right)$, foram realizados cálculos para obter o F_H da cal para cada peso específico aparente seco estudado nos ensaios de porosímetro por intrusão de mercúrio. Os valores são apresentados na Tabela 4.6.

Na Tabela 4.6 observa-se que o fator de hidratação calculado para a cal é diferente para cada peso específico aparente seco estudado, sendo de 2,25, 1,98 e 1,68 para o peso específico aparente seco de 1,4 g/cm³, 1,5 g/cm³ e 1,6 g/cm³, respectivamente.

Tabela 4.6 – Fator de hidratação calculado para a cal

γ_d (g/cm ³)	Tempo de cura	η (%)	$\Delta\eta$ (%)	Teor volumétrico de cal (C_{av}) (%)	Fator de hidratação
1,4	0	36,76	5,79	4,67	2,24
	28	30,97			
1,5	0	34,31	4,83	5,01	1,96
	28	29,47			
1,6	0	31,95	3,57	5,28	1,68
	28	28,38			

A partir desta análise e dentro dos limites desta pesquisa, conclui-se então, que o modelo desenvolvido por Powers (1960) não se adapta perfeitamente às misturas caulim-cal, pois o fator de hidratação (F_H) calculado para a cal é dependente do peso específico aparente seco, o que não é coerente com o Modelo de Powers, que sugere que cada tipo de cimento possui um fator de hidratação específico que depende apenas das suas características.

Assim, um número maior de ensaios de porosidade por intrusão de mercúrio (em amostras com diferentes características) devem ser realizados e analisados, para afirmar a validade ou a não validade deste modelo na previsão da porosidade destas misturas caulim-cal.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A partir da análise e discussão dos resultados, dentro das condições e limites específicos deste estudo, as seguintes conclusões sobre o estudo do material caulim-cal são obtidas:

a) Quanto à influência da quantidade de cal

Para todas as amostras de caulim-cal (com 17%, 20% e 23% de umidade), pode-se perceber a influência da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples, sobre a resistência à tração e sobre a rigidez inicial do solo siltoso estabilizado com cal, para todos os tempos de cura estudados. Mesmo pequenas adições de cal são suficientes para gerar ganhos de resistência e rigidez nesses materiais, verificando-se que na faixa de teores estudados (3% até 9%), a resistência à compressão simples, a resistência à tração e a rigidez inicial aumentam linearmente com o aumento da quantidade de cal.

b) Quanto à influência da porosidade

Para todas as amostras de caulim-cal (com 17%, 20% e 23% de umidade), pode-se perceber a influência da porosidade sobre a resistência à compressão simples, sobre a resistência à tração e sobre a rigidez inicial do solo siltoso estabilizado com cal, para todos os tempos de cura estudados. Além disso, observou-se que a resistência à compressão simples, a resistência à tração e a rigidez inicial aumentaram exponencialmente com a redução na porosidade do material. A existência de um número maior de contatos e, conseqüentemente, a maior possibilidade da cal promover a união das partículas nesses contatos parece ser a causa desse fenômeno. 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 e rigidez do material.

c) Relação vazios/cal

Verificou-se que a relação vazios/cal, ajustado por um expoente $[\eta/(C_{av})^{0,45}]$, é um parâmetro eficaz na estimativa da resistência à compressão, da resistência à tração e da rigidez inicial das misturas caulim-cal estudadas. Os resultados apresentados neste trabalho, portanto, sugerem que pode-se escolher a quantidade de cal, a porcentagem de umidade e o esforço de compactação adequado para fornecer uma mistura que resulte nas características de resistência e rigidez desejadas.

d) Quanto à influência do tempo de cura

Observou-se que o aumento do tempo de cura provoca o aumento da resistência à compressão simples, da resistência à tração e da rigidez inicial das misturas de caulim-cal estudadas. A explicação para esse comportamento consiste em que as reações pozolânicas, as quais proporcionam ganhos efetivos de resistências às misturas compactadas de solo e cal são lentas, estendendo-se por anos e só se iniciam certo tempo depois da compactação. O ganho de resistência só ocorre se houver pH suficientemente elevado para dissolução da sílica e da alumina dos argilo-minerais do solo e se a combinação delas com a cal derem origem a novos compostos cimentantes. Pois tanto para a manutenção do pH elevado, como para a formação de aluminatos, silicatos e/ou alumino-silicatos de cálcio, é fundamental a participação da cal. Além disso, nos ensaios de rigidez inicial, a explicação para este comportamento consiste em que a onda “S” (de cisalhamento) está relacionada com a rigidez do material, por isso a sua velocidade (e conseqüentemente o G_0 do material estudado) cresce continuamente com o tempo, juntamente com o aumento da resistência do material, proporcionada pela cal.

e) Quanto à influência da umidade

Verificou-se, para as misturas caulim-cal estudadas nesta pesquisa, um aumento da resistência à compressão simples e da resistência à tração com o aumento do teor de umidade até um valor ótimo (20%), a partir do qual a resistência passa a diminuir. Isto pode ser explicado pelo fato de que a eficiência da hidratação da cal e a eficiência da matriz cimentícia (que predomina após as reações pozolânicas serem desenvolvidas) são afetadas pela utilização de um teor de umidade muito inferior ao teor de umidade ótimo, prejudicando a resistência

dessas misturas. Provavelmente o teor de umidade de 17% não foi suficiente para o processo de hidratação da cal, logo as resistências foram inferiores às resistências proporcionadas pelas umidades maiores (20% e 23%). Para os ensaios de rigidez inicial observou-se um aumento da rigidez inicial com a diminuição do teor de umidade, para os tempos de cura estudados. Este fato pode ser atribuído ao efeito da sucção nas medidas de rigidez inicial. Assim, os resultados expostos até aqui sugerem que as resistências máximas (à compressão simples e à tração) e a rigidez máxima são obtidas no lado seco da curva de compactação das misturas de caulim-cal.

f) Relações únicas no controle da resistência à compressão simples, da resistência à tração e da rigidez inicial do solo estudado

Observou-se a existência de relações únicas e distintas no controle da resistência à compressão simples, no controle da resistência à tração e no controle da rigidez inicial do caulim-cal estudado em função da porosidade, do teor volumétrico de cal e do teor de umidade, sendo muito eficiente para o uso em relações de dosagem. Em termos práticos, para a utilização destas misturas de caulim-cal, existem várias maneiras para alcançar um valor-alvo de resistência à compressão simples, resistência à tração ou rigidez inicial para um determinado projeto: redução da porosidade e/ou aumento da quantidade de cal e/ou aumento/diminuição da umidade. Além disso, a relação vazios/cal pode ser também de extrema utilidade no controle da execução da camada tratada com cal, na medida em que, constatada uma compactação inferior à prescrita, poderá se estimar com confiabilidade a perda da resistência ou da rigidez inicial decorrente deste fato e conseqüentemente medidas corretivas poderão ser tomadas como, por exemplo, o reforço da camada ou ainda, a redução do carregamento transmitido.

g) Relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão simples

Verificou-se que a razão entre as equações da resistência à tração e da resistência à compressão simples (q_t/q_u) é, em média, 9%. Este resultado sugere, então, que resistência à tração das amostras de caulim-cal estudadas representam, em média, 9% da sua resistência à compressão simples, para os tempos de cura estudados.

h) Relação entre a rigidez inicial e a resistência à compressão simples

Verificou-se a existência de um relacionamento direto da resistência à compressão simples com a rigidez inicial das amostras de caulim-cal estudadas. Apesar das dispersões existentes (equações com R^2 em torno de 0,74), a relação G_o/q_u é interessante, pois é possível ter uma ideia da magnitude dos parâmetros a partir das expressões resultantes deles, onde conhecendo apenas um parâmetro (q_t ou G_o) é possível determinar o outro.

i) Relação entre a rigidez inicial e a resistência à tração

Verificou-se a existência de um relacionamento direto da resistência à tração com a rigidez inicial das amostras de caulim-cal estudadas. Apesar das dispersões existentes (equações com R^2 em torno de 0,83), a relação G_o/q_t é interessante, pois é possível ter uma ideia da magnitude dos parâmetros a partir das expressões resultantes deles, onde conhecendo apenas um parâmetro (q_t ou G_o) é possível determinar o outro.

j) Análise da variância

Verificou-se, com a realização da análise da variância, que todos os fatores controláveis analisados no experimento (umidade (A), cal (B), porosidade (C) e tempo de cura (D)) são significativos, bem como todas as interações entre eles, tanto para a variável de resposta resistência à compressão simples, como para as variáveis de resposta resistência à tração e rigidez inicial. Além disso, com a realização da ANOVA, percebeu-se que o Fator A (cal) se destaca como o mais significativo para as três variáveis de resposta analisadas e o Fator B (umidade) se destaca como o menos significativo para as variáveis de resposta resistência à compressão simples e resistência à tração. Para a variável de resposta rigidez inicial, o fator controlável menos significativo foi o tempo de cura (Fator D).

k) Análise da variação da porosidade

Verificou-se um comportamento característico da porosidade para as misturas caulim-cal estudadas: a diminuição da porosidade com o tempo de cura. Além disso, outro comportamento característico foi observado na distribuição de poros das amostras estudadas: o deslocamento dos picos das curvas de 28 dias de cura para direita, fazendo com que os poros aos 28 dias de cura sejam de dimensões menores do que ao 0 dia de cura. Mesmo com poucos ensaios realizados, os resultados apresentaram tendências interessantes e foram utilizados na adaptação do modelo de Powers, para prever a variação da porosidade destas misturas.

l) Adaptação do modelo de Powers para a previsão da porosidade

O modelo desenvolvido por Powers (1960) não se adaptou perfeitamente na previsão da porosidade das misturas caulim-cal estudadas, pois o fator de hidratação (F_H) calculado para a cal é dependente do peso específico aparente seco, o que não é coerente com o Modelo de Powers, que sugere que cada tipo de cimento possui um fator de hidratação específico que depende apenas das suas características. Assim, um número maior de ensaios de porosidade por intrusão de mercúrio (em amostras com diferentes características) devem ser realizados e analisados, para afirmar a validade ou a não validade deste modelo na previsão da porosidade destas misturas caulim-cal.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a dar prosseguimento ao trabalho realizado nesta tese e ampliar o conhecimento sobre o comportamento de solos estabilizados com cal, o autor sugere os seguintes tópicos de pesquisa:

- a verificação da validade da relação vazios/cal para solos predominantemente argilosos e também para solos predominantemente arenosos;
- a verificação da relação vazios/cal na estimativa da resistência à tração das misturas estudadas, para outros tempos de cura (90 e 360 dias);
- a verificação da relação vazios/cal na estimativa da resistência da rigidez inicial das misturas estudadas, para outros tempos de cura (180 e 360 dias);
- a execução de ensaios de medidas de rigidez inicial com as amostras submersas em água;
- verificar o efeito da temperatura sobre o comportamento de misturas caulim-cal;
- a realização de ensaios de porosímetro por intrusão de mercúrio para todas as combinações dos fatores controláveis desta pesquisa;
- a adaptação ou o desenvolvimento de um modelo, que permita prever a porosidade de misturas caulim-cal ao longo do tempo de cura;

- a comparação do cálculo do teor volumétrico de cal anidra considerando a massa específica real dos grãos da cal (C_{av}), com o cálculo considerando a massa específica do material cal (M_{ca}^{ani});
- a execução de ensaios como fotomicroscopia e difração por raios-x, para melhor compreensão dos mecanismos de reações entre o solo e a cal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKOTO, B. K. A.; SINGH, G. **Behaviour of Lime Stabilized Laterite Under Repeated Loading**. Australian Road Research, Victoria. v.16, p.259-267, 1986.

AL-MUKHAR, M. **Macroscopic behaviour and microstructural properties of a kaolinite clay under controlled mechanical and hydraulic state**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 1995, Paris. Anais. 1995. v. 2, p. 561-566.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. Philadelphia, 1997.

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

ARAKI, M.S.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Study of a collapsible porous soil of Brasil**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 1995, Paris. Anais. 1995. v. 2, p. 12-21.

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

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

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

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

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

_____ **NBR 7175: Cal hidratada para argamassa - Especificação**. 1986.

_____ **NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. 1983

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

ATTOH-OKINE, N. O. **Lime Treatment of laterite soils and gravels – revisited**. Construction and Building Material, v.9, n.5, p.283-287, 1995.

ATKINSON, J. H. **Non-linear soil stiffness in routine design**. *Géotechnique*, London, v.50,

n.5, p.487-508, 2000.

AZAMBUJA, R. M. B. **Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas de Solo-Cimento-Bentonita para Aplicação em Barreiras Verticais de Contenção de Contaminantes.** 2004. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.

BELL, F. G. **Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils.** Engineering Geology, n.42, p.223-237, 1996.

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.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 7591: Porosity and pore size distribution of materials.** 1992

BRUNAUER, S. **Tobermorite-gel – The heart of concrete.** American Scientist, v. 50, n. 1, p. 210-229, 1962.

BURLAND, J. B. **Small is beautiful – the stiffness of soils at small strains.** Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v.26, p.499-516, 1989.

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. de O. **Contribuição ao Conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquixídicos Utilizando o Hidróxido de Cálcio: Aplicação ao Processo de Geopolimerização (Estabilização).** 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CERATTI, J. A. P. **Efeitos da Adição de Cal e Cinza Volante nas Propriedades de um Solo Residual Compactado.** 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CHANDLER, R.J.; CRILLY, M.S.; MONTGOMERY-SMITH, G. **A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings.** Proceedings of the Institute of Civil Engineering, UK, v.92, n.2, p.82-89, 1992.

CHANG, T.; WOODS, R.D. **Effect of particle contact bond on shear modulus.** Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.118, n.8, p.1216-1233, 1992.

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

CONSOLI, N.C.; ROTTA, G.V.; PRIETTO, P.D.M. **The influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soils**. Technical Note. Géotechnique, London, vol.50, n.1, p.99-105, 2000.

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

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; PRIETTO, P. D. M.; THOMÉ, A. **Plate Load Test on Fiber-Reinforced Soil**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.129, n.10, p. 951-955. 2003

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. **Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.133, n.2, p.197-205, 2007.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R.C.; FLOSS, M.F.; FESTUGATO, L. **Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.136, p.759-763, 2010.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA, R.B. **Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.23, p.432-440, 2011.

CRUZ, P. T. **Compacted Soils – A Particular Case of Non Saturated Material**. In: 4º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 2001, Porto alegre. Anais. Rio Grande do Sul: Wai Ying Yuk Gehling e Fernando Schnaid, 2001. p.113-133.

CRUZ, R. C. **Influência de Parâmetros Fundamentais na Rigidez, Resistência e Dilatância de uma Areia Artificialmente Cimentada**. 2008. 218p. Tese (Doutorado em Engenharia) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos Parâmetros-chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal**. 2009. 198p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DELAGE, P.; AUDIGUIER, M.; CUI, Y. J.; HOWAT, M. D. **Microstructure of a compacted silt**. Canadian Geotechnical Journal, n.33, p.150-158, 1996.

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

FELDMAN, R. F.; SEREDA, P. A. **New model for hydrated Portland cement and its practical implications.** Canadian Journal of Chemical Engineering, v.53 n.9, p. 53-59, 1970.

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

FONINI, A. **Comportamento Mecânico de uma Areia Cimentada: Análise Experimental e Micromecânica.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

FONSECA, A. P. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

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.

GALAA, A. M.; THOMPSON, B. D; GRABINSKY, M. W., BAWDEN, W. F. **Characterizing stiffness development in hydrating mine backfill using ultrasonic wave measurements.** Canadian Geotechnical Journal, v.48, n.8, p. 1174-1187, 2011.

