

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

**Durabilidade, Rigidez e Avaliação do Ciclo de Vida de um Solo
Dispersivo Estabilizado com Cal.**

Néstor Masamune Kanazawa Villalba

Porto Alegre
2015

NESTOR MASAMUNE KANAZAWA VILLALBA

**DURABILIDADE, RIGIDEZ E ANÁLISE DO CICLO DE VIDA
DE UM SOLO DISPERSIVO ESTABILIZADO COM CAL**

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

Porto Alegre
2015

KANAZAWA VILLALBA, NESTOR MASAMUNE
DURABILIDADE, RIGIDEZ E AVALIAÇÃO DO CICLO DE
VIDA DE UM SOLO DISPERSIVO ESTABILIZADO COM CAL /
NESTOR MASAMUNE KANAZAWA VILLALBA. -- 2015.
154 f.

Orientador: NILO CESAR CONSOLI.
Coorientadora: ANA CAROLINA BADALOTTI PASSUELLO.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-
RS, 2015.

1. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS. 2. SOLO-CAL. 3.
DURABILIDADE. 4. RIGIDEZ. 5. ACV. I. CONSOLI, NILO
CESAR, orient. II. BADALOTTI PASSUELLO, ANA
CAROLINA, coorient. III. Título.

NESTOR MASAMUNE KANAZAWA VILLALBA

DURABILIDADE, RIGIDEZ E ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE UM SOLO DISPERSIVO ESTABILIZADO COM CAL

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

Porto Alegre, 9 de junho de 2015

Nilo Cesar Consoli
Ph.D. pela Concordia University
Orientador

Ana Carolina Badalotti Passuello
Ph.D. pela Universitat Rovira i Virgili
Co-Orientadora

Prof. Armando Miguel Awruch
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Andrea Diambra (BRISTOL)
Ph.D. pela University of Bristol

Prof. Antônio Thomé (UPF)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

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

Prof.^a Cecília Gravina da Rocha (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.^a Sabrina Rodrigues Sousa (UPF)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho a minha esposa Carmen, pela
compreensão durante o período de seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente a Deus e nossa MTA, pela vida.

À minha esposa Carmen pela confiança, paciência, apoio incondicional e pela compreensão da ausência. *Te amo mucho mi vida.*

A todos os meus familiares e amigos pelo constante apoio e carinho, em especial às famílias Kanazawa, Benítez, Domínguez, Martínez e Quiñónez.

Ao Professor Ph.D. Nilo Cesar Consoli, pelos conhecimentos transmitidos, estímulo e a incrível motivação. Muito obrigado pela confiança, interesse, disponibilidade, exemplo e amizade. Meus sinceros agradecimentos e admiração.

À Professora Ph.D. Ana Carolina Passuello, agradeço o estímulo, a disponibilidade e a atenção dispensada ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor Lucas Festugato, pela amizade, excelente recepção, interesse, a disponibilidade e pelos conhecimentos compartilhados durante os desenvolvimentos da pesquisa. Muito obrigado Professor.

Aos Professores Dr. Antonio Aquino e M.Sc. Rubén López, pela confiança, apoio, transmissão das experiências, e por conduzir o início deste mestrado.

A todos os professores do PPGECC da UFRGS, que com conhecimentos e dedicação proporcionaram de aulas excelentes.

À meu irmão e colega M.Sc. Alejandro Quiñónez, pela amizade e companheirismo durante a realização deste mestrado, pela preocupação compartilhada no operativo de transporte de solo, pela incrível aventura.

À equipe do Laboratório ENVIRONGEO/LEGG. Muito obrigado pela disponibilidade, pela troca de ideias, pela amizade e pelos momentos de descontração. Em especial ao laboratorista João Diniz pelo, auxílio, amizade e dedicação, e todos aos auxiliares de pesquisa. Aos meus amigos, Lidiane, Mozzara, Lucas, Alisson, Jorge, Sergio, Naloan, David, Ricardo, Vitor, pela disponibilidade, apoio e amizade.

Aos colegas e amigos do Mestrado, Ale, Ali, Hermann, Paola, Lucas, Ricardo, William, Luís, Pedro, José, Rodrigo, Diego. Obrigado pelo companheirismo, pelas reuniões, discussões, estudos e os encontros para compartilhar momentos inolvidável.

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

*“Education is the most powerful weapon, which you can
use to change the world”*

Nelson Mandela

RESUMO

KANAZAWA, N. M. **Durabilidade, Rigidez e Análise do Ciclo de Vida de um Solo Dispersivo Estabilizado com Cal.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A capacidade de manter a estabilidade e integridade durante o tempo de exposição às forças destrutivas do intemperismo é um dos aspectos mais importantes da estabilização de solos em projetos de pavimentos. Esta dissertação apresenta resultados de um estudo laboratorial sobre o comportamento mecânico de um solo dispersivo estabilizado com cal. O solo estudado é um solo sedimentar de sedimentos quaternários pertencente à denominada região ocidental do Paraguai. O solo dispersivo se caracteriza por apresentar teores significativos de sódio e por apresentar erosão hídrica acelerada. O objetivo deste estudo foi avaliar a durabilidade de misturas de Solo-Cal submetidos a ciclos de molhagem e secagem. A resistência à compressão simples e resistência à vácuo saturação também foram examinadas para avaliar o desempenho de misturas de Solo-Cal. Medição da velocidade de pulso de ultra-som foi realizado como teste não destrutivo para monitorizar a rigidez das misturas. Os efeitos do tempo de cura, das características de compactação e do teor de cal, foram avaliados. Finalmente, desde um enfoque ambiental através da ferramenta de avaliação do ciclo de vida (ACV) foram avaliadas todas as misturas em função aos impactos ambientais potenciais gerados na construção de 1 m³ de sub-base de Solo-Cal. Verificou-se que a durabilidade, a rigidez e a resistência de solos estabilizados com cal aumentam com o tempo de cura, com a energia de compactação e com o aumento do teor de cal. Além disso, a dispersibilidade intermediária (ND4) que o solo apresentava em seu estado natural, muda para não dispersivo (ND1) com a adição de 2% de cal. Em conclusão ressalta-se que a mistura SC3-5 apresenta um melhor comportamento mecânico comparável com a mistura SC3-7, mas, com um menor impacto potencial gerado.

Palavras-chave: *Estabilização de solos. Solo-Cal. Durabilidade. Rigidez. ACV.*

ABSTRACT

KANAZAWA, N. M. **Durabilidade, Rigidez e Análise do Ciclo de Vida de um Solo Dispersivo Estabilizado com Cal.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The ability to retain stability and integrity during the exposure time to the destructive forces of weathering is one of the most important aspects of soil stabilization in pavements design. This thesis presents the results of a laboratory study of the mechanical behavior of a dispersive soil stabilized with lime. The studied soil is a sedimentary soil of the quaternary sediments belonging to the so called western region of Paraguay. The dispersive soil is characterized by having significant levels of sodium and accelerated erosion. The objective of this study was to evaluate the durability of soil-lime mixtures subjected to wetting and drying cycles. Resistance to simple compression and resistance to vacuum saturation were also examined to assess the performance of soil-lime mixtures. Measurement of the ultrasonic pulse velocity was performed as non-destructive testing for monitoring the stiffness of the blends. The effects of curing time, the compression characteristics and lime content, were evaluated. Finally, all mixtures were evaluated from an environmental viewpoint by the life cycle assessment (LCA). All mixtures were evaluated according to the environmental impact in the construction of 1 m³ of Soil-Lime. It was found that durability, rigidity and resistance of soil stabilized with lime increases with cure time, with the energy of compaction and with increased lime content. Moreover, the dispersibility intermediate (ND4) showed that the soil in its natural state, changes to non-dispersive (ND1) with the addition of 2% lime. In conclusion it is emphasized that the SC3-5 mixture has a better mechanical behavior comparable to SC3-7 mix, but with less potential impact generated.

Key-words: *Soil stabilization, Soil-Lime, Durability. Stiffness. ACV.*

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA..... | 11 |
| 1.2 OBJETIVOS | 12 |
| 1.2.1 Objetivo Geral..... | 12 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos..... | 12 |
| 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO | 13 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA | 14 |
| 2.1 SOLOS DISPERSIVOS | 14 |
| 2.1.1 Histórico..... | 14 |
| 2.1.2 O Fenômeno da Dispersão | 15 |
| 2.1.3 Identificação de Solos Dispersivos | 19 |
| 2.1.4 Estabilização de Solos Dispersivos..... | 27 |
| 2.2 VISÃO GERAL SOBRE A TÉCNICA DO SOLO-CAL | 28 |
| 2.2.1 Materiais Utilizados no Solo-Cal..... | 30 |
| 2.2.1.1 Solo..... | 30 |
| 2.2.1.2 Cal..... | 31 |
| 2.2.1.3 Água | 31 |
| 2.2.2 Reações Solo-Cal | 32 |
| 2.2.3 Dosagem Solo-Cal | 34 |
| 2.2.4 Impactos Ambientais da Cal | 35 |
| 2.3 VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DO SOLO-CAL.... | 36 |
| 2.3.1 Efeito da Cal..... | 36 |
| 2.3.2 Efeito da Densidade e Compactação..... | 36 |
| 2.3.3 Efeito do Teor de Umidade e da Relação Água/Cal | 37 |
| 2.3.4 Efeito do tempo de Cura | 38 |
| 2.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM CAL . | 40 |
| 2.4.1 Resistência à Compressão Simples | 40 |
| 2.4.2 Resistência à Vácuo-Saturação | 41 |
| 2.4.3 Rigidez Inicial | 42 |
| 2.4.4 Durabilidade..... | 42 |
| 2.5 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE SOLOS MELHORADOS | 44 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.5.1 | Impactos ambientais relacionados ao melhoramento de solos..... | 44 |
| 2.5.2 | Avaliação do Ciclo de Vida | 46 |
| 2.5.2.1 | Definição dos Objetivos e Escopo..... | 47 |
| 2.5.2.2 | Inventário do ciclo de Vida | 47 |
| 2.5.2.3 | Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida | 48 |
| 2.5.2.4 | Interpretação | 51 |
| 3 | PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 52 |
| 3.1 | CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 52 |
| 3.2 | VARIAVEIS INVESTIGADAS..... | 54 |
| 3.3 | MATERIAIS..... | 55 |
| 3.3.1 | Solo | 55 |
| 3.3.2 | Cal | 56 |
| 3.3.3 | Água | 57 |
| 3.4 | MÉTODOS | 57 |
| 3.4.1 | Coleta de Amostras | 57 |
| 3.4.2 | Preparação das Amostras | 58 |
| 3.4.3 | Ensaio de Caracterização..... | 59 |
| 3.4.4 | Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem..... | 60 |
| 3.4.4.1 | Moldagem e cura dos corpos-de-prova | 60 |
| 3.4.4.2 | Procedimento de Ensaio | 63 |
| 3.4.5 | Ensaio de Resistência à Compressão Simples | 63 |
| 3.4.5.1 | Moldagem e cura dos corpos-de-prova | 64 |
| 3.4.5.2 | Procedimento de Ensaio | 64 |
| 3.4.6 | Ensaio de Resistência à Vácuo-Saturação | 65 |
| 3.4.6.1 | Moldagem e cura dos corpos-de-prova | 65 |
| 3.4.6.2 | Procedimento de Ensaio | 66 |
| 3.4.7 | Ensaio de Medidas de Rigidez Inicial | 67 |
| 3.4.7.1 | Moldagem e cura dos corpos-de-prova | 67 |
| 3.4.7.2 | Procedimento de Ensaio | 67 |
| 3.4.8 | Ensaio do Furo de Agulha (<i>Pinhole</i>)..... | 70 |
| 3.5 | PROGRAMA DE ENSAIOS..... | 71 |
| 3.5.1 | Definição dos Pontos de Moldagem..... | 71 |
| 3.5.2 | Programa de Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem..... | 73 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.5.3 | Programa de Ensaio de Resistência à Compressão Simples e à Vácuo-Saturação | 74 |
| 3.5.4 | Programa de Ensaio de Medidas de Rigidez Inicial | 74 |
| 3.5.5 | Programa de Ensaio do Furo de Agulha (<i>Pinhole</i>)..... | 74 |
| 3.6 | AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE MISTURAS DE SOLO-CAL..... | 75 |
| 3.6.1 | Estudo de Caso | 75 |
| 3.6.2 | Delimitações e Limitações da Pesquisa | 75 |
| 3.6.3 | Definição do objetivo e escopo | 76 |
| 3.6.3.1 | Definição da unidade funcional..... | 76 |
| 3.6.3.2 | Coleta de dados do ciclo de vida | 76 |
| 3.6.3.3 | Definição do sistema de produto | 77 |
| 3.6.4 | Inventário do Ciclo de Vida | 80 |
| 3.6.4.1 | Produção de Cal Hidratada..... | 81 |
| 3.6.4.2 | Transporte da Cal..... | 81 |
| 3.6.4.3 | Extração do Solo..... | 83 |
| 3.6.4.4 | Transporte do Solo | 83 |
| 3.6.4.5 | Construção de 1 m ³ de Solo-Cal..... | 84 |
| 3.6.5 | Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida | 84 |
| 3.6.6 | Interpretação..... | 85 |
| 4 | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 86 |
| 4.1 | ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO..... | 86 |
| 4.2 | ENSAIOS DE DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM | 88 |
| 4.2.1 | Efeito do Teor de Cal e do Peso Específico Aparente Seco | 88 |
| 4.2.2 | Efeito do Tempo de Cura | 90 |
| 4.3 | ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E À VÁCUO-SATURÇÃO..... | 93 |
| 4.3.1 | Efeito do Teor de Cal e do Peso Específico Aparente Seco | 93 |
| 4.3.2 | Efeito do Tempo de Cura | 94 |
| 4.3.3 | Relação Vazios/Cal | 96 |
| 4.4 | ENSAIOS DE MEDIDAS DE RIGIDEZ INICIAL..... | 97 |
| 4.4.1 | Efeito do Teor de Cal e do Tempo de Cura | 98 |
| 4.4.2 | Efeito do Peso Específico Aparente Seco | 99 |
| 4.4.3 | Relação Vazios/Cal | 101 |
| 4.5 | ENSAIOS DO FURO DE AGULHA (<i>PINHOLE</i>) | 107 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.6 | AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) | 108 |
| 4.6.1 | Comparativo dos Impactos Ambientais | 110 |
| 4.6.1.1 | Acidificação..... | 110 |
| 4.6.1.2 | Depleção de recursos não renováveis..... | 111 |
| 4.6.1.3 | Eutrofização..... | 111 |
| 4.6.1.4 | Depleção da camada de ozônio | 112 |
| 4.6.1.5 | Oxidação fotoquímica | 113 |
| 4.6.1.6 | Demanda de energia acumulada..... | 113 |
| 4.6.1.7 | Aquecimento global ou Mudança climática | 115 |
| 4.6.1.8 | Comportamento mecânico vs avaliação ambiental de solos estabilizados com cal 115 | |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 118 |
| 5.1 | CONCLUSÕES | 118 |
| 5.2 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 121 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 122 |
| | APÊNDICE A | 134 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - Limites de consistência: solos dispersivos versus solos não dispersivos. Fonte: Sherard et al. (1975) - | 19 |
| Figura 2.2 - Padrões de dispersão dos solos pelo percentual de sódio e total de sais. Fonte: Sherard et al. (1976) | 23 |
| Figura 2.3 - Esquema do Ensaio de Pinhole. Fonte: Furtado e Machado (1982)..... | 24 |
| Figura 2.4 - Fluxograma orientativo para avaliação dos resultados. Fonte: ABNT-NBR 14114/98)..... | 25 |
| Figura 2.5 - Mecanismo de troca de cátions. Fonte: Prusinski e Bahattacharja (1999) | 33 |
| Figura 2.6 - Mecanismo de estabilização Solo-Cal. Fonte: Ingles e Metcalf (1972, apud THOMÉ,1994)..... | 34 |
| Figura 2.7 - Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal. Fonte: Ingles e Metcalf (1972) | 39 |
| Figura 2.8 - Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias. Fonte: Ingles e Metcalf (1972)..... | 40 |
| Figura 3.1 - Formações Geológicas do Paraguai. Fonte: González (2000)..... | 56 |
| Figura 3.2 - Coleta e armazenamento de amostras..... | 58 |
| Figura 3.3 - Armazenamento das amostras | 59 |
| Figura 3.4 - Corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura | 61 |
| Figura 3.5 - Corpos-de-prova na câmara de cura | 62 |
| Figura 3.6 - Ciclos de molhagem, secagem e escovagem | 63 |
| Figura 3.7 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples. | 65 |
| Figura 3.8- Corpos-de-prova e execução do ensaio de vácuo-saturação..... | 66 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.9 - Partes componentes do equipamento <i>Pundit Lab Plus</i> | 68 |
| Figura 3.10 - Execução do Ensaio de Medidas de Rigidez Inicial..... | 69 |
| Figura 3.11 - Exemplos de Ondas no equipamento ultrassônico <i>Pundit Lab Plus</i> | 69 |
| Figura 3.12 - Corpo-de-prova e execução do ensaio <i>Pinhole</i> | 70 |
| Figura 3.13 - Curvas de Compactação..... | 71 |
| Figura 3.14 - Variação do LL, LP e IP do Solo-Cal versus Teor de Cal..... | 72 |
| Figura 3.15 - pH do Solo-Cal versus Teor de Cal | 73 |
| Figura 3.16 - Classificação do solo quanto a dispersibilidade no ensaio <i>Pinhole</i> | 75 |
| Figura 3.17 - Sistema de produto “do berço ao portão” da construção 1 m ³ de uma camada de Solo-Cal..... | 77 |
| Figura 4.1 - Curva granulométrica do solo..... | 86 |
| Figura 4.2 - Resultado dentro dos Padrões de Dispersão de Solos. Adaptado de Sherald et al. (1976) | 87 |
| Figura 4.3 - Perda de Massa Acumulada versus N° de Ciclos – Solo-Cal: 3% - γ_d :1.60, 1.75 e 1,90 g/cm ³ - (28 dias de cura)..... | 88 |
| Figura 4.4 - Perda de Massa Acumulada versus N° de Ciclos – Solo-Cal: 5% - γ_d :1.60, 1.75 e 1,90 g/cm ³ - (28 dias de cura)..... | 89 |
| Figura 4.5 - Perda de Massa Acumulada versus N° de Ciclos – Solo-Cal: 7% - γ_d :1.60, 1.75 e 1,90 g/cm ³ - (28 dias de cura)..... | 90 |
| Figura 4.6 - Perda de Massa Acumulada versus N° de Ciclos – Solo-Cal: 5% - γ_d :1,60 g/cm ³ (7, 14, 28 e 60 dias de cura)..... | 91 |
| Figura 4.7 - Perda de Massa Acumulada versus N° de Ciclos – Solo-Cal: 5% - γ_d :1,75 g/cm ³ (7, 14, 28 e 60 dias de cura)..... | 92 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.8 - Perda de Massa Acumulada versus N° de Ciclos – Solo-Cal: 5% - γ_d :1,90 g/cm ³ (7, 14, 28 e 60 dias de cura)..... | 92 |
| Figura 4.9 - Resistência à Compressão Simples do Solo-Cal - 28 dias de cura..... | 93 |
| Figura 4.10 - Resistência à Vácuo-Saturação do Solo-Cal - 28 dias de cura..... | 94 |
| Figura 4.11 - Resistência à Compressão Simples e Resistência à Vácuo-Saturação do Solo-Cal - γ_d :1,60 g/cm ³ (7, 14, 28 e 60 dias)..... | 95 |
| Figura 4.12 - Resistência à Compressão Simples e Resistência à Vácuo-Saturação do Solo-Cal - γ_d :1,75 g/cm ³ (7, 14, 28 e 60 dias)..... | 95 |
| Figura 4.13 - Resistência à Compressão Simples versus Resistência à Vácuo-Saturação do Solo-Cal - γ_d :1,90 g/cm ³ (7, 14, 28 e 60 dias de cura)..... | 96 |
| Figura 4.14 - Resistência à Compressão Simples versus Relação Vazios/Cal ajustado do Solo-Cal – 28 dias de cura..... | 97 |
| Figura 4.15 - Modulo Cisalhante versus Tempo de Cura – Solo-Cal – γ_d :1,60 g/cm ³ | 98 |
| Figura 4.16 - Modulo Cisalhante versus Tempo de Cura – Solo-Cal – γ_d :1,75 g/cm ³ | 98 |
| Figura 4.17 - Modulo Cisalhante versus Tempo de Cura – Solo-Cal – γ_d :1,90 g/cm ³ | 99 |
| Figura 4.18 - Modulo Cisalhante versus Tempo de Cura – Solo-Cal: 3%..... | 100 |
| Figura 4.19 - Modulo Cisalhante versus Tempo de Cura – Solo-Cal: 5%..... | 100 |
| Figura 4.20 - Modulo Cisalhante versus Tempo de Cura – Solo-Cal: 7%..... | 101 |
| Figura 4.21 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 7 dias de cura..... | 102 |
| Figura 4.22 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 14 dias de cura..... | 102 |
| Figura 4.23 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 21 dias de cura..... | 103 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.24 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 28 dias de cura | 103 |
| Figura 4.25 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 44 dias de cura | 104 |
| Figura 4.26 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 60 dias de cura | 104 |
| Figura 4.27 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 90 dias de cura | 105 |
| Figura 4.28 - Efeito do tempo de cura nas amostras de Solo-Cal nos ensaios de medidas de rigidez inicial..... | 106 |
| Figura 4.29 - Variação do G_0 em relação à Porosidade, Teor de Cal e Tempo de Cura | 107 |
| Figura 4.30 - Variação da dispersibilidade com o teor de cal e com o peso específico aparente seco..... | 108 |
| Figura 4.31 - Relação entre misturas de Solo-Cal pelos impactos ambientais resultantes..... | 109 |
| Figura 4.32 - Comparativo do impacto da acidificação entre misturas de Solo-cal..... | 110 |
| Figura 4.33 - Comparativo do impacto da depleção de recursos não renováveis entre misturas de Solo-cal | 111 |
| Figura 4.34 - Comparativo do impacto da eutrofização entre misturas de Solo-cal | 112 |
| Figura 4.35 - Comparativo do impacto da depleção da camada de ozônio entre misturas de Solo-cal | 112 |
| Figura 4.36 - Comparativo do impacto da oxidação fotoquímica entre misturas de Solo-cal | 113 |
| Figura 4.37 - Comparativo do impacto da demanda de energia acumulada entre misturas de Solo-cal..... | 114 |
| Figura 4.38 - Comparativo do impacto da demanda de energia acumulada entre misturas de Solo-cal por tipos de energia consumidos..... | 114 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.39 - Comparativo do impacto do aquecimento global entre misturas de Solo-cal... | 115 |
| Figura 4.40 - Comparativo entre a Durabilidade e o Aquecimento global de misturas de Solo-Cal..... | 116 |
| Figura 4.41 - Comparativo entre a Rigidez e o Aquecimento global de misturas de Solo-Cal | 116 |
| Figura 4.42 - Comparativo entre a Resistência e o Aquecimento global de misturas de Solo-Cal | 117 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1 - Graus e padrões de dispersão (adaptado da NBR 13601, 1996). | 21 |
| Tabela 2.2 - CTC dos principais argilo-minerais. Fonte: Guimarães (1971) | 27 |
| Tabela 2.3 - Composição média das cales brasileiras. Fonte: Guimarães (2002) | 31 |
| Tabela 2.4 - Parâmetros e categorias de impactos. Fonte Frischknecht et al. 2007. | 50 |
| Tabela 2.5 - Elementos opcionais da avaliação de impactos do ciclo de vida. Fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b. | 50 |
| Tabela 3.1 - Etapas e Ensaio do Programa Experimental | 53 |
| Tabela 3.2 - Caracterização da Cal Utilizada. Fonte: CIENTEC | 57 |
| Tabela 3.3 - Misturas avaliadas | 77 |
| Tabela 3.4 - Consumo unitário de materiais para cada tipo de mistura..... | 81 |
| Tabela 3.5 - Dados fornecidos pela fábrica de cal..... | 82 |
| Tabela 3.6 - Dados do equipamento para o transporte da cal..... | 83 |
| Tabela 3.7 - Dados do equipamento para extração do solo..... | 83 |
| Tabela 3.8 - Dados do equipamento para o transporte do Solo..... | 84 |
| Tabela 3.9 - Dados dos equipamentos para a construção do Solo-Cal..... | 84 |
| Tabela 3.10 - Categorias de impacto aplicadas na análise de ciclo de vida da construção de uma Sub-Base de Solo-Cal..... | 85 |
| Tabela 4.1 - Propriedades Físicas do Solo..... | 86 |
| Tabela 4.2 - Características Químicas da Água Intersticial do Solo | 87 |
| Tabela 4.3 - Resultados no ensaio do furo de agulha. | 107 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 4.4 - Avaliação dos impactos ambientais do processo de construção de uma Sub-base de Solo-Cal | 109 |
| Tabela A.1 - Dados dos corpos-de-prova ensaiados com ciclos de molhagem e secagem | 135 |
| Tabela A.1 (continuação) - Dados dos corpos-de-prova ensaiados com ciclos de molhagem e secagem | 136 |
| Tabela A.2 - Dados dos corpos-de-prova ensaiados a resistência à compressão simples e vácuo-saturação | 137 |
| Tabela A.2 (continuação) - Dados dos corpos-de-prova ensaiados a resistência à compressão simples e vácuo-saturação | 138 |
| Tabela A.3 - Dados dos corpos-de-prova ensaiados a medição do módulo de rigidez inicial | 139 |
| Tabela A.3 (continuação) - Dados dos corpos-de-prova ensaiados a medição do módulo de rigidez inicial | 140 |
| Tabela A.3 (continuação) - Dados dos corpos-de-prova ensaiados a medição do módulo de rigidez inicial | 141 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACV | Avaliação do ciclo de vida |
| AICV | Avaliação de impactos |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CED | Cumulative energy demand (Demanda de energia acumulada) |
| ICL | Initial Consumption of Lime |
| ICV | Inventário do ciclo de vida |
| PS | Porcentagem de sódio presente |
| RCD | Resistência à compressão diametral |
| RCS | Resistência à compressão simples |
| SAR | Razão de absorção de sódio |
| TRB | Transportation Research Board |
| TSD | Total de sais dissolvidas |
| UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul |

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

| | |
|--------------------|--|
| e | índice de vazios |
| G | massa específica real dos grãos |
| IP | índice de plasticidade |
| C _a | quantidade de cal, expresso em percentagem |
| C _{av} | teor volumétrico de cal, expresso em percentagem |
| LL | limite de liquidez |
| LP | limite de plasticidade |
| q _u | resistência à compressão simples (compressão) |
| G ₀ | módulo cisalhante |
| R ² | coeficiente de determinação |
| t | tempo de cura |
| V _v | volume de vazios |
| V _{total} | volume total |

Alfabeto Grego

| | |
|----------------|----------------------------------|
| γ _d | peso específico aparente seco |
| η | porosidade |
| ω | umidade, expressa em percentagem |

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

As técnicas de pavimentação evoluem no sentido de atender à demanda de pavimentos mais resistentes e duráveis face ao aumento de carga e de sua frequência de solicitação.

É uma prática universal a utilização de materiais pétreos na construção da estrutura de um pavimento. Porém, a escassez de agregados pétreos em certas regiões resulta em grandes distâncias de transporte, tornando a utilização inviável do ponto de vista econômico. Surge assim a necessidade de utilizar materiais localizados na obra ou nas imediações que apresentem as características necessárias para seu emprego nessas camadas de pavimento, principalmente quando se trata de pavimentos de baixo volume de tráfego, onde as restrições orçamentárias são as que impõem a solução.

Muitas vezes é comum não encontrar materiais naturais satisfatórios no local da construção, por exemplo, quando o solo local apresenta teores significativos de sódio, conhecidos como solos dispersivos, que se caracterizam por apresentar erosão hídrica acelerada. A presença destes tipos de solos em várias regiões do Paraguai constitui um sério problema no desenvolvimento de obras de engenharia, o que motiva a realização deste trabalho de pesquisa.

Uma alternativa disponível é o melhoramento das propriedades destes tipos de solos através da adição de cal ou cimento. A aplicação da técnica de tratamento de solos com cal vem sendo empregada com sucesso na construção de bases para pavimentos.