GENS, A. ALONSO, E.E., SURIOL, J., LORET, A. **Effect of structure on the volumetric behaviour of a compacted soil.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOIL, 1995. Paris. Anais. 1995. pp.83-88.

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

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

HERRIN, M.; MITCHELL, H. **Lime-soil Mixtures.** Highway Research Board Bulletin, Washington, D.C., v.304, p.99-121, 1961.

HIGHT, D.W.; JARDINE, R.J. **Small-strain stiffness and strength characteristics of hard London tertiary clays.** Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks. Rotterdam: A.A. Balkema, p.533-552, 1993.

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

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

JARDINE, R.J.; POTTS, D.M.; FOURIE, A.B.; BURLAND, J.B. **Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction**. Géotechnique, London, v.36, n.3, p.377-396, 1986.

JUCÁ, F.T.J. **Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Politécnica de Madrid, Madrid.

KÉZDI, Á. **Stabilized Earth Roads**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 327p., 1979.

KULIKOVA, Z.V. **Microstructure influence on properties of gypsíferos soils**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOIL, 1995, Paris. Anais. 1995. v. 1, p. 129-132.

LARNACH, W. J. **Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strength of Soil-cement Mixtures**. Civil Engineering and Public Works Reviews. London: Lomax Erskine and Co., vol.55, n.648, p.903-905, 1960.

LITTLE, D. N. **Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates**. Volume 1: Summary of Findings. Prepared for The National Lime Association, 1999.

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

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

LOVATO, R. S. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação**. 2004. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

MARINHO, F. A. M.; SILVA, R. M. **Relation Between Undrained Shear Strength and Suction for Some Brazilian Soils.** In: 4º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 2001, Porto alegre. Anais... Rio Grande do Sul: Wai Ying Yuk Gehling e Fernando Schnaid, p.149-158., 2001.

Martínez, G. S. S. **Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação barreiras.** 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MATEOS, M. **Soil Lime Research at Iowa State University.** Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions. ASCE, New York, v.90, p.127-153, 1964.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials.** New York: McGrawHill, 659p., 2001

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Estrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008.

Neville, A. M. **Properties of concrete.** London: Longman, 1995

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

OLIVEIRA, C. T. A. **Água do poro de pastas de cimento de escória.** 2000. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

ORMSBY, W. C.; KINTER, E. B. **Effects of Dolomitic and Calcitic Limes on Strenght Development in Mistures with Two Clay Minerals.** Public Roads. v.37, n.4, p.149-160. 1973.

OSINUBI, K. J. **Influence of Compactive Efforts and Compaction Delays on Lime-Treated Soil.** Journal of Transportation Engineering. Março/Abril. 1998.

PAULON, V. & KIRCHHEIM, A. N. **Concreto: ciência e tecnologia – Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido.** Instituto Brasileiro do Concreto, cap.16, p. 1-28, 2011

POWERS, T. C. **Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste.** Journal of the American Ceramic Society, v.61 n.1, p.1-5, 1958.

POWERS, T.C. **Properties of cement pate and concrete.** In: INTERNACIONAL SYMPOSIUM, 1960. Washington: National Bureau of Standards, 1960. s.V, p.V-1.

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

NAMBIAR, E. K. K. & RAMAMURTHY, K. **Models for strength prediction of foam concrete**. Journal of Materials and Structures, n. 41, p.247–254, 2008.

RIBEIRO, J. L.; TEN CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

RIGHETTO, G. L. **Validação do Fator Vazios/Agente Cimentante na Análise da Resistência Mecânica de um Solo Tratado com Cal, Cimento e Resíduo de Britagem de Rocha**. 2008. 91p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. **Lime Requirement for Stabilization**. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. 79TH ANNUAL MEETING, 2000. Washington, D.C., 2000.

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

ROSA, D. A. **Validação da relação vazios/cimento na estimativa da resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado**. 2010. 79p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ROTTA, G. V. **Cimentação Introduzida sob Tensão: Compreendendo a Importância do Índice de Vazios de Formação da Estrutura no Comportamento Mecânico de Solos Cimentados**. 2000. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.

SANDRONI, S.S.; CONSOLI, N.C. **Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com dois Solos Difíceis: os Extremamente Moles e os Expansivos**. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2010. Gramado. Anais Eletrônicos: 8ª Palestra (PA08), 2010.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SATO, T.; SAKURAGI, N.; KUWAYAMA, T. **Fabric of undisturbed and compacted volcanic soil estimated**. Unsaturated soils, 1995. Paris. 1995. Anais. p. 1527-1540.

Metodologias para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura

SHI BIN. **Quantitative analysis of the microstructural changes of remoulded clayey soil in the process of compaction.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 1995, Paris. Anais. 1995. v. 1, p. 26-30.

SCHNAID, F.; PRIETTO, P.D.M.; CONSOLI, N.C. **Prediction of Cemented Sand Behavior in Triaxial Compression.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.127, n.10, p.857-868, 2001.

SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. **Delay in Compaction and Importance of the Lime Fixation Point on the Strength and Compaction Characteristics of Soil.** Ground Improvement, n.2, p.27-32. 1998.

TATSUOKA, F.; JARDINE, R.J.; LO PRESTI, D.; DI BENEDETTO, H.; KODAKA, T. **Characterising the pre-failure deformation properties of geomaterials – theme lecture.** In: International conference on soil mechanics and foundation engineering, 14., Hamburg, Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, p. 2129-2164, 1999.

THOMÉ, A. **Estudo do Comportamento de um Solo Mole Tratado com Cal, Visando seu Uso em Fundações Superficiais.** 1994. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

THOMÉ, A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. **Circular Footings on a Cemented Layer Above Weak Foundation Soil.** Canadian Geotechnical Journal, v. 42, n.6, p.1569-1584. 2005.

THOMPSON, M. R. **Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils.** Highway Research Record, Washington, D.C. v.92, p.69-82. 1975.

THOMPSON, M. R. **Lime Reactivity of Illinois Soils.** Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, v.92, p.67-92.1966.

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

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **Soil stabilization for pavements.** Technical Manual, Nº 5-822-14, Washington, D. C., 1994.

USBR – U.S. Department of the Interior – Bureau of Reclamation. **Earth Manual.** Third Edition, Denver, Colorado, 1998.

VILAR, O. M. **Ensaio de campo e laboratório em solos não saturados.** In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 1995. Porto Alegre, 1995.

VITALI, O. P. M. **Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência.** 2008. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

WAN, A. W. L.; GRAY, M. N.; GRAHAM, J. 1995. **On the relations of suctions moisture content and soil structure in compacted clays.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 1995. Paris. Anais. 1995. v. 1, p. 215-222.

WITTMANN, F. H. **The structure of hardened cement paste - A basis for a better understanding of the materials properties.** In: HYDRAULIC CEMENT PASTES: THEIR STRUCTURE AND PROPERTIES, 1976. Cement and Concrete Association, Slough, United Kingdom, 1976. p. 96-117.

**APÊNDICE A – DADOS DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS AO
ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES**

Tabela A.1 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 17% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rr} (%)	Sucção (KPa)
A1-1c ₂₈	3,0	1,63	1,39	0,825	45,2	16,62	200,2	90,5	3,26	27,8	53,2	36,3	443	418	49,7	x	x
A1-2c ₂₈	3,0	1,65	1,41	0,803	44,5	16,69	197,7	88,0	3,26	27,0	51,8	35,6	418		51,3	x	x
A1-3c ₂₈	3,0	1,65	1,41	0,796	44,3	16,87	196,7	87,1	3,25	26,8	51,3	35,3	395		52,3	x	x
A1-4c ₂₈	5,0	2,68	1,40	0,811	44,8	17,00	198,2	88,7	5,31	16,7	41,9	28,7	1263	1402	50,7	72,2	583
A1-5c ₂₈	5,0	2,68	1,40	0,812	44,8	17,09	198,2	88,8	5,31	16,7	41,9	28,8	1480		50,8	x	x
A1-6c ₂₈	5,0	2,70	1,41	0,795	44,3	16,59	197,3	87,4	5,33	16,4	41,1	28,3	1462		50,4	x	x
A1-7c ₂₈	7,0	3,68	1,40	0,812	44,8	16,70	199,5	89,4	7,34	12,2	36,5	24,9	1525	1584	48,8	x	x
A1-8c ₂₈	7,0	3,68	1,40	0,811	44,8	16,64	198,8	89,0	7,32	12,2	36,3	24,9	1720		48,7	x	x
A1-9c ₂₈	7,0	3,67	1,40	0,814	44,9	16,74	199,0	89,3	7,31	12,2	36,5	25,0	1507		48,8	x	x
A1-10c ₂₈	9,0	4,60	1,39	0,827	45,3	16,64	200,2	90,6	9,22	9,8	33,4	22,8	2441	2269	46,8	x	x
A1-11c ₂₈	9,0	4,63	1,40	0,816	44,9	16,63	199,6	89,7	9,24	9,7	33,0	22,5	2266		47,4	x	x
A1-12c ₂₈	9,0	4,61	1,39	0,823	45,1	16,65	200,2	90,4	9,24	9,8	33,2	22,7	2098		47,1	x	x
A2-13c ₂₈	3,0	1,73	1,48	0,712	41,6	16,60	201,0	83,5	3,49	24,0	47,6	32,4	989	943	57,5	x	x
A2-14c ₂₈	3,0	1,74	1,49	0,707	41,4	16,56	200,7	83,1	3,49	23,8	47,4	32,3	850		57,7	x	x
A2-15c ₂₈	3,0	1,74	1,49	0,702	41,3	16,75	199,9	82,5	3,49	23,7	47,0	32,1	991		58,8	x	x
A2-16c ₂₈	5,0	2,85	1,49	0,705	41,3	16,61	200,4	82,9	5,70	14,5	37,9	25,8	1927	1808	56,9	75,9	15
A2-17c ₂₈	5,0	2,86	1,49	0,699	41,1	16,60	199,8	82,2	5,71	14,4	37,5	25,7	1857		57,4	x	x
A2-18c ₂₈	5,0	2,87	1,50	0,693	40,9	16,91	198,5	81,2	5,69	14,3	37,1	25,5	1642		59,0	x	x
A2-19c ₂₈	7,0	3,93	1,50	0,695	41,0	16,52	199,4	81,8	7,84	10,4	32,4	22,2	2810	2599	56,3	x	x
A2-20c ₂₈	7,0	3,92	1,49	0,701	41,2	17,19	199,3	82,1	7,81	10,5	32,6	22,3	2644		58,1	x	x
A2-21c ₂₈	7,0	3,93	1,49	0,697	41,1	17,28	198,4	81,5	7,79	10,5	32,3	22,2	2343		58,8	x	x
A2-22c ₂₈	9,0	4,93	1,49	0,704	41,3	17,10	199,6	82,5	9,85	8,4	29,5	20,1	3089	2991	56,5	x	x
A2-23c ₂₈	9,0	4,93	1,49	0,705	41,4	16,58	200,8	83,0	9,90	8,4	29,6	20,2	3155		54,7	x	x
A2-24c ₂₈	9,0	4,91	1,48	0,713	41,6	16,97	201,2	83,7	9,87	8,5	29,9	20,3	2728		55,4	x	x

Tabela A.1 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 17% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rr} (%)	Sucção (KPa)
A3-25 _{C28}	3,0	1,85	1,58	0,607	37,8	17,35	200,2	75,6	3,70	20,4	42,0	28,6	1067	1110	70,5	x	x
A3-26 _{C28}	3,0	1,85	1,58	0,607	37,8	17,44	200,4	75,7	3,70	20,4	42,0	28,6	1085		70,8	x	x
A3-27 _{C28}	3,0	1,85	1,58	0,608	37,8	17,49	200,4	75,8	3,70	20,5	42,0	28,7	1177		70,9	x	x
A3-28 _{C28}	5,0	3,02	1,58	0,606	37,7	16,60	201,4	75,9	6,09	12,5	33,7	22,9	2211	2389	66,2	82,8	84
A3-29 _{C28}	5,0	3,02	1,58	0,606	37,7	17,18	200,8	75,8	6,07	12,5	33,7	22,9	2500		68,5	x	x
A3-30 _{C28}	5,0	3,03	1,58	0,604	37,6	16,73	200,8	75,6	6,08	12,4	33,6	22,9	2456		67,0	x	x
A3-31 _{C28}	7,0	4,15	1,58	0,607	37,8	16,53	201,4	76,1	8,35	9,1	29,3	19,9	2693	2763	64,6	x	x
A3-32 _{C28}	7,0	4,15	1,58	0,604	37,7	16,55	201,4	75,9	8,36	9,1	29,2	19,8	3003		64,9	x	x
A3-33 _{C28}	7,0	4,15	1,58	0,607	37,8	17,27	200,6	75,7	8,32	9,1	29,2	19,9	2592		67,5	x	x
A3-34 _{C28}	9,0	5,23	1,58	0,609	37,8	17,47	200,4	75,8	10,48	7,2	26,4	18,0	3510	3491	66,8	x	x
A3-35 _{C28}	9,0	5,23	1,58	0,608	37,8	17,32	200,7	75,9	10,49	7,2	26,3	18,0	3720		66,2	x	x
A3-36 _{C28}	9,0	5,24	1,58	0,605	37,7	16,58	202,0	76,1	10,58	7,2	26,3	17,9	3245		63,7	x	x

Tabela A.2 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 17% de umidade e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A1-37c ₉₀	3,0	1,62	1,39	0,831	45,4	16,88	200,4	91,0	3,25	28,0	53,5	36,5	484	432	50,0	x	x
A1-38c ₉₀	3,0	1,62	1,38	0,835	45,5	17,40	200,0	91,0	3,24	28,1	53,7	36,7	431		51,3	x	x
A1-39c ₉₀	3,0	1,61	1,38	0,840	45,7	17,16	200,3	91,4	3,23	28,3	53,9	36,8	382		50,4	x	x
A1-40c ₉₀	5,0	2,65	1,39	0,828	45,3	16,89	200,2	90,7	5,31	17,1	42,8	29,2	1419	1526	49,3	x	x
A1-41c ₉₀	5,0	2,64	1,38	0,837	45,5	17,35	200,2	91,2	5,29	17,2	43,1	29,4	1607		50,1	x	x
A1-42c ₉₀	5,0	2,65	1,39	0,830	45,4	17,46	199,4	90,5	5,29	17,1	42,8	29,3	1551		50,8	71,4	51
A1-43c ₉₀	7,0	3,65	1,39	0,826	45,2	16,68	200,3	90,6	7,31	12,4	37,0	25,3	1667	1822	47,9	x	x
A1-44c ₉₀	7,0	3,66	1,39	0,820	45,0	16,99	198,9	89,6	7,28	12,3	36,7	25,1	1989		49,1	70,3	59
A1-45c ₉₀	7,0	3,68	1,40	0,813	44,8	17,16	198,1	88,8	7,28	12,2	36,4	25,0	1811		50,0	x	x
A1-46c ₉₀	9,0	4,58	1,38	0,834	45,5	17,46	199,7	90,8	9,15	9,9	33,5	22,9	2353	2576	48,7	x	x
A1-47c ₉₀	9,0	4,57	1,38	0,838	45,6	16,77	201,6	92,0	9,22	10,0	33,8	23,0	2812		46,5	x	x
A1-48c ₉₀	9,0	4,63	1,40	0,816	44,9	16,64	199,4	89,6	9,23	9,7	33,0	22,5	2564		47,4	67,9	197
A2-49c ₉₀	3,0	1,73	1,48	0,714	41,7	17,46	199,8	83,3	3,46	24,1	47,6	32,5	1112	1049	60,2	78,0	87
A2-50c ₉₀	3,0	1,73	1,48	0,717	41,8	17,27	200,5	83,7	3,47	24,1	47,8	32,6	1024		59,3	x	x
A2-51c ₉₀	3,0	1,76	1,50	0,690	40,8	16,80	198,4	81,0	3,48	23,3	46,2	31,7	1011		60,0	x	x
A2-52c ₉₀	5,0	2,83	1,48	0,713	41,6	17,23	201,0	83,7	5,69	14,7	38,3	26,1	2676	2603	58,4	x	x
A2-53c ₉₀	5,0	2,83	1,48	0,713	41,6	17,45	200,3	83,4	5,67	14,7	38,2	26,1	2346		59,1	x	x
A2-54c ₉₀	5,0	2,83	1,48	0,716	41,7	17,08	201,0	83,9	5,69	14,8	38,4	26,1	2785		57,6	73,5	133
A2-55c ₉₀	7,0	3,88	1,48	0,716	41,7	17,25	200,8	83,8	7,80	10,7	33,3	22,7	3515	3255	57,1	x	x
A2-56c ₉₀	7,0	3,90	1,48	0,709	41,5	16,97	200,4	83,1	7,81	10,6	33,0	22,5	3273		56,7	70,5	190
A2-57c ₉₀	7,0	3,92	1,49	0,701	41,2	16,56	200,1	82,4	7,84	10,5	32,6	22,3	2978		56,0	x	x
A2-58c ₉₀	9,0	4,92	1,48	0,710	41,5	17,50	200,0	83,0	9,83	8,4	29,7	20,3	3697	3663	57,3	70,6	190
A2-59c ₉₀	9,0	4,91	1,48	0,712	41,6	17,49	199,9	83,1	9,82	8,5	29,7	20,3	3960		57,2	x	103
A2-60c ₉₀	9,0	4,92	1,48	0,708	41,5	17,45	200,0	82,9	9,85	8,4	29,6	20,2	3331		57,3	x	x

Tabela A.2 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 17% de umidade e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0,45})	η/(C _{av}) ^{0,45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A3-61c ₉₀	3,0	1,84	1,58	0,609	37,9	16,81	201,2	76,2	3,71	20,5	42,2	28,7	1298	1204	68,0	83,6	354
A3-62c ₉₀	3,0	1,85	1,58	0,606	37,7	16,57	200,7	75,7	3,71	20,4	42,0	28,6	1150		67,4	x	x
A3-63c ₉₀	3,0	1,85	1,58	0,609	37,8	16,89	200,9	76,0	3,71	20,5	42,1	28,7	1163		68,4	x	x
A3-64c ₉₀	5,0	3,02	1,58	0,608	37,8	17,14	200,6	75,9	6,05	12,5	33,7	23,0	2580	2615	68,1	x	x
A3-65c ₉₀	5,0	3,02	1,58	0,607	37,8	16,98	200,6	75,8	6,06	12,5	33,7	23,0	2799		67,6	78,8	32
A3-66c ₉₀	5,0	3,02	1,58	0,609	37,8	17,42	200,0	75,7	6,03	12,5	33,7	23,0	2466		69,2	x	x
A3-67c ₉₀	7,0	4,15	1,58	0,607	37,8	16,93	200,8	75,8	8,33	9,1	29,2	19,9	4260	4181	66,1	x	x
A3-68c ₉₀	7,0	4,16	1,58	0,602	37,6	16,72	200,3	75,3	8,33	9,0	29,0	19,8	4322		65,8	74,7	844
A3-69c ₉₀	7,0	4,14	1,58	0,609	37,9	16,51	201,8	76,4	8,35	9,1	29,4	20,0	3962		64,2	x	x
A3-70c ₉₀	9,0	5,24	1,58	0,604	37,6	16,54	201,2	75,8	10,55	7,2	26,2	17,9	5691	5202	63,7	75,5	
A3-71c ₉₀	9,0	5,23	1,58	0,607	37,8	16,55	201,4	76,1	10,54	7,2	26,4	17,9	4695		63,5	x	x
A3-72c ₉₀	9,0	5,23	1,58	0,606	37,7	16,53	201,3	76,0	10,54	7,2	26,3	17,9	5220		63,4	x	x

Tabela A.3 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 17% de umidade e 360 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A1-73c ₃₆₀	3,0	1,61	1,38	0,839	45,6	17,47	200,4	91,4	3,24	28,3	53,9	36,8	571	583	51,3	x	x
A1-74c ₃₆₀	3,0	1,62	1,39	0,829	45,3	17,49	199,1	90,2	3,23	27,9	53,2	36,4	596		52,0	x	x
A1-75c ₃₆₀	3,0	1,63	1,39	0,822	45,1	17,35	198,8	89,7	3,24	27,7	52,8	36,2	582		52,0	x	x
A1-76c ₃₆₀	5,0	2,64	1,38	0,836	45,5	17,44	200,2	91,2	5,29	17,2	43,1	29,4	1587	1695	50,4	75,4	19
A1-77c ₃₆₀	5,0	2,65	1,38	0,833	45,4	17,46	199,8	90,8	5,29	17,2	42,9	29,3	1712		50,7	x	x
A1-78c ₃₆₀	5,0	2,66	1,39	0,823	45,2	17,45	199,0	89,8	5,30	17,0	42,4	29,1	1788		51,2	x	x
A1-79c ₃₆₀	7,0	3,66	1,39	0,819	45,0	16,81	199,5	89,8	7,31	12,3	36,7	25,1	2113	2142	48,7	x	x
A1-80c ₃₆₀	7,0	3,65	1,39	0,825	45,2	17,41	199,2	90,0	7,28	12,4	36,9	25,2	2090		50,0	x	x
A1-81c ₃₆₀	7,0	3,67	1,40	0,816	44,9	16,35	200,3	90,0	7,35	12,2	36,7	25,0	2222		47,5	x	x
A1-82c ₃₆₀	9,0	4,64	1,40	0,812	44,8	17,49	197,9	88,7	9,18	9,7	32,7	22,5	2778	2847	50,1	x	x
A1-83c ₃₆₀	9,0	4,63	1,40	0,816	44,9	17,49	197,9	88,9	9,16	9,7	32,8	22,5	2953		49,9	x	x
A1-84c ₃₆₀	9,0	4,64	1,40	0,814	44,9	17,27	198,3	89,0	9,19	9,7	32,8	22,5	2811		49,4	x	x
A2-85c ₃₆₀	3,0	1,74	1,48	0,710	41,5	17,46	199,7	82,9	3,47	23,9	47,4	32,4	1078	1205	60,6	x	x
A2-86c ₃₆₀	3,0	1,73	1,48	0,713	41,6	17,29	200,3	83,4	3,47	24,0	47,6	32,5	1333		59,8	x	x
A2-87c ₃₆₀	3,0	1,75	1,49	0,700	41,2	17,19	199,2	82,0	3,48	23,6	46,8	32,0	1203		60,5	x	x
A2-88c ₃₆₀	5,0	2,85	1,49	0,702	41,2	17,27	199,4	82,2	5,69	14,5	37,6	25,7	2807	2853	59,5	81,0	193
A2-89c ₃₆₀	5,0	2,84	1,48	0,711	41,5	17,44	200,2	83,2	5,68	14,6	38,1	26,0	2828		59,3	x	x
A2-90c ₃₆₀	5,0	2,86	1,49	0,698	41,1	17,49	198,8	81,7	5,68	14,4	37,4	25,6	2925		60,5	x	x
A2-91c ₃₆₀	7,0	3,91	1,49	0,703	41,3	17,48	198,9	82,1	7,78	10,6	32,6	22,3	3687	3567	58,9	x	x
A2-92c ₃₆₀	7,0	3,90	1,48	0,709	41,5	17,40	200,0	83,0	7,80	10,6	32,9	22,5	3470		58,2	x	x
A2-93c ₃₆₀	7,0	3,94	1,50	0,691	40,9	17,37	198,1	81,0	7,81	10,4	32,1	22,0	3544		59,6	x	x
A2-94c ₃₆₀	9,0	4,95	1,49	0,700	41,2	17,47	199,4	82,1	9,86	8,3	29,3	20,1	4108	4100	58,1	x	x
A2-95c ₃₆₀	9,0	4,91	1,48	0,712	41,6	17,44	200,8	83,5	9,86	8,5	29,8	20,3	3993		57,0	x	x
A2-96c ₃₆₀	9,0	4,92	1,48	0,710	41,5	17,33	200,8	83,4	9,87	8,4	29,8	20,3	4199		56,7	x	x

Tabela A.3 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 17% de umidade e 360 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ_d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η /(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A3-97c ₃₆₀	3,0	1,84	1,58	0,609	37,9	17,48	200,2	75,8	3,69	20,5	42,1	28,7	1329	1336	70,7	x	x
A3-98c ₃₆₀	3,0	1,85	1,58	0,604	37,6	17,18	200,5	75,5	3,71	20,3	41,8	28,5	1352		70,1	x	x
A3-99c ₃₆₀	3,0	1,85	1,58	0,608	37,8	17,28	200,5	75,8	3,70	20,5	42,1	28,7	1327		70,1	x	x
A3-100c ₃₆₀	5,0	3,04	1,59	0,597	37,4	17,30	199,0	74,4	6,05	12,3	33,1	22,7	2940	2812	70,1	82,8	59
A3-101c ₃₆₀	5,0	3,07	1,60	0,582	36,8	17,09	197,7	72,7	6,06	12,0	32,3	22,2	2749		71,0	x	x
A3-102c ₃₆₀	5,0	3,08	1,61	0,576	36,6	17,44	197,1	72,1	6,07	11,9	32,0	22,0	2747		73,1	x	x
A3-103c ₃₆₀	7,0	4,16	1,58	0,602	37,6	17,17	200,0	75,2	8,32	9,0	29,0	19,8	4523	4575	67,6	x	x
A3-104c ₃₆₀	7,0	4,18	1,59	0,596	37,3	17,13	199,3	74,4	8,32	8,9	28,7	19,6	4621		68,2	x	x
A3-105c ₃₆₀	7,0	4,17	1,59	0,600	37,5	17,41	199,3	74,7	8,30	9,0	28,8	19,7	4581		68,8	x	x
A3-106c ₃₆₀	9,0	5,28	1,59	0,593	37,2	17,38	199,0	74,1	10,50	7,1	25,7	17,6	5684	5854	68,2	x	x
A3-107c ₃₆₀	9,0	5,26	1,59	0,599	37,5	17,38	199,3	74,7	10,48	7,1	26,0	17,8	5793		67,5	x	x
A3-108c ₃₆₀	9,0	5,30	1,60	0,587	37,0	16,77	199,0	73,6	10,55	7,0	25,5	17,5	6086		66,5	x	x

Tabela A.4 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ_d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η /(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{ri} (%)	Sucção (KPa)
A1-109c ₂₈	3,0	1,66	1,42	0,790	44,1	20,31	195,5	86,3	3,24	26,6	50,8	35,2	406	405	63,3	x	x
A1-110c ₂₈	3,0	1,66	1,42	0,793	44,2	20,18	195,8	86,6	3,24	26,7	51,0	35,2	393		62,7	x	x
A1-111c ₂₈	3,0	1,64	1,40	0,812	44,8	20,42	197,7	88,6	3,24	27,3	52,2	35,9	417		62,0	x	x
A1-112c ₂₈	5,0	2,67	1,40	0,819	45,0	20,45	198,3	89,2	5,29	16,9	42,2	28,9	1195	1210	60,4	70,3	6
A1-113c ₂₈	5,0	2,66	1,39	0,822	45,1	20,41	198,8	89,7	5,30	16,9	42,4	29,0	1212		60,0	x	x
A1-114c ₂₈	5,0	2,67	1,40	0,818	45,0	20,14	198,9	89,5	5,31	16,9	42,2	28,9	1224		59,5	x	x
A1-115c ₂₈	7,0	3,71	1,41	0,795	44,3	20,09	196,5	87,0	7,30	11,9	35,6	24,5	1863	1838	59,9	x	x
A1-116c ₂₈	7,0	3,65	1,39	0,826	45,2	20,43	199,2	90,2	7,27	12,4	36,9	25,3	1827		58,6	x	x
A1-117c ₂₈	7,0	3,65	1,39	0,827	45,3	20,46	199,1	90,1	7,26	12,4	36,9	25,3	1824		58,7	x	x
A1-118c ₂₈	9,0	4,64	1,40	0,813	44,8	20,47	197,7	88,6	9,17	9,7	32,7	22,5	2534	2640	58,6	x	x
A1-119c ₂₈	9,0	4,64	1,40	0,812	44,8	20,10	198,6	89,0	9,21	9,7	32,8	22,5	2647		57,6	x	x
A1-120c ₂₈	9,0	4,64	1,40	0,812	44,8	19,96	198,8	89,1	9,22	9,7	32,8	22,5	2740		57,2	x	x
A2-121c ₂₈	3,0	1,76	1,50	0,690	40,8	19,98	198,1	80,9	3,48	23,2	46,1	31,7	936	1003	71,4	x	x
A2-122c ₂₈	3,0	1,75	1,50	0,696	41,0	20,45	197,9	81,2	3,46	23,4	46,4	31,9	1026		72,4	x	x
A2-123c ₂₈	3,0	1,76	1,50	0,692	40,9	20,38	197,7	80,8	3,47	23,3	46,2	31,7	1049		72,6	x	x
A2-124c ₂₈	5,0	2,83	1,48	0,717	41,8	20,39	200,4	83,7	5,66	14,8	38,3	26,2	1706	1801	68,7	83,5	90
A2-125c ₂₈	5,0	2,84	1,49	0,707	41,4	19,87	200,3	82,9	5,70	14,6	37,9	25,9	1799		68,0	x	x
A2-126c ₂₈	5,0	2,85	1,49	0,700	41,2	20,45	198,4	81,7	5,67	14,4	37,4	25,7	1897		70,6	x	x
A2-127c ₂₈	7,0	3,89	1,48	0,712	41,6	19,83	200,7	83,5	7,81	10,7	33,1	22,6	2699	2734	66,1	x	x
A2-128c ₂₈	7,0	3,94	1,50	0,693	40,9	19,77	198,8	81,3	7,82	10,4	32,2	22,1	2866		67,7	x	x
A2-129c ₂₈	7,0	3,90	1,48	0,710	41,5	19,55	201,4	83,6	7,85	10,7	33,1	22,5	2635		65,3	x	x
A2-130c ₂₈	9,0	4,99	1,50	0,685	40,7	19,93	197,6	80,4	9,86	8,1	28,7	19,7	4173	4119	67,7	x	x
A2-131c ₂₈	9,0	4,92	1,48	0,709	41,5	19,54	201,2	83,4	9,90	8,4	29,7	20,2	3958		64,1	x	x
A2-132c ₂₈	9,0	4,91	1,48	0,711	41,6	20,46	199,7	83,0	9,81	8,5	29,7	20,3	4225		66,9	x	x