Inúmeras pesquisas (NÚÑEZ, 1991; THOMÉ, 1994; CARRARO, 1997; CONSOLI, 2001; LOVATO, 2004; LOPES JUNIOR, 2007; CONSOLI et al., 2009a, 2009b; DALLA ROSA, 2009a) 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, investigando seu comportamento sob diversas condições de carregamento, inclusive com ensaios de placa e provas de carga em verdadeira grandeza. Os resultados têm apresentado ganhos significativos de capacidade de suporte e redução nos recalques.

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

A presente pesquisa, ao identificar e quantificar as variáveis mais importantes no controle do comportamento de solo dispersivo artificialmente tratado com cal visa obter subsídios para que, a partir da manipulação adequada de tais variáveis por meio de dosagem, se possa atingir de forma objetiva e com maior confiabilidade as propriedades requeridas quanto à durabilidade, à resistência, ao módulo de rigidez e à dispersibilidade. Além disso, visa obter um comparativo dos impactos ambientais potenciais associados por meio da Avaliação do Ciclo de Vida para distintas misturas de Solo-Cal.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

- Avaliar a durabilidade, a rigidez inicial e a dispersibilidade de um solo dispersivo estabilizado com cal e os impactos ambientais potenciais associados ao uso da cal nestas misturas.

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

1.2.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Quantificar a influência isolada de cada uma das variáveis de interesse: tempo de cura, teor de cal e o grau de compactação sobre a perda de massa determinada através de ensaios de ciclos de molhagem e secagem,
- Quantificar a influência isolada de cada uma das variáveis de interesse: tempo de cura, teor de cal e o grau de compactação sobre a redução da resistência à compressão simples determinada através de ensaios de vácuo saturação,

- Quantificar a influência isolada de cada uma das variáveis de interesse: tempo de cura, teor de cal e o grau de compactação sobre a rigidez inicial do solo-cal estudado determinada através da medição da velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos,
- Quantificar a influência isolada de cada uma das variáveis de interesse: tempo de cura, teor de cal e o grau de compactação sobre a dispersibilidade do solo-cal estudado através do ensaio de *Pinhole Test*, e por fim,
- Quantificar os impactos ambientais potenciais associados ao ciclo de vida das diferentes misturas de Solo-Cal.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos de acordo com as etapas de pesquisa realizadas. É iniciado com este capítulo introdutório, Capítulo 1, seguido do Capítulo 2, onde é apresentada uma revisão da literatura existente, compreendida por tópicos referentes aos principais assuntos abordados nesta pesquisa.

No Capítulo 3, o programa experimental é exposto junto com uma descrição dos materiais utilizados, dos equipamentos e dos métodos de ensaios.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos na etapa experimental, considerando aspectos referentes ao solo-cal estudado.

As principais conclusões, que representam a síntese do conhecimento adquirido durante a realização deste trabalho, são apresentadas no Capítulo 5, com as sugestões para futuros trabalhos.

São apresentadas, por fim, as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 SOLOS DISPERSIVOS

2.1.1 Histórico

Antigamente, os solos argilosos eram considerados como solos resistentes à erosão devido ao fluxo de água, porém nem todas as argilas apresentam estas características. Existem argilas altamente erosivas, como as argilas dispersivas.

A existência de solos dispersivos foi primeiramente reconhecida por engenheiros, após investigações pioneiras de feições erosivas em barragens de argila na Austrália, no início da década de 1960. Mais de 20 anos antes, era sabido que argilas sódicas são responsáveis por vários problemas de erosão na agricultura e em estruturas de solos, descrevendo-as como “solos dispersivos”, como até hoje são conhecidos.

Nos estudos subsequentes, através do estabelecimento de critérios de identificação de argilas dispersivas, foram apontados, de forma mais ampla, os riscos destes materiais em obras geotécnicas. Sherard et al. (1972a) notaram a ocorrência de argilas dispersivas em sítios de barragens executadas em três estados dos Estados Unidos: Oklahoma, Mississipi e Califórnia e também em um dique em uma barragem no município de Zulia, Venezuela, apresentando a primeira proposta de critério de classificação quanto a dispersibilidade das argilas. Sherard et al. (1972b) descrevem as causas que ocasionam o início do processo de formação de *piping* e a relevância da presença de estruturas de drenagem interna nas barragens. Posteriormente, Sherard et al (1976), caracterizaram a presença de solos dispersivos em obras geotécnicas executadas em mais quatro estados americanos (Tennessee, Texas, Dakota do Norte e Colorado) e em outros países como Brasil, México, Israel, Vietnam, Austrália, Venezuela e Argentina, como também, a descrição dos ensaios que devem ser prescritos para classificação quanto à dispersibilidade dos solos.

Cole et al. (1977) e Kim (1984) abordaram o estudo de argilas dispersivas em barragens de irrigação na Tailândia.

Os estudos iniciais foram expostos e sistematizados mediante a realização de simpósio internacional promovido pela American Society for Testing and Materials – ASTM, em 1976.

Os trabalhos tratavam basicamente de métodos para a identificação de argilas dispersivas e soluções de engenharia propostas para o enfrentamento dos problemas afetos à sua utilização em obras geotécnicas.

Em termos das contribuições mais recentes, Shrestha (1997) estudou os efeitos da ação erosiva sobre argilas dispersivas em regiões agriculturáveis no Nepal. Haroon et al (1993) relataram os bons resultados na construção de uma barragem na Índia com solos dispersivos estabilizados com cal. Globa e Barbour (2001) apresentaram um estudo de caso de um canal escavado em solo coluvionar no Canadá, com ocorrência de material dispersivo, com grandes teores de sódio e a presença principalmente de esmectita. Sotelo (2001) identificou muitos problemas geotécnicos devido à presença de solos dispersivos em obras executadas na região nordeste da Argentina. Awad (2002) descreveu a realização de ensaios de dispersibilidade em amostras de oito barragens localizadas na Faixa de Gaza, construídas com solos dispersivos, sendo analisadas a eficiência do sistema de drenagem através de ensaios similares aos de proteção e a resistência à erosão das amostras quando misturadas com cinzas. Vakili et al. (2013) apresentam a utilização de pozolana para a estabilização de uma argila dispersiva em Arzarbayejan, Irã.

No cenário nacional, a literatura técnica é bastante incipiente a respeito da utilização de solos dispersivos em obras de barragem ou outras obras geotécnicas. Entretanto, a barragem da UHE de Sobradinho caracterizou-se pela presença e ampla utilização de solos dispersivos em todas as suas estruturas de terra, sem quaisquer procedimentos de tratamento químico. Somente em data muito recente, cerca de 30 anos após esta obra pioneira, foram publicados dois artigos sobre a influência de solos dispersivos no comportamento de obras geotécnicas.

Müller et al. (2003) apresentaram os estudos realizados na área de empréstimo da Barragem de Santa Bárbara, construída em 1958, no município de Pelotas, Rio Grande do Sul, com 9,0m de altura e voltada para fins de abastecimento. Mello et al, (2002) relataram, por sua vez, a utilização de cal para tratamento e estabilização dos solos dispersivos utilizados na construção do canal do Baixo Irecê, obra destinada a conduzir as águas do Rio São Francisco até os municípios de Itaguaçu e Xique-Xique, na região do semi-árido baiano, estrutura com 13 km de extensão e capacidade de vazão de 60,0 m³/s.

2.1.2 O Fenômeno da Dispersão

No passado, solos argilosos eram avaliados basicamente como materiais altamente resistentes aos efeitos da erosão decorrentes da percolação de água. Em função de uma série de problemas

detectados em obras geotécnicas, sabe-se hoje que muitas argilas tendem a apresentar uma elevada susceptibilidade à dispersão ou deflocação em presença de água, que tende a induzir mecanismos de erosão interna e *piping* através de um maciço de solo.

A erosão dos solos pode produzir-se por fenómenos de distintas naturezas. Segundo Ghuman et al. (1976), os mecanismos de erosão podem-se gerar por força exteriores, no incremento da velocidade do fluido; ou devido à degradação das forças internas, como a dissolução química de cimentos artificiais ou a dispersão das argilas. A dispersão continua até as forças externas e a internas se equilibrarem. Neste trabalho trata-se a erosão produzida em solos argilosos devido ao fenómeno denominado dispersão. Tal fenómeno resulta quando as forças de repulsão devido às cargas superficiais dos argilo-minerais tornam-se maiores que as forças de atração de van der Waals.

Lewis et al. (1976) indicam que as forças de van der Waals devidas à atração de átomos de partículas adjacentes, são inversamente proporcionais à sétima potência do afastamento entre elas e são independentes das características químicas do meio ao redor das partículas de argila. As forças de repulsão devidas às forças eletrostáticas geradas pelas cargas negativas superficiais são fortemente influenciadas pelo meio onde se encontram e são consideravelmente maiores que as forças de van der Waals. Se as cargas negativas não são neutralizadas, as partículas mantem-se em suspensão com comportamento coloidal.

Mitchell (1993) afirma que a flocação ocorre quando são adicionados à estrutura da argila, elementos com cargas positivas chamados cátions, que neutralizam as cargas negativas. Os cátions frequentemente são dos elementos cálcio, magnésio, sódio e potássio. Ao redor de cada cátion forma-se uma esfera de solvatação com moléculas de água, e a partícula da argila adere-se a este conjunto. Devido ao campo elétrico gerado pelos cátions e às características dipolares das moléculas da água. O tamanho da esfera de solvatação diminui com o aumento da concentração de cátions na solução e vice-versa.

Sherard et al. (1976) indicam que argilas naturais dispersam-se na presença de água pura, como no caso de água das chuvas. O fenómeno é gerado pois a água presente nos poros do solo tem uma maior concentração de cátions que a água pura da chuva. Quando a água da chuva ingressa no solo, produz basicamente dois efeitos:

- (i) Por um lado, tende a pegar cátions da água dos poros para reduzir a diferença de concentração, o que gera um desequilíbrio entre a água absorvida e a água dos poros, produzindo uma transferência entre cátions da partícula e da água de poro. O resultado é uma diminuição elétrica da estrutura química da argila, aumentando a repulsão eletrostática entre partículas.
- (ii) Ao mesmo tempo, os cátions que permanecem aderidos na partícula de argila tendem a aumentar a esfera de solvatação pela diminuição da concentração de cátions na solução. Isto aumenta o afastamento entre partículas com a consequente redução das forças de atração de van der Waals.

Ambos efeitos produzem a dispersão das partículas de argilas. Nestas condições um gradiente hidráulico mínimo pode ocasionar erosões consideráveis.

Segundo Holmgren et al. (1976) a tendência a uma erosão por dispersão depende fundamentalmente do tipo de cátion predominante na estrutura da argila, sendo os solos sódicos mais dispersivos que os solos com cálcio e magnésio.

Ainda, Mitchell (1993) assinala que a concentração dos cátions absorvidos diminui ao aumentar o afastamento entre as partículas de argilas. Este conjunto recebe o nome de dupla camada difusa. Os cátions bivalentes como os de cálcio e o magnésio geram uma espessura de camada dupla muito menor que os cátions monovalentes de sódio. Isto proporciona um afastamento maior entre partículas de argilas em solos sódicos, o que implica forças de atração menores. Além disso, mantendo outros fatores constantes, os cátions bivalentes aderem-se com maior força nas partículas de argilas que os monovalentes. Assim, íons de sódio podem ser extraídos mais facilmente da água absorvida quando existem diferenças de concentração de sais com a água dos poros, descompensando eletricamente a partícula de argila.

Existem também outros fatores que influem nas características dispersivas das argilas, como no caso do pH do solo, a composição mineralógica da partícula, o conteúdo de umidade do solo e a natureza das chuvas.

Um médio neutro é definido como o de solução com pH igual a 7, meio ácido quando o pH é menor que 7 é meio básico para valores de pH maiores que 7. Se o pH é igual a 7 significa que:

$$(2.1) \quad \log \frac{1}{H^+} = 7 \rightarrow 10^7 = \frac{1}{H^+}$$

Isto implica que a maior pH, menor a quantidade de íons de H^+ encontram-se presentes na solução. Anteriormente foi estabelecido que as cargas das partículas de argilas são devidas a cargas descompensadas em sua superfície. Isto é independente do pH do ambiente e dependente da estrutura mineralógica do mineral. Porém, as partículas de argilas têm hidroxilos (OH^-) expostos na superfície. Segundo Mitchell (1993), a tendência dos hidroxilos de dissociar-se na água é fortemente influenciada pelo pH. Para um maior valor de pH, é menor a concentração de H^+ na água. Para compensar esta falta de H^+ , os hidroxilos da superfície dissociam-se, ficando descompensada a carga elétrica do oxigênio, o que aumenta a carga negativa da partícula.



Isto implica que valores altos de pH geram condições favoráveis para a dispersão de partículas de argila e baixos valores de pH favorecem a floculação.

Segundo Holmgren (1976), o tipo de argilo-mineral também tem influência no fenômeno da dispersão. No caso das montmorilonitas, as partículas de argilas existem em pacotes conhecidos como “tactoids” de quatro a nove lâminas paralelas. Os resultados de ensaios demonstraram que os espaços entre lâminas são preenchidos preferencialmente pelo cálcio, gerando-se um intercambio catiônico que coloca o sódio na superfície exterior e o cálcio entre as lâminas. Estando o sódio no exterior, o que dispersa-se não são as lâminas mas os tactoids. Este modelo dá uma explicação razoável da dispersão espontânea a muito baixos níveis de sódio em solos que contem montmorillonitas. As caolinitas e illitas são estruturalmente diferentes das montmorilonitas, devido a que estas estão compostas por lâminas individuais de maior espessura, tornando-as mais suscetíveis as variações do pH por gerar descompensação de cargas nas superfícies.

O conteúdo de umidade também influencia no fenômeno. Como foi comentado anteriormente, as forças de atração incrementam-se de forma inversamente proporcional à sétima potência do afastamento entre partículas. Ao aumentar o conteúdo de umidade do solo, aumenta o afastamento entre as partículas, o que favorece a dispersão.

Finalmente, a natureza das chuvas é outro fator importante, dado que grandes chuvas, seguidas de períodos secos com formação de trincas no solo, geram maior erosão que ciclos úmidos

prolongados, onde existe tempo para que a argila expanda-se, selando as trincas e dificultando a entrada da água.

2.1.3 Identificação de Solos Dispersivos

Argilas dispersivas não podem ser distinguidas de argilas não-dispersivas por ensaios convencionais tais como granulometria, limites de consistência ou compactação (Sherard et al., 1972b, 1975; Mitchel, 1976; Furtado e Machado, 1982; Kim, 1984; Globa e Barbour, 2001; Morais et al., 2004). A Figura 2.1 ilustra esta impossibilidade de correlação para o caso de 195 ensaios para a determinação de limites de consistência realizados em amostras provenientes de diversas barragens e marcados em conjunto na carta de plasticidade de Casagrande (Sherard et al, 1975).

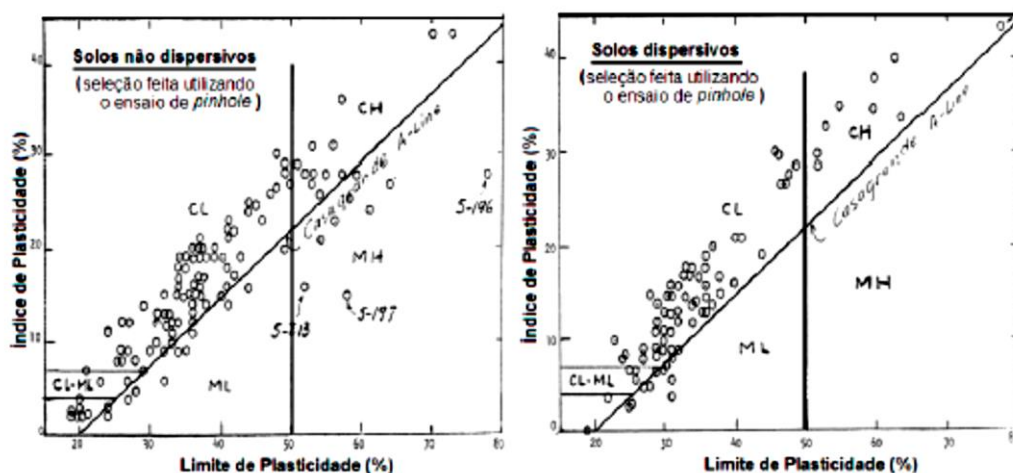


Figura 2.1 - Limites de consistência: solos dispersivos versus solos não dispersivos. Fonte: Sherard et al. (1975) -

As características dispersivas são determinadas por meio dos resultados de ensaios padronizados, realizados em amostras representativas, que podem ser: NBR 13601: Crumb Test (ABNT, 1996a), NBR 13602: sedimentometria comparativa (ABNT, 1996b), NBR 13603: teor de sais na água intersticial do solo (ABNT, 1996c) e NBR 14114: *Pinhole* (ABNT, 1996d).

Adicionalmente, impõe-se a necessidade de realização de muitos ensaios e a aplicação de tratamento estatístico aos resultados, a fim de se caracterizar a natureza dispersiva ou não-dispersiva das argilas testadas (Bourdeaux e Nakao, 1974).

Identificada a presença de argilas dispersivas, impõem-se outros ensaios para se obter a real composição mineralógica dos solos (difratometria de raios-X), a caracterização da estabilidade do solo identificando-se a capacidade de troca catiônica e, por fim, o conhecimento da acidez do solo, haja vista que a carga elétrica das partículas varia com o pH, que influi consideravelmente na magnitude dos fenômenos de adsorção, troca catiônica, dispersão e floculação (Pessoa, 2004).

2.1.3.1 Ensaio do Torrão (*Crumb Test*).

O ensaio do torrão ou *Crumb test* foi inicialmente proposto por Rallings (1966) e posteriormente modificado por Sherard et al. (1976). O ensaio possibilita caracterizar uma susceptibilidade à dispersão de uma amostra associada a solos dispersivos. O inverso, contudo, não é necessariamente verdadeiro, isto é, o ensaio pode indicar que não ocorre dispersão e, no entanto, o solo pode ter um comportamento dispersivo. Sendo assim, por se tratar de um ensaio cujos procedimentos e equipamentos necessários são muito simples e pelo potencial de indefinição dos resultados, os resultados devem ser objetos de avaliações cuidadosas. Entretanto, é sempre recomendado em fases iniciais de estudo ou de anteprojeto.

No ensaio, são utilizados três béqueres, com capacidade de 200ml, que são preenchidos com 150ml de água destilada, tendo como opção também a utilização de uma solução de hidróxido de sódio, com concentração de 1 meq/litro (0,001 normal).

Os torrões de formato aproximadamente esférico são dispostos nestes recipientes, com diâmetros entre 6mm e 10mm, preparadas a partir de amostras indeformadas ou, então, corpos-de-prova compactados segundo as condições de campo. Após repouso de 1 hora, deve-se observar as reações ocorridas e atribuir o correspondente grau de dispersão à amostra, de acordo com os padrões estabelecidos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Graus e padrões de dispersão (adaptado da NBR 13601, 1996).

| | | |
|--------|--|---|
| Grau 1 | Comportamento não-dispersivo | O torrão de solo pode absorver água, sofrer esboroamento e esparramar-se no fundo do béquer, formando uma pilha achatada, mas não se observa sinal de turvação no líquido, provocado por colóides em suspensão. |
| Grau 2 | Comportamento levemente dispersivo | Há indícios de turvação na água, próximos à superfície do torrão (se a turvação for facilmente visível, registrar como grau 3). |
| Grau 3 | Comportamento moderadamente dispersivo | Observa-se uma nuvem de colóides em suspensão, geralmente finos veios espalhando-se no fundo do béquer; em casos extremos, toda a água torna-se turva. |
| Grau 4 | Comportamento fortemente dispersivo | Observa-se uma nuvem coloidal, geralmente uma película muito fina, cobrindo quase todo o fundo do béquer; em casos extremos, toda a água torna-se turva. |

Segundo a NBR 13601 (ABNT, 1996a), um solo é classificado como não-dispersivo quando se atribui ao comportamento médio dos torrões testados o grau 1 ou 2. Ao contrário, um solo é caracterizado como dispersivo quanto for atribuído grau 3 ou 4.

2.1.3.2 Ensaio Sedimentométrico Comparativo – Ensaio de Dispersão SCS

Este ensaio foi proposto originalmente pelo Soil Conservation Service (SCS) dos Estados Unidos. O princípio do ensaio está baseado no conceito de que o solo com características dispersivas irá se comportar, na fase de sedimentação, como se tivesse sido utilizado um agente dispersor durante o ensaio. O procedimento de ensaio é semelhante ao preconizado pela NBR 7181 (ABNT, 1984a), diferenciando-se em termos de dois aspectos básicos: não se usa agitação mecânica e não se adiciona agente dispersor na suspensão de solo-água.

O ensaio consiste em se comparar os percentuais (em massa) das partículas com diâmetros menores que 0,005 mm, determinadas pelo procedimento da norma NBR 13602 (ABNT, 1996b) e os obtidos pela norma NBR 7181 (ABNT, 1984a), de forma a se obter uma medida da dispersibilidade de solos argilosos, chamada porcentagem de dispersão, de acordo com a seguinte relação:

$$(2.3) \quad PD(\%) = \left(\frac{A}{B}\right) \cdot 100$$

Sendo:

PD – porcentagem de dispersão, em %;

A – porcentagem, em massa, das partículas com diâmetro menor que 0,005 mm, determinada de acordo com a norma NBR 13602 (ABNT, 1996b);

B - porcentagem, em massa, das partículas com diâmetro menor que 0,005 mm, determinada de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1984a).

A porcentagem de dispersão igual a 100% confere ao solo a presença de uma fração argilosa altamente dispersiva; por outro lado, uma porcentagem de dispersão nula indica uma fração completamente não-dispersiva.

2.1.3.3 Teores de Sais na Água Intersticial

O método de avaliação da dispersibilidade de solos argilosos, através de ensaios químicos, tem o objetivo de determinar a quantidade de sais dissolvidos na água intersticial. A partir de uma amostra de solo, com umidade próxima do limite de liquidez, a água intersticial é retirada mediante o uso de vácuo e um kitassato, até se obter um volume de cerca de 100ml.

À análise química, feita por espectrofotometria, permite a determinação das quantidades dos cátions presentes de sódio, cálcio, magnésio e potássio, expressas em miliequivalentes por litro (meq/litro).

Desta forma são obtidos três parâmetros de análise por meio das seguintes relações:

- Total de sais dissolvidos (TSD):

$$(2.4) \quad TSD = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+}$$

- Porcentagem de sódio presente (PS):

$$(2.5) \quad PS(\%) = \left(\frac{Na^{+}}{TSD}\right) \cdot 100$$

- Razão de absorção de sódio (RAS ou SAR):

$$(2.6) \quad RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\left(\frac{Ca^{2+}+Mg^{2+}}{2}\right)}}$$

Com os valores dos parâmetros TSD e PS caracteriza-se, por meio do ábaco indicado na Figura 2.2, a condição dispersiva, questionável ou não dispersiva do solo ensaiado.

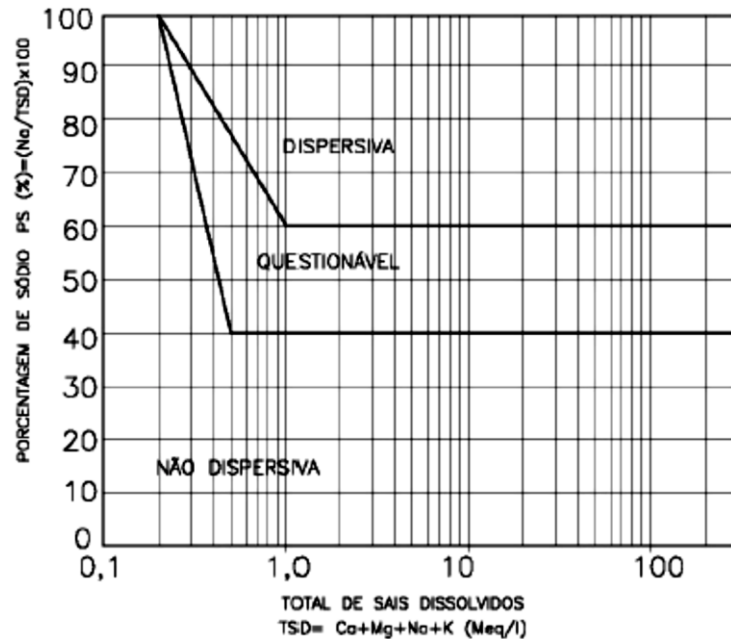


Figura 2.2 - Padrões de dispersão dos solos pelo percentual de sódio e total de sais. Fonte: Sherard et al. (1976)

2.1.3.4 Ensaio do Furo de Agulha (*Pinhole Test*)

Esta metodologia foi proposta por Sherard et al. (1975) e os critérios de avaliação dos resultados baseiam-se em centenas de ensaios realizados sobre amostras coletadas de aterros, canais e outras obras geotécnicas, nas quais os solos argilosos apresentaram-se tipicamente erodíveis ou resistentes aos efeitos da erosão.

A metodologia deste ensaio é definida pela norma NBR 14114 (ABNT, 1998), que busca avaliar, de forma direta e qualitativa, o potencial de dispersibilidade de solos argilosos, pelo fluxo de água destilada através de um pequeno furo feito axialmente, através de um corpo-de-prova padrão (Figura 2.3). O corpo-de-prova pode ser proveniente de um bloco indeformado ou compactado segundo as prescrições da norma NBR 6457 (ABNT, 1986a), simulando as condições de campo.

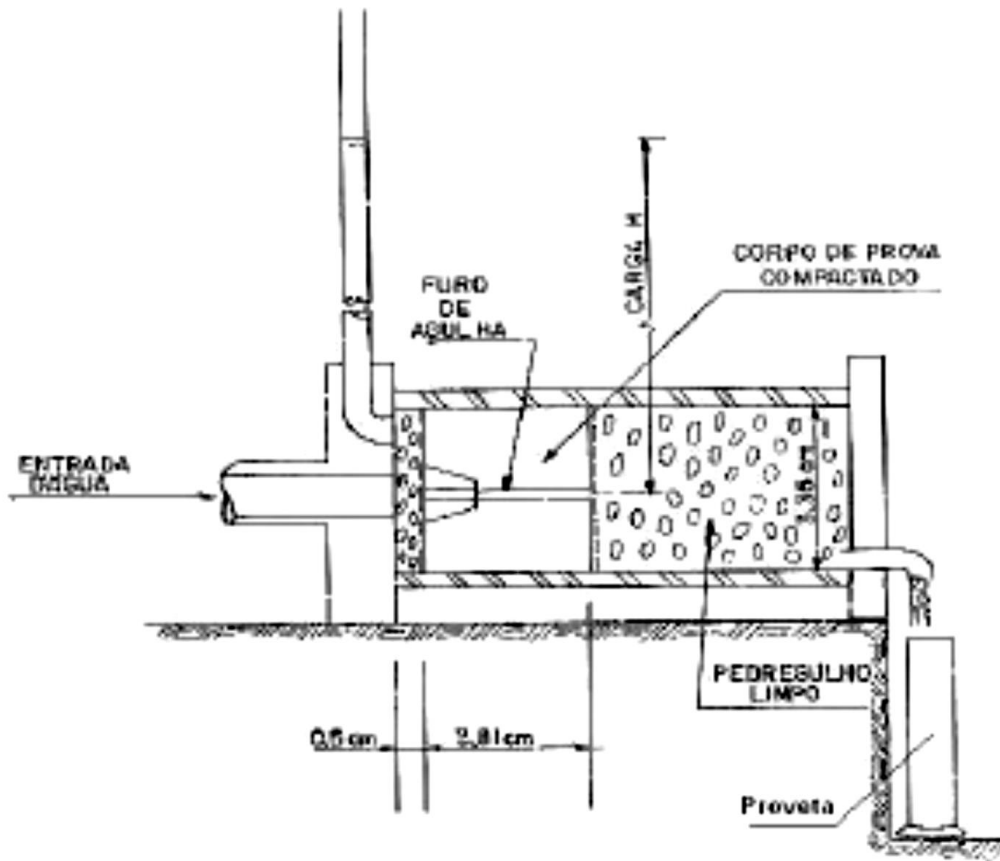


Figura 2.3 - Esquema do Ensaio de Pinhole. Fonte: Furtado e Machado (1982)

A classificação do solo quanto à dispersibilidade baseia-se na aparência do efluente, na medição das vazões e nas dimensões finais do furo. A natureza da solução que flui do corpo-de-prova, com imposição de uma diferença de carga hidráulica inicial de 50mm, fornece a diferença básica entre argilas altamente dispersivas e não dispersivas.

Quando o efluente torna-se turvo, o furo feito no corpo-de-prova tende a se alargar rapidamente, resultando em um aumento da vazão, identificando, desta forma, um comportamento dispersivo do solo. Na situação inversa, ou seja, sem alterações da forma do furo e da vazão, com o efluente levemente turvo, a argila pode ser classificada como levemente a moderadamente dispersiva.

Na Figura 2.4 apresenta-se um fluxograma orientativo para avaliar os resultados em quanto a dispersibilidade.

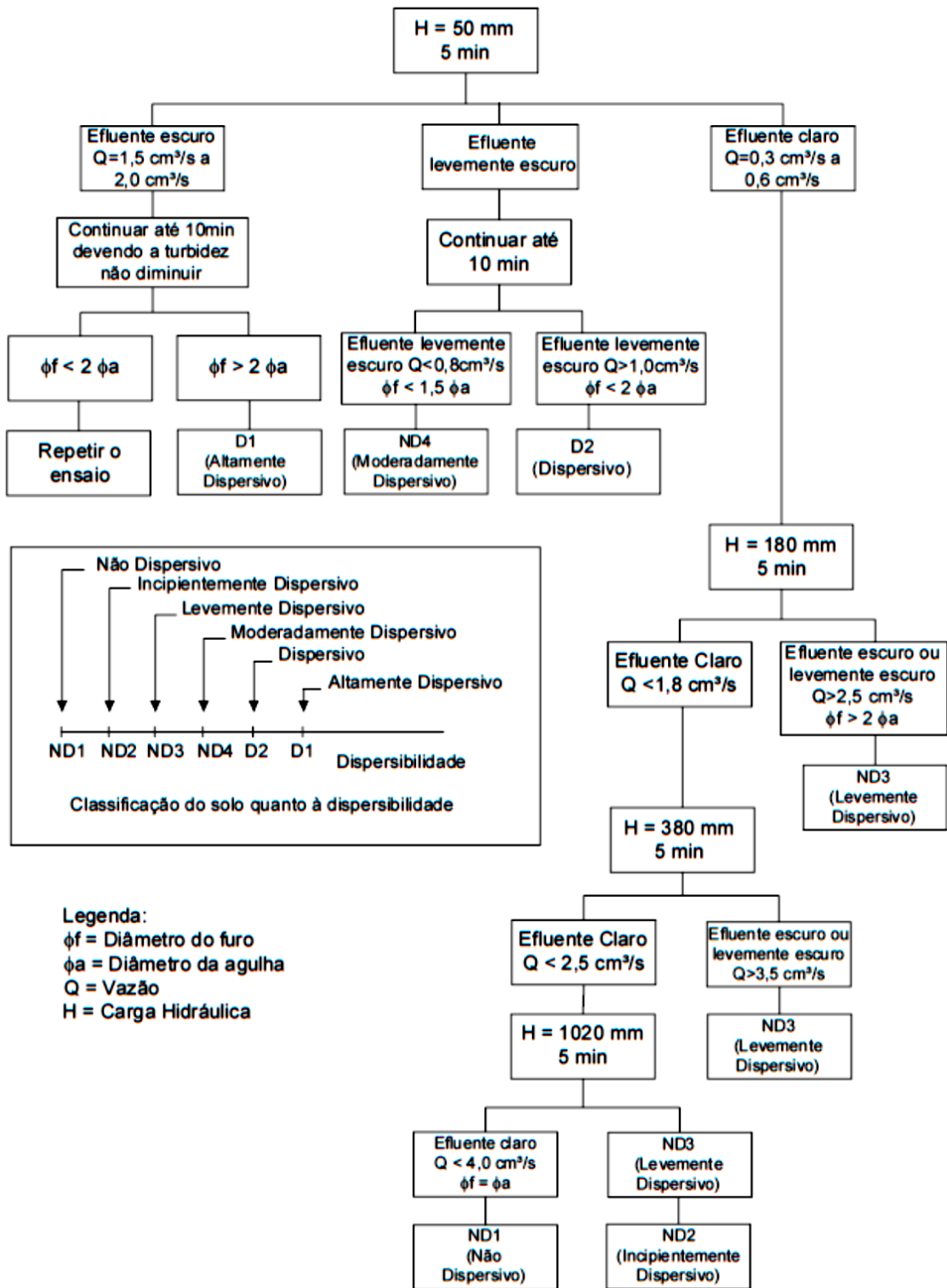


Figura 2.4 - Fluxograma orientativo para avaliação dos resultados. Fonte: ABNT-NBR 14114/98)

2.1.3.5 Ensaios Especiais

- Difractometria por raios-X

A difração por raios-X é um dos processos mais eficientes para a determinação da composição mineralógica de solos e rochas. O ensaio permite identificar de forma quantitativa os minerais, analisados a partir dos picos dos difratogramas. Os difratogramas depois de gerados permitem caracterizar as diversas fases minerais presentes.

Para o ensaio, as pastilhas de amostras são preparadas pela técnica de *back loading*, que consiste no pressionamento do pó contra a abertura de uma lâmina de alumínio, disposta sobre uma superfície lisa e firme (geralmente vidro). O pó fica na abertura da lâmina, apesar de "suspenso". Dessa forma, a outra face será varrida por raios-X.

Atualmente utilizam-se equipamentos de difratometria equipados com goniômetros e filtros em linha acoplados a computador. Estes são equipados com programas capazes de tratar os dados, realizando a procura automática de picos, suavizando as curvas e corrigindo a referência de background, caracterizando, assim, os minerais presentes e procedendo-se a uma análise qualitativa da composição mineralógica dos solos.

- Capacidade de Troca Catiônica

A capacidade de troca catiônica do solo (CTC) é definida como sendo a quantidade de cátions necessária para neutralizar as cargas negativas de uma quantidade unitária de solo em determinadas condições, ou seja, a capacidade do solo de reter e trocar cátions, para um determinado pH. As cargas negativas pertencem à fase sólida do solo, representadas pelas partículas de argila, pela fração coloidal da matéria orgânica e pelos óxidos hidratados de ferro e de alumínio.

A CTC é expressa em miliequivalentes por 100 g ou 100ml de material (meq/100g ou meq/100ml), sendo expressa pela relação:

$$(2.7) \quad CTC = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+} + H^{+} + Al^{3+}$$

Observa-se que parte da equação 2.7 corresponde ao total de sais dissolvidos ou TSD (equação 2.7), somada às quantidades dos íons H^{+} e Al^{3+} , passíveis de determinação por análise química

através de espectrofotometria. A Tabela 2.2 apresenta a variação da CTC dos principais argilo-minerais (Guimarães, 1971).

Tabela 2.2 - CTC dos principais argilo-minerais. Fonte: Guimarães (1971)

| Argilo-Minerais | CTC (meq/100g) |
|------------------------|-----------------------|
| Caulinita | 3 - 15 |
| Clorita | 11 - 40 |
| Ilita | 10 - 40 |
| Vermiculita | 100 - 150 |
| Montmorilonita | 80 - 100 |

2.1.4 Estabilização de Solos Dispersivos

Segundo dados da USBR (1998), os projetos especificam o uso da cal para estabilização mediante a adição de uma quantidade mínima capaz de produzir um solo não dispersivo. (Adição de cal hidratada, cerca de 1 a 4 % de massa seca de solo). Cuidados específicos devem ser tomados em relação à presença de sulfatos no solo, pois a presença deste íon ocasiona o surgimento da gipsita na forma de gel (gesso), o que causa uma maior expansão nos solos, impondo-se, então, a necessidade de se promover aumentos da dosagem convencional.

Bourdeaux et al. (1976) empregaram 0.6% de sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3$ para mudar um solo altamente dispersivo em um solo não dispersivo.

Sherard et al. (1976) realizaram dezenas de ensaios *Pinhole* em diferentes argilas dispersivas modificadas com pequenas quantidades de $Ca(OH)_2$ (1% a 4% respeito ao peso seco). Em todos os casos, sem exceção, o solo mudou para não dispersivo.

Cole et al. (1977) tiveram excelentes resultados em barragens, onde foi compactado o solo dispersivo até atingir permeabilidades da ordem de 10^{-5} cm/s com o objetivo de evitar o ingresso da água das chuvas. Este tratamento físico conseguiu-se compactando o solo a densidades maiores a 85% do Proctor Normal. Depois disso foi colocada uma proteção de solo dispersivo estabilizado com 2% de cal.

Dascal et al. (1976) estabilizaram solos dispersivos com 3 a 4% de cal, indicando que além de produzir-se a troca de cátions de sódio por cátions de cálcio mais estáveis, a cal reage com os componentes pozolânicos da argila formando cimentação que aumenta a resistência da argila e mantém as partículas unidas, evitando a erosão.

Ryker (1976), empregando cal e alumínio como agentes estabilizantes para solos dispersivos, menciona certas vantagens e desvantagens do caso do alumínio. O alumínio apresenta um menor custo de aplicação e menor periculosidade. Mas, o custo do alumínio é aproximadamente 5 vezes maior que o custo da cal. Outro efeito desfavorável do alumínio é que torna o pH do solo extremadamente ácido (pH entre 3 e 4), impedindo o crescimento da vegetação. Por último, a estabilização com alumínio só produz uma troca de cátions, a cal, além disso, produz cimentação entre partículas.

2.2 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 na Via ápia, construída pelos Romanos. Pode-se definir solo-cal como o produto resultante da mistura íntima 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 aglomerante 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 adequados 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;
- Avenida Sernambetiba – Guanabara (Rio de Janeiro) – trecho de 18 km, com base de 3% a 4% 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).

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.

2.2.1 Materiais Utilizados no Solo-Cal

2.2.1.1 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/m^2 , após 28 dias de cura à temperatura de $22,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Solos que apresentam limitada reatividade pozolânica (ganhos de resistência inferiores a 345 kN/m^2) 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.

2.2.1.2 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.

Na Tabela 2.3 são apresentadas as propriedades com valores médios das cales comercializadas no mercado brasileiro, segundo Guimarães (2002).

Tabela 2.3 - Composição média das cales brasileiras. Fonte: 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 CÁLCICA | 90-98 | 0,1-0,8 | 0,5-3,5 | 0,2-1,0 | 0,5-5,0 | 0,2-3,8 | 0,1-0,6 | 96,0-98,5 | - |
| CAL HIDRATADA CÁLCICA | 70-74 | 0,1-1,4 | 0,5-2,5 | 0,2-0,8 | 23-27 | 1,5-3,5 | 0,1-0,0 | | 0,5-1,8 |
| CAL HIDRATADA DOLOMÍTICA OU 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 | | - |

2.2.1.3 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).

2.2.2 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 uma 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, uma vez que reduz a quantidade de cal disponível para produzir as reações pozolânicas.

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 (1953), 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 e 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 2.5.

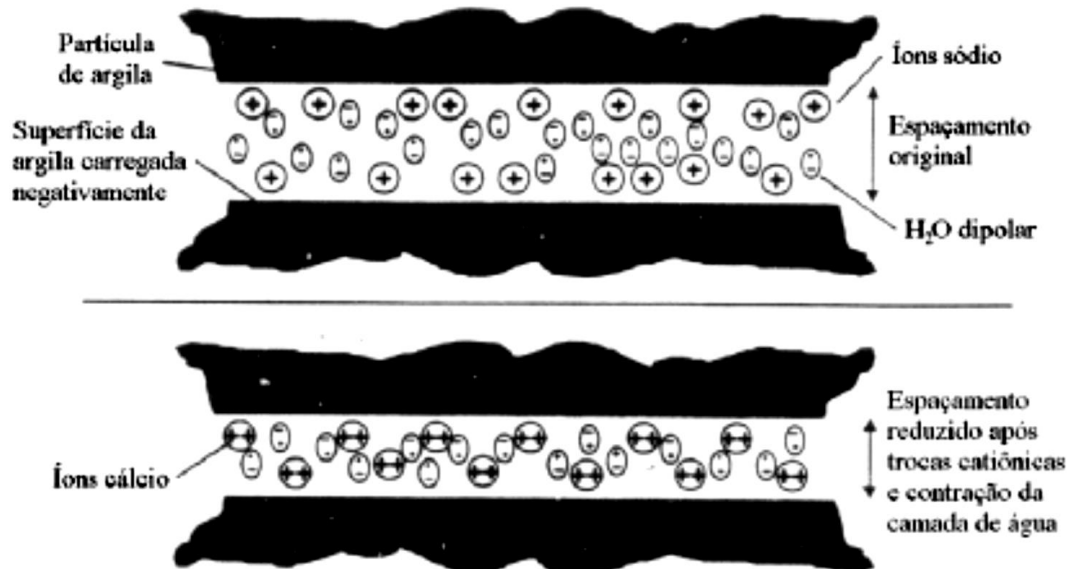


Figura 2.5 - Mecanismo de troca de cátions. Fonte: Prusinski e Bahattacharja (1999)

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 e 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 da argila. Essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio. Segundo relato do TRB (1987) esta reação não cessará enquanto houver $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reagindo e sílica disponível no solo. Conforme Ingles e 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 2.5.

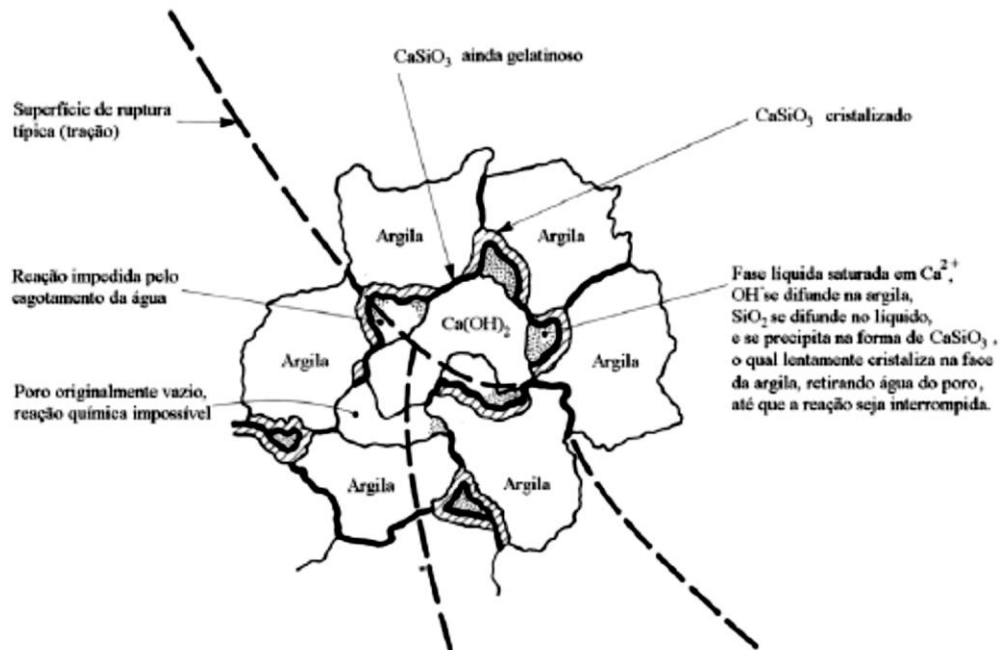


Figura 2.6 - Mecanismo de estabilização Solo-Cal. Fonte: Ingles e Metcalf (1972, apud THOMÉ,1994)

2.2.3 Dosagem Solo-Cal

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

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

- Método do pH (EADES & GRIM, 1966) – consiste na determinação do teor mínimo de cal que produza um aumento no valor de pH para 12,4.
- Método do ICL (*Initial Consumption of Lime*) – proposto por Rogers et al (1997), é uma variação do método do pH, onde o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor constante (máximo);
- Método do *Lime Fixation Point* (HILT & DAVIDSON, 1960) – baseado no limite de plasticidade, que determina o teor de cal máximo que proporciona melhoria na trabalhabilidade, sem ganhos significativos de resistência;

- Método de Thompson (1966) – que define como reativo um solo que apresente um aumento de resistência à compressão simples de pelo menos 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), 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 à 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.

2.2.4 Impactos Ambientais da Cal

Entre os impactos ambientais relacionados à produção da cal devem ser citadas as emissões de dióxido de carbono (gás de efeito estufa) e o alto consumo de energia, a produção de resíduos, a emissão de poeira, a geração de ruídos, o consumo de água, os odores, a mudança, da paisagem e a emissão de outros gases.

A geração de resíduos, ou subprodutos, podem originar-se: da partida ou desligamento dos fornos para manutenção; do desempoeiramento dos gases de combustão; de deficiências na calcinação; da inadequação da composição do mineiro para a produção de cal; do processo de britagem, que gera finos, os quais podem ser beneficiados e destinados a outros mercados. A poeira é gerada no processo de britagem, transporte, calcinação e hidratação. Os ruídos e vibrações são inerentes à atividade de manufatura, devido ao uso de maquinário pesado. O consumo de água dependerá das atividades dentro de cada etapa de produção e de controle na hidratação da cal. Os odores são consequências dos gases efluentes da queima de alguns combustíveis ou do uso de resíduos como fonte energética. As mudanças na paisagem ocorrem devido às atividades de mineração. Os diversos gases resultantes variam segundo o tipo de

forno, condições de funcionamento, tipos de combustíveis, características de matéria-prima e técnica de redução de emissões empregadas (EIPPCB; IPTS 2013).

2.3 VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DO SOLO-CAL

2.3.1 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 no ganho de resistência através da cimentação das partículas (INGLES E METCALF, 1972; ATTOH-OKINE, 1995; TRB, 1987).

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

Guimarães (2002) comenta, ainda, que a cal, seja ela virgem ou hidratada, influi no processo de estabilização de um solo em função do valor de seus teores de óxidos de cálcio e de magnésio. Segundo Nóbrega (1981), os íons desses elementos, presentes nas cales, são responsáveis pela modificação no comportamento dos argilo-minerais presentes no solo. Contudo, a autora afirma que cada solo reage de forma particular para cada tipo de cal aplicada e que a escolha e aplicação desta não pode ser aleatória.

Consoli et al. (2001), ao estudar 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 o aumento da resistência de pico e diminuição da deformação na qual o pico é atingido.

2.3.2 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 massa específica aparente máxima (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).

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 floclulação, a quantidade de vazios e o tamanho dos vazios no solo aumenta. Esta estrutura floclada 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).

2.3.3 Efeito do Teor de Umidade e da Relação Água/Cal

Solos estabilizados com cal normalmente são compactados em campo na umidade ótima para obtenção da massa específica aparente seca máxima, como determinado no ensaio de compactação de Proctor. Entretanto, estudos com solo-cal e solo-cimento mostram que em alguns casos, o teor de umidade que proporciona máxima resistência e durabilidade não é necessariamente igual ao teor de umidade que gera a maior massa específica aparente seca, e sim um valor levemente inferior ao teor ótimo (CARRARO, 1997; FOPPA, 2005).

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 floclulação 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 cales cálcica e dolomítica, o autor observou uma umidade ótima em média 1,3% maior para as misturas com cal cálcica que para as misturas com cal dolomítica.

Lopes Junior (2007) estudou misturas de solo residual de arenito Botucatu com 25% de rocha basáltica pulverizada, tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal. Nessas misturas utilizou-se 10%, 12%, 14% e 16% de umidade de moldagem. Os resultados mostraram que a variação de umidade de moldagem não afetou a resistência à compressão simples para os tempos de cura estudados (28 e 90 dias), verificou-se não existir relação entre a resistência à compressão simples e a relação água/cal. Segundo o autor, para o solo-cal estudado, a relação água/cal não é a melhor maneira de prever a resistência em solos no estado não-saturado. Em solos tratados com cal, Ingles e Metcalf (1972) afirmam que a água somente é necessária para transportar os íons 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.

2.3.4 Efeito do tempo de Cura

Inglês e Metcalf (1972) apresentam um estudo sobre a influência do tempo de cura em diferentes tipos de solos, tratados com 5% de cal hidratada, observando taxas de ganhos de resistência maiores em pedregulhos arenosos, conforme a Figura 2.6.

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 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.

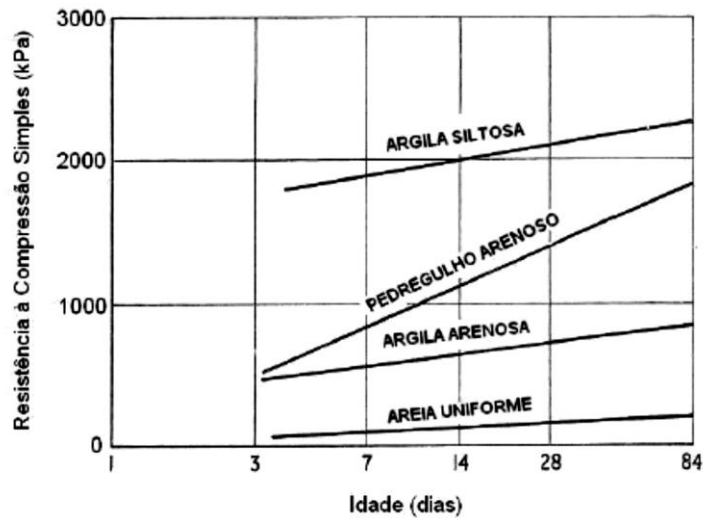


Figura 2.7 - Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal. Fonte: Ingles e Metcalf (1972)

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

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 (2009a) verificou que as amostras curadas por um período de 90 dias, apresentaram em média, resistências 35% superiores às amostras curadas por 60 dias, e estas, por sua vez, apresentaram resistências 65% superiores em relação às amostras com 28 dias de cura.

2.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM CAL

2.4.1 Resistência à Compressão Simples

A resistência de misturas solo-cal normalmente é avaliada através dos ensaios de compressão simples, compressão triaxial e 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 e Metcalf (1972), geralmente, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até certo nível, usualmente 8% para solos argilosos. A partir deste ponto a taxa de acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal, devido às misturas solo-cal apresentarem uma cimentação lenta e dependerá do tipo de solo Figura 2.7.

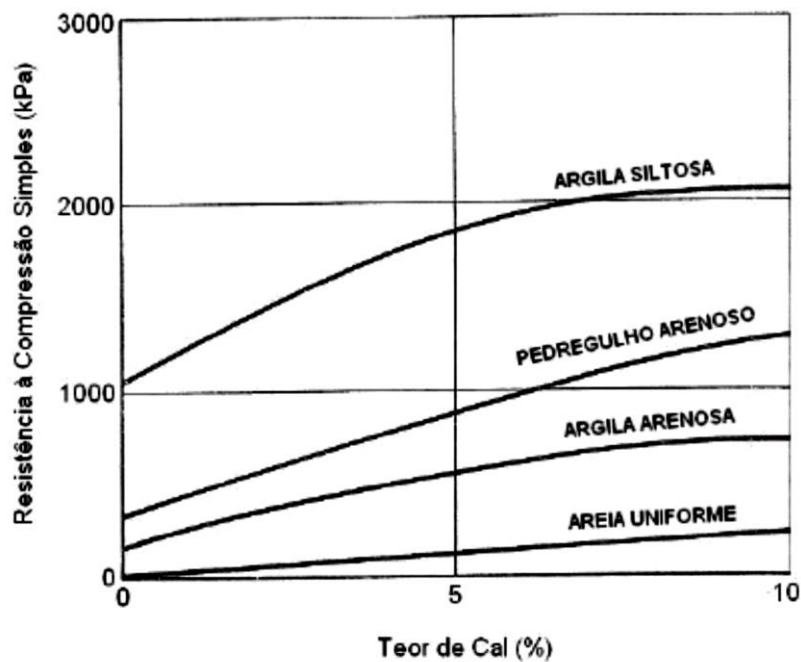


Figura 2.8 - Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias. Fonte: Ingles e Metcalf (1972)

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, a massa específica, o tempo e tipo de cura, como sendo os principais fatores que influenciam a resistência de misturas de solo e cal.

Ormsby e Kinter (1973), por sua vez, constataram que em solos ricos em caolinita a adição de cal cálcica dá 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.

2.4.2 Resistência à Vácuo-Saturação

Este ensaio avalia o desempenho relativo de solos estabilizados com cal o cimento. Segundo Dempsey e Thompson (1973), o ensaio de vácuo-saturação pode ser potencialmente uma maneira rápida e de baixo custo de avaliar a durabilidade.

Bhattacharja e Bhatti (2003) constataram que a resistência à compressão simples de solos estabilizado com cimento Portland e cal experimentou uma perda de resistência significativa após o teste de vácuo-saturação. Os solos estabilizados com cimento após a vácuo-saturação tinha uma resistência muito maior do que os dos solos estabilizadas com cal. A resistência à compressão simples aos 7 dias de cura de uma argila com 6% de cimento diminuiu de 1,31 Mpa para 0,48 Mpa; com 6% de cal, a resistência à compressão simples passou de 0,75 Mpa para 0,41 Mpa. Uma tendência semelhante também foi encontrada em outros solos argilosos com baixa plasticidade.

Segundo Su (2012) a pressão de vácuo gerada durante o ensaio induz maior retenção da água na amostra, o que gera uma poro-pressão positiva quando a amostra é submetida a compressão, resultando uma resistência menor. Ao estudar misturas de um solo siltoso com cimento, verificou redução da resistência à compressão simples depós do vácuo-saturação da ordem de 2 a 16%. Afirmou que misturas de Cinza-Cal são mais vulneráveis à vácuo-saturação, apresentando uma redução da resistência da ordem de 24 a 56%.

2.4.3 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).

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.

Dalla Rosa (2013), ao estudar misturas de um solo siltoso-cal, observou a influência da quantidade de cal e a porosidade sobre a rigidez inicial para distintos tempos de cura estudados, verificando que a rigidez inicial aumenta, linearmente com o aumento da quantidade de cal e exponencialmente com a redução da porosidade.

2.4.4 Durabilidade

Segundo Marcon (1977), a durabilidade se refere à capacidade de um material manter a sua integridade estrutural sob condições a que é exposto. As principais forças deteriorantes que afetam a integridade estrutural de um material estabilizado pozolanicamente são as variações de umidade e temperatura. Além destes fatores ambientais, as ações das cargas repetidas do tráfego debilitam o pavimento por fadiga.

Estudos realizados indicam que a durabilidade talvez seja a propriedade mais significativa do comportamento dos materiais estabilizados pozolanicamente, sendo que os fatores que mais

influenciam esta propriedade são: granulometria do agregado, teor de cal, tempo de cura e saturação.

Muitos métodos de avaliação de durabilidade de materiais estabilizados com cal têm sido estudados. Entre estes podemos destacar: perda de peso por abrasão, absorção de água, velocidade de propagação de pulsos, variação de volume e medidas de resistência. Os métodos mais comuns de laboratório são perda de peso e/ou perda de resistência para corpos de prova submetidos a ciclos de molhagem e secagem ou gelo-de-gelo.

A avaliação da durabilidade por perda de peso em escovagens é feita em função de limites máximos de desgaste estabelecidos. Conhece-se normas para perdas máximas, em ciclos de molhagem e secagem, no caso do solo-cimento, que são funções do tipo de solo.

O critério de avaliação de durabilidade por perda de resistência não faz parte de especificações fixas. As indicações que existem são para corpos-de-prova submetidos a ciclos de gelo e degelo. Consideram-se como satisfatórias as misturas que tenham uma razão de resistência de ao menos 80%. Mateos (1961), Robnett e Thompson (1969). A razão de resistência é o quociente expresso em percentagem, da resistência de corpos-de-prova submetidos a ciclos de molhagem e secagem, gelo e degelo ou de vácuo-saturação, pela resistência de corpos-de-prova curados normalmente.

Whitehurst e Yoder (1952, apud Clare e Cruchlrey (1957)) relataram que adição de 5% de cal aumenta acentuadamente a durabilidade de solos a ciclos de congelamento e degelo, e que esta aumenta com o tempo de cura.

Segundo Herrin e Mitchell (1961), a resistência das misturas solo-cal ao intemperismo é influenciada pelo teor e tipo de cal, o tempo de cura, a energia de compactação e o tipo de solo. O teor de cal é tão crítico que um mínimo de 5% é recomendado, mesmo que teores menores possam produzir as resistências especificadas. A durabilidade aumenta igualmente com o tempo de cura e com a energia de compactação. A maior consideração a respeito de durabilidade de misturas solo-cal é a resistência a ciclos de congelamento e degelo. Prolongados períodos de exposição à água produz pouco efeito nocivo (TRB, 1987).