Tabela A.4 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ ₀ (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A3-133c ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,604	37,7	20,43	199,8	75,3	3,70	20,3	41,8	28,5	1451	1290	83,3	x	x
A3-134c ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,607	37,8	20,44	200,2	75,6	3,70	20,5	42,0	28,7	1207		82,9	x	x
A3-135c ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,607	37,8	20,40	200,2	75,6	3,70	20,4	42,0	28,7	1211		82,8	x	x
A3-136c ₂₈	5,0	3,02	1,58	0,608	37,8	20,44	199,6	75,5	6,02	12,5	33,6	23,0	2381	2357	81,2	76,4	327
A3-137c ₂₈	5,0	3,04	1,59	0,597	37,4	20,43	198,9	74,4	6,04	12,3	33,1	22,7	2330		82,7	x	x
A3-138c ₂₈	5,0	3,03	1,58	0,603	37,6	20,46	199,6	75,1	6,04	12,4	33,4	22,8	2360		82,0	x	x
A3-139c ₂₈	7,0	4,14	1,58	0,609	37,9	20,18	200,8	76,0	8,31	9,1	29,3	20,0	3245	3464	78,5	x	x
A3-140c ₂₈	7,0	4,14	1,58	0,609	37,9	20,31	200,4	75,9	8,30	9,1	29,3	20,0	3427		79,0	x	x
A3-141c ₂₈	7,0	4,17	1,59	0,599	37,5	20,18	199,6	74,7	8,32	9,0	28,8	19,7	3720		79,9	x	x
A3-142c ₂₈	9,0	5,25	1,58	0,602	37,6	20,45	199,6	75,0	10,48	7,2	26,1	17,8	4719	4889	79,0	x	x
A3-143c ₂₈	9,0	5,23	1,58	0,606	37,7	19,97	201,0	75,9	10,52	7,2	26,3	17,9	4742		76,6	x	x
A3-144c ₂₈	9,0	5,23	1,58	0,607	37,8	19,81	201,2	76,0	10,53	7,2	26,3	17,9	5205		76,0	x	x

Tabela A.5 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 20% de umidade e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rr} (%)	Sucção (KPa)
A1-145c ₉₀	3,0	1,65	1,41	0,804	44,6	19,58	197,9	88,2	3,26	27,1	51,8	35,6	436	478	60,0	x	x
A1-146c ₉₀	3,0	1,65	1,41	0,801	44,5	20,50	196,3	87,3	3,24	27,0	51,5	35,5	526		63,1	75,0	69
A1-147c ₉₀	3,0	1,64	1,40	0,812	44,8	20,50	197,5	88,5	3,24	27,3	52,2	35,9	473		62,2	x	x
A1-148c ₉₀	5,0	2,69	1,41	0,802	44,5	20,44	196,5	87,4	5,29	16,5	41,3	28,5	1400	1515	61,6	73,1	129
A1-149c ₉₀	5,0	2,68	1,40	0,810	44,8	20,21	197,6	88,5	5,30	16,7	41,8	28,7	1544		60,3	x	x
A1-150c ₉₀	5,0	2,68	1,40	0,808	44,7	20,37	197,3	88,2	5,30	16,6	41,6	28,6	1602		61,0	x	x
A1-151c ₉₀	7,0	3,66	1,39	0,822	45,1	20,30	199,0	89,7	7,28	12,3	36,7	25,2	1884	1978	58,6	70,2	64
A1-152c ₉₀	7,0	3,69	1,40	0,808	44,7	20,50	197,2	88,1	7,27	12,1	36,1	24,9	2066		60,1	x	x
A1-153c ₉₀	7,0	3,65	1,39	0,826	45,2	20,44	199,1	90,0	7,27	12,4	36,9	25,3	1984		58,7	x	x
A1-154c ₉₀	9,0	4,66	1,41	0,803	44,5	19,91	197,4	87,9	9,21	9,5	32,4	22,3	2630	2658	57,7	x	x
A1-155c ₉₀	9,0	4,64	1,40	0,811	44,8	19,74	198,8	89,0	9,23	9,6	32,8	22,4	2952		56,6	69,2	140
A1-156c ₉₀	9,0	4,63	1,40	0,816	44,9	20,09	198,8	89,4	9,20	9,7	32,9	22,6	2394		57,3	x	x
A2-157c ₉₀	3,0	1,73	1,48	0,715	41,7	20,02	200,8	83,7	3,48	24,1	47,8	32,6	1029	1114	69,0	79,1	133
A2-158c ₉₀	3,0	1,73	1,48	0,713	41,6	20,25	200,4	83,4	3,47	24,0	47,6	32,5	1128		70,0	x	x
A2-159c ₉₀	3,0	1,73	1,48	0,714	41,7	20,26	200,5	83,5	3,47	24,0	47,7	32,5	1185		69,9	x	x
A2-160c ₉₀	5,0	2,84	1,49	0,708	41,4	19,70	200,9	83,3	5,71	14,6	38,0	25,9	1956	2116	67,3	77,9	34
A2-161c ₉₀	5,0	2,83	1,48	0,715	41,7	20,30	200,6	83,7	5,68	14,7	38,3	26,1	2256		68,6	x	x
A2-162c ₉₀	5,0	2,83	1,48	0,717	41,8	20,36	200,8	83,8	5,67	14,8	38,4	26,2	2136		68,6	x	x
A2-163c ₉₀	7,0	3,89	1,48	0,713	41,6	20,21	200,8	83,6	7,81	10,7	33,1	22,6	3122	3236	67,2	75,7	55
A2-164c ₉₀	7,0	3,91	1,49	0,704	41,3	20,43	199,4	82,4	7,80	10,6	32,7	22,4	3526		68,8	x	x
A2-165c ₉₀	7,0	3,90	1,48	0,710	41,5	20,48	199,8	82,9	7,79	10,6	32,9	22,5	3061		68,4	x	x
A2-166c ₉₀	9,0	4,92	1,48	0,710	41,5	20,34	200,2	83,1	9,84	8,5	29,7	20,3	4700	4133	66,6	73,3	301
A2-167c ₉₀	9,0	4,93	1,49	0,704	41,3	19,74	200,6	82,9	9,89	8,4	29,6	20,2	4079		65,2	x	x
A2-168c ₉₀	9,0	4,95	1,49	0,700	41,2	20,01	199,6	82,2	9,87	8,3	29,3	20,1	3619		66,5	x	x

Tabela A.5 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 20% de umidade e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rr} (%)	Sucção (KPa)
A3-169c ₉₀	3,0	1,85	1,58	0,608	37,8	20,26	200,6	75,9	3,70	20,5	42,1	28,7	1319	1327	82,1	83,8	103
A3-170c ₉₀	3,0	1,84	1,58	0,610	37,9	20,18	201,3	76,3	3,71	20,5	42,3	28,8	1344		81,5	x	x
A3-171c ₉₀	3,0	1,84	1,58	0,610	37,9	20,35	200,6	76,0	3,70	20,5	42,2	28,8	1316		82,3	x	x
A3-172c ₉₀	5,0	3,03	1,58	0,601	37,5	19,67	200,9	75,4	6,09	12,4	33,5	22,8	4083	3731	79,1	x	x
A3-173c ₉₀	5,0	3,02	1,58	0,605	37,7	20,22	200,4	75,5	6,06	12,5	33,6	22,9	3404		80,8	83,2	166
A3-174c ₉₀	5,0	3,03	1,58	0,601	37,5	19,75	200,6	75,3	6,08	12,4	33,4	22,8	3705		79,4	x	x
A3-175c ₉₀	7,0	4,15	1,58	0,606	37,7	20,45	200,8	75,8	8,33	9,1	29,2	19,9	4717	4959	80,0	80,2	367
A3-176c ₉₀	7,0	4,15	1,58	0,607	37,8	19,63	201,8	76,2	8,37	9,1	29,3	19,9	5434		76,6	x	x
A3-177c ₉₀	7,0	4,16	1,58	0,602	37,6	19,55	201,2	75,6	8,37	9,0	29,0	19,8	4728		77,0	x	x
A3-178c ₉₀	9,0	5,23	1,58	0,609	37,8	20,22	201,1	76,1	10,51	7,2	26,4	18,0	5554	5782	77,3	x	x
A3-179c ₉₀	9,0	5,24	1,58	0,604	37,7	20,42	200,7	75,6	10,52	7,2	26,2	17,9	6091		78,6	77,1	55
A3-180c ₉₀	9,0	5,23	1,58	0,608	37,8	20,08	201,0	76,0	10,51	7,2	26,4	18,0	5699		76,8	x	x

Tabela A.6 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 20% de umidade e 360 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rr} (%)	Sucção (KPa)
A1-181C ₃₆₀	3,0	1,65	1,41	0,795	44,3	20,44	197,1	87,3	3,26	26,8	51,3	35,3	574	594	63,4	x	x
A1-182C ₃₆₀	3,0	1,65	1,41	0,797	44,4	20,48	195,6	86,7	3,23	26,9	51,2	35,4	600		63,3	x	x
A1-183C ₃₆₀	3,0	1,66	1,42	0,790	44,1	20,29	196,5	86,8	3,26	26,6	51,0	35,2	609		63,3	x	x
A1-184C ₃₆₀	5,0	2,71	1,42	0,789	44,1	20,19	195,4	86,2	5,30	16,3	40,7	28,2	1987	1646	61,8	78,7	172
A1-185C ₃₆₀	5,0	2,72	1,42	0,787	44,0	19,51	196,2	86,4	5,33	16,2	40,7	28,1	1096		59,9	x	x
A1-186C ₃₆₀	5,0	2,71	1,42	0,790	44,1	20,38	195,3	86,2	5,29	16,3	40,7	28,2	1856		62,3	x	x
A1-187C ₃₆₀	7,0	3,72	1,42	0,792	44,2	19,61	196,8	87,0	7,32	11,9	35,5	24,5	2109	2259	58,7	x	x
A1-188C ₃₆₀	7,0	3,70	1,41	0,799	44,4	19,54	197,3	87,6	7,31	12,0	35,8	24,6	2308		58,0	x	x
A1-189C ₃₆₀	7,0	3,73	1,42	0,788	44,1	19,74	196,1	86,4	7,31	11,8	35,3	24,4	2359		59,4	x	x
A1-190C ₃₆₀	9,0	4,68	1,41	0,798	44,4	19,97	196,7	87,3	9,20	9,5	32,2	22,2	2775	2887	58,2	x	x
A1-191C ₃₆₀	9,0	4,71	1,42	0,786	44,0	20,02	195,7	86,1	9,21	9,3	31,7	21,9	2881		59,2	x	x
A1-192C ₃₆₀	9,0	4,68	1,41	0,795	44,3	19,74	196,7	87,2	9,21	9,5	32,1	22,1	3005		57,7	x	x
A2-192C ₃₆₀	3,0	1,76	1,51	0,682	40,6	20,42	196,3	79,6	3,46	23,0	45,5	31,4	1083	1242	73,7	x	x
A2-194C ₃₆₀	3,0	1,77	1,51	0,677	40,4	20,33	195,9	79,1	3,47	22,8	45,2	31,2	1350		74,0	x	x
A2-195C ₃₆₀	3,0	1,76	1,51	0,684	40,6	20,38	195,8	79,5	3,45	23,0	45,5	31,5	1293		73,5	x	x
A2-196C ₃₆₀	5,0	2,87	1,50	0,689	40,8	20,30	197,3	80,5	5,67	14,2	36,9	25,4	2109	2299	71,2	83,0	68
A2-197C ₃₆₀	5,0	2,87	1,50	0,689	40,8	20,12	197,7	80,7	5,68	14,2	36,9	25,4	2373		70,5	x	x
A2-198C ₃₆₀	5,0	2,86	1,50	0,696	41,1	20,21	198,2	81,4	5,67	14,4	37,3	25,6	2415		70,1	x	x
A2-199C ₃₆₀	7,0	3,98	1,52	0,674	40,3	19,87	196,4	79,1	7,82	10,1	31,3	21,6	3338	3473	69,9	x	x
A2-200C ₃₆₀	7,0	3,96	1,51	0,684	40,6	20,46	196,9	80,0	7,79	10,3	31,8	21,9	3485		70,9	x	x
A2-201C ₃₆₀	7,0	3,96	1,51	0,682	40,6	20,46	196,5	79,7	7,78	10,2	31,7	21,8	3596		71,1	x	x
A2-202C ₃₆₀	9,0	4,96	1,50	0,695	41,0	19,59	199,6	81,8	9,90	8,3	29,2	19,9	4492	4444	65,6	x	x
A2-203C ₃₆₀	9,0	4,98	1,50	0,689	40,8	20,03	198,6	81,0	9,88	8,2	28,9	19,8	4404		67,6	x	x
A2-204C ₃₆₀	9,0	4,99	1,51	0,685	40,6	19,66	198,6	80,7	9,91	8,1	28,8	19,7	4436		66,8	x	x

Tabela A.6 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 20% de umidade e 360 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rr} (%)	Sucção (KPa)
A3-205c ₃₆₀	3,0	1,90	1,62	0,566	36,2	20,30	195,7	70,7	3,71	19,1	39,2	27,1	1594	1534	88,3	x	x
A3-206c ₃₆₀	3,0	1,87	1,60	0,584	36,9	20,18	198,1	73,1	3,71	19,7	40,5	27,8	1466		85,1	x	x
A3-207c ₃₆₀	3,0	1,86	1,59	0,593	37,2	20,51	198,6	73,9	3,70	20,0	41,0	28,1	1541		85,3	x	x
A3-208c ₃₆₀	5,0	3,05	1,60	0,590	37,1	20,52	198,1	73,5	6,05	12,2	32,7	22,5	4163	4274	84,1	89,4	49
A3-209c ₃₆₀	5,0	3,04	1,59	0,594	37,3	20,43	199,0	74,2	6,06	12,3	33,0	22,6	4390		83,0	x	x
A3-210c ₃₆₀	5,0	3,07	1,60	0,583	36,8	20,04	198,5	73,1	6,09	12,0	32,4	22,2	4268		83,1	x	x
A3-211c ₃₆₀	7,0	4,18	1,59	0,596	37,3	19,44	200,6	74,9	8,38	8,9	28,8	19,6	5401	5461	77,3	x	x
A3-212c ₃₆₀	7,0	4,17	1,59	0,598	37,4	20,18	199,3	74,6	8,31	9,0	28,8	19,7	5432		80,0	x	x
A3-213c ₆₀	7,0	4,15	1,58	0,608	37,8	20,57	199,7	75,5	8,28	9,1	29,2	19,9	5550		80,2	x	x
A3-214c ₃₆₀	9,0	5,27	1,59	0,594	37,3	20,07	198,6	74,0	10,48	7,1	25,7	17,6	6427	6554	78,6	x	x
A3-215c ₃₆₀	9,0	5,26	1,59	0,598	37,4	20,39	198,6	74,4	10,45	7,1	25,9	17,7	6681		79,3	x	x
A3-216c ₃₆₀	9,0	5,26	1,59	0,600	37,5	20,49	198,6	74,5	10,44	7,1	25,9	17,8	6554		79,5	x	x

Tabela A.7 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 23% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A1-217c ₂₈	3,0	1,66	1,42	0,793	44,2	23,46	195,	86,4	3,24	26,7	50,9	35,2	414	436	72,9	x	
A1-218c ₂₈	3,0	1,64	1,40	0,815	44,9	23,45	1 7,8	8,8	3,24	27,4	52,3	36,0	453		71,0	x	x
A1-219c ₂₈	3,0	1,65	1,41	0,794	44,3	23,34	196,0	86,7	3,24	26,7	51,1	35,3	441		72,4	x	x
A1-220c ₂₈	5,0	2,71	1,42	0,790	44,1	22,80	196,4	86,7	5,32	16,3	40,9	28,2	1207	1183	69,7	80,9	69
A1-221c ₂₈	5,0	2,69	1,41	0,804	44,6	23,22	197,2	87,9	5,31	16,6	41,5	28,5	1180		69,8	x	x
A1-222c ₂₈	5,0	2,71	1,42	0,788	44,1	22,60	196,4	86,6	5,33	16,2	40,8	28,1	1162		69,3	x	x
A1-223c ₂₈	7,0	3,67	1,40	0,817	45,0	23,39	198,5	89,3	7,28	12,3	36,5	25,1	1639	1793	67,8	x	x
A1-224c ₂₈	7,0	3,67	1,40	0,814	44,9	23,37	198,0	88,9	7,27	12,2	36,4	25,0	1834		68,0	x	x
A1-225c ₂₈	7,0	3,71	1,41	0,796	44,3	23,15	196,5	87,1	7,29	12,0	35,6	24,6	1907		68,9	x	x
A1-226c ₂₈	9,0	4,65	1,40	0,808	44,7	23,35	197,5	88,3	9,19	9,6	32,5	22,4	2115	2073	67,2	x	x
A1-227c ₂₈	9,0	4,66	1,41	0,803	44,5	22,63	198,0	88,2	9,23	9,6	32,4	22,3	1907		65,5	x	x
A1-228c ₂₈	9,0	4,62	1,39	0,819	45,0	23,14	198,8	89,5	9,19	9,7	33,0	22,6	2196		65,7	x	x
A2-229c ₂₈	3,0	1,78	1,52	0,672	40,2	22,76	196,2	78,8	3,48	22,6	44,9	31,0	679	640	83,5	x	x
A2-230c ₂₈	3,0	1,75	1,49	0,698	41,1	22,90	199,3	81,9	3,49	23,5	46,7	32,0	632		80,8	x	x
A2-231c ₂₈	3,0	1,74	1,49	0,703	41,3	23,45	200,0	82,5	3,49	23,7	47,0	32,1	607		82,2	x	x
A2-232c ₂₈	5,0	2,85	1,49	0,701	41,2	23,36	198,9	82,0	5,67	14,4	37,5	25,7	2017	1962	80,5	90,2	129
A2-233c ₂₈	5,0	2,87	1,50	0,692	40,9	22,68	199,0	81,4	5,71	14,3	37,2	25,5	1804		79,1	x	x
A2-234c ₂₈	5,0	2,85	1,49	0,701	41,2	22,86	199,7	82,3	5,70	14,4	37,6	25,7	2066		78,8	x	x
A2-235c ₂₈	7,0	3,93	1,50	0,696	41,1	22,93	198,8	81,6	7,81	10,5	32,4	22,2	2217	2388	78,0	x	x
A2-236c ₂₈	7,0	3,90	1,48	0,710	41,5	23,26	200,0	83,0	7,79	10,7	33,0	22,5	2605		77,7	x	x
A2-237c ₂₈	7,0	3,91	1,49	0,704	41,3	23,10	199,8	82,5	7,81	10,6	32,7	22,4	2342		77,8	x	x
A2-238c ₂₈	9,0	4,92	1,48	0,709	41,5	23,16	200,1	83,0	9,85	8,4	29,7	20,3	2979	3210	76,0	x	x
A2-239c ₂₈	9,0	4,95	1,49	0,698	41,1	22,64	199,6	82,0	9,88	8,3	29,3	20,0	3180		75,5	x	x
A2-240c ₂₈	9,0	4,91	1,48	0,712	41,6	22,60	201,2	83,7	9,88	8,5	29,8	20,3	3471		73,9	x	x

Tabela A.7 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 23% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rr} (%)	Sucção (KPa)
A3-241c ₂₈	3,0	,85	1,58	0,609	37,9	23,47	199,8	75,6	3,69	20,5	42,0	28,7	1456	1576	94,9	x	x
A3-242c ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,607	37,8	23,31	199,9	75,5	3,69	20,5	42,0	28,7	1619		94,6	x	x
A3-243c ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,605	37,7	23,40	199,2	75,1	3,68	20,4	41,8	28,6	1652		95,3	x	x
A3-244c ₂₈	5,0	3,04	1,59	0,596	37,3	23,05	198,6	74,2	6,04	12,3	33,0	22,6	2253	2361	93,4	77,8	64
A3-245c ₂₈	5,0	3,03	1,59	0,601	37,5	22,50	200,0	75,1	6,06	12,4	33,4	22,8	2477		90,5	x	x
A3-246c ₂₈	5,0	3,02	1,58	0,606	37,7	22,66	200,4	75,6	6,06	12,5	33,6	22,9	2353		90,4	x	x
A3-247c ₂₈	7,0	4,17	1,59	0,597	37,4	23,13	198,7	74,3	8,29	9,0	28,7	19,6	3049	3177	91,9	x	x
A3-248c ₂₈	7,0	4,14	1,58	0,609	37,8	22,99	200,1	75,7	8,29	9,1	29,2	20,0	3023		89,5	x	x
A3-249c ₂₈	7,0	4,15	1,58	0,606	37,7	23,20	199,7	75,3	8,29	9,1	29,1	19,9	3459		90,8	x	x
A3-250c ₂₈	9,0	5,23	1,58	0,606	37,7	23,03	199,8	75,4	10,46	7,2	26,2	17,9	4492	4360	88,4	x	x
A3-251c ₂₈	9,0	5,24	1,58	0,604	37,6	23,20	199,4	75,0	10,45	7,2	26,1	17,9	4495		89,4	x	x
A3-252c ₂₈	9,0	5,23	1,58	0,608	37,8	23,37	199,8	75,5	10,45	7,2	26,3	18,0	4092		89,5	x	x

Tabela A.8 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 23% de umidade e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rr} (%)	Sucção (KPa)
A1-253c ₉₀	3,0	1,64	1,40	0,811	44,8	23,44	197,3	88,4	3,23	27,3	52,1	35,9	475	435	71,2	77,3	57
A1-254c ₉₀	3,0	1,65	1,41	0,797	44,4	23,35	196,	87,0	,24	26,9	51,3	35,4	427		72,2	x	x
A1-255c ₉₀	3,0	1,65	1,41	0,802	44,5	23,48	196,9	87,7	3,24	27,0	51,6	35,6	402		72,1	70,1	43
A1-256c ₉₀	5,0	2,66	1,39	0,824	45,2	22,88	199,4	90,1	5,30	17,0	42,5	29,1	1303	1239	67,1	x	x
A1-257c ₉₀	5,0	2,67	1,40	0,815	44,9	23,00	198,6	89,2	5,31	16,8	42,1	28,8	1152		68,2	75,3	138
A1-258c ₉₀	5,0	2,69	1,41	0,805	44,6	22,86	197,7	88,2	5,31	16,6	41,6	28,6	1262		68,6	67,5	11
A1-259c ₉₀	7,0	3,64	1,39	0,828	45,3	23,32	199,6	90,5	7,28	12,4	37,0	25,3	1970	1835	66,7	x	x
A1-260c ₉₀	7,0	3,67	1,40	0,815	44,9	23,00	198,7	89,2	7,30	12,2	36,5	25,0	1876		66,9	74,7	42
A1-261c ₉₀	7,0	3,66	1,39	0,820	45,1	23,45	198,4	89,4	7,26	12,3	36,6	25,1	1659		67,8	65,7	26
A1-262c ₉₀	9,0	4,62	1,39	0,818	45,0	22,76	199,4	89,8	9,22	9,7	33,0	22,6	2232	2225	64,7	x	x
A1-263c ₉₀	9,0	4,63	1,40	0,817	45,0	22,69	199,6	89,8	9,24	9,7	33,0	22,6	1966		64,6	72,5	174
A1-264c ₉₀	9,0	4,63	1,40	0,814	44,9	22,95	199,3	89,5	9,24	9,7	32,9	22,5	2477		65,6	x	x
A2-265c ₉₀	3,0	1,73	1,48	0,717	41,8	23,12	201,6	84,2	3,49	24,1	48,0	32,6	651	666	79,5	82,6	54
A2-266c ₉₀	3,0	1,74	1,49	0,706	41,4	22,82	200,4	83,0	3,49	23,8	47,3	32,3	701		79,6	72,1	28
A2-267c ₉₀	3,0	1,75	1,50	0,696	41,1	22,81	199,4	81,9	3,49	23,5	46,7	31,9	646		80,7	x	x
A2-268c ₉₀	5,0	2,89	1,51	0,677	40,4	22,87	196,5	79,3	5,69	13,9	36,3	25,0	1869	2076	81,7	x	x
A2-269c ₉₀	5,0	2,84	1,48	0,711	41,6	23,10	200,4	83,3	5,68	14,7	38,1	26,0	2075		78,5	71,5	35
A2-270c ₉₀	5,0	2,84	1,48	0,710	41,5	23,19	200,0	83,0	5,68	14,6	38,0	26,0	2283		79,0	70,7	207
A2-271c ₉₀	7,0	3,90	1,48	0,710	41,5	22,96	199,9	83,0	7,79	10,7	33,0	22,5	2569	2727	76,7	78,7	316
A2-272c ₉₀	7,0	3,91	1,49	0,705	41,3	22,85	200,1	82,7	7,82	10,6	32,8	22,4	2993		76,8	x	x
A2-273c ₉₀	7,0	3,88	1,48	0,716	41,7	23,52	200,0	83,4	7,77	10,7	33,2	22,7	2618		77,9	x	x
A2-274c ₉₀	9,0	4,90	1,48	0,716	41,7	22,87	201,0	83,9	9,85	8,5	30,0	20,4	3708	3525	74,3	76,4	140
A2-275c ₉₀	9,0	4,92	1,49	0,707	41,4	22,85	200,5	83,1	9,87	8,4	29,6	20,2	3625		75,1	x	x
A2-276c ₉₀	9,0	4,93	1,49	0,704	41,3	22,55	200,6	82,9	9,90	8,4	29,5	20,1	3241		74,5	x	x

Tabela A.8 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 23% de umidade e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A3-277c ₉₀	3,0	1,8	1,58	0,610	37,9	23,41	199,6	75,7	3,68	20,6	42,1	28,8	1889	1753	94,5	75,8	72
A3-278c ₉₀	3,0	1,84	1,58	0,610	37,9	23,32	199,6	75,6	3,68	20,5	42,1	28,8	1609		94,2	89,2	41
A3-279c ₉₀	3,0	1,85	1,59	0,601	37,5	22,99	198,8	74,6	3,69	20,2	41,5	28,4	1762		94,3	x	x
A3-280c ₉₀	5,0	3,02	1,58	0,606	37,7	23,11	199,4	75,3	6,03	12,5	33,5	22,9	3567	3616	92,1	67,9	227
A3-281c ₉₀	5,0	3,02	1,58	0,606	37,7	23,08	199,6	75,3	6,03	12,5	33,5	22,9	4030		92,1	87,7	177
A3-282c ₉₀	5,0	3,02	1,58	0,607	37,8	22,63	200,9	75,9	6,07	12,5	33,7	23,0	3251		90,0	x	x
A3-283c ₉₀	7,0	4,14	1,58	0,609	37,8	22,69	201,2	76,1	8,34	9,1	29,3	20,0	4415	4568	88,4	85,7	335
A3-284c ₉₀	7,0	4,15	1,58	0,605	37,7	22,82	199,6	75,3	8,28	9,1	29,1	19,9	4970		89,3	x	x
A3-285c ₉₀	7,0	4,17	1,59	0,599	37,5	22,55	199,4	74,7	8,31	9,0	28,8	19,7	4320		89,2	x	x
A3-286c ₉₀	9,0	5,24	1,58	0,605	37,7	22,52	200,8	75,7	10,52	7,2	26,3	17,9	5740	6272	86,6	84,4	416
A3-287c ₉₀	9,0	5,23	1,58	0,608	37,8	23,11	200,0	75,6	10,46	7,2	26,3	18,0	6784		88,5	x	x
A3-288c ₉₀	9,0	5,23	1,58	0,607	37,8	23,48	199,5	75,4	10,44	7,2	26,2	17,9	6293		90,0	x	x

Tabela A.9 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 23% de umidade e 360 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A1-289c ₃₆₀	3,0	1,65	1,41	0,794	44,3	23,17	195,9	86,7	3,24	26,8	51,1	35,3	514	536	71,9	x	x
A1-290c ₃₆₀	3,0	1,66	1,42	0,794	44,2	23,44	195,4	86,5	3,24	26,7	51,0	35,3	542		72,8	x	x
A1-291c ₃₆₀	3,0	1,65	1,41	0,798	44,4	23,46	195,6	86,8	3,23	26,9	51,2	35,4	553		72,5	x	x
A1-292c ₃₆₀	5,0	2,72	1,42	0,787	44,0	22,79	195,8	86,2	5,32	16,2	40,6	28,1	1322	1363	70,0	77,6	28
A1-293c ₃₆₀	5,0	2,72	1,42	0,786	44,0	22,57	196,1	86,3	5,33	16,2	40,6	28,1	1446		69,4	x	x
A1-294c ₃₆₀	5,0	2,70	1,41	0,795	44,3	22,60	197,3	87,4	5,33	16,4	41,1	28,3	1323		68,7	x	x
A1-295c ₃₆₀	7,0	3,70	1,41	0,801	44,5	22,99	197,0	87,6	7,29	12,0	35,8	24,7	2081	2029	68,0	x	x
A1-296c ₃₆₀	7,0	3,68	1,40	0,812	44,8	23,42	197,4	88,5	7,26	12,2	36,3	24,9	2029		68,3	x	x
A1-297c ₃₆₀	7,0	3,68	1,40	0,809	44,7	23,27	196,9	88,0	7,25	12,1	36,1	24,9	1977		68,2	x	x
A1-298c ₃₆₀	9,0	4,67	1,41	0,801	44,5	23,27	196,9	87,6	9,19	9,5	32,3	22,2	2336	2456	67,5	x	x
A1-299c ₃₆₀	9,0	4,69	1,42	0,792	44,2	23,16	195,8	86,5	9,19	9,4	31,9	22,0	2528		68,1	x	x
A1-300c ₃₆₀	9,0	4,67	1,41	0,799	44,4	23,36	196,5	87,2	9,19	9,5	32,2	22,2	2505		68,1	x	x
A2-301c ₃₆₀	3,0	1,75	1,50	0,694	41,0	22,94	198,9	81,5	3,49	23,4	46,5	31,8	816	829	81,4	x	x
A2-302c ₃₆₀	3,0	1,77	1,51	0,680	40,5	22,97	196,7	79,6	3,48	22,9	45,5	31,3	843		83,3	x	x
A2-303c ₃₆₀	3,0	1,78	1,52	0,670	40,1	23,15	196,1	78,7	3,49	22,6	44,9	31,0	828		85,1	x	x
A2-304c ₃₆₀	5,0	2,88	1,51	0,685	40,7	22,94	197,1	80,1	5,67	14,1	36,7	25,3	2331	2252	80,9	84,1	135
A2-305c ₃₆₀	5,0	2,89	1,51	0,678	40,4	22,97	197,3	79,7	5,71	14,0	36,4	25,1	2223		81,9	x	x
A2-306c ₃₆₀	5,0	2,89	1,51	0,681	40,5	23,15	196,1	79,4	5,66	14,0	36,4	25,1	2202		82,2	x	x
A2-307c ₃₆₀	7,0	3,92	1,49	0,702	41,2	23,02	199,6	82,3	7,82	10,5	32,6	22,3	3080	2954	77,8	x	x
A2-308c ₃₆₀	7,0	3,92	1,49	0,700	41,2	22,57	200,2	82,4	7,85	10,5	32,6	22,3	2950		76,4	x	x
A2-309c ₃₆₀	7,0	3,95	1,50	0,687	40,7	23,24	197,1	80,3	7,79	10,3	31,9	21,9	2830		80,2	x	x
A2-310c ₃₆₀	9,0	5,00	1,51	0,681	40,5	23,02	197,2	79,9	9,86	8,1	28,5	19,6	3837	3835	78,6	x	x
A2-311c ₃₆₀	9,0	5,05	1,52	0,666	40,0	22,57	196,0	78,4	9,89	7,9	27,9	19,3	3963		78,8	x	x
A2-312c ₃₆₀	9,0	5,00	1,51	0,680	40,5	23,24	196,7	79,6	9,84	8,1	28,5	19,6	3704		79,5	x	x