2.5 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE SOLOS MELHORADOS

2.5.1 Impactos ambientais relacionados ao melhoramento de solos

A construção civil é o maior consumidor de recursos naturais de qualquer economia (JOHN, 2000) e é a atividade humana com maior impacto sobre o meio ambiente (CIB; CSTB, 1997). Segundo Sjöström (1996), a construção civil consome entre 14% e 50% de todos os recursos naturais extraídos no planeta. Não existem dados específicos para o Brasil, sobre o consumo destes recursos pela construção civil, mas a participação do setor no PIB nacional é superior a 14,5% (FIESP, 1999). Por meio de dados como estes, é possível perceber a magnitude da atividade na economia mundial e o quão significativo pode ser seu impacto ambiental, em virtude da quantidade de recursos naturais empregados em seu processo.

Geralmente, o aspecto ambiental associado a este setor refere-se à fase construtiva, desconsiderando as fases de produção de materiais, uso e descarte dos mesmos. Neste sentido, um processo adequado de gestão ambiental deve atender, sempre que possível, a todo o ciclo de vida da construção (e evidentemente o ciclo dos seus constituintes).

Pesquisas visando reduzir os impactos ambientais na construção civil receberam investimento crescente ao longo das duas últimas décadas.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta muito empregada para avaliar os impactos ambientais (por exemplo, a pegada de carbono) associados à indústria da construção. Por sua crescente complexidade, muitas vezes se opta por aplicar versões simplificadas do método, que podem ser utilizados como ferramentas eficazes quando se considera o desempenho ambiental durante o processo de projeto. Maguire (2009) considera que as fases de pré-construção e construção são as mais relevantes na construção de estradas, tendo em conta as emissões diretas (provenientes da exploração de máquinas e equipamentos no local) e indiretas (resultantes da produção, extração, transformação, fabricação de materiais de construção) de gases do efeito estufa (GEE).

Além de avaliar os impactos ambientais, outro benefício da ACV é apoiar um processo de tomada de decisão com os dados quantitativos na revisão de cenários alternativos de gestão para melhorar o desempenho ambiental. (HÄKKINEN, 1994).

A indústria da construção, de acordo com Silva (2003), tem usado a ACV direta e indiretamente, por exemplo, para avaliação de materiais de construção, rotulagem ambiental de produtos e certificação ambiental.

Tendências recentes mostram também que a sustentabilidade é levada em conta na construção e operação de rodovias. Assim sendo, a ACV para obter melhores soluções em rodovias vem sendo aplicada a distintos estudos, conforme descrito na continuação. Blankendaal et al. (2014) aplicaram a ACV a um estudo de caso que procura reduzir o impacto ambiental do concreto e do asfalto na construção de rodovias. Barandica et al. (2013) apresentam a ACV como uma ferramenta para subsidiar a decisão acerca da redução das emissões de GEE em projetos de rodovias. Lundström (1998) estuda a escolha de pavimentos de concreto e/ou asfalto sobre o meio ambiente.

Mroueh et al. (2000) e Mroueh et al. (2001) apresentam um procedimento de avaliação de impacto de ciclo de vida para a comparação e avaliação da construção de estradas e terraplenagem alternativas. Stripple (2001) apresenta um estudo piloto para análise de inventário para avaliação do ciclo de vida de estradas na Suécia. Peuportier (2003) apresenta na França uma avaliação de ciclo de vida de 1 km de seis variantes de estradas.

Chester e Horvath (2010) conduziram um estudo de caso na Califórnia, comparando os efeitos de operação do veículo e efeitos indiretos de componentes de veículos, infraestruturas e dos combustíveis para os casos de automóveis, ferroviários pesados e aeronaves por meio da ACV.

Araújo et al. (2014), apresentam a importância da utilização da ACV visando encontrar soluções amigáveis ao meio ambiente na construção de rodovias. O resultado do estudo mostrou que a sustentabilidade da construção do pavimento pode ser melhorada usando misturas asfálticas recicladas.

Zhang et al. (2010) estudaram a ACV de três opções de recapeamento com: (a) Compósitos Cimentícios, (b) Concreto com cimento Portland, e (c) mistura asfáltica usinada a quente (HMA), para um pavimento trincado de concreto, considerando para a análise, 40 anos de vida útil e sua respectiva manutenção.

Duggan et al. (2015) estudaram a construção de uma rodovia sobre solo melhorado (turfa e agente cimentante), onde a ACV realizada envolveu os processos de produção de materiais constituintes da construção do solo melhorado, transporte e máquinas utilizadas em cada processo, bem como os fatores menos desconhecidos, como a drenagem da turfa, sistemas de

drenagem, restauração, estabilidade de taludes e eliminação da vegetação/floresta. Este estudo concluiu que existem impactos relacionados à dosagem de melhoramento de solo.

Santero et al. (2011) compilaram 15 estudos de ACV realizados em rodovias desde 1996 até o princípio de 2010 realizados na Austrália, Canadá, Finlândia, Coreia, Suécia, Reino Unido e EUA, com o objetivo de identificar a qualidade do sistema de produto. Os autores salientam a rápida expansão de avaliações do ciclo de vida do pavimento, o que representa o crescente interesse em melhorar a sustentabilidade deste sistema de infraestrutura. Santero et al. (2011) comprovaram que para quantificar de forma abrangente pegadas ambientais e efetivamente orientar os esforços de sustentabilidade, unidades funcionais precisam ser padronizadas, limites de sistemas expandidos, a qualidade e confiabilidade de dados melhorados, e escopos de estudo alargado. Salienta que melhorando essas deficiências permitirá que estudos futuros sejam avaliações equitativas e comparáveis, em vez de gerar conclusões independentes e isoladas.

2.5.2 Avaliação do Ciclo de Vida

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) destaca-se atualmente como ferramenta de gestão para análise e escolha de alternativas e tomada de decisão sob uma perspectiva ambiental. O seu princípio consiste em analisar as repercussões ambientais de um produto ou atividade, a partir de um inventário de entradas e saídas (matérias-primas e energia, produto, subprodutos e resíduos) do sistema considerado. A ACV de um produto deve incluir todas as entradas e saídas dos processos que participam ao longo de seu ciclo de vida: extração de matérias primas e o processamento necessário dos materiais para a manufatura de componentes, o uso em fim sua reciclagem ou disposição final. Transporte, armazenagem, distribuição e outras atividades intermediárias entre as fases do ciclo de vida também incluem-se quando a sua relevância é suficiente. A este tipo de ciclo de vida denomina-se comumente do berço ao túmulo.

Quando o escopo do sistema limita-se a entradas/saídas a partir da obtenção das matérias primas até que o produto situa-se no mercado (na saída da planta de fabricação) denomina-se como do berço ao portão. E quando só se tem em conta as entradas/saídas do sistema produtivo (processos de fabricação), denomina-se de porta a porta.

A ACV consiste, basicamente, na análise e interpretação dos dados obtidos, por meio do inventário quantitativo e qualitativo, de todos os insumos consumidos e dos resíduos e demais poluentes liberados no ambiente, durante todo o ciclo de vida de um produto, (desde sua fabricação, uso e descarte) e posterior avaliação dos impactos ambientais gerados.

Segundo a metodologia apresentada pela família de Normas ISO 14.040, assim como as diretrizes propostas por Manzini e Vezzoli (2005) e Mourad et al. (2002), para a realização de um estudo de ACV, são necessárias as subseqüentes etapas, descritas nos itens a seguir.

2.5.2.1 Definição do Objetivo e Escopo

O primeiro passo de um estudo de ACV é a definição do objetivo, escopo e das fronteiras do sistema a ser avaliado. A importância dessa etapa se deve principalmente à infinidade de parâmetros que podem ser analisados em um sistema produtivo, de modo que é preciso sempre delimitar, de forma clara, quais devem ser os dados e quais as unidades que devem ser levadas em consideração no estudo.

Este item, também, visa estabelecer a unidade funcional a ser adotada no estudo.

Segundo as recomendações da norma ISO 14.040 (2009a), na definição de escopo e fronteiras de um estudo de ACV, devem ser especificados todos os aspectos, a seguir:

- a) Unidade funcional;
- b) Sistema do produto estudado;
- c) Fronteiras do sistema;
- d) Procedimentos de Alocação (entradas e saídas);
- e) Tipos de Impactos avaliados;
- f) Requisitos da qualidade dos dados (período de tempo e área geográfica coberta);
- g) Fonte dos dados.

2.5.2.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Após a definição do objetivo e escopo do sistema a ser avaliado, o próximo passo é a elaboração do Inventário do Ciclo de Vida de cada um dos materiais que compõem um produto. Esta etapa da ACV consiste no inventário quantitativo e qualitativo, de todos os insumos consumidos e dos resíduos e demais poluentes liberados no ambiente, durante todo o ciclo de vida de um produto (inputs e outputs).

As diferentes fases que compreendem o ciclo de vida de um produto são:

- 1) Obtenção das Matérias-primas e energia;
- 2) Fabricação do produto;
- 3) Transporte;
- 4) Uso;
- 5) Descarte.

Na construção do inventário quantifica-se o uso de recursos (energia e matérias-primas) e as cargas ambientais (emissões atmosféricas, efluentes e resíduos sólidos) geradas ao longo do ciclo de vida de um produto, embalagem, processo, material ou atividade (ISO 14044:2009).

Nesta etapa, a partir do objetivo e dos limites de sistema definidos para a análise, procede-se uma coleta extensiva de dados, gerando planilhas que calculam e apresentam os fluxos de uso total de energia, recursos e liberação de emissões pelo sistema (SETAC, 1991).

Segundo Frankl e Rubik (2000), tais inventários possibilitam a identificação de limitações ou relevam a necessidade de mais informações para a avaliação do processo de construção, podendo gerar mudanças nos procedimentos de coleta de dados, revisão dos objetivos ou escopo do estudo que está sendo realizado. Ressalta-se a importância da consistência dos dados na fase de inventário para a obtenção de resultados mais precisos, que expressem a realidade de forma confiável.

2.5.2.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AIVC)

Pode-se dizer que a etapa mais importante de uma ACV é a avaliação e interpretação dos impactos ambientais gerados pelo produto estudado, porém, também, pode ser mencionada como a etapa mais crítica de um estudo dessa natureza (SANDHOLZER; NARODOSLAWSKY, 2007).

A fase de AICV é composta, primordialmente, pelas etapas de seleção, classificação e caracterização de categorias e modelos que tem como produto final a avaliação dos impactos ambientais selecionados para o produto em estudo. Após estas fases, existem etapas opcionais (normalização, agrupamento e ponderação) que dependem dos objetivos da aplicação do estudo ou adequação para fase final de interpretação da ACV.

O Building Research Establishment (2013) indica as seguintes categorias de impacto para ACVs de materiais da construção civil:

- a) Mudança climática determina os potenciais de impactos a partir de quantitativos de gases do efeito estufa, como CO₂, N₂O, CH₄ e aerossóis
- b) Depleção da camada de ozônio representa a exaustão da camada de ozônio, cujos impactos podem causar danos futuros ao meio ambiente. Já a oxidação fotoquímica ocorre pela formação de nevoeiro gerada pela reação de poluentes emitidos ao ar.
- c) Acidificação está relacionada à formação de chuva ácida como consequência das emissões de óxidos de nitrogênio e enxofre, causando danos no solo e na água.
- d) A eutrofização representa os potenciais de impactos referentes às emissões de nutrientes ao solo e aos corpos d'água, principalmente, de nitratos e óxidos de fósforo.
- e) A oxidação fotoquímica está relacionada com os poluentes secundários formados pela queima de combustíveis e solventes.
- f) Depleção dos recursos naturais representa a utilização de recursos naturais como matérias-primas e combustíveis fósseis, sendo medida pela quantidade extraída em relação às reservas.

Além destas categorias de impacto, a categoria de “Demanda de Energia Acumulada” (CED), tem grande importância para análises em processos com grande demanda de recursos energéticos. Através desta avaliação pode-se determinar e quantificar os recursos energéticos renováveis e não-renováveis consumidos no sistema de produto avaliado, analisando os consumos diretos do processo, assim como os consumos indiretos ocorridos na produção de matérias-primas/insumos do sistema, (FRISCHKNECHT, 2007).

Na etapa de caracterização, os impactos são quantificados para cada categoria de impacto selecionadas em uma medida correspondente a unidade referencial. Na tabela 2.4, pode-se ver a definição das categorias e seus respectivos parâmetros e unidades referenciais.

Tabela 2.4 - Parâmetros e categorias de impactos. Fonte Frischknecht et al. 2007.

| Categoria de Impacto | Parâmetro | Unidade |
|---|---|----------------|
| Mudança climática | Mudança climática, GWP 100a | kg CO2-eq |
| Redução da camada de ozônio | Redução potencial do ozônio (camada estratosfêra), ODP | kg CFC-11 -eq |
| Acidificação do solo e da água | Acidificação potencial do solo e água, AP | kg SO2 -eq |
| Eutrofização | Eutrofização potencial, EP | kg PO4 -eq |
| Oxidante fotoquímicos | Formação potencial de ozônio troposférico, POCP | kg C2H4 -eq |
| Depleção de recursos naturais - elementos | Depleção potencial de recursos naturais não-fósseis, ADP-elements | kg Sb -eq |
| Demanda de energia acumulada | Demanda dos recursos energéticos renováveis e não renováveis, CED | MJ, -eq |

Sendo assim, os dados analisados na fase do ICV, após fase de classificação, são calculados para cada parâmetro, em que diferentes substâncias são convertidas em relação a sua respectiva contribuição à substância da unidade referência do impacto avaliado. Esta equivalência é denominada como a determinação dos fatores de caracterização (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b).

Com a classificação e caracterização da fase AICV, tem-se um perfil ambiental do produto em estudo. No entanto, os dados resultantes destas etapas não são de fácil compreensão, devido ao diferente referencial. Desta forma, cabe ao pesquisador avaliar a necessidade de se analisar os resultados através dos elementos opcionais da avaliação de impacto, descritos na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Elementos opcionais da avaliação de impactos do ciclo de vida. Fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b.

| Elementos Opcionais | Descrição |
|----------------------------|---|
| Normalização | Cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a informações de referência |
| Agrupamento | Agregação e possível hierarquização das categorias de impacto |
| Ponderação | Conversão e possível agregação dos resultados dos indicadores entre as diferentes categorias de impacto utilizando fatores numéricos baseados em escolha de valores; convém que os dados anteriores à ponderação permaneçam disponíveis |

2.5.2.4 Interpretação

Conforme a NBR ISO 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b), os seguintes elementos devem ser estudados na fase de interpretação da ACV:

- a) identificação das questões significativas;
- b) avaliação do estudo;
- c) conclusões, limitações e recomendações.

A identificação das questões significativas é feita com base nos resultados obtido nas fases de ICV e AICV, sendo importante analisar se as características definidas no objetivo e escopo do estudo estão apropriadas em relação aos valores resultantes da ACV.

Para se proceder à avaliação do estudo, três técnicas podem ser utilizadas; verificação da integridade, sensibilidade e consistência. Ambas são ferramentas para avaliar a qualidade dos dados, respectivamente, coletados, resultantes e determinados para análise do estudo.

Por fim, a fase de conclusões, limitações e recomendações é relevante para o reporte ao público-alvo determinado na primeira fase de definição de objetivos da ACV. Faz-se uso de uma revisão crítica da aplicação da ferramenta de ACV, metodologia e resultados, a fim de verificar se a qualidade do trabalho é satisfatória em relação aos requisitos determinados no início do estudo.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este programa experimental tem três objetivos fundamentais. O primeiro consiste em avaliar a influência do tempo de cura, do teor de cal e do peso específico da compactação na previsão da perda de massa, perda de resistência e na rigidez inicial de um solo dispersivo tratado com cal. O segundo é verificar o efeito da cal nas características dispersivas do solo. Por último, avaliar o impacto ambiental potencial gerado pela construção de 1 m³ de Solo-Cal

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

Na segunda etapa foi realizada uma bateria de ensaios de ciclos de molhagem e secagem sobre os pontos de moldagem pré-estabelecidos de acordo com o programa de ensaios detalhado no item 3.5.2. Esta etapa foi desenvolvida para avaliar a influência isolada de cada uma das variáveis investigadas sobre a perda de peso do solo-cal. As variáveis investigadas são detalhadas no item 3.2.

Na terceira etapa, foram realizados ensaios para obter a rigidez inicial das misturas solo-cal estudadas. O programa de ensaios está detalhado no item 3.5.4. Esta etapa teve como objetivo avaliar a influência isolada de cada uma das variáveis investigadas sobre a rigidez inicial e de buscar uma relação entre a rigidez a pequeníssimas deformações (G_0) e a relação volume de vazios/volume de cal do solo tratado.

Na quarta etapa, foi realizada uma bateria de ensaios de resistência à compressão simples e de resistência a vácuo-saturação sobre os pontos de moldagem pré-estabelecidos de acordo com o programa de ensaios detalhado no item 3.5.3. 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 vácuo-saturação do solo tratado.

Na quinta etapa foram realizados ensaios do furo de agulha (*pinhole*) de acordo com o programa detalhado no item 3.5.5. O objetivo desta etapa é verificar a influência isolada de cada uma das variáveis investigadas sobre a dispersibilidade do solo.

A sexta e última etapa consiste em avaliar os impactos ambientais devido à construção de 1 m³ de uma sub-base de Solo-Cal por meio de uma ACV.

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

Portanto, nos itens 3.3 e 3.4 são apresentados os materiais e métodos, respectivamente, utilizados durante o programa experimental. No item 3.5, encontram-se detalhados os programas de ensaios. Como o programa de ensaios está baseado em resultados obtidos na etapa de caracterização, ele será apresentado após os itens referentes aos materiais e métodos.

Tabela 3.1 - Etapas e Ensaios do Programa Experimental

| Etapa | Material | Tipo de Ensaio | Número de Ensaios |
|--------------------------|-----------------|---|--------------------------|
| Ensaio de Caracterização | Solo Dispersivo | Massa Específica Real dos Grãos | 3 |
| | | Análise Granulométrica | 1 |
| | | Límite de Plasticidade | 1 |
| | | Límite de Liquidez | 1 |
| | | Compactação | 2 |
| | | Determinação da Matéria Orgânica | 1 |
| | | Químicos (Teor de Sais na Água Intersticial) | 1 |
| | | Crumb Test | 1 |
| | | Furo de Agulha (Pinhole) | 3 |
| | Cal | Análise Química | 1 |
| Análise Física | | 1 | |
| Dosagem Cal | Solo-Cal | Método Lime Fixation Point (Hilt e Davidson, 1960) | 1 |
| | | Compactação | 3 |
| Durabilidade | Solo-Cal | Ciclos de Molhagem e Secagem | 54 |
| Resistência Mecânica | Solo-Cal | Resistência à Compressão Simples | 54 |
| | | Resistência à Vácuo-Saturação | 54 |
| Rigidez Inicial | Solo-Cal | Medida de Rigidez Inicial pelo equipamento ultrassônico | 436 |
| Ensaio Especial | Solo Cal | Pinhole Test | 30 |

3.2 VARIÁVEIS INVESTIGADAS

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 do peso específico aparente seco (γ_d) da mistura compactada;
 - Quantidade de cal (Ca): massa de cal dividida pela massa de solo seco, expressa 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: solo dispersivo;
 - Tipo de agente cimentante: cal hidratada (tipo CH-II);
 - Temperatura durante a moldagem: $21^\circ \pm 2^\circ\text{C}$;
 - Taxa de deformação nos ensaios de resistência à compressão simples: 1,14% por minuto;
 - Teor de umidade (w): massa de água (a) dividida pela massa de solo seco, expresso em porcentagem.

- Fatores de ruído:
 - Velocidade de moldagem dos corpos-de-prova: a moldagem foi realizada em uma prensa que não é automatizada;

- Homogeneidade da mistura dos corpos-de-prova: a mistura foi realizada manualmente.

As variáveis dependentes são as variáveis de resposta do experimento:

- Perda de massa após ciclos de molhagem e secagem;
- Resistência à compressão simples (q_u);
- Resistência à Vácuo-Saturação (q_v);
- Rigidez inicial (G_0);
- Impactos ambientais potenciais.

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 foi utilizada na análise dos dados.

3.3 MATERIAIS

3.3.1 Solo

O solo utilizado no presente trabalho é um solo sedimentar de formações quaternários pertencente à denominada da região ocidental do Paraguai, conhecida como Baixo Chaco (Figura 3.1). A escolha deste solo se deu pelos seguintes fatores básicos: é um solo que cobre uma extensa área do território do Paraguai sob regiões com relevante potencial econômico; possui características dispersivas causando diversos problemas de erodibilidade em distintas obras de engenharia, fazendo deste um material que necessita de algum tipo de adequação ou melhoria para seu emprego.

A jazida, de onde foi coletada a amostra, situa-se às margens da rodovia nacional N°12 Vice-Presidente Sánchez, na localidade de Remansito, município da cidade de Villa Hayes no departamento Presidente Hayes. Os resultados de caracterização do solo são apresentados no item 4.1.

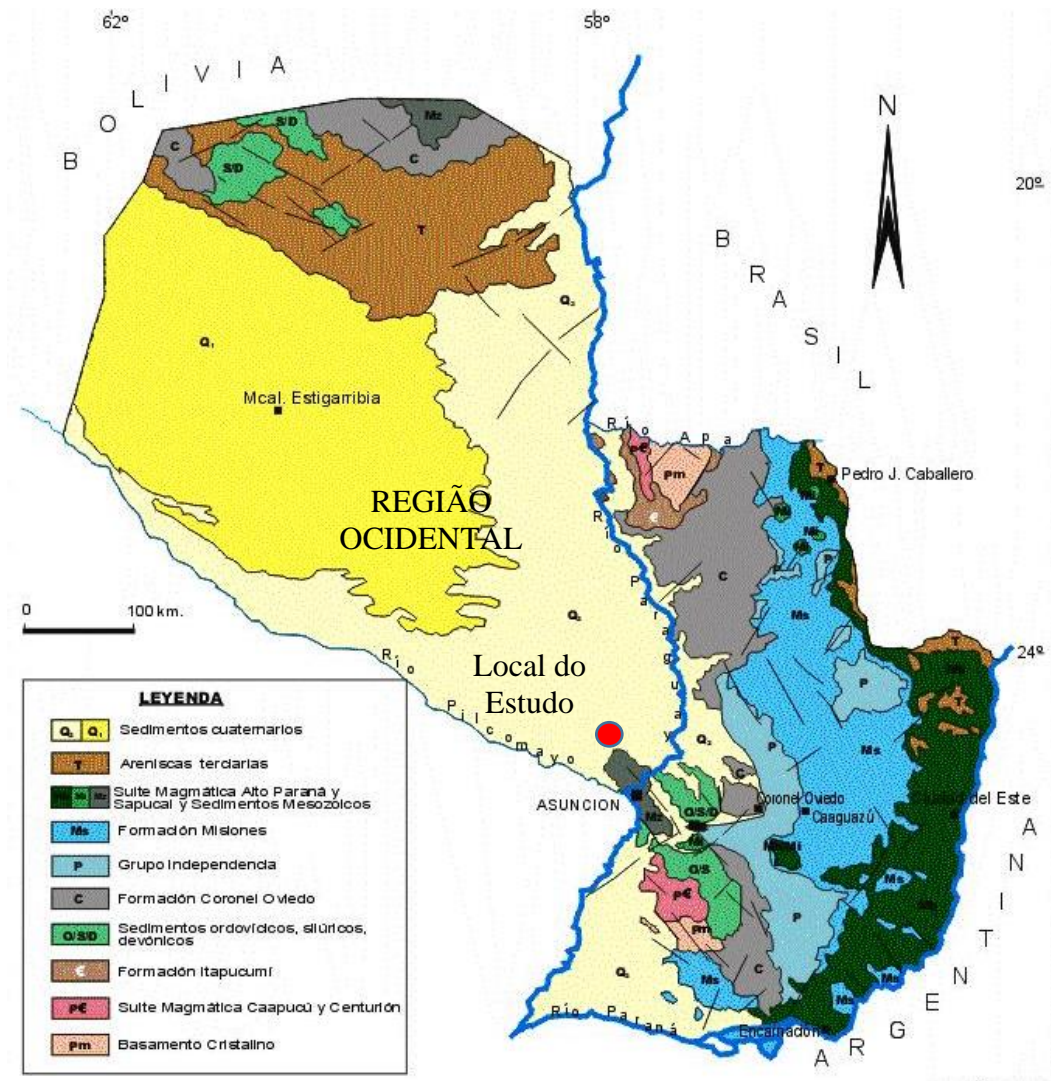


Figura 3.1 - Formações Geológicas do Paraguai. Fonte: González (2000)

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 3.2 apresenta os resultados de ensaios de caracterização da cal utilizada, fornecidos pela CIENTEC, comparando com as exigências da NBR 7175/86 (ABNT, 1986).

Os ensaios de massa específica da cal seguiram as recomendações da NBR 6508 (ABNT, 1984). Obteve-se, a partir de três determinações, o valor médio de $2,6 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 3.2 - Caracterização da Cal Utilizada. Fonte: CIENTEC

| PROPRIEDADES | LIMITES DA NBR 7175 | ANÁLISE | NORMA |
|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|-----------|
| Massa unitária | $\leq 600 \text{ kg/m}^3$ | 510 kg/m^3 | NBR 7251 |
| Finnura (<0,075mm) | - | 17,20% | NBR 9289 |
| Massa específica real dos grãos | - | $2,6 \text{ g/cm}^3$ | NBR 6508 |
| Superfície específica Bleine | - | 10000 - 15000 cm^2/g | NBR NM 76 |
| Índice de atividade pozolânica | - | 60 kgf/cm^2 | NBR 5751 |
| Consistência normal da aragamassa | - | 447 (água) | NBR 9206 |
| Retenção de água | - | 96,20% | NBR 9290 |
| Plasticidade | - | 173 | NBR 9206 |
| Perda ao Fogo | - | 17,10% | |
| Resíduo Insolúvel | - | 12,70% | |
| CO ₂ (anidrido carbônico) | $\leq 5\%$ | 2,20% | |
| Óxidos Totais | $\geq 88\%$ | 94,80% | |
| Óxidos não hidratados | $\leq 15\%$ | 11,00% | |
| CaO | - | 40,00% | |
| MgO | - | 28,00% | |
| Fe ₂ O ₃ | - | 0,23% | |
| Al ₂ O ₃ | - | 0,20% | |
| Umidade | $\leq 1,5\%$ | 0,60% | |
| Resíduo na peneira 0,600mm | $\leq 0,5\%$ | 0,00% | |
| Resíduo na peneira 0,075mm | $\leq 15\%$ | 8,00% | |

3.3.3 Água

A água utilizada para a moldagem dos corpos-de-prova e para os ensaios de caracterização foi água destilada obtida no laboratório por equipamento próprio.

3.4 MÉTODOS

3.4.1 Coleta de Amostras

A amostra de solo foi coletada no estado deformado, mediante escavação mecânica, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. A amostra assim obtida foi armazenada e transportada em sacos plásticos adequadamente vedados. Durante a coleta, todos os cuidados foram tomados no sentido de se evitar a contaminação da amostra. (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Coleta e armazenamento de amostras.

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 reações com dióxido de carbono presente na atmosfera.

3.4.2 Preparação das Amostras

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

As amostras assim preparadas eram armazenadas até a data da sua utilização em sacos plásticos, devidamente identificados e vedados. (Figura 3.3).



Figura 3.3 - Armazenamento das amostras

3.4.3 Ensaios de Caracterização

Para caracterização do solo, foram utilizados os ensaios de determinação do teor de umidade, granulometria, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade, compactação, determinação do pH, difração por raios-x, determinação da matéria orgânica, determinação de sais na água intersticial e o ensaio do furo de agulha (*Pinhole*).

As determinações do teor de umidade do solo seguiram os procedimentos descritos pelo anexo da norma NBR 6457/86.

A análise granulométrica do solo foi realizada de acordo com os procedimentos descritos pela NBR 7181/84.

A determinação da massa específica real dos grãos de solo seguiu-se o método descrito pela NBR 6508/84.

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

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

Para determinação do pH foi empregado um pH-metro MARTE MB-10 com eletrodo de vidro combinado. O eletrodo foi calibrado com soluções de pH 7,0 e pH 10,0 para determinação do pH da mistura solo-cal.

A determinação da matéria orgânica seguiu o método descrito pela NBR 13600/96. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS.

A avaliação da dispersibilidade do solo foi realizada de acordo com os procedimentos descritos pela NBR 14114/98.

Todos os ensaios de caracterização física e química da cal foram realizados no Laboratório de Análises Inorgânicas da Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (CIENTEC).

3.4.4 Ensaios de Durabilidade por Molhagem e Secagem

Os procedimentos adotados para a realização do ensaio foram baseados na norma NBR 13554/1996. Esta norma prescreve o método para a determinação de perda de massa, variação de umidade e variação de volume produzidas por ciclos de molhagem e secagem de corpos-de-prova de solo-cimento.

3.4.4.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Foram utilizados para o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura (Figura 3.4). A confecção dos corpos-de-prova foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura.

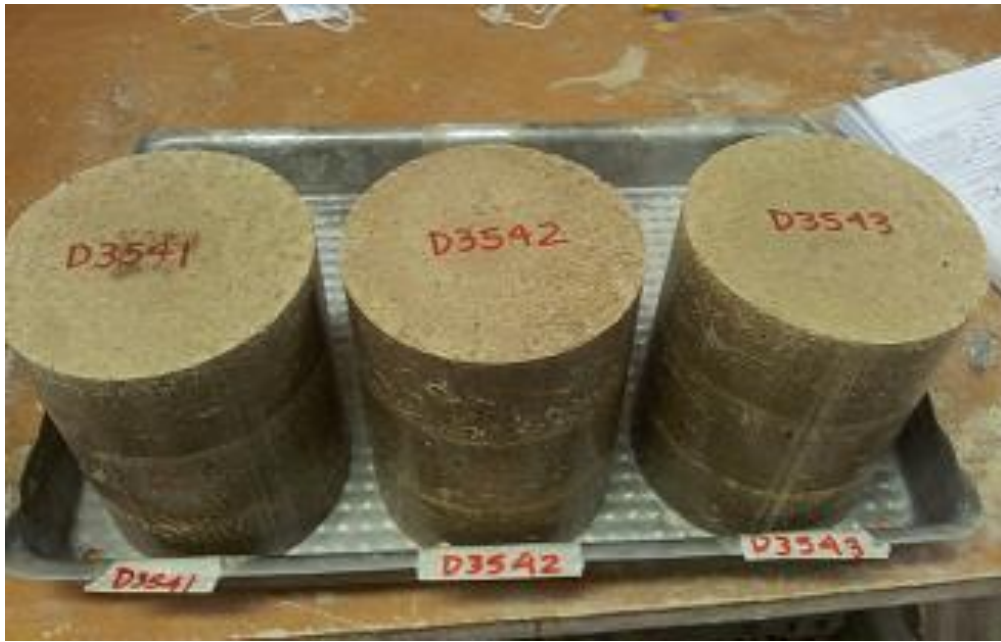


Figura 3.4 - Corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura

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

A quantidade de cal necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo seco utilizada e a quantidade de água (teor de umidade) em relação à soma das massas de solo seco e cal. 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 material necessário para confecção de um corpo-de-prova era dividida em três partes iguais (para o corpo-de-prova do ensaio *Pinhole*, em cinco partes iguais), armazenados em recipientes com tampa para evitar a perda da umidade, para posterior compactação.

Ao final deste processo, três pequenas porções da mistura eram retiradas e colocadas em cápsulas para determinação do teor de umidade. A média dos três teores de umidade medidos era 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 contínuo, devidamente lubrificado, de maneira que cada camada atingisse as

especificações de teor de umidade e peso específico aparente seco, 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 com a ajuda de um extrator de corpo-de-prova, sua massa e medidas (diâmetro e altura) devidamente anotados com resolução de 0,01g e 0,1 mm 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 $21^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$). (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Corpos-de-prova na câmara de cura

Eram considerados aptos para ensaios os corpos-de-prova que atendiam as seguintes tolerâncias especificadas na norma ASTM D 559/2003:

- Massa específica aparente seca (γ_d): valor especificado $\pm 48,1 \text{ kg/m}^3$;

- Teor de umidade (ω): valor especificado ± 1 pontos percentuais.

3.4.4.2 Procedimento de Ensaio

O método estabelece uma cura em câmara úmida durante 7 dias, mas de forma a avaliar a influência do tempo de cura, foram estabelecidos distintos períodos de cura. Após isto, os três corpos-de-prova moldados para cada tipo de mistura foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem, e dois dos três corpos-de-prova também a ciclos de escovagem. O corpo-de prova restante foi usado para obter a variação de umidade e a variação de volume durante o ensaio. Os ciclos tiveram duração de 48 horas distribuídas da seguinte maneira: 5 horas de imersão em água, 42 horas de secagem em estufa a 71 °C e 1 hora de intervalo para escovagem e pesagem a fim de avaliar a perda de peso. Por se tratar de pesquisa, as perdas de peso foram avaliadas após cada ciclo. Repetiram-se estes ciclos até o número 6. (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Ciclos de molhagem, secagem e escovagem

3.4.5 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, este ensaio possui baixo custo, é confiável e amplamente difundido no meio técnico.

3.4.5.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Foram utilizados para os ensaios de 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 descritos no item 3.4.4.1.

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

- Massa específica aparente seca (γ_d): valor especificado ± 1 pontos percentuais;
- Teor de umidade (ω): valor especificado $\pm 0,5$ pontos percentuais.

3.4.5.2 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). As velocidades de deformação aplicadas nestes ensaios foram de 1,14 mm por minuto. Os procedimentos 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, foram submersos em um recipiente com água por um período de 24 horas, visando sua aproximação à condição de saturação.

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. Procedeu-se, então, a execução do ensaio e anotou-se a carga máxima atingida pelo corpo-de-prova (Figura 3.7).

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.

Também foi considerado o tipo de falha dos corpos-de-prova visando determinar a área corrigida segundo o especificado na norma ASTM D 5102/2006.



Figura 3.7 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples.

3.4.6 Ensaios de Resistência à Vácuo-Saturação

Ensaio de vácuo-saturação descrito na norma ASTM C 593/06 é o ensaio de durabilidade especificado para solos estabilizados com cal-cinza e outros tipos de pozolanas. O ensaio, visando avaliar o desempenho das distintas misturas de solo-cal, compara as resistências à compressão simples de corpos-de-prova que sofreram um processo de vácuo-saturação com a resistência à compressão simples de corpos-de-prova “não alterados”.

3.4.6.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Foram utilizados, para os ensaios de resistência à vácuo-saturação, 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 3.4.4.1. As mesmas tolerâncias (especificadas no item 3.4.5.1) utilizadas para os corpos-de-prova de resistência à compressão simples, foram utilizadas para as amostras de resistência à vácuo-saturação.

3.4.6.2 Procedimento de Ensaio

Os corpos-de prova, após atingir em o tempo de cura especificado, são retirados do saco plástico e mantidos à temperatura ambiente. A seguir, são colocados em uma câmara de vácuo, onde posteriormente é aplicada uma pressão de vácuo de 24 in. Hg (81,36 kPa). Depois de 30 minutos, a câmara é inundada com água destilada e o vácuo é retirado, deixando os corpos-de-prova saturados à pressão atmosférica por uma hora para, a seguir, ser realizado o ensaio de resistência à compressão simples utilizando os mesmos equipamentos e os mesmos procedimentos, descritos no item 3.4.5.2. (Figura 3.8).



Figura 3.8- Corpos-de-prova e execução do ensaio de vácuo-saturação.

Neste trabalho foram aplicadas algumas variações no procedimento do ensaio descrito na norma ASTM C 593/06.

- As dimensões dos corpos-de-prova cilíndricos empregados são de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, com a finalidade de comparar os resultados obtidos com os resultados de trabalhos realizados anteriormente e para a relação altura/diâmetro entre 2 e 2,5 estipulada na norma ASTM D 5102/1996.
- Os corpos-de-prova foram colocados na câmara de vácuo um dia antes de atingir o tempo de cura especificado, visando aproximar à condição de saturação, através de sua imersão por 24 horas.

Visando avaliar o desempenho das distintas misturas de solo-cal, o ensaio compara as resistências à compressão simples de corpos-de-prova que sofreram um processo de vácuo-saturação com a resistência à compressão simples de corpos-de-prova “não alterados”.

3.4.7 Ensaios de Medidas de Rigidez Inicial

Os ensaios de medida de rigidez inicial através da técnica de ondas ultrassônicas trata-se de um método simples, não destrutivo, que visa à 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.

3.4.7.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Ao tratar-se de um ensaio não destrutivo, foram utilizados, para os ensaios de medidas de rigidez inicial, os mesmos corpos-de-prova correspondentes aos ensaios de durabilidade por ciclos de molhagem e secagem, resistência à compressão simples e resistência à vácuo-saturação.

3.4.7.2 Procedimento de Ensaio

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

O equipamento *Pundit Lab Plus* 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 (Figura 3.9).

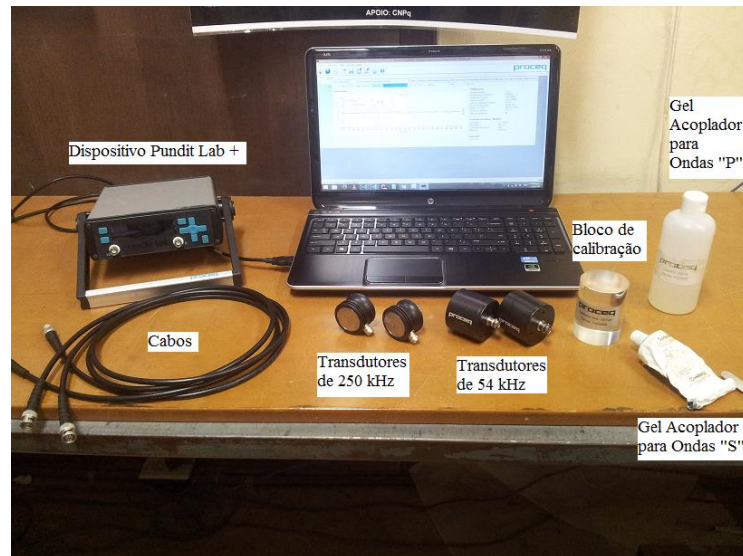


Figura 3.9 - Partes componentes do equipamento *Pundit Lab Plus*.

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. Foi utilizado o gel acoplador, da marca *Mercur*, para facilitar o envio das ondas ultrassônicas dos transdutores de ondas “P” e um gel acoplador de alta viscosidade para ondas de cisalhamento da marca *Magnaflux*, para os transdutores de ondas “S”. Primeiramente 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 3.9. Os transdutores utilizados eram de 54 kHz e 250 kHz para as ondas “P” e para as ondas “S”, respectivamente.

O corpo-de-prova devidamente posicionado (Figura 3.10) foi submetido à passagem de ondas que 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, emitida pela unidade do *Pundit Lab Plus* (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 Plus*, que a conduzia ao software para aquisição dos dados. Neste software é possível obter o tempo de atraso da onda (em μs).



Figura 3.10 - Execução do Ensaio de Medidas de Rigidez Inicial.

A Figura 3.11 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.

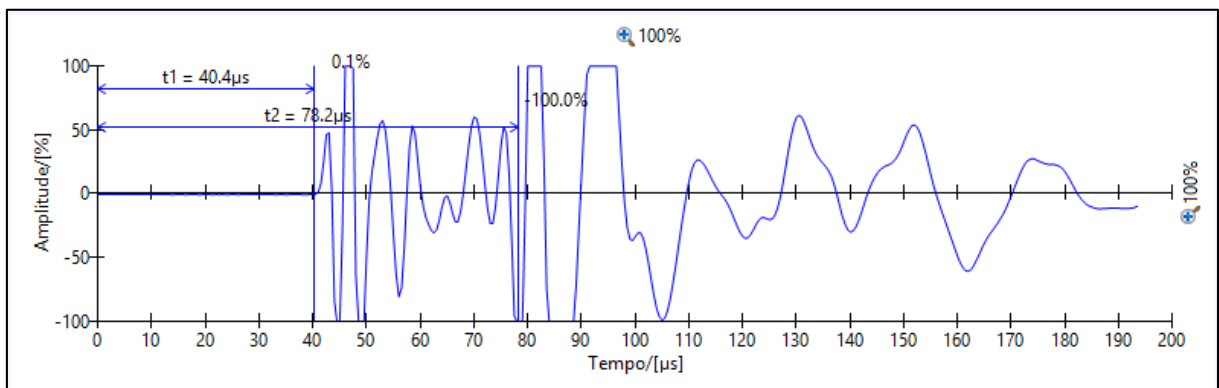


Figura 3.11 - Exemplos de Ondas no equipamento ultrassônico Pundit Lab Plus.

Utilizou-se as respostas das ondas secundárias (“S”) para 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:

$$(4.1) \quad G_0 = \rho V_s^2 = \rho \left(\frac{L}{t_s} \right)^2$$

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

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 ensaiadas com os mesmos procedimentos descritos nos itens 3.4.4.2, 3.4.5.2 e 3.4.6.2.

3.4.8 Ensaio do Furo de Agulha (*Pinhole*)

Foram utilizados, para os ensaios do furo de agulha (*Pinhole*), corpos-de-prova cilíndricos de 3,57 cm de diâmetro e 3,81 cm de altura. 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 3.4.4.1. (Figura 3.12).

Os procedimentos de ensaio do furo de agulha foram descritos nos itens. 2.1.3.4.



Figura 3.12 - Corpo-de-prova e execução do ensaio Pinhole.

3.5 PROGRAMA DE ENSAIOS

3.5.1 Definição dos Pontos de Moldagem

O programa de ensaios, para os experimentos realizados nesta pesquisa, foi definido baseado na Figura 3.13, a partir das curvas de compactação do solo e da mistura solo-cal com 5% de cal em relação ao peso seco do solo. Nela observam-se as curvas de compactação 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 uma linha vertical, com um mesmo teor de umidade e diferentes pesos específicos aparentes secos.

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

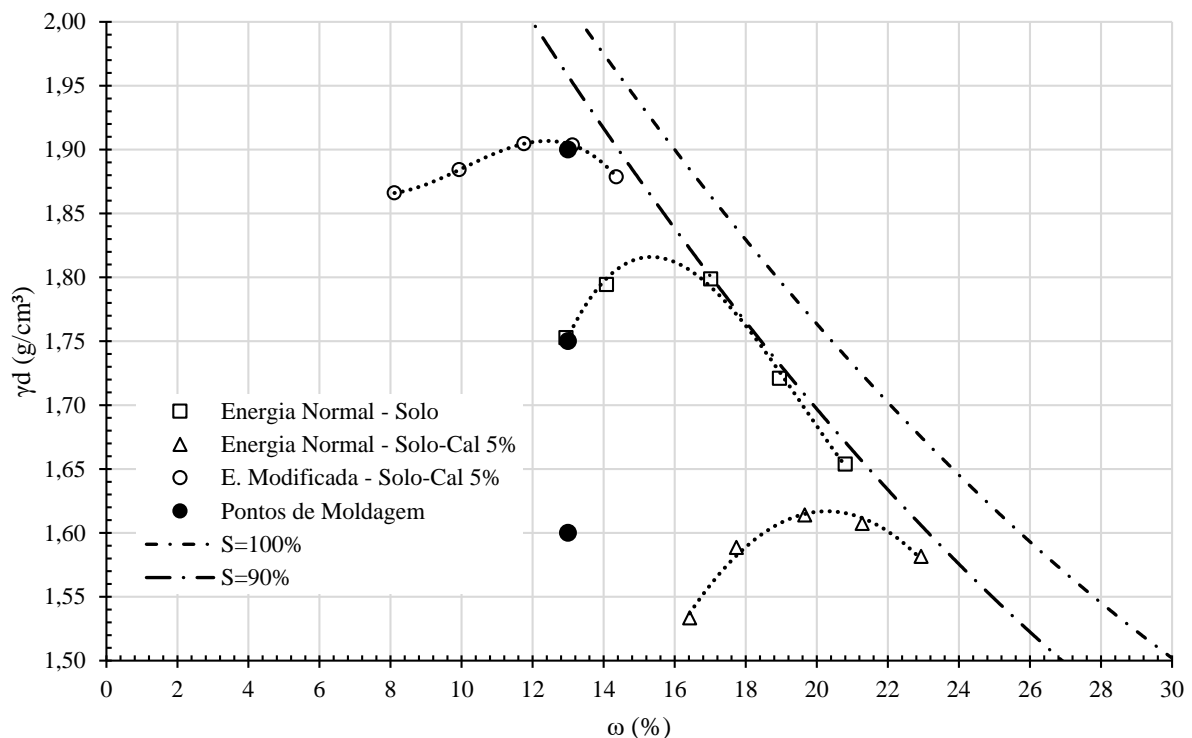


Figura 3.13 - Curvas de Compactação

Para a avaliação das variáveis do solo tratado com cal foram moldados corpos-de-prova com 3%, 5% e 7% de cal para cada ponto da Figura 3.13.

Os teores de cal utilizados neste trabalho (3% a 7%) foram definidos através do Método de dosagem para solo-cal estabelecido pelo ensaio de *Lime Fixation Point* (Hilt e Davidson, 1960) e experiência brasileira e internacional.

A partir do método do *Lime Fixation Point* (Figura 3.14) foi definido o teor mínimo de cal 3% (em termos de peso específico aparente seco) adotado para este trabalho. Quando a cal é misturada com solos argilosos, são envolvidos dois estágios de reação. O primeiro estágio é imediato e ocorre com uma melhora da trabalhabilidade resultando um aumento do limite plástico (devido pela troca catiônica e floculação). A quantidade de cal requerida para produzir o aumento máximo em termos de limite plástico é definida como *Lime Fixation Point*, e este processo está referido como ponto de fixação de cal. No segundo estágio, o excedente de cal após o *Lime Fixation Point* é utilizado no processo de cimentação onde se gera um ganho de resistência da mistura devido às reações pozolânicas.

As quantidades de 5% e 7%, foram escolhidas considerando a experiência brasileira e internacional com o solo-cal Mitchell (1981), Consoli et al. (2001), Consoli et al. (2008).

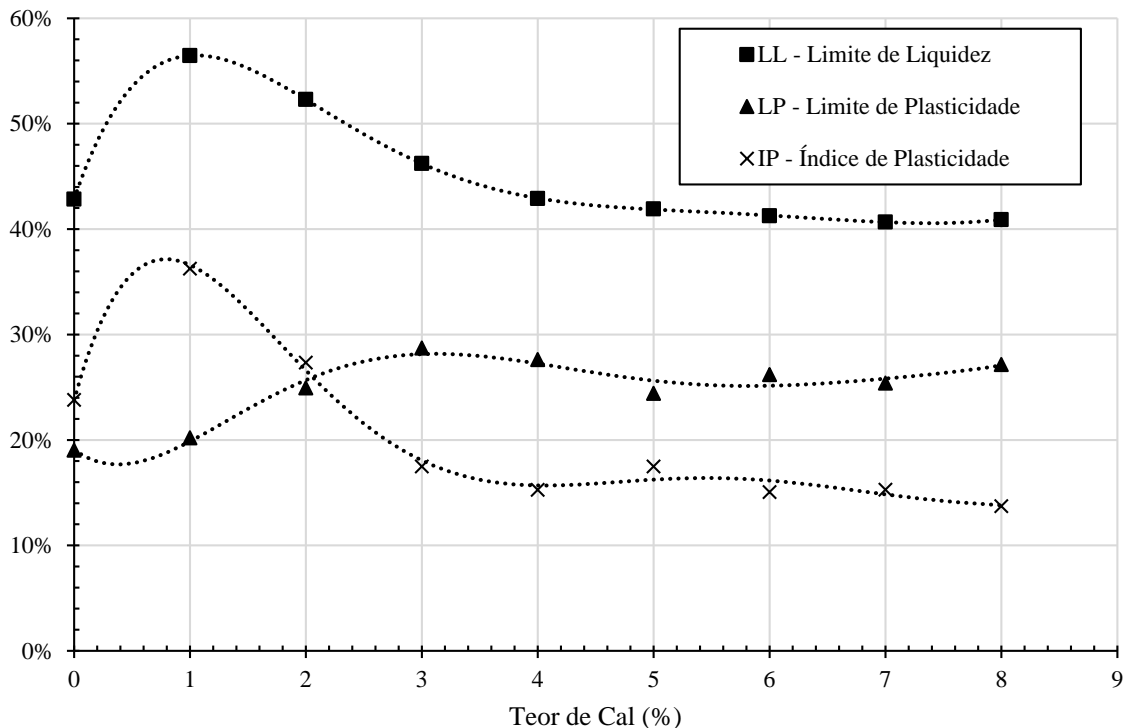


Figura 3.14 - Variação do LL, LP e IP do Solo-Cal versus Teor de Cal

Também foi avaliado o método do ICL (*Initial Consumption of Lime*), proposto por Rogers et al. (1997). Afirma que o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor constante máximo. Verifica-se que é necessário um teor mínimo de 5% de cal para cessar a variação do pH e chegar aos valores máximos constantes ($\text{pH} \approx 12,3$). Com este método descarta-se a possibilidade de empregar 3% de teor de cal (teor mínimo definido com o método *Lime Fixation Point*), más neste trabalho mantem-se visando demonstrar a afirmação de Paige-Green (1991) e Paige-Green et al. (1990) que solos estabilizados podem ser seriamente afetados pela carbonatação quando a mistura apresenta um pH abaixo de 12.

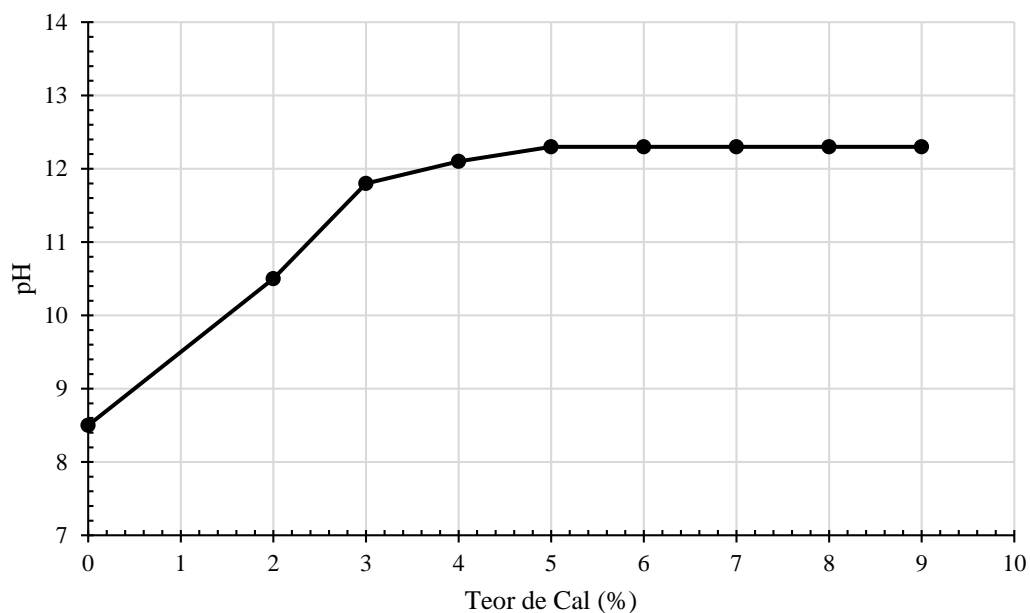


Figura 3.15 - pH do Solo-Cal versus Teor de Cal

3.5.2 Programa de Ensaios de Durabilidade por Molhagem e Secagem

O programa de ensaios de durabilidade por molhagem e secagem teve por objetivo avaliar a influência das variáveis: quantidade de cal, peso específico e tempo de cura sobre a perda de massa das misturas de solo-cal.

Os três pontos foram moldados com porcentagens de cal de 3%, 5% e 7% para um tempo de cura de 28 dias visando avaliar a influência da quantidade de cal e o peso específico; além disso para avaliar a influência do tempo de cura, os três pontos foram moldados com 5% de cal com diferentes tempos de cura (7 e 60 dias). Só foi empregado a mistura de 5% de cal devido à quantidade limitada de solo disponível nesta pesquisa. As mostras foram moldadas em triplicata.

3.5.3 Programa de Ensaio de Resistência à Compressão Simples e à Vácuo-Saturação

O programa de ensaios de resistência à compressão simples e à vácuo-saturação teve por objetivo avaliar a influência das variáveis: quantidade de cal, peso específico e tempo de cura sobre a resistência à compressão simples das misturas de solo-cal.

Os três pontos foram moldados com porcentagens de cal de 3%, 5% e 7% para um tempo de cura de 28 dias visando avaliar a influência da quantidade de cal e o peso específico; além disso os três pontos foram moldados com 5% de cal com diferentes tempos de cura (7 e 60 dias). As mostras foram moldadas em triplicata.

3.5.4 Programa de 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, peso específico e tempo de cura sobre o módulo cisalhante (G_0) das misturas de solo-cal.

Depois de moldados todos os corpos-de-prova descritos nos itens 3.5.1.1 e 3.5.1.2, foram embalados e devidamente armazenados em câmara úmida até o dia da leitura predeterminado, visando ter leituras dos três pontos da Figura 3.13 com porcentagens de cal de 3%, 5% e 7% para distintos tempos de cura (7, 14, 21, 28, 44, 60 e 90 dias).

3.5.5 Programa de Ensaio do Furo de Agulha (*Pinhole*)

O programa de ensaios do furo de agulha (*Pinhole*) teve por objetivo avaliar a influência das variáveis: quantidade de cal e o peso específico aparente seco sobre as características dispersivas das misturas de solo-cal. A susceptibilidade à dispersão é avaliada mediante a classificação dos solos em seis padrões, que variam desde não dispersivos (classe ND1) a fortemente dispersivos (classe D1), conforme a Figura 3.16.

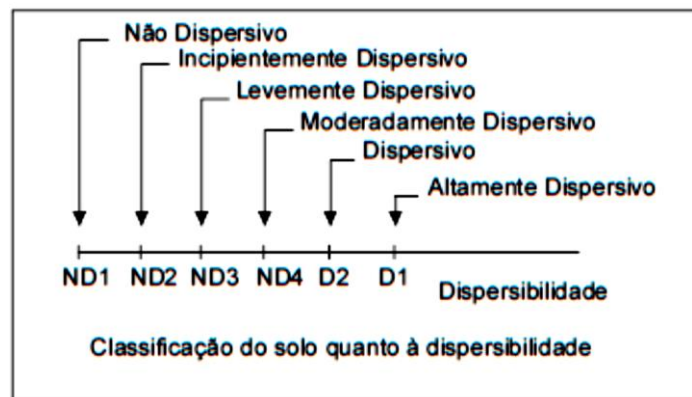


Figura 3.16 - Classificação do solo quanto a dispersibilidade no ensaio *Pinhole*.

3.6 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE MISTURAS DE SOLO-CAL

3.6.1 Estudo de Caso

O estudo de caso desenvolvido neste trabalho teve como proposta a aplicação da ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) estimar os impactos ambientais da construção de uma sub-base de Solo-Cal, fazendo uma comparação com nove tipos de misturas.

A metodologia aqui aplicada, segue as diretrizes da ferramenta de ACV segundo norma ISO 14040 (ABNT, 2009b), em que as quatro etapas principais do estudo (definição de objetivos e escopo, análise do inventário do ciclo de vida, avaliação dos impactos do ciclo de vida e interpretação) são detalhadas nos próximos itens, com exceção da etapa de interpretação que é comentada no capítulo 4.

Para a realização deste ACV, verificou-se a necessidade do uso de recursos computacionais, especificamente o *software Open LCA*, o que facilitou a utilização e modificação de dados, além de relacionar os dados a diferentes categorias de impacto de ciclo de vida e analisar segundo diferentes metodologias. Elegeram-se o *software Open LCA*, versão 1.4 (GreenDelta, 2014), pela sua ampla gama de recursos e facilidade de inserção de dados provenientes de bases disponíveis, além de ser um software disponibilizado gratuitamente na internet para aplicação da ferramenta aqui estudada.