Tabela A.9 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 23% de umidade e 360 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	média q _u (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (K a)
A3-313c ₃₆₀	3,0	1,88	1,61	0,80	36,7	22,52	197,1	72,3	3,71	19,5	40,1	27,6	1822	1940	95,8	x	x
A3-314c ₃₆₀	3,0	1,86	1,59	0,593	37,2	22,79	197,7	73,5	3,68	20,0	40,9	28,1	1948		94,8	x	x
A3-315c ₃₆₀	3,0	1,87	1,59	0,592	37,2	23,26	197,0	73,3	3,67	19,9	40,8	28,1	2049		96,8	x	x
A3-316c ₃₆₀	5,0	3,02	1,58	0,609	37,8	23,48	199,9	75,6	6,03	12,5	33,7	23,0	4105	3965	93,2	90,8	95
A3-317c ₃₆₀	5,0	3,07	1,61	0,580	36,7	22,77	197,2	72,4	6,06	11,9	32,2	22,2	3863		94,9	x	x
A3-218c ₃₆₀	5,0	3,05	1,59	0,593	37,2	22,90	199,7	74,4	6,08	12,2	33,0	22,6	3928		93,3	x	x
A3-319c ₃₆₀	7,0	4,20	1,60	0,586	36,9	22,61	198,3	73,3	8,33	8,8	28,2	19,4	4860	4937	91,5	x	x
A3-320c ₃₆₀	7,0	4,21	1,60	0,585	36,9	22,75	197,3	72,8	8,30	8,8	28,1	19,3	5056		92,3	x	x
A3-321c ₆₀	7,0	4,16	1,58	0,601	37,5	22,65	199,3	74,8	8,30	9,0	28,9	19,7	4895		89,4	x	x
A3-322c ₃₆₀	9,0	5,24	1,58	0,604	37,6	22,52	200,7	75,5	10,52	7,2	26,2	17,9	6885	6757	86,8	x	x
A3-323c ₃₆₀	9,0	5,24	1,58	0,603	37,6	22,92	200,0	75,3	10,49	7,2	26,1	17,8	6759		88,4	x	x
A3-324c ₃₆₀	9,0	5,28	1,59	0,591	37,2	22,51	198,7	73,9	10,50	7,0	25,6	17,6	6628		88,5	x	x

**APÊNDICE B – DADOS DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS
AO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO**

Tabela B.1 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 17% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ_d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η /(C _{av}) ^{0.45}	q _u (KPa)	q _u média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A1-1t ₂₈	3,0	1,64	1,41	0,806	44,6	16,56	198,3	88,5	3,26	27,2	52,0	35,7	35	33	50,6	x	x
A1-2t ₂₈	3,0	1,62	1,38	0,837	45,6	17,38	201,2	91,7	3,25	28,2	53,9	36,7	32		51,1	x	x
A1-3t ₂₈	3,0	1,64	1,40	0,810	44,7	17,30	199,4	89,2	3,27	27,3	52,3	35,8	32		52,7	x	x
A1-4t ₂₈	5,0	2,66	1,39	0,825	45,2	17,30	198,9	89,9	5,29	17,0	42,5	29,1	66	66	50,7	x	x
A1-5t ₂₈	5,0	2,66	1,39	0,823	45,1	17,16	199,0	89,8	5,30	17,0	42,4	29,1	61		50,4	x	x
A1-6t ₂₈	5,0	2,66	1,39	0,825	45,2	17,39	198,9	90,0	5,29	17,0	42,5	29,1	72		50,9	x	x
A1-7t ₂₈	7,0	3,64	1,39	0,830	45,3	17,32	199,7	90,5	7,27	12,4	37,1	25,3	112	115	49,5	x	x
A1-8t ₂₈	7,0	3,64	1,39	0,831	45,4	17,34	199,7	90,6	7,27	12,5	37,1	25,4	117		49,5	x	x
A1-9t ₂₈	7,0	3,66	1,39	0,822	45,1	16,87	199,0	89,8	7,28	12,3	36,7	25,2	118		48,7	x	x
A1-10t ₂₈	9,0	4,63	1,40	0,816	44,9	17,22	198,3	89,1	9,18	9,7	32,9	22,5	172	157	49,1	x	x
A1-11t ₂₈	9,0	4,63	1,40	0,817	45,0	16,88	199,0	89,5	9,21	9,7	33,0	22,6	152		48,1	x	x
A1-12t ₂₈	9,0	4,64	1,40	0,814	44,9	17,14	198,3	89,0	9,19	9,7	32,8	22,5	147		49,0	x	x
A2-13t ₂₈	3,0	1,74	1,49	0,709	41,5	17,42	199,5	82,8	3,47	23,9	47,3	32,4	41	39	60,5	x	x
A2-14t ₂₈	3,0	1,73	1,48	0,717	41,8	17,45	200,4	83,7	3,47	24,1	47,8	32,6	38		60,0	x	x
A2-15t ₂₈	3,0	1,74	1,48	0,710	41,5	16,92	200,6	83,3	3,48	23,9	47,5	32,4	38		58,7	x	x
A2-16t ₂₈	5,0	2,84	1,49	0,708	41,4	17,46	199,2	82,5	5,66	14,6	37,8	25,9	72	76	59,6	x	x
A2-17t ₂₈	5,0	2,85	1,49	0,704	41,3	16,53	200,3	82,8	5,70	14,5	37,8	25,8	72		56,7	x	x
A2-18t ₂₈	5,0	2,84	1,48	0,710	41,5	17,47	199,7	82,9	5,67	14,6	38,0	26,0	83		59,5	x	x
A2-19t ₂₈	7,0	3,90	1,48	0,711	41,5	17,47	199,5	82,9	7,77	10,7	32,9	22,5	259	239	58,3	x	x
A2-20t ₂₈	7,0	3,90	1,48	0,710	41,5	17,29	199,7	82,9	7,79	10,6	32,9	22,5	225		57,8	x	x
A2-21t ₂₈	7,0	3,90	1,49	0,708	41,4	17,52	199,5	82,7	7,79	10,6	32,8	22,5	231		58,7	x	x
A2-22t ₂₈	9,0	4,91	1,48	0,712	41,6	17,42	200,0	83,2	9,82	8,5	29,8	20,3	247	247	56,9	x	x
A2-23t ₂₈	9,0	5,00	1,51	0,682	40,6	17,38	196,3	79,6	9,81	8,1	28,5	19,7	227		59,3	x	x
A2-24t ₂₈	9,0	4,95	1,49	0,700	41,2	17,40	198,9	81,9	9,84	8,3	29,3	20,1	265		57,9	x	x

Tabela B.1 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 17% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0,45})	η/(C _{av}) ^{0,45}	q _t (KPa)	q _t média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A3-25t ₂₈	3,0	1,85	1,59	0,601	37,5	17,14	200,0	75,1	3,71	20,2	41,6	28,4	46	47	70,3	x	x
A3-26t ₂₈	3,0	1,86	1,59	0,598	37,4	17,40	199,0	74,4	3,70	20,1	41,3	28,3	44		71,7	x	x
A3-27t ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,603	37,6	17,25	199,9	75,2	3,70	20,3	41,7	28,5	49		70,5	x	x
A3-28t ₂₈	5,0	3,02	1,58	0,607	37,8	17,25	200,5	75,7	6,05	12,5	33,7	23,0	185	179	68,7	x	x
A3-29t ₂₈	5,0	3,01	1,58	0,609	37,9	17,23	200,6	76,0	6,05	12,6	33,8	23,0	174		68,3	x	x
A3-30t ₂₈	5,0	3,02	1,58	0,609	37,9	17,01	201,2	76,1	6,07	12,6	33,8	23,0	179		67,5	x	x
A3-31t ₂₈	7,0	4,15	1,58	0,605	37,7	17,25	200,3	75,5	8,32	9,1	29,1	19,9	276	289	67,6	x	x
A3-32t ₂₈	7,0	4,14	1,58	0,608	37,8	17,23	200,5	75,8	8,31	9,1	29,2	19,9	287		67,2	x	x
A3-33t ₂₈	7,0	4,15	1,58	0,604	37,7	17,44	199,9	75,3	8,30	9,1	29,1	19,8	305		68,4	x	x
A3-34t ₂₈	9,0	5,24	1,58	0,604	37,7	17,33	200,1	75,3	10,49	7,2	26,2	17,9	407	387	66,8	x	x
A3-35t ₂₈	9,0	5,23	1,58	0,607	37,8	17,44	200,2	75,6	10,48	7,2	26,3	17,9	350		66,9	x	x
A3-36t ₂₈	9,0	5,33	1,61	0,577	36,6	17,36	196,3	71,8	10,47	6,9	25,0	17,2	405		70,0	x	x

Tabela B.2 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 17% de umidade e 360 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ_d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{ep} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	$\eta/(C_{av})^{0.45}$	q _t (KPa)	q _t média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A2-109t ₃₆₀	7,0	3,96	1,51	0,683	40,6	16,56	197,9	80,3	7,83	10,3	31,8	21,9	272	275	57,5	x	x
A2-110t ₃₆₀	7,0	3,95	1,50	0,687	40,7	16,57	198,4	80,8	7,84	10,3	32,0	21,9	265		57,2	x	x
A2-111t ₃₆₀	7,0	3,89	1,48	0,714	41,6	17,28	200,3	83,4	7,79	10,7	33,1	22,6	287		57,4	x	x
A2-112t ₃₆₀	9,0	4,99	1,50	0,686	40,7	16,51	198,5	80,7	9,90	8,2	28,8	19,7	318	323	56,0	x	x
A2-113t ₃₆₀	9,0	4,96	1,49	0,697	41,1	16,85	199,1	81,8	9,87	8,3	29,2	20,0	338		56,2	x	x
A2-114t ₃₆₀	9,0	4,91	1,48	0,711	41,6	16,58	201,2	83,6	9,88	8,5	29,8	20,3	314		54,2	x	x

Tabela B.3 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{ep} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _t (KPa)	q _t média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A1-37t ₂₈	3,0	1,61	1,38	0,839	45,6	20,31	200,7	91,6	3,24	28,3	54,0	36,8	38	39	28,3	x	x
A1-38t ₂₈	3,0	1,65	1,41	0,804	44,6	19,81	197,9	88,2	3,26	27,1	51,9	35,6	41		27,1	x	x
A1-39t ₂₈	3,0	1,62	1,38	0,837	45,6	20,78	199,7	91,0	3,23	28,2	53,7	36,7	38		28,2	x	x
A1-40t ₂₈	5,0	2,65	1,39	0,831	45,4	20,16	200,2	90,9	5,31	17,1	42,9	29,3	120	123	17,1	x	x
A1-41t ₂₈	5,0	2,66	1,39	0,825	45,2	20,49	199,2	90,1	5,29	17,0	42,5	29,1	114		17,0	x	x
A1-42t ₂₈	5,0	2,65	1,39	0,832	45,4	20,22	200,3	90,9	5,30	17,1	42,9	29,3	134		17,1	x	x
A1-43t ₂₈	7,0	3,65	1,39	0,824	45,2	20,45	198,8	89,8	7,27	12,4	36,8	25,2	196	188	12,4	x	x
A1-44t ₂₈	7,0	3,66	1,39	0,823	45,2	20,07	199,7	90,2	7,30	12,4	36,9	25,2	174		12,4	x	x
A1-45t ₂₈	7,0	3,70	1,41	0,803	44,6	20,42	196,9	87,7	7,27	12,1	35,9	24,7	193		12,1	x	x
A1-46t ₂₈	9,0	4,58	1,38	0,836	45,5	20,30	200,5	91,3	9,18	9,9	33,7	23,0	261	242	9,9	x	x
A1-47t ₂₈	9,0	4,62	1,39	0,821	45,1	19,83	199,7	90,0	9,22	9,8	33,1	22,7	231		9,8	x	x
A1-48t ₂₈	9,0	4,60	1,39	0,828	45,3	20,11	200,0	90,6	9,20	9,9	33,4	22,8	233		9,9	x	x
A2-49t ₂₈	3,0	1,73	1,48	0,717	41,7	19,89	201,9	84,3	3,49	24,1	48,0	32,6	74	74	24,1	x	x
A2-50t ₂₈	3,0	1,74	1,49	0,702	41,2	19,81	199,8	82,4	3,49	23,6	47,0	32,1	72		23,6	x	x
A2-51t ₂₈	3,0	1,73	1,48	0,718	41,8	20,24	201,0	84,0	3,47	24,2	47,9	32,7	75		24,2	x	x
A2-52t ₂₈	5,0	2,84	1,48	0,710	41,5	20,47	199,8	82,9	5,67	14,6	38,0	26,0	228	241	14,6	x	x
A2-53t ₂₈	5,0	2,84	1,49	0,707	41,4	20,29	199,3	82,5	5,67	14,6	37,8	25,9	262		14,6	x	x
A2-54t ₂₈	5,0	2,85	1,49	0,704	41,3	20,41	199,2	82,3	5,67	14,5	37,7	25,8	234		14,5	x	x
A2-55t ₂₈	7,0	3,89	1,48	0,714	41,7	20,15	200,6	83,6	7,80	10,7	33,2	22,6	293	311	10,7	x	x
A2-56t ₂₈	7,0	3,90	1,48	0,710	41,5	20,45	199,8	83,0	7,79	10,7	32,9	22,5	321		10,7	x	x
A2-57t ₂₈	7,0	3,89	1,48	0,713	41,6	20,05	200,6	83,5	7,80	10,7	33,1	22,6	318		10,7	x	x
A2-58t ₂₈	9,0	4,96	1,49	0,696	41,0	20,37	198,5	81,5	9,84	8,3	29,1	20,0	323	345	8,3	x	x
A2-59t ₂₈	9,0	4,93	1,49	0,705	41,3	20,50	199,4	82,4	9,83	8,4	29,5	20,2	350		8,4	x	x
A2-60t ₂₈	9,0	4,92	1,48	0,709	41,5	20,40	200,0	83,0	9,84	8,4	29,7	20,3	361		8,4	x	x

Tabela B.3 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0,45})	η/(C _{av}) ^{0,45}	q _t (KPa)	q _t média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A3-61t ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,609	37,8	20,49	200,4	75,8	3,70	20,5	42,1	28,7	100	101	82,9	x	x
A3-62t ₂₈	3,0	1,84	1,58	0,610	37,9	20,25	201,4	76,3	3,71	20,5	42,3	28,8	94		81,8	x	x
A3-63t ₂₈	3,0	1,86	1,59	0,598	37,4	20,37	199,0	74,4	3,70	20,1	41,3	28,3	109		84,0	x	x
A3-64t ₂₈	5,0	3,02	1,58	0,609	37,8	19,94	201,4	76,2	6,07	12,5	33,8	23,0	269	257	79,2	x	x
A3-65t ₂₈	5,0	3,02	1,58	0,608	37,8	20,32	200,7	75,9	6,06	12,5	33,7	23,0	233		80,8	x	x
A3-66t ₂₈	5,0	3,02	1,58	0,609	37,8	20,45	201,0	76,1	6,06	12,5	33,8	23,0	269		81,1	x	x
A3-67t ₂₈	7,0	4,15	1,58	0,604	37,7	20,34	200,4	75,5	8,33	9,1	29,1	19,8	406	375	79,8	x	x
A3-68t ₂₈	7,0	4,15	1,58	0,607	37,8	20,34	200,8	75,8	8,33	9,1	29,2	19,9	349		79,5	x	x
A3-69t ₂₈	7,0	4,15	1,58	0,606	37,7	20,42	200,7	75,8	8,33	9,1	29,2	19,9	371		79,8	x	x
A3-70t ₂₈	9,0	5,23	1,58	0,607	37,8	20,40	200,6	75,7	10,50	7,2	26,3	17,9	513	473	78,2	x	x
A3-71t ₂₈	9,0	5,25	1,58	0,600	37,5	19,62	201,2	75,5	10,57	7,1	26,1	17,8	455		76,1	x	x
A3-72t ₂₈	9,0	5,23	1,58	0,609	37,8	20,36	201,2	76,1	10,52	7,2	26,4	18,0	450		77,8	x	x