3.6.2 Delimitações e Limitações da Pesquisa

O trabalho delimita-se a analisar o processo de construção de 1 m³ de solo melhorado usado na construção de uma sub-base de Solo-Cal empregando nove tipos de misturas (misturas

estudadas na primeira parte deste trabalho), procurando avaliar o desempenho ambiental das misturas que podem ser informações importantes na etapa de decisão de um projeto.

São limitações do trabalho os dados coletados para análise de inventário do ciclo de vida dos processos do sistema de produto, obtidos em pesquisas de dados de indústrias e adaptados do banco de dados do *Ecoinvent* versão 2.2 e 3.1 especificamente do inventário realizado por Kellenberger et al. (2007).

3.6.3 Definição do objetivo e escopo

Nesta fase, definiram-se os principais aspectos da ACV. Primeiramente, definiu-se que o objetivo da análise é avaliar e comparar o desempenho ambiental das nove misturas de Solo-Cal. Para avaliar estas misturas optou-se em uma camada de sub-base de Solo-Cal típica da estrutura de um pavimento.

A partir das bibliografias revisadas e de dados correspondentes à extração dos materiais, à produção da cal, à logística de transporte e à própria construção, foi delimitado o escopo desta ACV. Nesta etapa, muitas delimitações tiveram que ser realizadas para que se obtivesse um inventário que satisfizesse os objetivos.

3.6.3.1 Definição da unidade funcional

A unidade funcional do estudo está relacionada ao volume unitário de mistura de Solo-Cal de uma camada de Sub-Base, baseado na recomendação de Jullien et al. (2014). Estes autores indicam que a unidade funcional na ACV de um pavimento pode ser escolhida de acordo com a massa ou o volume unitário ou total de materiais componente do pavimento estudado; como assim também a 1 km de pavimento com as espessuras, larguras e comprimentos definidos para cada caso. Diversas pesquisas de ACV de pavimentos foram estudadas baseados na comparação de materiais empregados na pavimentação (LUNDSTRÖM, 1998; MROUEH et al., 2000, 2001; STRIPPLE, 2001; PEUPOURTIER, 2003; CHESTER e HORVATH, 2010; SANTERO et al., 2011a; SANTERO et al., 2011b).

3.6.3.2 Coleta de dados do ciclo de vida

A etapa de coleta de dados foi realizada a partir da base de dados internacional *Ecoinvent* versão 2.2 e 3.1, onde foram obtidos todos os dados referentes à fabricação da cal hidratada, desde a extração das matérias-primas até o empacotamento dos sacos de cal hidratada, os dados do inventário realizado por Kellenberger et al. (2007), corresponde à única fábrica de cal hidratada

na Suíça (*Kalkfabrik Netstal AG*). A base de dados foi utilizada como referência e foi feita a adaptação para o caso de produção de cal do Paraguai com dados obtidos mediante pesquisa numa fábrica de cal *Concret-Cal*, situada no Paraguai.

Além disso foram coletados dados de uma empresa construtora do Paraguai referentes ao consumo de diesel dos diferentes equipamentos encarregados da extração de solos, transporte de solo e da cal, homogeneização e compactação de misturas de Solo-Cal.

3.6.3.3 Definição do sistema de produto

Na Figura 3.17, são detalhados todos os produtos e processos considerados na análise de ACV.

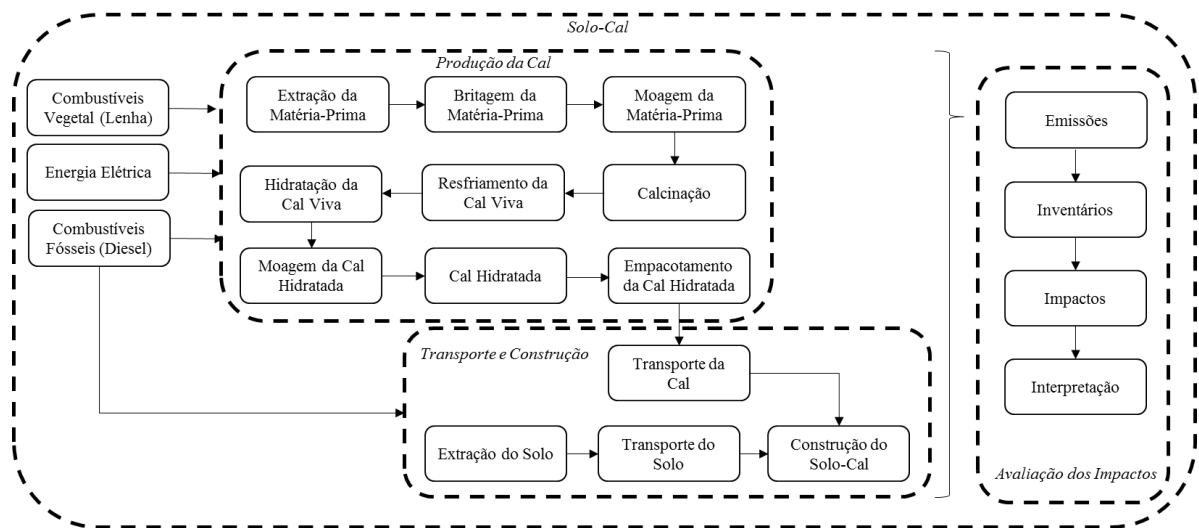


Figura 3.17 - Sistema de produto “do berço ao portão” da construção 1 m³ de uma camada de Solo-Cal.

Os nove ciclos de vida em estudo possuem os mesmos elementos, variando só o consumo de material para cada tipo de mistura. Não estão abordados neste estudo os processos de uso, manutenção e a disposição final das distintas misturas de Solo-Cal.

Tabela 3.3 - Misturas avaliadas

| Mistura | SC1-3 | SC2-3 | SC3-3 | SC1-5 | SC2-5 | SC3-5 | SC1-7 | SC2-7 | SC3-7 |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Peso Específico Aparente Seco (γ_s) | 1.600 kg/m ³ | 1.750 kg/m ³ | 1.900 kg/m ³ | 1.600 kg/m ³ | 1.750 kg/m ³ | 1.900 kg/m ³ | 1.600 kg/m ³ | 1.750 kg/m ³ | 1.900 kg/m ³ |
| % Cal | 3% | 3% | 3% | 5% | 5% | 5% | 7% | 7% | 7% |
| Umidade | 13% | 13% | 13% | 13% | 13% | 13% | 13% | 13% | 13% |

O sistema restringe-se às fases que correspondem desde a extração de matérias-primas para a fabricação da cal até a obtenção final de 1 m³ sub-base de solo-cal.

A partir da Figura 3.17 são explicados a seguir todos os processos que englobam cada sistema de produto.

O processo da produção de cal hidratada engloba os seguintes sub-processos, descritos a seguir: (i) produção de calcário, (ii) calcinação do calcário, (iii) hidratação da cal viva e (iv) empacotamento.

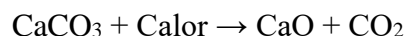
i) Produção de calcário

O calcário é extraído de jazidas a céu aberto. A primeira operação é remover a camada de terra (isto é, o solo, argila, o que recobre a jazida de calcário). Diversas são as técnicas e tipos de equipamentos usados para destape de jazida. A próxima etapa é a perfuração das rochas. Brocas rotativas e de percussão são usadas. Os orifícios são preenchidos com explosivo.

No processo de explosão a pedra é fragmentada, com cerca de 90 g de explosivo por tonelada de calcário. Após explodir, a rocha fragmentada é carregada geralmente por escavadeiras hidráulicas e transportada em caminhões basculantes para a unidade de britagem e peneiramento. Na planta de britagem e peneiramento, os pedaços maiores de rocha são quebrados em um britador de mandíbula primária. Depois de ter alcançado o tamanho desejado, a rocha é transportada para a instalação de lavagem e de classificação. Ao passar diferentes esteiras transportadoras e agitando as peneiras com diferentes aberturas de malha, a brita é lavada e armazenada. A água utilizada para a lavagem é água de rio. Como não há disponibilidade de mais dados, nenhum impacto ambiental está previsto neste processo de britagem e peneiramento, portanto as emissões não são tidas em conta.

ii) Calcinação do calcário

Segundo EPA (1998), a reação química para a decomposição de carbonato de cálcio (Calcário) por calor é:

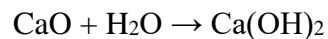


Neste sub-processo, a planta da fábrica *Concret-Cal* usa dois fornos metálicos de eixo vertical e ambos são acionados por lenha vegetal. As emissões se restringem a liberação de CO₂ pela calcinação do calcário. Os fornos de calcinação possuem duas partes: (a) a zona de pré-aquecimento das pedras calcárias, que logo são transferidos para o ar de combustão (pré-aquecido a cerca de 800 °C) e (b) a zona de calcinação da cal viva, que ocorre em uma temperatura de cerca de 1100 C.

Segundo Kellenberger et al. (2007), o forno de KFN da Suíça, precisa uma energia de 4.200 kJ/kg, para aquecimento dos fornos às temperaturas correspondentes do processo de calcinação, utilizando combustível pesado (*Heavy Fuel Oil*). Já na *Concret-Cal* (planta do Paraguai) o forno precisa uma energia de 6.620 kJ/kg e a energia é proveniente da queima de lenha vegetal. O consumo de lenha vegetal é de 0,427 kg por cada quilograma de cal hidratada produzida. Esta lenha é proveniente de uma reserva de eucaliptos que apresentam uma densidade aproximada de 0,60 – 0,80 kg/m³, com um poder calorífico subestimado de 15,5 MJ/kg.

iii) Hidratação da cal viva

Segundo EPA (1998), o processo normal de hidratação é realizado sob pressão atmosférica a cerca de 100 C.



Na KFN (Suíça), a cal viva é misturada rapidamente com algo menos do que duas vezes a quantidade estequiométrica de água. O pó de cal hidratada produzido tem uma densidade muito mais baixa do que a cal viva e, portanto, pode passar através de um açude para entrar na segunda fase de apagamento onde é agitada ligeiramente. Quando a segunda fase da hidratação está concluída, o produto é seco.

A cal hidratada em bruto é alimentada a um primeiro circuito em que um separador de ar remove as partículas mais finas. Estes finos são recuperados utilizando um ciclone, e em seguida, transferido por um sistema de transporte pneumático para os silos de armazenagem e empacotamento. A cal hidratada é descarregada a cerca de 100 °C e contém menos do que 1% de água em excesso. Por insuficiência de dados do consumo de água no processo de hidratação para a fábrica de cal do Paraguai, a quantidade de água foi adotada igual aos processos descritos para KFN.

iv) Empacotamento

O processo de embalagem do produto é realizado em sacos de papel. Uma vez preenchidos com cal hidratada, os sacos são transportados por uma cinta transportadora. Por sua vez, os sacos são empilhados em páletes. Para garantir a proteção contra umidade, e para um melhor transporte, os páletes são envoltos em sacos plásticos. O pálete é assumido para ser usado 10 vezes antes de ser descartado. Assim, apenas 1 / 10 da demanda é inventariado. Este processo de empacotamento da KFN é assumido igual para a fábrica de cal de Paraguai, devido à insuficiência de dados para este processo.

Para os processos de transporte de cal, extração do solo, transporte do solo e produção da mistura solo-cal, referente às descrições de cada processo e considerações para os consumos de cada maquinário adotados neste trabalho, foram fornecidos por parte de uma empresa construtora da área de pavimentação do Paraguai.

Portanto, o processo de transporte da cal compreende o transporte do produto empacotado de cal hidratada em caminhões triplo eixo com capacidade para 25 tn. Considerou-se uma velocidade do caminhão de 40 km/h em média, tempo de carregamento e descarregamento médio de 40 minutos e um transporte de 20.000 kg de cal hidratada por viagem. Finalmente, foi considerada uma distância de 100 km, de modo a considerar que as obras serão realizadas em um local afastado da fábrica distribuidora da cal hidratada.

O processo de extração do solo envolve os trabalhos de exploração do solo local. Nestes trabalhos, foi considerada a extração de solo realizada por escavadeira. Desconsiderou-se a limpeza do local de exploração devido à baixa incidência deste trabalho.

O processo de transporte do solo envolve o trabalho de transporte de solo até o pé de obra. Neste processo, considerou-se um tempo de espera de 7 minutos entre carga e descarga do solo, e uma velocidade média de transporte de 30 km/h. A distância média considerada para a exploração do solo foi de 1,5 km. Esta distância é normalmente considerada para trabalhos de extração de solo para terraplenagens.

O processo de produção da mistura solo-cal engloba os processos de mistura, homogeneização e compactação. Para os trabalhos de mistura até a homogeneização do solo-cal, considerou-se os seguintes maquinários: motoniveladora, distribuidora de cal, recuperadora, caminhão regador de água e trator com grade de discos. Para os trabalhos de compactação do solo-cal foram considerados os seguintes maquinários: rolo pé de carneiro e rolo liso.

3.6.4 Inventário do Ciclo de Vida

Nesta etapa são apresentadas as entradas e saídas de cada processo para avaliar os impactos ambientais gerados na construção de 1 m³ de Solo-Cal.

O processo de fabricação da cal hidratada foi considerado igual para todos os tipos de misturas, as diferenças entre estes se encontram nas quantidades de materiais necessários para a construção de cada tipo de mistura. Na tabela a seguir são mostrados os consumos unitários de materiais para cada tipo de mistura.

Tabela 3.4 - Consumo unitário de materiais para cada tipo de mistura

| Mistura | SC1-3 | SC2-3 | SC3-3 | SC1-5 | SC2-5 | SC3-5 | SC1-7 | SC2-7 | SC3-7 |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Quantidade de Solo | 1.553 kg/m ³ | 1.699 kg/m ³ | 1.845 kg/m ³ | 1.524 kg/m ³ | 1.667 kg/m ³ | 1.810 kg/m ³ | 1.495 kg/m ³ | 1.636 kg/m ³ | 1.776 kg/m ³ |
| Quantidade de Cal | 47 kg/m ³ | 51 kg/m ³ | 55 kg/m ³ | 76 kg/m ³ | 83 kg/m ³ | 90 kg/m ³ | 105 kg/m ³ | 114 kg/m ³ | 124 kg/m ³ |
| Quantidade de Água | 208 kg/m ³ | 228 kg/m ³ | 247 kg/m ³ | 208 kg/m ³ | 228 kg/m ³ | 247 kg/m ³ | 208 kg/m ³ | 228 kg/m ³ | 247 kg/m ³ |

3.6.4.1 Produção de Cal Hidratada

No processo de produção da cal hidratada foram consideradas as entradas necessárias para a produção de 1 kg de cal hidratada. Este processo compreende duas entradas de material: produção de calcário (2.286 kg/kg) e água (6,02E-4 m³/kg). O calcário é a principal matéria prima necessária para a produção de cal hidratada. A água é necessária para o processo de hidratação da cal viva. Os dados apresentados na Tabela 3.5, são os coletados na fábrica de cal hidratada *Concret-Cal*. O período de coleta de dados tem como base o ano 2014. Como fontes de energia são consumidas: Lenha vegetal (6.618 MJ/kg) utilizada como principal fonte de energia para abastecimento dos fornos da planta da fábrica de cal hidratada, e energia elétrica com matriz energética 100% de hidrelétrica (0.036 kWh/kg) utilizada para consumo energético da fábrica de cal hidratada.

Finalmente a entrada de empacotamento compreende a energia necessária para empacotar cada quilograma de cal hidratada, neste caso de (0.381 MJ/kg). O processo de empacotamento foi utilizado do inventário realizado por Kellenberger et al. (2007).

3.6.4.2 Transporte da Cal

Para este processo foi considerado o consumo de diesel por parte do maquinário. Na Tabela 3.6 são apresentados todos os fatores considerados para o valor de consumo final por MJ/kg. Este processo se limita à inserção de consumo de diesel por parte do maquinário, portanto não são considerados os impactos associados à produção do maquinário, apenas da produção de combustíveis.

Tabela 3.5 - Dados fornecidos pela fábrica de cal.

| Dados Coletados da Fábrica de Cal | | |
|--|----------------------------------|-------------------------------------|
| Mês | Produção de Cal Hidratada | Consumo de Lenha na Caldeira |
| Janeiro | 2.051.030 kg | 1.513.830 kg |
| Fevereiro | 2.943.550 kg | 1.630.426 kg |
| Março | 2.971.838 kg | 1.462.560 kg |
| Abril | 5.590.747 kg | 2.058.070 kg |
| Maio | 5.021.141 kg | 704.310 kg |
| Junho | 3.097.064 kg | 747.340 kg |
| Julho | 2.151.195 kg | 1.387.930 kg |
| Agosto | 4.220.924 kg | 2.496.694 kg |
| Setembro | 5.074.861 kg | 2.392.670 kg |
| Outubro | 5.389.322 kg | 2.841.310 kg |
| Novembro | 4.578.856 kg | 1.164.660 kg |
| Dezembro | 4.157.220 kg | 1.784.290 kg |
| Total | 47.247.748 kg | 20.184.090 kg |

Resumo

Consumo médio de Calcário: 9.000 tn/mês

2,286 kg de Calcário / kg de Cal Hidratada

Consumo médio de Electricidade: 141.481 kWh/mês (média tensão)

0,0359 kWh / kg de Cal Hidratada

0,427 kg de lenha / kg de Cal Hidratada

O caminhão duplo-eixo apresenta uma potência igual a 220 HP, um fator de 0,046 (fator de consumo de diesel empírico do maquinário fornecido pela empresa construtora do Paraguai) e uma incidência definida como a inversa do rendimento de 0,5653 Horas/tn sendo o rendimento 1,77 tn/Horas. Finalmente na Tabela 3.6 se observa o resultado 5,72 Lts/tn e vezes o poder calorífico do Diesel (35,86 MJ/Litro de Diesel) se obtém o consumo de 205,16 MJ/tn do maquinário para este processo.

Tabela 3.6 - Dados do equipamento para o transporte da cal.

| Equipamentos para o Transporte | Potência (HP) | Lts Diesel/tn (0,046xHPxh) | Horas/tn | MJ/tn(*) |
|---|----------------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Caminhão basculante 15 tn - DMT = 100 km - Transporte da Cal | 220 | 5,7212 lts/tn | 0,56533 hs/tn | 205,16 MJ/tn |
| <i>(*)Observações: O poder calorífico inferior do Diesel é 35,86 MJ / litro de diesel</i> | | | | |

3.6.4.3 Extração do Solo

Neste processo foi considerado o consumo de diesel da escavadeira, apresentado na Tabela 3.7. Este processo se limita à inserção de consumo de diesel por parte do maquinário, portanto não são considerados os impactos associados à produção do maquinário. A escavadeira considerada apresenta uma potência igual a 150 HP, um fator de 0,15 (fator de consumo de diesel empírico do maquinário) e uma incidência definida como a inversa do rendimento de 0.007 Horas/tn sendo o rendimento 145 tn/Horas. Finalmente na tabela se observa o resultado 0,15 Lts/tn e vezes o poder calorífico do Diesel (35,86 MJ/Litro de Diesel) se obtém o consumo de MJ/tn do maquinário para este processo, sendo igual a 5,54 MJ/tn.

Tabela 3.7 - Dados do equipamento para extração do solo.

| Equipamento para a extração do Solo | Potência (HP) | Lts Diesel/tn (0,15xHPxh) | Horas/tn | MJ/tn(*) |
|---|----------------------|--------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Escavadeira | 150 | 0,1544 lts/tn | 0,00686 hs/tn | 5,54 MJ/tn |
| <i>(*)Observações: O poder calorífico inferior do Diesel é 35,86 MJ / litro de diesel</i> | | | | |

3.6.4.4 Transporte do Solo

Na Tabela 3.8 é apresentado o equipamento envolvido no transporte do solo. Este processo se limita à inserção de consumo de diesel por parte do maquinário, portanto não são considerados os impactos associados ao ciclo de vida do equipamento. O caminhão basculante apresenta uma potência igual a 220 HP, um fator de 0,046 (fator de consumo de diesel empírico do maquinário fornecido) e uma incidência definida como a inversa do rendimento de 0,0228 Horas/tn sendo o rendimento 43,48 tn/Hora. Finalmente na tabela se observa o resultado 0,23 Lts/tn e vezes o poder calorífico do Diesel (35,86 MJ/Litro de Diesel) se obtém o consumo de 8,29 MJ/tn do maquinário para este processo.

Tabela 3.8 - Dados do equipamento para o transporte do Solo.

| Equipamentos para o Transporte | Potência (HP) | Lts Diesel/tn (0,046xHPxh) | Horas/tn | MJ/tn(*) |
|--|---------------|-------------------------------|---------------|------------|
| Caminhão basculante 10 m ³ - DMT = 1,50 km - Transporte do Solo | 220 | 0,2313 lts/tn | 0,02286 hs/tn | 8,29 MJ/tn |
| (*)Observações: O poder calorífico inferior do Diesel é 35,86 MJ / litro de diesel | | | | |

3.6.4.5 Construção de 1 m³ de Solo-Cal

Na Tabela 3.9 apresentam-se os equipamentos necessários para a construção de Solo-Cal que foram fornecidos pela empresa construtora. Este processo se limita à inserção de consumo de diesel por parte dos maquinários, portanto não são consideradas as ACV dos maquinários. O consumo de diesel representa o sub-processo de mistura, homogeneização e compactação do solo-cal.

Tabela 3.9 - Dados dos equipamentos para a construção do Solo-Cal

| Equipamentos para a Construção | | Potência (HP) | Lts Diesel/m ³ (0,15xHPxh) | Horas/m ³ | MJ/m ³ (*) |
|--|----------------------------|---------------|--|----------------------|---------------------------------|
| Mistura e Homogeneização | Motoniveladora | 185 | 0,2070 | 0,00746 | 7,42 |
| | Distribuidora de Cal | 115 | 0,0725 | 0,00420 | 2,60 |
| | Recuperadora | 430 | 0,2709 | 0,00420 | 9,71 |
| | Camião regador de água | 220 | 0,1274 | 0,00386 | 4,57 |
| | Trator com grade de discos | 150 | 0,0945 | 0,00420 | 3,39 |
| Compactação | Rolo Pé de Carneiro | 115 | 0,1589 | 0,00921 | 5,70 |
| | Rolo Liso | 115 | 0,1006 | 0,00583 | 3,61 |
| | | Total | 1,0317 Lts / m³ | Total | 37,00 MJ / m³ |
| (*)Observações: O poder calorífico inferior do Diesel é 35,86 MJ / litro de diesel | | | | | |

3.6.5 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Conforme regulamentação da norma inglesa (BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 2013), foram determinadas as categorias de impacto ambiental relevantes para estudos de ACV em produtos utilizados na construção civil. Na Tabela 3.10, apresentam-se as categorias de impactos utilizadas para este estudo. Com exceção da mudança climática, obtida pela metodologia de cálculo proposto pelo IPCC 2007, os demais impactos são determinados pela metodologia da CML 2001. Somando-se a isso, também foi utilizada a metodologia de Demanda de Energia Acumulada (CED), que avalia os diferentes tipos de recursos energéticos renováveis e não-renováveis utilizados em todo processo avaliado.

Há uma gama de metodologias de impactos para se avaliar quando se faz uma análise do ciclo de vida, porém, para a aplicação deste estudo, os potenciais mais relevantes são os listados na Tabela 3.10. Após a definição dos impactos avaliados deve ser feita uma caracterização em que se obtém a quantificação dos potenciais de impactos, tendo, por fim, o perfil ambiental detalhado do produto em análise.

Tabela 3.10 - Categorias de impacto aplicadas na análise de ciclo de vida da construção de uma Sub-Base de Solo-Cal

| Categorias de Impacto | Unidade |
|--|--------------------------------------|
| Mudança climática (IPCC 2007) | kg CO ₂ -eq |
| Redução da camada de ozônio (CML 2001) | kg CFC-11 -eq |
| Ozônio fotoquímico (CML2001) | kg C ₂ H ₄ -eq |
| Acidificação (CML 2001) | kg SO ₂ -eq |
| Eutrofização (CML 2001) | kg PO ₄ -eq |
| Depleção de recursos não renováveis - elementos (CML 2001) | kg Sb -eq |
| Demanda de energia acumulada - energia (CED) | MJ, -eq |

As demais etapas dentro da fase de AICV, normalização e definição de ponderadores dos impactos, não serão abordadas neste estudo.

3.6.6 Interpretação

Nesta fase são resumidos e discutidos os resultados do ICV e da AICV, servindo como base para conclusões, recomendações e tomada de decisões, de acordo com o objetivo e escopo estabelecidos. Deste modo, após ter montado cada sistema de produto, foi realizada uma comparativa de resultados para cada tipo de mistura.

Com a obtenção dos impactos gerados por cada tipo de mistura, e com os resultados experimentais do programa de durabilidade, rigidez e resistência, estimaram-se as misturas com menor impacto no ambiente; permitindo realizar recomendações para a dosagem de misturas de solo-cal do ponto de vista ambiental.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A curva granulométrica do solo é apresentada na Figura 4.1. As propriedades físicas do solo sedimentar dispersivo, determinadas nesta pesquisa são apresentadas na Tabela 4.1.

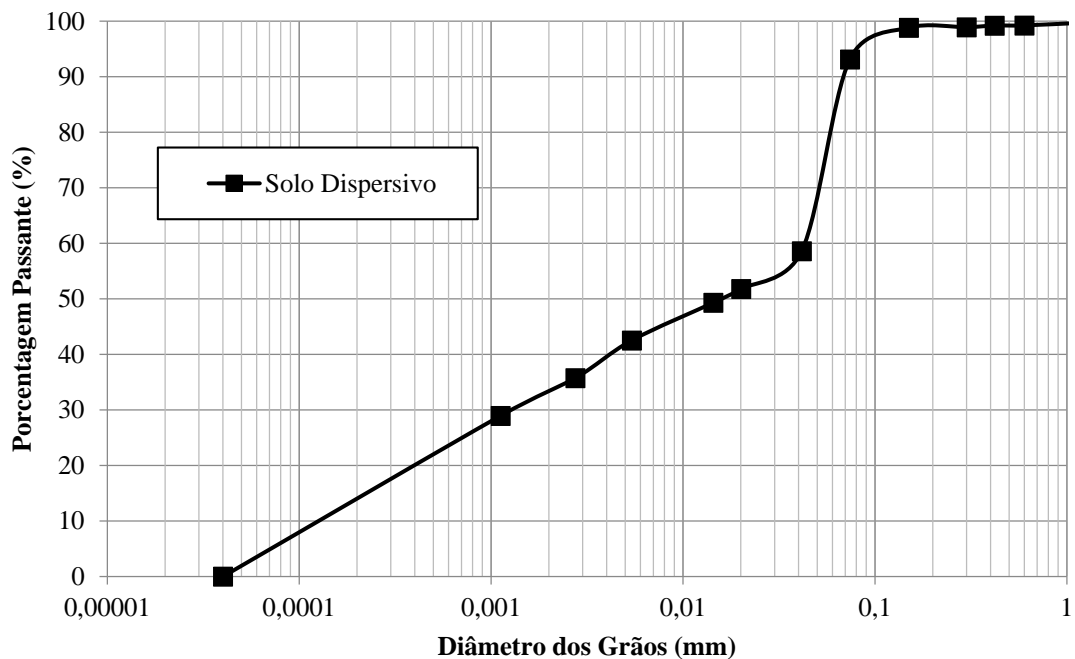


Figura 4.1 - Curva granulométrica do solo

Tabela 4.1 - Propriedades Físicas do Solo

| Propriedades | Valores | Norma | Observações |
|-------------------------------------|------------------------|--------------|--------------------------------|
| Limite Liquidez (LL) | 43 | NBR 6459/84 | |
| Limite de Plasticidade (LP) | 19 | NBR 7180/84 | |
| Índice de Plasticidade (IP) | 24 | - | |
| Densidade Real dos Grãos (G) | 27,4 kN/m ³ | NBR 6508/84 | Média de 3 determinações |
| % Passante Peneira #200 | 93,00% | NBR 6502/95 | Com uso de defloculante |
| % de Areia fina (0,06 < Φ < 0,2 mm) | 20% | | |
| % de Silte (0,002 < Φ < 0,06 mm) | 46% | | |
| % de Argila (Φ < 0,002 mm) | 34% | | |
| Dispersibilidade (Crumb Test) | Grau 4 | NBR 13601 | Realizado em campo |
| Dispersibilidade (Pinhole) | ND4 | NBR 14114/98 | Dispersibilidade Intermediária |

O solo é classificado como uma argila de baixa compressibilidade (CL) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação e como um solo argiloso A-7-6 com índice de grupo igual a 23, de acordo com a Classificação da *American Association of State Highway Officials*.