Tabela B.4 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 20% de umidade e 360 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ_d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0,45})	$\eta/(C_{av})^{0,45}$	q _t (KPa)	q _t média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A2-115 ₃₆₀	9,0	4,96	1,50	0,695	41,0	19,64	199,1	81,6	9,88	8,3	29,1	19,9	390	388	65,8	x	x
A2-116 ₃₆₀	9,0	5,00	1,51	0,683	40,6	19,88	197,5	80,1	9,87	8,1	28,6	19,7	381		67,8	x	x
A2-117 ₃₆₀	9,0	4,98	1,50	0,687	40,7	19,76	198,1	80,7	9,87	8,2	28,8	19,8	392		66,9	x	x

Tabela B.5 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 23% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{ep} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _t (KPa)	q _t média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A1-73t ₂₈	3,0	1,63	1,40	0,818	45,0	23,39	198,4	89,3	3,24	27,5	52,6	36,1	32	32	70,5	x	x
A1-74t ₂₈	3,0	1,65	1,41	0,805	44,6	23,11	197,4	88,0	3,25	27,1	51,8	35,6	30		70,7	x	x
A1-75t ₂₈	3,0	1,63	1,39	0,822	45,1	23,49	198,6	89,6	3,24	27,7	52,8	36,2	35		70,4	x	x
A1-76t ₂₈	5,0	2,69	1,41	0,801	44,5	23,07	197,1	87,6	5,31	16,5	41,3	28,5	67	62	69,6	x	x
A1-77t ₂₈	5,0	2,69	1,41	0,804	44,6	22,60	198,1	88,3	5,33	16,6	41,6	28,6	58		67,9	x	x
A1-78t ₂₈	5,0	2,65	1,38	0,834	45,5	23,87	199,4	90,7	5,28	17,2	42,9	29,4	61		69,1	x	x
A1-79t ₂₈	7,0	3,66	1,39	0,818	45,0	23,49	198,4	89,3	7,27	12,3	36,6	25,1	104	103	68,0	x	x
A1-80t ₂₈	7,0	3,67	1,40	0,817	45,0	23,46	198,2	89,1	7,27	12,3	36,5	25,1	112		68,1	x	x
A1-81t ₂₈	7,0	3,71	1,41	0,798	44,4	23,45	196,0	87,0	7,27	12,0	35,6	24,6	93		69,7	x	x
A1-82t ₂₈	9,0	4,65	1,40	0,806	44,6	22,68	198,6	88,6	9,24	9,6	32,6	22,3	175	183	65,4	x	x
A1-83t ₂₈	9,0	4,63	1,40	0,818	45,0	23,25	198,6	89,4	9,19	9,7	32,9	22,6	197		66,2	x	x
A1-84t ₂₈	9,0	4,63	1,40	0,816	44,9	22,57	199,4	89,6	9,23	9,7	32,9	22,5	177		64,4	x	x
A2-85t ₂₈	3,0	1,73	1,48	0,715	41,7	23,17	200,5	83,6	3,47	24,1	47,7	32,6	38	38	79,9	x	x
A2-86t ₂₈	3,0	1,75	1,50	0,693	40,9	22,52	199,2	81,5	3,49	23,3	46,4	31,8	41		80,1	x	x
A2-87t ₂₈	3,0	1,74	1,49	0,709	41,5	23,47	199,6	82,8	3,47	23,9	47,3	32,4	35		81,6	x	x
A2-88t ₂₈	5,0	2,86	1,50	0,694	41,0	22,87	198,7	81,4	5,69	14,3	37,2	25,5	129	142	79,6	x	x
A2-89t ₂₈	5,0	2,84	1,49	0,708	41,4	23,22	199,8	82,8	5,68	14,6	37,9	25,9	142		79,3	x	x
A2-90t ₂₈	5,0	2,84	1,48	0,710	41,5	22,98	200,3	83,2	5,68	14,6	38,0	26,0	156		78,2	x	x
A2-91t ₂₈	7,0	3,88	1,48	0,716	41,7	23,44	200,5	83,6	7,79	10,7	33,2	22,6	247	259	77,7	x	x
A2-92t ₂₈	7,0	3,90	1,49	0,707	41,4	22,78	200,2	82,9	7,82	10,6	32,9	22,4	259		76,4	x	x
A2-93t ₂₈	7,0	3,91	1,49	0,705	41,4	23,03	199,4	82,5	7,79	10,6	32,7	22,4	271		77,4	x	x
A2-94t ₂₈	9,0	4,93	1,49	0,705	41,3	22,52	199,8	82,6	9,86	8,4	29,5	20,2	276	270	74,3	x	x
A2-95t ₂₈	9,0	4,91	1,48	0,711	41,5	23,14	200,3	83,2	9,84	8,5	29,7	20,3	259		75,7	x	x
A2-96t ₂₈	9,0	4,90	1,48	0,715	41,7	23,17	200,8	83,7	9,84	8,5	29,9	20,4	275		75,4	x	x

Tabela B.5 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 23% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ_d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0,45})	η /(C _{av}) ^{0,45}	q _t (KPa)	q _t média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A3-97t ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,609	37,8	22,91	200,6	75,9	3,70	20,5	42,1	28,7	72	68	92,8	x	x
A3-98t ₂₈	3,0	1,84	1,58	0,610	37,9	23,06	199,4	75,5	3,68	20,5	42,0	28,8	66		93,2	x	x
A3-99t ₂₈	3,0	1,84	1,58	0,610	37,9	23,15	199,9	75,7	3,69	20,5	42,1	28,8	66		93,6	x	x
A3-100t ₂₈	5,0	3,01	1,58	0,609	37,9	23,09	200,3	75,8	6,04	12,6	33,8	23,0	242	256	91,6	x	x
A3-101t ₂₈	5,0	3,02	1,58	0,608	37,8	23,31	199,7	75,5	6,03	12,5	33,6	23,0	271		92,7	x	x
A3-102t ₂₈	5,0	3,02	1,58	0,606	37,7	23,43	199,0	75,0	6,01	12,5	33,5	22,9	254		93,5	x	x
A3-103t ₂₈	7,0	4,15	1,58	0,605	37,7	23,02	199,6	75,3	8,29	9,1	29,1	19,9	271	265	90,2	x	x
A3-104t ₂₈	7,0	4,14	1,58	0,609	37,9	23,48	199,7	75,6	8,27	9,1	29,2	20,0	288		91,4	x	x
A3-105t ₂₈	7,0	4,16	1,58	0,603	37,6	23,33	199,2	74,9	8,28	9,1	29,0	19,8	237		91,7	x	x
A3-106t ₂₈	9,0	5,24	1,58	0,605	37,7	23,45	199,4	75,2	10,45	7,2	26,1	17,9	510	515	90,2	x	x
A3-107t ₂₈	9,0	5,25	1,58	0,601	37,5	23,29	198,8	74,7	10,44	7,1	26,0	17,8	527		90,1	x	x
A3-108t ₂₈	9,0	5,24	1,58	0,604	37,6	23,22	199,4	75,1	10,45	7,2	26,1	17,9	509		89,5	x	x

Tabela B.6 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 23% de umidade e 360 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{ep} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	q _t (KPa)	q _t média (KPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A1-118 ₃₆₀	3,0	1,66	1,42	0,792	44,2	23,46	194,9	86,1	3,23	26,7	50,8	35,2	44	44	73,0	x	x
A1-119 ₃₆₀	5,0	2,70	1,41	0,795	44,3	22,60	197,3	87,4	5,33	16,4	41,1	28,3	75	75	68,7	x	x
A1-120 ₃₆₀	7,0	3,68	1,40	0,809	44,7	23,27	196,9	88,0	7,25	12,1	36,1	24,9	118	118	68,2	x	x
A1-121 ₃₆₀	9,0	4,67	1,41	0,799	44,4	23,36	196,5	87,2	9,19	9,5	32,2	22,2	245	245	68,1	x	x
A2-122 ₃₆₀	3,0	1,78	1,52	0,670	40,1	23,15	196,1	78,7	3,49	22,6	44,9	31,0	50	50	85,1	x	x
A2-123 ₃₆₀	5,0	2,91	1,52	0,669	40,1	23,15	194,7	78,0	5,66	13,8	35,8	24,8	183	183	83,6	x	x
A2-124 ₃₆₀	7,0	3,92	1,49	0,698	41,1	22,28	200,4	82,4	7,87	10,5	32,6	22,2	297	285	75,7	x	x
A2-125 ₃₆₀	7,0	3,92	1,49	0,700	41,2	22,57	200,2	82,4	7,85	10,5	32,6	22,3	298		76,4	x	x
A2-126 ₃₆₀	7,0	3,95	1,50	0,687	40,7	23,24	197,1	80,3	7,79	10,3	31,9	21,9	261		80,2	x	x
A2-127 ₃₆₀	9,0	5,03	1,52	0,671	40,2	22,28	197,2	79,2	9,92	8,0	28,2	19,4	399		77,3	x	x
A2-128 ₃₆₀	9,0	5,05	1,52	0,666	40,0	22,57	196,0	78,4	9,89	7,9	27,9	19,3	367	392	78,8	x	x
A2-129 ₃₆₀	9,0	5,00	1,51	0,680	40,5	23,24	196,7	79,6	9,84	8,1	28,5	19,6	411		79,5	x	x
A3-130 ₃₆₀	3,0	1,87	1,59	0,592	37,2	23,26	197,0	73,3	3,67	19,9	40,8	28,1	84	84	96,8	x	x
A3-131 ₃₆₀	5,0	3,05	1,59	0,593	37,2	22,90	199,7	74,4	6,08	12,2	33,0	22,6	298	298	93,3	x	x
A3-132 ₃₆₀	7,0	4,16	1,58	0,601	37,5	22,65	199,3	74,8	8,30	9,0	28,9	19,7	316	316	89,4	x	x
A3-133 ₃₆₀	9,0	5,28	1,59	0,591	37,2	22,51	198,7	73,9	10,50	7,0	25,6	17,6	690	690	88,5	x	x

**APÊNDICE C – DADOS DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS
AOS ENSAIOS DE MEDIDAS DE RIGIDEZ INICIAL**

Tabela C.1 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 17% de umidade e 28 dias de cura

\Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ_d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{ep} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	$\eta/(C_{av})^{0.45}$	G _o (MPa)	G _o média (MPa)	S _r (%)	S _{rr} (%)	Sucção (KPa)
A1-1c ₂₈	3,0	1,63	1,39	0,825	45,2	16,62	200,2	90,5	3,26	27,8	53,2	36,3	6142	6142	49,7	x	x
A1-4c ₂₈	5,0	2,68	1,40	0,811	44,8	17,00	198,2	88,7	5,31	16,7	41,9	28,7	8349	8349	50,7	x	x
A1-7c ₂₈	7,0	3,68	1,40	0,812	44,8	16,70	199,5	89,4	7,34	12,2	36,5	24,9	9925	9925	48,8	x	x
A1-10c ₂₈	9,0	4,60	1,39	0,827	45,3	16,64	200,2	90,6	9,22	9,8	33,4	22,8	11590	11692	46,8	x	x
A1-11c ₂₈	9,0	4,63	1,40	0,816	44,9	16,63	199,6	89,7	9,24	9,7	33,0	22,5	11794		47,4	x	x
A2-13c ₂₈	3,0	1,73	1,48	0,712	41,6	16,60	201,0	83,5	3,49	24,0	47,6	32,4	7221	7258	57,5	x	x
A2-14c ₂₈	3,0	1,74	1,49	0,707	41,4	16,56	200,7	83,1	3,49	23,8	47,4	32,3	7294		57,7	x	x
A2-16c ₂₈	5,0	2,85	1,49	0,705	41,3	16,61	200,4	82,9	5,70	14,5	37,9	25,8	11262		56,9	x	x
A2-19c ₂₈	7,0	3,93	1,50	0,695	41,0	16,52	199,4	81,8	7,84	10,4	32,4	22,2	13125	13125	56,3	x	x
A2-22c ₂₈	9,0	4,93	1,49	0,704	41,3	17,10	199,6	82,5	9,85	8,4	29,5	20,1	14432	14372	56,5	x	x
A2-23c ₂₈	9,0	4,93	1,49	0,705	41,4	16,58	200,8	83,0	9,90	8,4	29,6	20,2	14313		54,7	x	x
A3-25c ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,607	37,8	17,35	200,2	75,6	3,70	20,4	42,0	28,6	9883	9929	70,5	x	x
A3-26c ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,607	37,8	17,44	200,4	75,7	3,70	20,4	42,0	28,6	9975		70,8	x	x
A3-28c ₂₈	5,0	3,02	1,58	0,606	37,7	16,60	201,4	75,9	6,09	12,5	33,7	22,9	14092	14092	66,2	x	x
A3-31c ₂₈	7,0	4,15	1,58	0,607	37,8	16,53	201,4	76,1	8,35	9,1	29,3	19,9	16490	16490	64,6	x	x
A3-34c ₂₈	9,0	5,23	1,58	0,609	37,8	17,47	200,4	75,8	10,48	7,2	26,4	18,0	18498	18656	66,8	x	x
A3-35c ₂₈	9,0	5,23	1,58	0,608	37,8	17,32	200,7	75,9	10,49	7,2	26,3	18,0	18814		66,2	x	x

Tabela C.2 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 17% de umidade e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ_d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η /(C _{av}) ^{0.45}	G _o (MPa)	G _o média (MPa)	S _r (%)	S _{rf} (%)	Sucção (KPa)
A1-37c ₉₀	3,0	1,62	1,39	0,831	45,4	16,88	200,4	91,0	3,25	28,0	53,5	36,5	6560	6560	50,0	x	x
A1-42c ₉₀	5,0	2,65	1,39	0,830	45,4	17,46	199,4	90,5	5,29	17,1	42,8	29,3	8951	8951	50,8	x	x
A1-43c ₉₀	7,0	3,65	1,39	0,826	45,2	16,68	200,3	90,6	7,31	12,4	37,0	25,3	10707	10707	47,9	x	x
A1-46c ₉₀	9,0	4,58	1,38	0,834	45,5	17,46	199,7	90,8	9,15	9,9	33,5	22,9	12395	12525	48,7	x	x
A1-47c ₉₀	9,0	4,57	1,38	0,838	45,6	16,77	201,6	92,0	9,22	10,0	33,8	23,0	12655		46,5	x	x
A2-49c ₉₀	3,0	1,73	1,48	0,714	41,7	17,46	199,8	83,3	3,46	24,1	47,6	32,5	7956	8027	60,2	x	x
A2-50c ₉₀	3,0	1,73	1,48	0,717	41,8	17,27	200,5	83,7	3,47	24,1	47,8	32,6	8098		59,3	x	x
A2-54c ₉₀	5,0	2,83	1,48	0,716	41,7	17,08	201,0	83,9	5,69	14,8	38,4	26,1	11889	11889	57,6	x	x
A2-56c ₉₀	7,0	3,90	1,48	0,709	41,5	16,97	200,4	83,1	7,81	10,6	33,0	22,5	13941	13941	56,7	x	x
A2-58c ₉₀	9,0	4,92	1,48	0,710	41,5	17,50	200,0	83,0	9,83	8,4	29,7	20,3	15391	15463	57,3	x	x
A2-59c ₉₀	9,0	4,91	1,48	0,712	41,6	17,49	199,9	83,1	9,82	8,5	29,7	20,3	15534		57,2	x	x
A3-61c ₉₀	3,0	1,84	1,58	0,609	37,9	16,81	201,2	76,2	3,71	20,5	42,2	28,7	10890	10906	68,0	x	x
A3-63c ₉₀	3,0	1,85	1,58	0,609	37,8	16,89	200,9	76,0	3,71	20,5	42,1	28,7	10922		68,4	x	x
A3-66c ₉₀	5,0	3,02	1,58	0,609	37,8	17,42	200,0	75,7	6,03	12,5	33,7	23,0	15154	15154	69,2	x	x
A3-68c ₉₀	7,0	4,16	1,58	0,602	37,6	16,72	200,3	75,3	8,33	9,0	29,0	19,8	17622	17622	65,8	x	x
A3-70c ₉₀	9,0	5,24	1,58	0,604	37,6	16,54	201,2	75,8	10,55	7,2	26,2	17,9	20654	20465	63,7	x	x
A3-71c ₉₀	9,0	5,23	1,58	0,607	37,8	16,55	201,4	76,1	10,54	7,2	26,4	17,9	20277		63,5	x	x