Os resultados dos ensaios químicos realizados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características Químicas da Água Intersticial do Solo

| Parâmetros | Valor |
|---|-------|
| Na (mEq/L) | 13,90 |
| K (mEq/L) | 0,50 |
| Ca (mEq/L) | 0,60 |
| Mg (mEq/L) | 0,20 |
| TSD (Total de Sais Dissolvidos) | 15,20 |
| PS = (Na/TSD)x100 | 91,4% |
| RAS ou SAR (Razão de Absorção de Sódio) | 21,98 |
| pH | 8,24 |

De acordo com os resultados, tendo em conta o teor de sais total na água intersticial do solo, a porcentagem de sódio e sua razão de absorção de sódio maior a 2, o solo pode ser classificado como um solo dispersivo. (ICOLD Boletín 77)

O resultado é apresentado na Figura 4.2 de acordo com Sherald et al. (1976), sendo classificado como solo dispersivo.

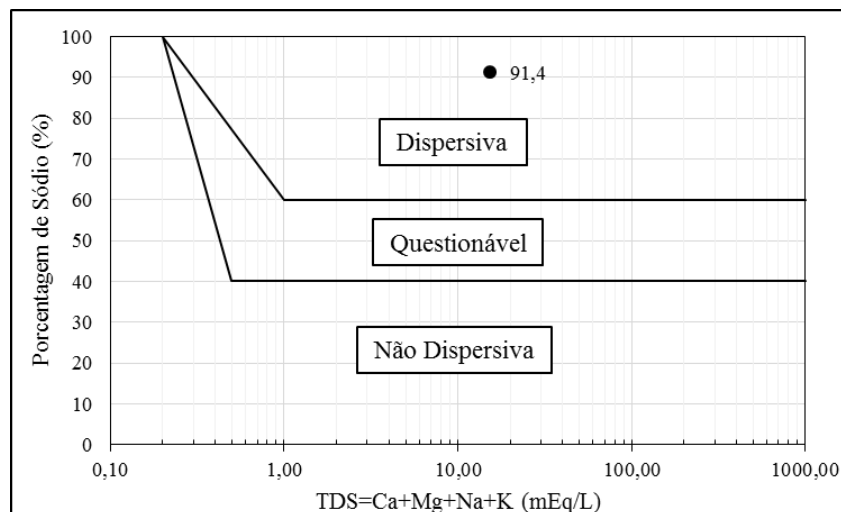


Figura 4.2 - Resultado dentro dos Padrões de Dispersão de Solos. Adaptado de Sherald et al. (1976)

4.2 ENSAIOS DE DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM

A Tabela A.1, do apêndice “A”, apresenta as características de todos os corpos-de-prova ensaiados com ciclos de molhagem e secagem, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. Pode-se observar nesta tabela que os dados foram agrupados a cada três linhas, pois correspondem às três repetições para um mesmo ponto de moldagem (mesmo teor de umidade, porosidade, teor de aglomerante e tempo de cura).

A partir destes dados, foram elaboradas as Figuras 4.3 a 4.8, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento solo-cal em estudo são evidenciados.

4.2.1 Efeito do Teor de Cal e do Peso Específico Aparente Seco

Na Figura 4.3 a 4.5, são apresentadas as curvas de variação da perda de massa acumulada em função dos números de ciclos para 28 dias de cura e para cada teor de cal. Cada curva, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca.

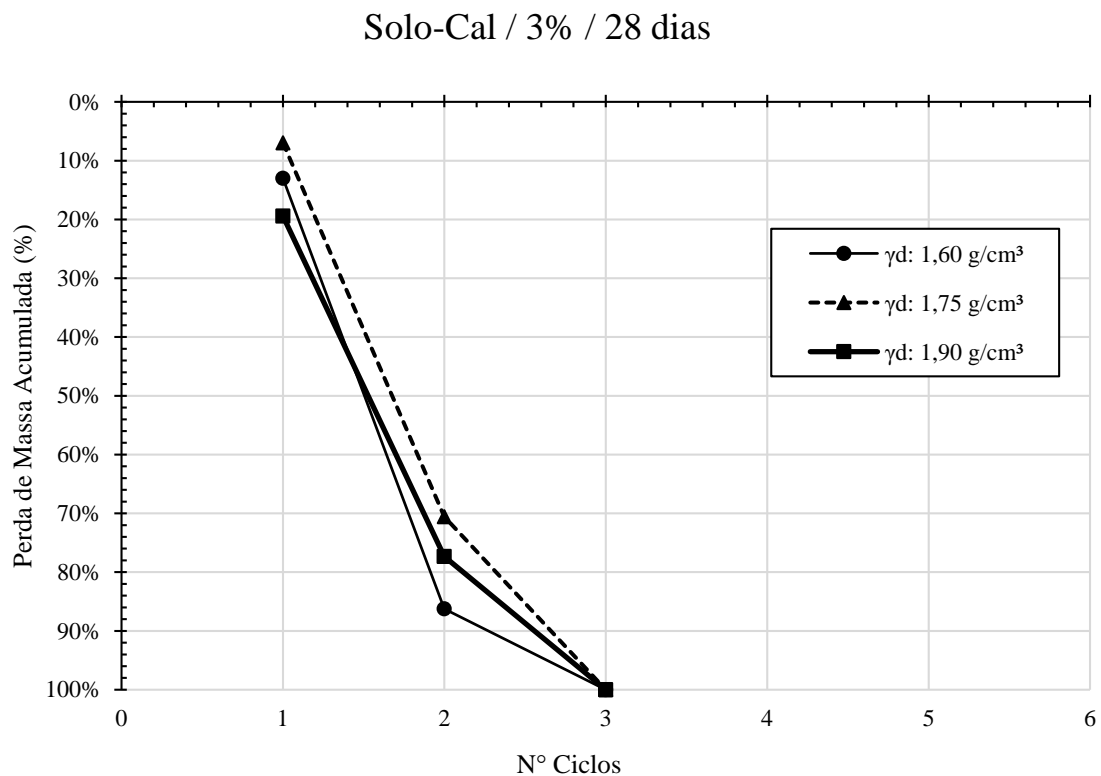


Figura 4.3 - Perda de Massa Acumulada versus N° de Ciclos – Solo-Cal: 3% - γ_d : 1.60, 1.75 e 1,90 g/cm³ - (28 dias de cura)

Nota-se na figura que para o caso de misturas com 3% de cal, todas as misturas atingem a perda de massa total após 3 ciclos, independentemente do peso específico aparente seco da mistura.

Para o caso de misturas com 5% de cal, nota-se uma diferença de perdas de massas entre as distintas misturas, diminuindo as perdas com o aumento do peso específico aparente seco, atingindo o sexto ciclo nos três casos, com perdas de massas de ordem de 60%, 50% e 25% para os pesos específicos de 1.60, 1.75 e 1.90 g/cm³ respectivamente.

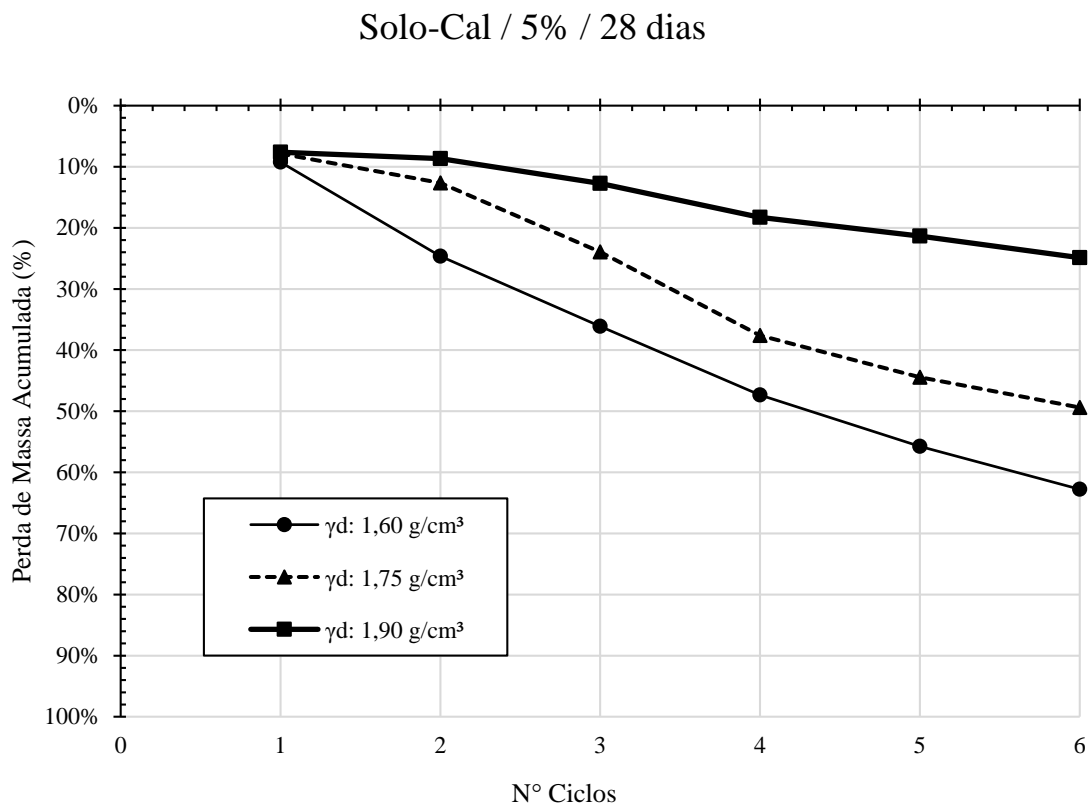


Figura 4.4 - Perda de Massa Acumulada versus N^o de Ciclos – Solo-Cal: 5% - γ_d : 1.60, 1.75 e 1,90 g/cm³ - (28 dias de cura)

Nota-se na Figura 4.5, para o caso de misturas com 7% de cal, as perdas de massas diminuem, não existindo uma diferença entre misturas com pesos específicos de 1.75 e 1.90 g/cm³, atingindo ambas misturas ao finalizar o sexto ciclo, perdas de massa da ordem de 25%.

Solo-Cal / 7% / 28 dias

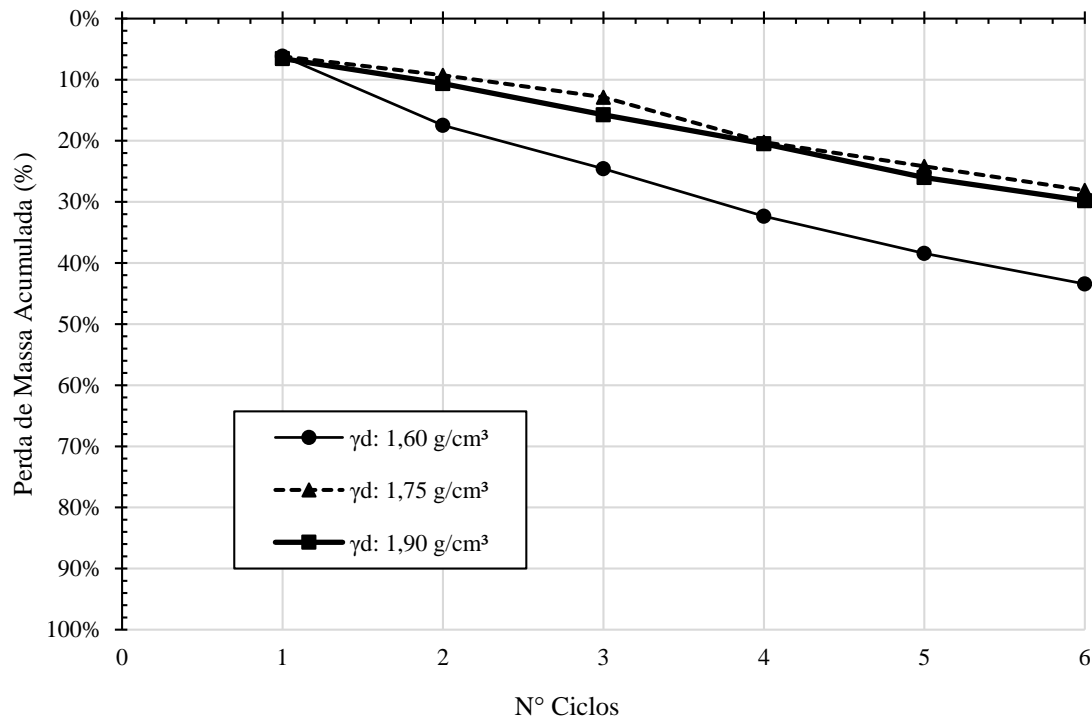


Figura 4.5 - Perda de Massa Acumulada versus N° de Ciclos – Solo-Cal: 7% - γ_d : 1,60, 1,75 e 1,90 g/cm³ - (28 dias de cura)

Com os resultados obtidos para as misturas com 3% de cal poderíamos confirmar que o comportamento é devido ao afirmado por Paige-Green (1991) e Paige-Green et al. (1990) que solos estabilizados são seriamente afetados pela carbonatação quando o pH da mistura se encontram abaixo de 12. A carbonatação envolve a reação entre a cal e o dióxido de carbono no ar, para formar o carbonato de cálcio. Esta reação é acompanhada por um aumento significativo do volume, e caso as forças expansivas geradas excedam a resistência à tração do material estabilizado, ocorre o enfraquecimento ou desintegração do material estabilizado.

4.2.2 Efeito do Tempo de Cura

Na Figura 4.6 a 4.8, são apresentadas as curvas de variação da perda de massa acumulada em função dos números de ciclos para um teor de cal de 5% e para distintos dias de cura. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo tempo de cura.

Nota-se na Figura 4.6 que para o caso de misturas com peso específico aparente seco, as perdas de massa diminuem com o aumento do tempo de cura, não existindo uma diferença apreciável entre as perdas de massa para 28 e 60 dias.

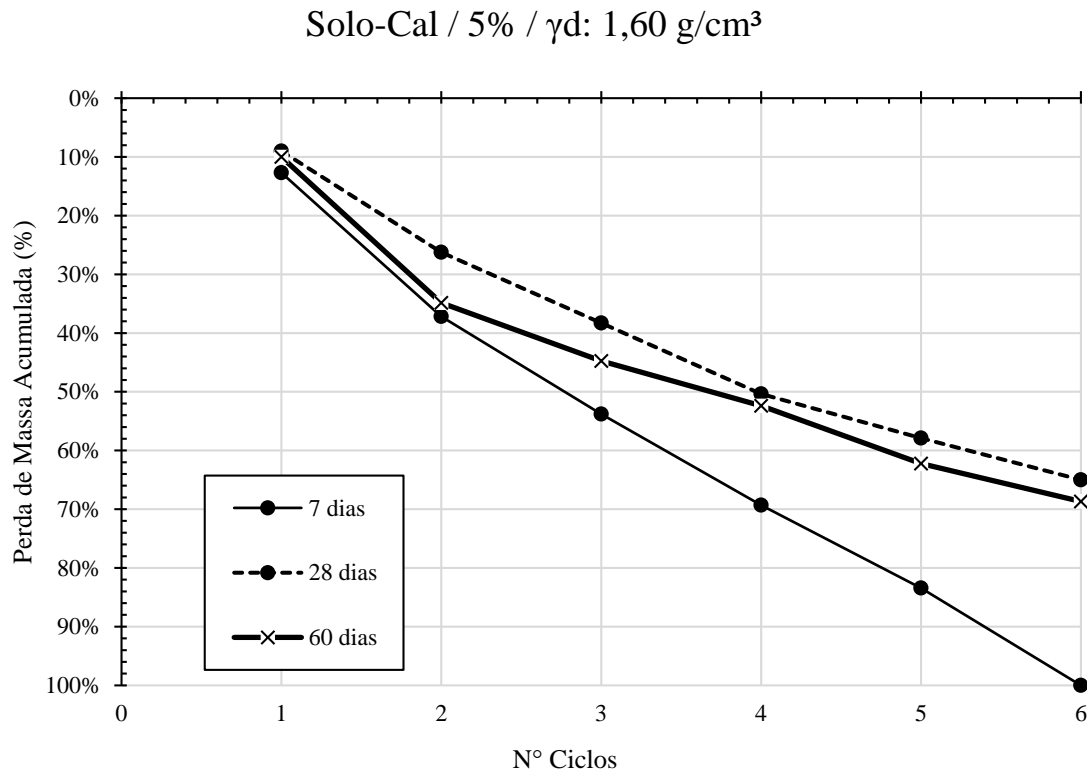


Figura 4.6 - Perda de Massa Acumulada versus N^o de Ciclos – Solo-Cal: 5% - γ_d : 1,60 g/cm³ (7, 14, 28 e 60 dias de cura)

No caso de misturas com peso específico de 1,75 g/cm³ (Figura 4.7), não foram observadas diferenças de perdas de massa para os três tempos de cura avaliados após os 6 ciclos.

Na Figura 4.8, nota-se que as misturas com 1,90 g/cm³, as perdas de massa diminuem com o aumento do tempo de cura. Para o caso de corpos-de-prova curados durante 60 dias, um caso particular foi observado, uma grande perda de massa já nos primeiros ciclos de humedecimento. Isto é devido a uma degradação instantânea que sofreram em comparação com a degradação progressiva dos demais corpos-de-prova.

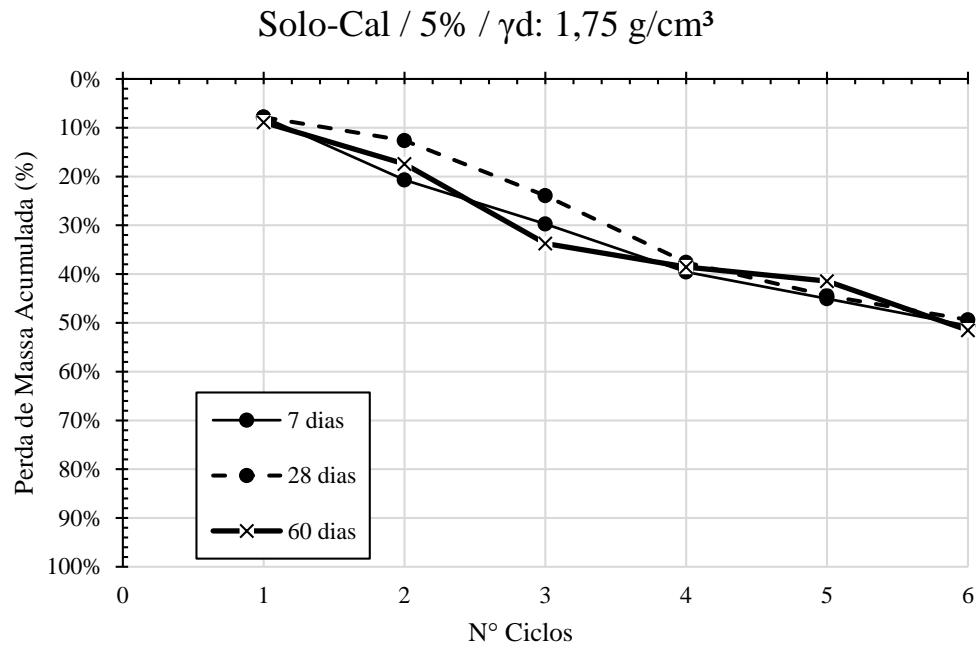


Figura 4.7 - Perda de Massa Acumulada versus Nº de Ciclos – Solo-Cal: 5% - γ_d :1,75 g/cm³ (7, 14, 28 e 60 dias de cura)

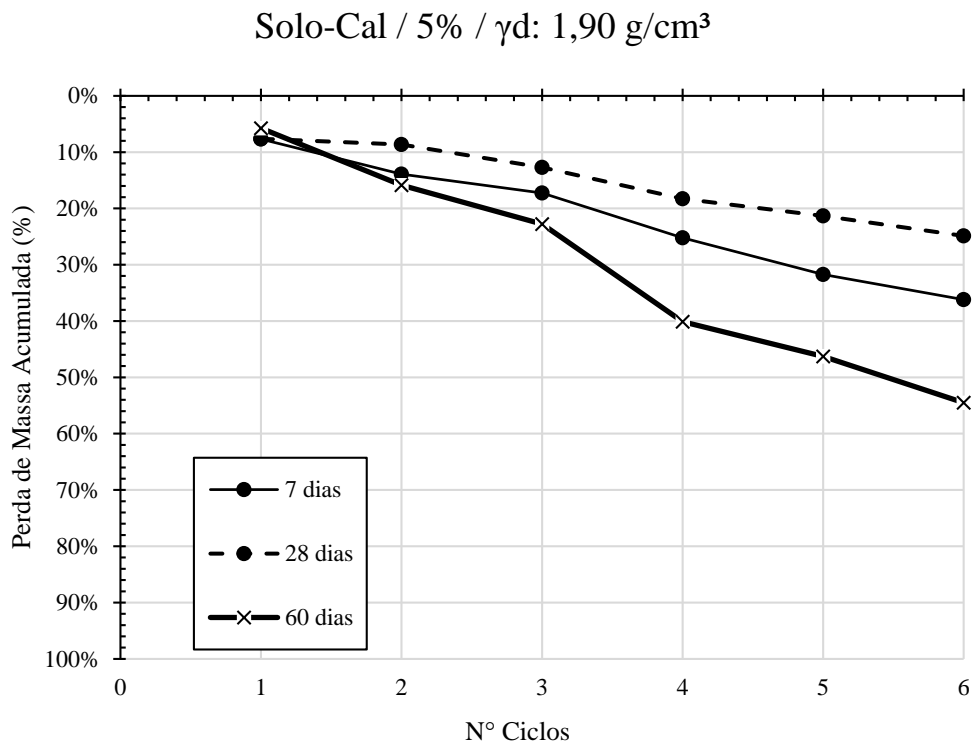


Figura 4.8 - Perda de Massa Acumulada versus Nº de Ciclos – Solo-Cal: 5% - γ_d :1,90 g/cm³ (7, 14, 28 e 60 dias de cura)

4.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E À VÁCUO-SATURAÇÃO

Na Tabela A.2, do apêndice A, são apresentadas as características de todos os corpos-de-prova ensaiados à compressão simples e ao vácuo saturação, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental.

A partir destes dados, foram elaboradas as Figuras 4.9 a 4.14, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento solo-cal em estudo são evidenciados. Os corpos-de-prova com 7 dias de cura e com o menor peso específico aparente seco foram descartados das análises, pois não suportaram a fase de saturação (imersão por 24 horas).

4.3.1 Efeito do Teor de Cal e do Peso Específico Aparente Seco

Na Figura 4.9 a 4.110, são apresentadas as variações da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal para 28 dias de cura. Cada série de dados, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca.

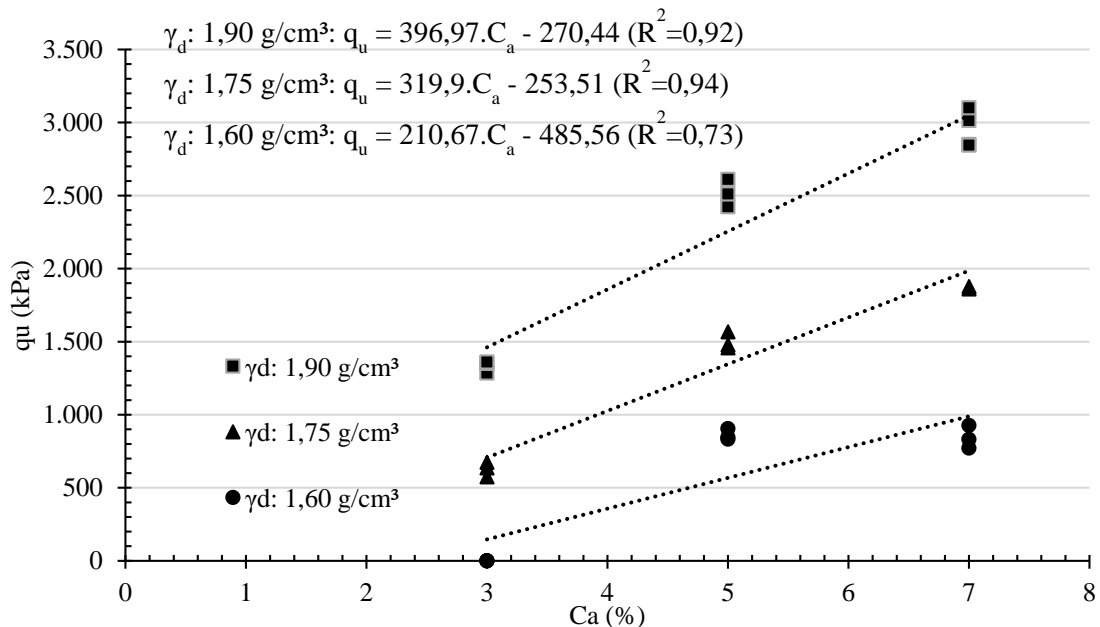


Figura 4.9 - Resistência à Compressão Simples do Solo-Cal - 28 dias de cura

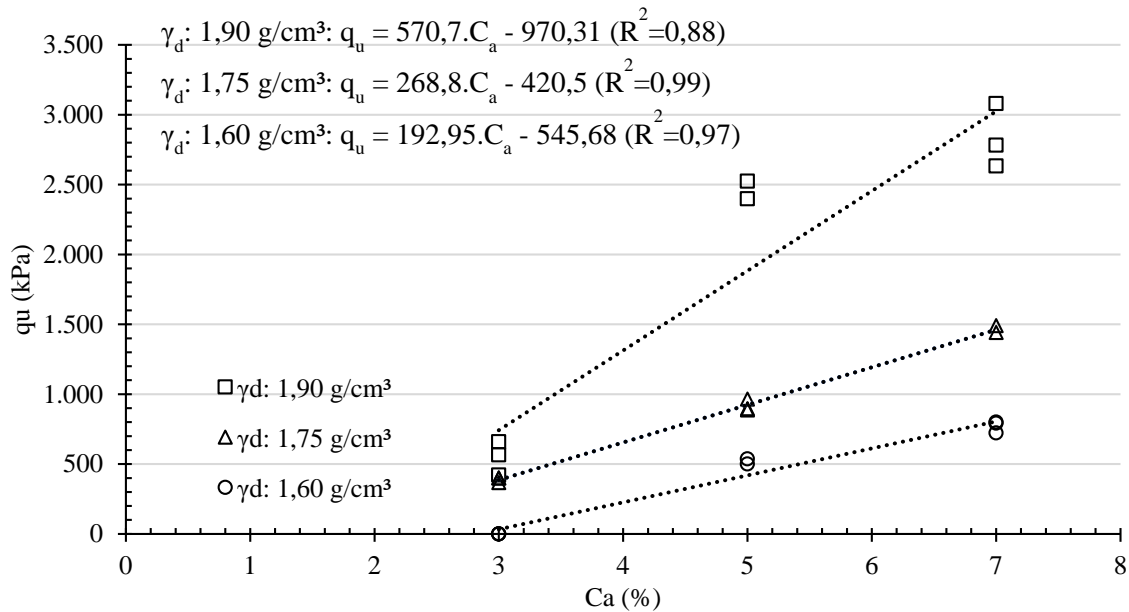


Figura 4.10 - Resistência à Vácuo-Saturação do Solo-Cal - 28 dias de cura

Pode-se observar que a quantidade de cal exerce influência sobre a resistência à compressão simples e a resistência à vácuo-saturação do material. Nota-se também a influência da massa específica aparente seca. Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples e a resistência à vácuo-saturação aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal.

4.3.2 Efeito do Tempo de Cura

Na Figura 4.11 a 4.13, são apresentadas variações da resistência à compressão simples em função do tempo de cura, para um teor de cal de 5% e para as três massas específicas aparentes secas. Cada curva, isoladamente, possui a mesma quantidade de cal e a mesma massa específica aparente seca.