Tabela C.3 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 20% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ_d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η /(C _{av}) ^{0.45}	G _o (MPa)	G _o média (MPa)	S _r (%)	S _{ri} (%)	Sucção (KPa)
A1-109c ₂₈	3,0	1,66	1,42	0,790	44,1	20,31	195,5	86,3	3,24	26,6	50,8	35,2	5194	5300	63,3	x	x
A1-110c ₂₈	3,0	1,66	1,42	0,793	44,2	20,18	195,8	86,6	3,24	26,7	51,0	35,2	5406		62,7	x	x
A1-112c ₂₈	5,0	2,67	1,40	0,819	45,0	20,45	198,3	89,2	5,29	16,9	42,2	28,9	8688	8736	60,4	x	x
A1-113c ₂₈	5,0	2,66	1,39	0,822	45,1	20,41	198,8	89,7	5,30	16,9	42,4	29,0	8784		60,0	x	x
A1-115c ₂₈	7,0	3,71	1,41	0,795	44,3	20,09	196,5	87,0	7,30	11,9	35,6	24,5	10952	10739	59,9	x	x
A1-116c ₂₈	7,0	3,65	1,39	0,826	45,2	20,43	199,2	90,2	7,27	12,4	36,9	25,3	10526		58,6	x	x
A1-118c ₂₈	9,0	4,64	1,40	0,813	44,8	20,47	197,7	88,6	9,17	9,7	32,7	22,5	12458	12471	58,6	x	x
A1-119c ₂₈	9,0	4,64	1,40	0,812	44,8	20,10	198,6	89,0	9,21	9,7	32,8	22,5	12485		57,6	x	x
A2-121c ₂₈	3,0	1,76	1,50	0,690	40,8	19,98	198,1	80,9	3,48	23,2	46,1	31,7	6870	7038	71,4	x	x
A2-122c ₂₈	3,0	1,75	1,50	0,696	41,0	20,45	197,9	81,2	3,46	23,4	46,4	31,9	7206		72,4	x	x
A2-124c ₂₈	5,0	2,83	1,48	0,717	41,8	20,39	200,4	83,7	5,66	14,8	38,3	26,2	11185	11132	68,7	x	x
A2-125c ₂₈	5,0	2,84	1,49	0,707	41,4	19,87	200,3	82,9	5,70	14,6	37,9	25,9	11078		68,0	x	x
A2-127c ₂₈	7,0	3,89	1,48	0,712	41,6	19,83	200,7	83,5	7,81	10,7	33,1	22,6	13406	13681	66,1	x	x
A2-128c ₂₈	7,0	3,94	1,50	0,693	40,9	19,77	198,8	81,3	7,82	10,4	32,2	22,1	13956		67,7	x	x
A2-130c ₂₈	9,0	4,99	1,50	0,685	40,7	19,93	197,6	80,4	9,86	8,1	28,7	19,7	14718	14805	67,7	x	x
A2-131c ₂₈	9,0	4,92	1,48	0,709	41,5	19,54	201,2	83,4	9,90	8,4	29,7	20,2	14893		64,1	x	x
A3-133c ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,604	37,7	20,43	199,8	75,3	3,70	20,3	41,8	28,5	8244	8336	83,3	x	x
A3-134c ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,607	37,8	20,44	200,2	75,6	3,70	20,5	42,0	28,7	8427		82,9	x	x
A3-136c ₂₈	5,0	3,02	1,58	0,608	37,8	20,44	199,6	75,5	6,02	12,5	33,6	23,0	11681	11813	81,2	x	x
A3-137c ₂₈	5,0	3,04	1,59	0,597	37,4	20,43	198,9	74,4	6,04	12,3	33,1	22,7	11946		82,7	x	x
A3-139c ₂₈	7,0	4,14	1,58	0,609	37,9	20,18	200,8	76,0	8,31	9,1	29,3	20,0	14916	14894	78,5	x	x
A3-140c ₂₈	7,0	4,14	1,58	0,609	37,9	20,31	200,4	75,9	8,30	9,1	29,3	20,0	14871		79,0	x	x
A3-142c ₂₈	9,0	5,25	1,58	0,602	37,6	20,45	199,6	75,0	10,48	7,2	26,1	17,8	16749	16824	79,0	x	x
A3-143c ₂₈	9,0	5,23	1,58	0,606	37,7	19,97	201,0	75,9	10,52	7,2	26,3	17,9	16899		76,6	x	x

Tabela C.4 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 20% de umidade e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	G _o (MPa)	G _o média (MPa)	S _r (%)	S _{rr} (%)	Sucção (KPa)
A1-145c ₉₀	3,0	1,65	1,41	0,804	44,6	19,58	197,9	88,2	3,26	27,1	51,8	35,6	5784	5903	60,0	x	x
A1-146c ₉₀	3,0	1,65	1,41	0,801	44,5	20,50	196,3	87,3	3,24	27,0	51,5	35,5	6023		63,1	x	x
A1-148c ₉₀	5,0	2,69	1,41	0,802	44,5	20,44	196,5	87,4	5,29	16,5	41,3	28,5	9476	9476	61,6	x	x
A1-151c ₉₀	7,0	3,66	1,39	0,822	45,1	20,30	199,0	89,7	7,28	12,3	36,7	25,2	11537	11488	58,6	x	x
A1-153c ₉₀	7,0	3,65	1,39	0,826	45,2	20,44	199,1	90,0	7,27	12,4	36,9	25,3	11440		58,7	x	x
A1-155c ₉₀	9,0	4,64	1,40	0,811	44,8	19,74	198,8	89,0	9,23	9,6	32,8	22,4	12785	13106	56,6	x	x
A1-156c ₉₀	9,0	4,63	1,40	0,816	44,9	20,09	198,8	89,4	9,20	9,7	32,9	22,6	13428		57,3	x	x
A2-157c ₉₀	3,0	1,73	1,48	0,715	41,7	20,02	200,8	83,7	3,48	24,1	47,8	32,6	8144	8144	69,0	x	x
A2-160c ₉₀	5,0	2,84	1,49	0,708	41,4	19,70	200,9	83,3	5,71	14,6	38,0	25,9	12105	11982	67,3	x	x
A2-162c ₉₀	5,0	2,83	1,48	0,717	41,8	20,36	200,8	83,8	5,67	14,8	38,4	26,2	11858		68,6	x	x
A2-163c ₉₀	7,0	3,89	1,48	0,713	41,6	20,21	200,8	83,6	7,81	10,7	33,1	22,6	14159	14439	67,2	x	x
A2-164c ₉₀	7,0	3,91	1,49	0,704	41,3	20,43	199,4	82,4	7,80	10,6	32,7	22,4	14718		68,8	x	x
A2-166c ₉₀	9,0	4,92	1,48	0,710	41,5	20,34	200,2	83,1	9,84	8,5	29,7	20,3	16348	16313	66,6	x	x
A2-168c ₉₀	9,0	4,95	1,49	0,700	41,2	20,01	199,6	82,2	9,87	8,3	29,3	20,1	16278		66,5	x	x
A3-169c ₉₀	3,0	1,85	1,58	0,608	37,8	20,26	200,6	75,9	3,70	20,5	42,1	28,7	8999	9268	82,1	x	x
A3-171c ₉₀	3,0	1,84	1,58	0,610	37,9	20,35	200,6	76,0	3,70	20,5	42,2	28,8	9537		82,3	x	x
A3-172c ₉₀	5,0	3,03	1,58	0,601	37,5	19,67	200,9	75,4	6,09	12,4	33,5	22,8	12808	13082	79,1	x	x
A3-173c ₉₀	5,0	3,02	1,58	0,605	37,7	20,22	200,4	75,5	6,06	12,5	33,6	22,9	13356		80,8	x	x
A3-175c ₉₀	7,0	4,15	1,58	0,606	37,7	20,45	200,8	75,8	8,33	9,1	29,2	19,9	15860	15675	80,0	x	x
A3-176c ₉₀	7,0	4,15	1,58	0,607	37,8	19,63	201,8	76,2	8,37	9,1	29,3	19,9	15490		76,6	x	x
A3-179c ₉₀	9,0	5,24	1,58	0,604	37,7	20,42	200,7	75,6	10,52	7,2	26,2	17,9	18376	18228	78,6	x	x
A3-180c ₉₀	9,0	5,23	1,58	0,608	37,8	20,08	201,0	76,0	10,51	7,2	26,4	18,0	18080		76,8	x	x

Tabela C.5 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 23% de umidade e 28 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ_d (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0,45})	$\eta/(C_{av})^{0,45}$	G _o (MPa)	G _o média (MPa)	S _r (%)	S _{rr} (%)	Sucção (KPa)
A1-217c ₂₈	3,0	1,66	1,42	0,793	44,2	23,46	195,	86,4	3,24	26,7	50,9	35,2	4364	4364	72,9	x	x
A1-220c ₂₈	5,0	2,71	1,42	0,790	44,1	22,80	196,4	86,7	5,32	16,3	40,9	28,2	8329	8329	69,7	x	x
A1-223c ₂₈	7,0	3,67	1,40	0,817	45,0	23,39	198,5	89,3	7,28	12,3	36,5	25,1	10456	10456	67,8	x	x
A1-226c ₂₈	9,0	4,65	1,40	0,808	44,7	23,35	197,5	88,3	9,19	9,6	32,5	22,4	12351	12172	67,2	x	x
A1-227c ₂₈	9,0	4,66	1,41	0,803	44,5	22,63	198,0	88,2	9,23	9,6	32,4	22,3	11993		65,5	x	x
A2-229c ₂₈	3,0	1,78	1,52	0,672	40,2	22,76	196,2	78,8	3,48	22,6	44,9	31,0	6011	6012	83,5	x	x
A2-230c ₂₈	3,0	1,75	1,49	0,698	41,1	22,90	199,3	81,9	3,49	23,5	46,7	32,0	6012		80,8	x	x
A2-232c ₂₈	5,0	2,85	1,49	0,701	41,2	23,36	198,9	82,0	5,67	14,4	37,5	25,7	9946	9946	80,5	x	x
A2-235c ₂₈	7,0	3,93	1,50	0,696	41,1	22,93	198,8	81,6	7,81	10,5	32,4	22,2	12393	12393	78,0	x	x
A2-238c ₂₈	9,0	4,92	1,48	0,709	41,5	23,16	200,1	83,0	9,85	8,4	29,7	20,3	14974	14869	76,0	x	x
A2-239c ₂₈	9,0	4,95	1,49	0,698	41,1	22,64	199,6	82,0	9,88	8,3	29,3	20,0	14763		75,5	x	x
A3-241c ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,609	37,9	23,47	199,8	75,6	3,69	20,5	42,0	28,7	6868	6540	94,9	x	x
A3-242c ₂₈	3,0	1,85	1,58	0,607	37,8	23,31	199,9	75,5	3,69	20,5	42,0	28,7	6212		94,6	x	x
A3-244c ₂₈	5,0	3,04	1,59	0,596	37,3	23,05	198,6	74,2	6,04	12,3	33,0	22,6	11065	11065	93,4	x	x
A3-247c ₂₈	7,0	4,17	1,59	0,597	37,4	23,13	198,7	74,3	8,29	9,0	28,7	19,6	14429	14429	91,9	x	x
A3-250c ₂₈	9,0	5,23	1,58	0,606	37,7	23,03	199,8	75,4	10,46	7,2	26,2	17,9	16242	16242	88,4	x	x

Tabela C.6 – Dados gerais dos corpos-de-prova de caulim-cal com 23% de umidade e 90 dias de cura

Corpo-de-prova	Ca (%)	C _{av} (%)	γ _a (g/cm ³)	e	η (%)	ω (%)	V _{cp} (cm ³)	V _v (cm ³)	V _{ca} (cm ³)	V _v /V _{ca}	(V _v)/(V _{ca} ^{0.45})	η/(C _{av}) ^{0.45}	G _o (MPa)	G _o média (MPa)	S _r (%)	S _{rr} (%)	Sucção (KPa)
A1-253c ₉₀	3,0	1,64	1,40	0,811	44,8	23,44	197,3	88,4	3,23	27,3	52,1	35,9	4911	4911	71,2	x	x
A1-257c ₉₀	5,0	2,67	1,40	0,815	44,9	23,00	198,6	89,2	5,31	16,8	42,1	28,8	8727	8727	68,2	x	x
A1-260c ₉₀	7,0	3,67	1,40	0,815	44,9	23,00	198,7	89,2	7,30	12,2	36,5	25,0	10919	10919	66,9	x	x
A1-263c ₉₀	9,0	4,63	1,40	0,817	45,0	22,69	199,6	89,8	9,24	9,7	33,0	22,6	13252	12998	64,6	x	x
A1-264c ₉₀	9,0	4,63	1,40	0,814	44,9	22,95	199,3	89,5	9,24	9,7	32,9	22,5	12745		65,6	x	x
A2-265c ₉₀	3,0	1,73	1,48	0,717	41,8	23,12	201,6	84,2	3,49	24,1	48,0	32,6	6627	6649	79,5	x	x
A2-266c ₉₀	3,0	1,74	1,49	0,706	41,4	22,82	200,4	83,0	3,49	23,8	47,3	32,3	6670		79,6	x	x
A2-270c ₉₀	5,0	2,84	1,48	0,710	41,5	23,19	200,0	83,0	5,68	14,6	38,0	26,0	10880	10880	79,0	x	x
A2-271c ₉₀	7,0	3,90	1,48	0,710	41,5	22,96	199,9	83,0	7,79	10,7	33,0	22,5	13335	13335	76,7	x	x
A2-274c ₉₀	9,0	4,90	1,48	0,716	41,7	22,87	201,0	83,9	9,85	8,5	30,0	20,4	15690	15528	74,3	x	x
A2-275c ₉₀	9,0	4,92	1,49	0,707	41,4	22,85	200,5	83,1	9,87	8,4	29,6	20,2	15366		75,1	x	x
A3-278c ₉₀	3,0	1,84	1,58	0,610	37,9	23,32	199,6	75,6	3,68	20,5	42,1	28,8	7835	7544	94,2	x	x
A3-279c ₉₀	3,0	1,85	1,59	0,601	37,5	22,99	198,8	74,6	3,69	20,2	41,5	28,4	7253		94,3	x	x
A3-280c ₉₀	5,0	3,02	1,58	0,606	37,7	23,11	199,4	75,3	6,03	12,5	33,5	22,9	12322	12322	92,1	x	x
A3-283c ₉₀	7,0	4,14	1,58	0,609	37,8	22,69	201,2	76,1	8,34	9,1	29,3	20,0	15304	15304	88,4	x	x
A3-288c ₉₀	9,0	5,23	1,58	0,607	37,8	23,48	199,5	75,4	10,44	7,2	26,2	17,9	17713	17713	90,0	x	x