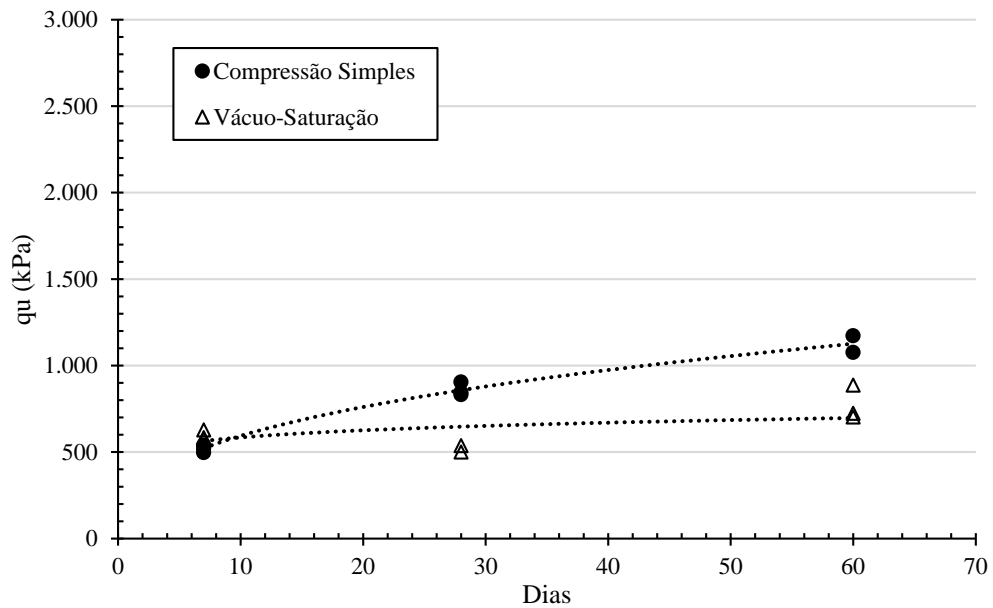
Solo-Cal / 5% / γ_d : 1,60 g/cm³

Figura 4.11 - Resistência à Compressão Simples e Resistência à Vácuo-Saturação do Solo-Cal - γ_d :1,60 g/cm³ (7, 14, 28 e 60 dias)

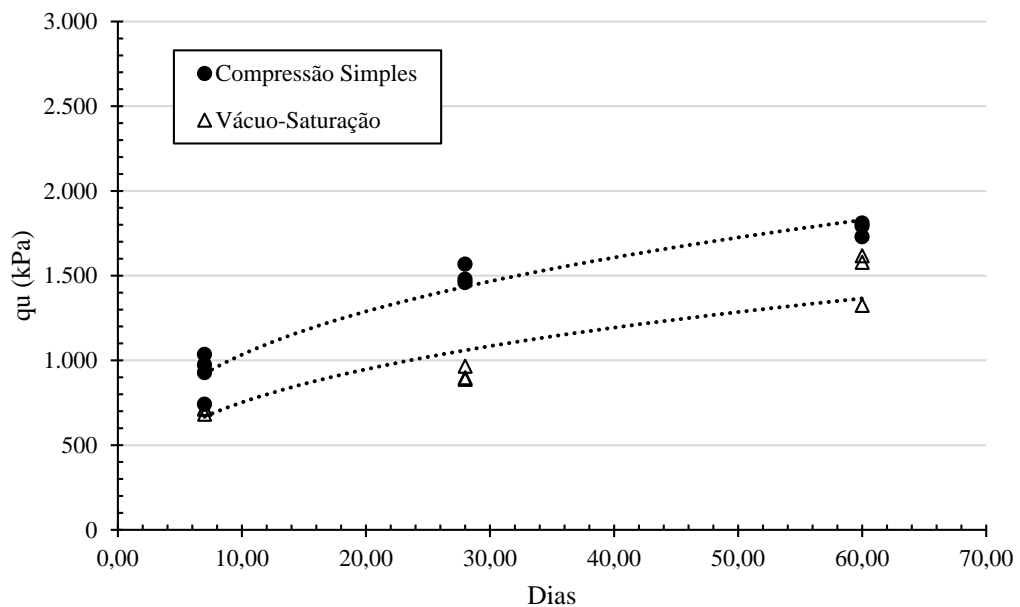
Solo-Cal / 5% / γ_d : 1,75 g/cm³

Figura 4.12 - Resistência à Compressão Simples e Resistência à Vácuo-Saturação do Solo-Cal - γ_d :1,75 g/cm³ (7, 14, 28 e 60 dias)

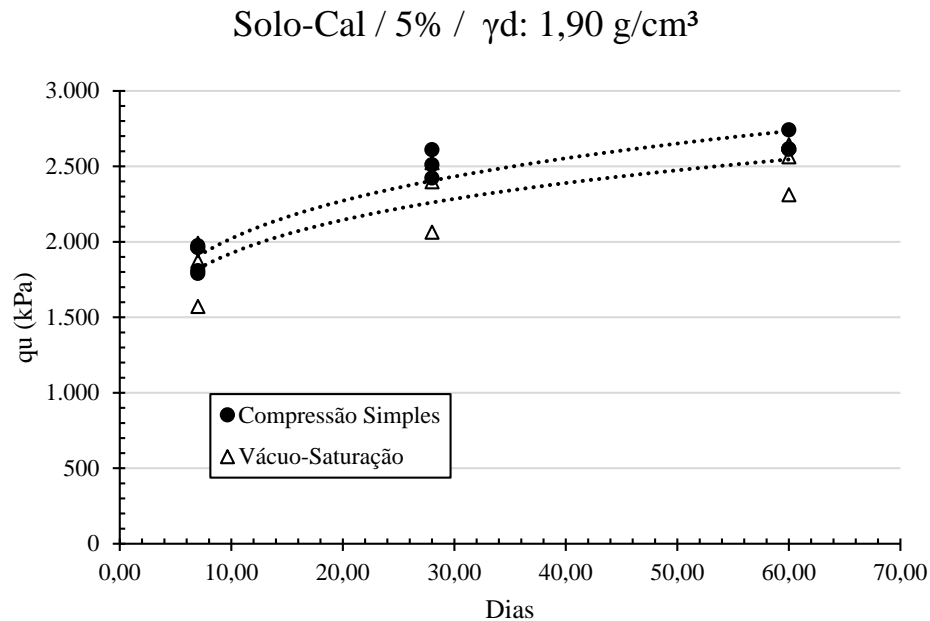


Figura 4.13 - Resistência à Compressão Simples versus Resistência à Vácuo-Saturação do Solo-Cal - γ_d :1,90 g/cm³ (7, 14, 28 e 60 dias de cura)

Pode-se observar que o tempo de cura exerce influência sobre a resistência à compressão simples e a resistência à vácuo-saturação do material. Nota-se o aumento das resistências com o aumento do tempo de cura. Além disso, nota-se que com o aumento da massa específica aparente seca, melhora o desempenho da mistura em quanto a perda da resistência avaliados com os ensaios de resistência à vácuo-saturação.

4.3.3 Relação Vazios/Cal

Lopes Junior (2007), estudando misturas de arenito Botucatu com resíduo de britagem e teores de 3% a 11% de cal, avaliou separadamente a relação das grandezas volume de vazios (V_v) e inverso do volume de cal ($1/V_{ca}$) com a resistência à compressão simples. O autor verificou que a taxa de variação da resistência em relação a cada uma dessas grandezas é substancialmente diferente. O autor encontrou uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Após diversas tentativas obteve-se que, aplicando uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro C_{av} , haveria uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, resultando num melhor ajuste para a relação vazios/cal.

Neste trabalho, essa compatibilização também foi empregada. Na Figura 4.14, são apresentadas as curvas de variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,16, dos corpos-de-prova com 28 dias de cura. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=13\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

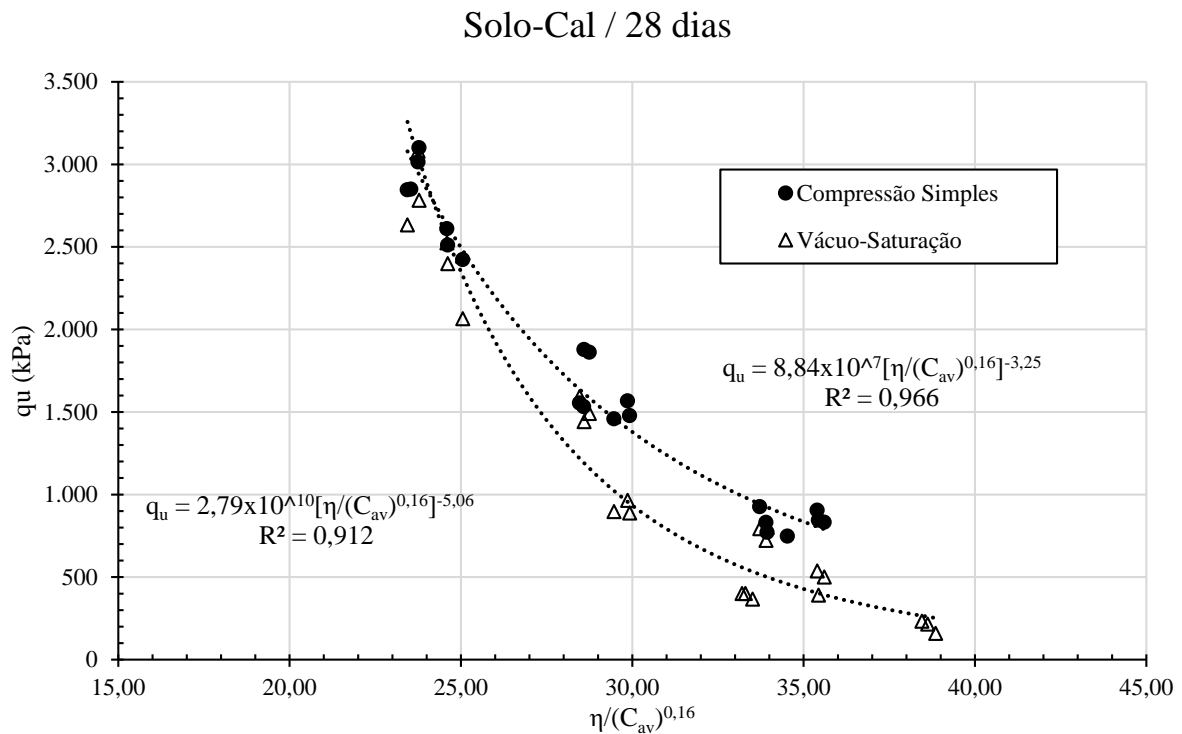


Figura 4.14 - Resistência à Compressão Simples versus Relação Vazios/Cal ajustado do Solo-Cal – 28 dias de cura

Nota-se que para uma menor relação $\eta / (C_{av})^{0,16}$ (maior teor de cal e porosidade menor), corresponde uma menor diferença entre a resistência à compressão simples e à resistência à vácuo-saturação. Isto evidencia a melhoria no desempenho das misturas de Solo-Cal com o aumento da quantidade de cal empregada e o aumento da massa específica aparente seca.

4.4 ENSAIOS DE MEDIDAS DE RIGIDEZ INICIAL

Nas Tabelas A.3 e A.4 do apêndice A, apresenta as características de todos os corpos-de-prova ensaiados, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. A partir destes dados, foram elaboradas as Figuras 4.15 a 4.29, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento solo-cal em estudo são evidenciados.

4.4.1 Efeito do Teor de Cal e do Tempo de Cura

Nas Figuras 4.15 a 4.17, são apresentadas as curvas de ajuste da variação do módulo cisalhante inicial (G_0) em função da quantidade de cal e dos dias de cura. Cada curva isoladamente, possui a mesma quantidade de cal e a mesma massa específica aparente seca.

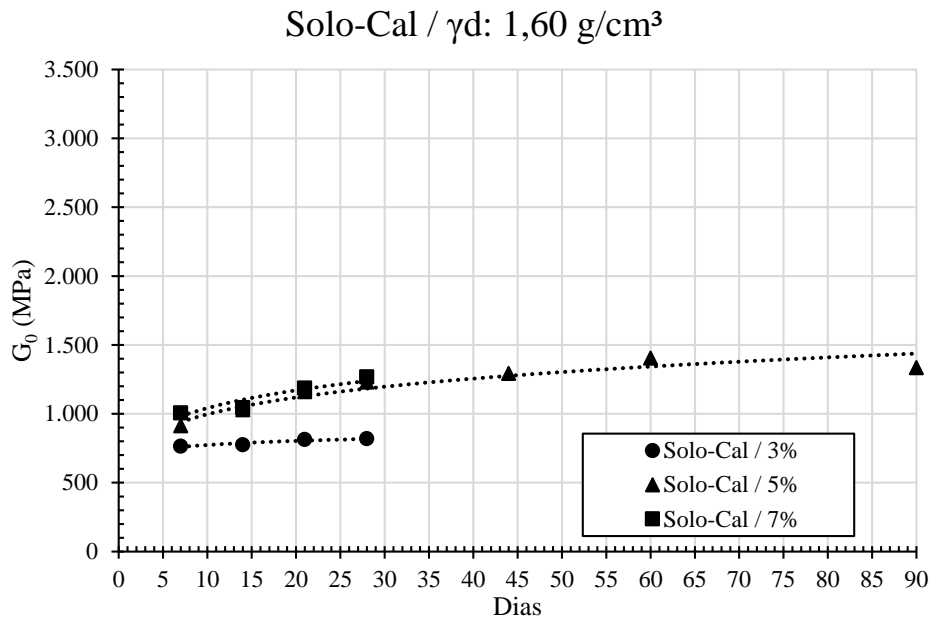


Figura 4.15 - Modulo Cisalhante versus Tempo de Cura – Solo-Cal – γ_d :1,60 g/cm³

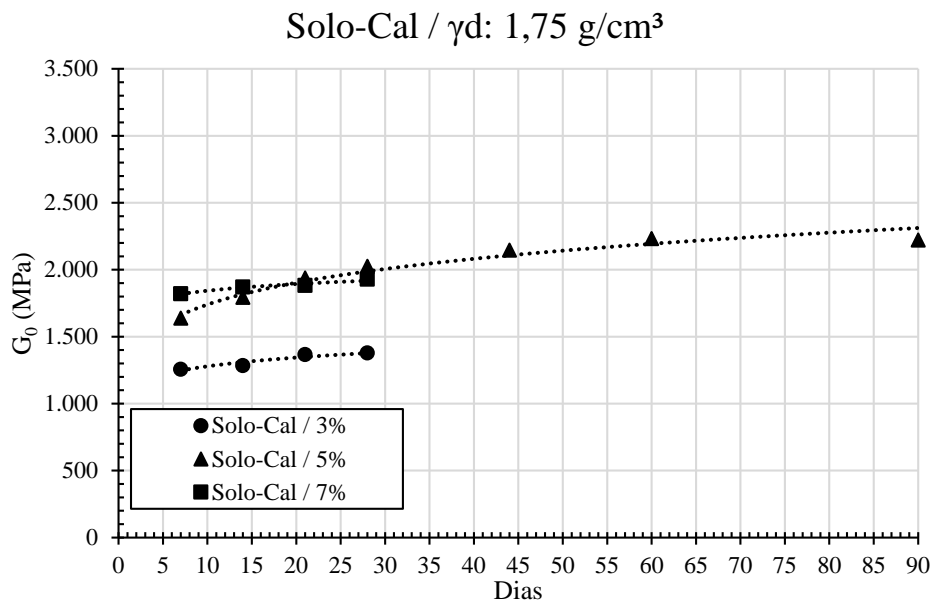


Figura 4.16 - Modulo Cisalhante versus Tempo de Cura – Solo-Cal – γ_d :1,75 g/cm³

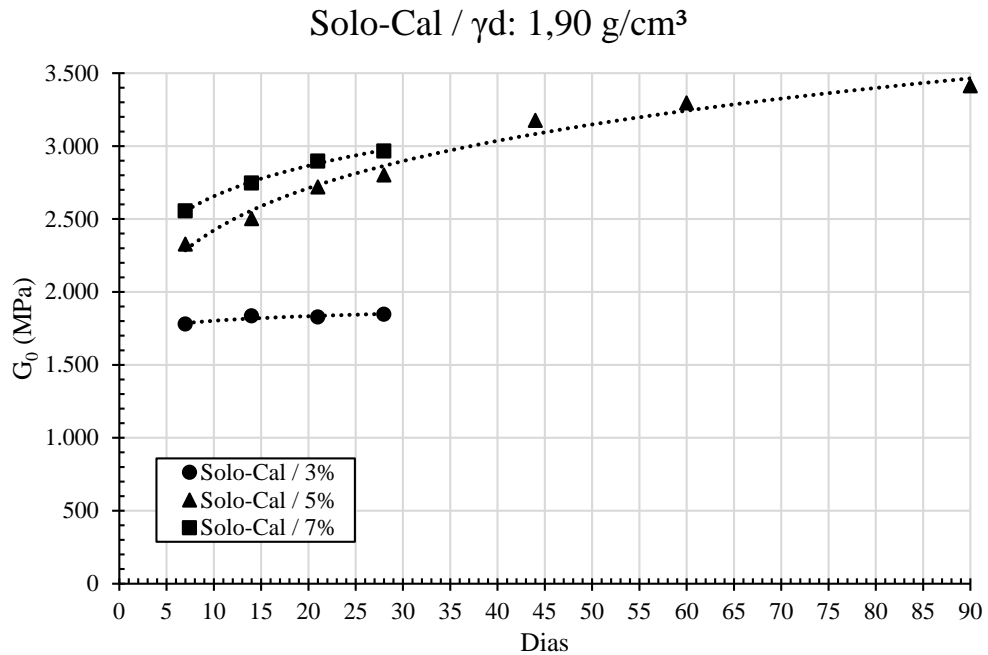


Figura 4.17 - Módulo Cisalhante versus Tempo de Cura – Solo-Cal – γ_d : 1,90 g/cm³

Foram observados que a quantidade de cal e o tempo de cura exercem influência sobre a rigidez inicial do material. Nota-se que existe um acréscimo notável com o aumento da quantidade de cal de 3% para 5%. Em tanto que para o aumento de teor de cal 5% para 7%, o acréscimo da rigidez inicial não foi significativo.

Além disso nota-se um aumento brusco da rigidez inicial dos primeiros dias de cura para o caso de misturas com 5% e 7% de cal, em tanto que este aumento não foi significativo para as misturas com 3% de cal.

4.4.2 Efeito do Peso Específico Aparente Seco

Nas Figuras 4.18 a 4.20, são apresentadas as curvas de ajuste da variação do módulo cisalhante inicial (G_0) em função da massa específica aparente seca e dos dias de cura. Cada curva isoladamente, possui a mesma quantidade de cal e a mesma massa específica aparente seca.

Solo-Cal / 3%

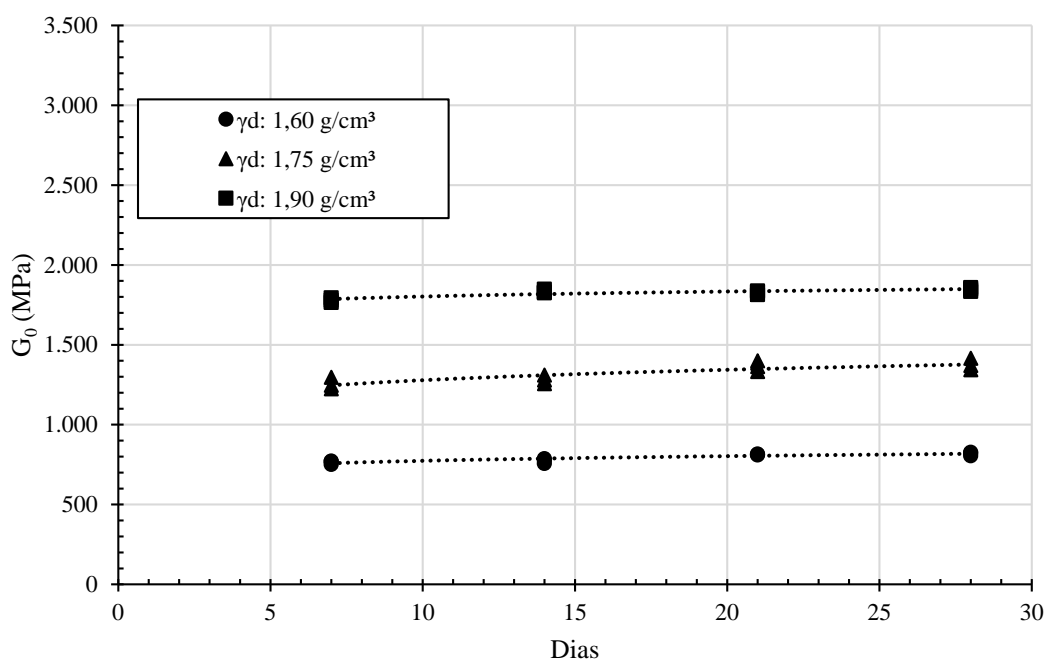


Figura 4.18 - Módulo Cisalhante versus Tempo de Cura – Solo-Cal: 3%

Solo-Cal / 5%

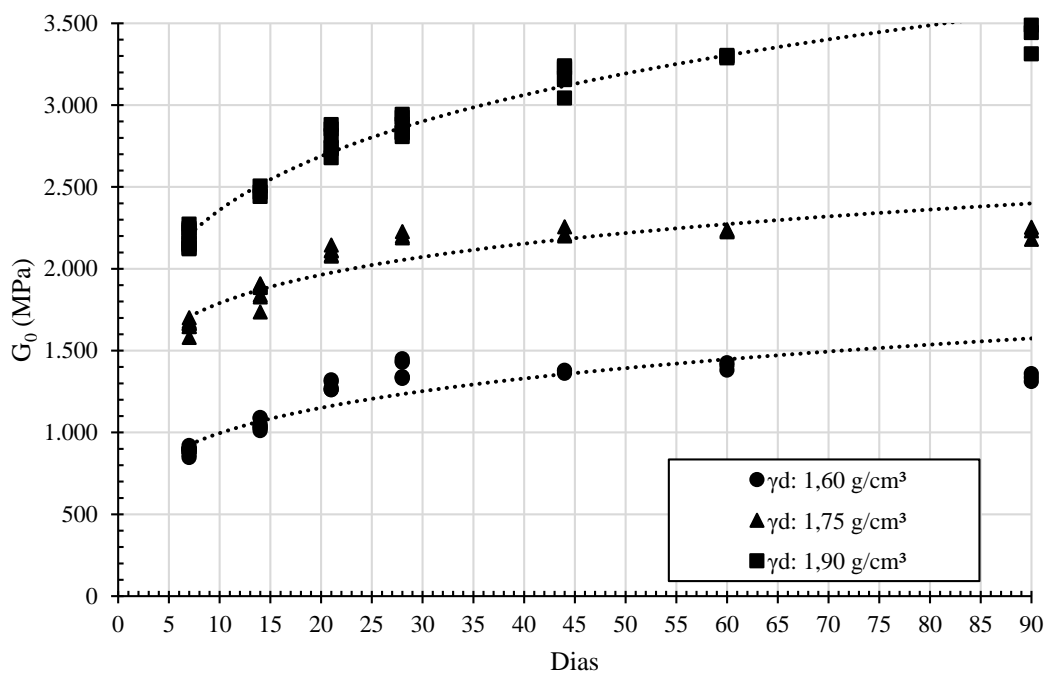


Figura 4.19 - Módulo Cisalhante versus Tempo de Cura – Solo-Cal: 5%

Solo-Cal / 7%

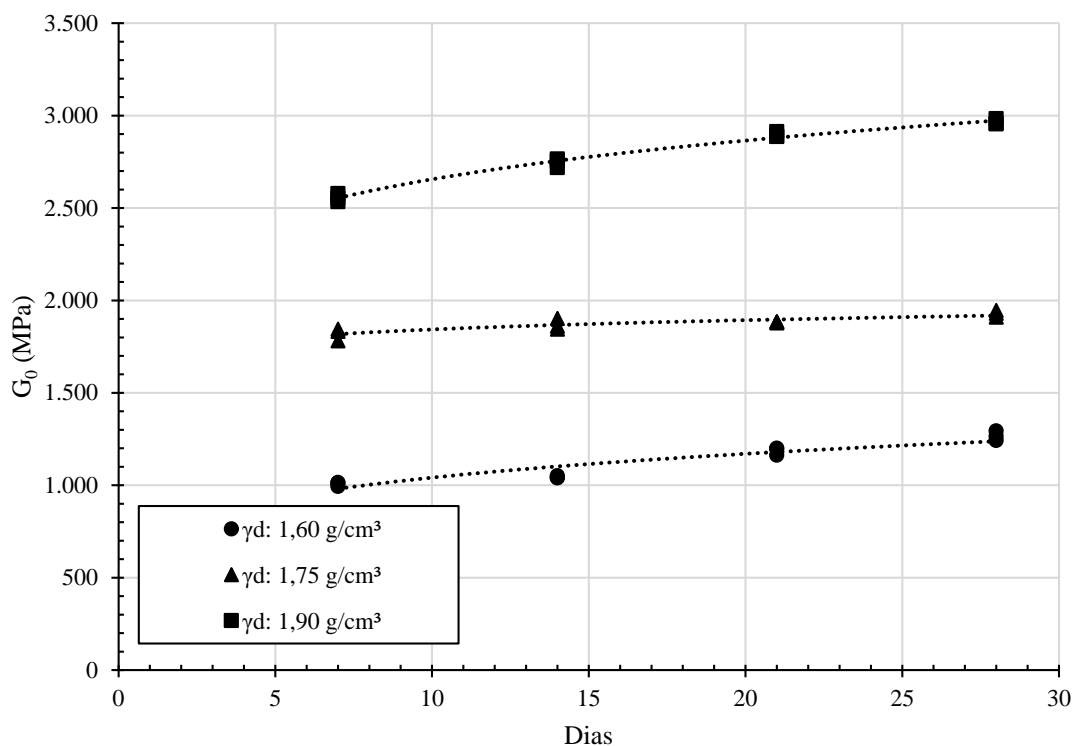


Figura 4.20 - Módulo Cisalhante versus Tempo de Cura – Solo-Cal: 7%

Nota-se nas três figuras anteriores que o peso específico aparente seco exerce influência sobre as medidas de rigidez inicial das misturas com distintos teores de cal. Além disso nota-se na Figura 4.19 que para misturas com 5% de cal, após 60 dias de cura, o valor medido da rigidez inicial praticamente mantém-se constante, correspondendo a um valor máximo.

4.4.3 Relação Vazios/Cal

Nas Figuras 4.21 a 4.29, são apresentadas as curvas de variação do módulo cisalhante inicial em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado pela potência 0,16, dos corpos-de-prova com 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente. Todos os corpos-de-prova apresentados possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=13\%$), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

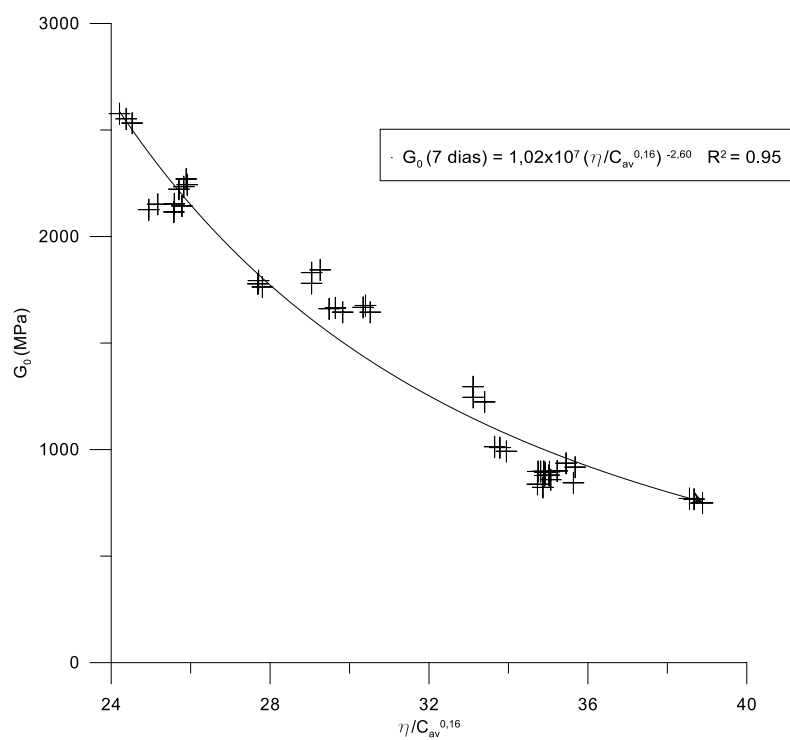


Figura 4.21 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 7 dias de cura

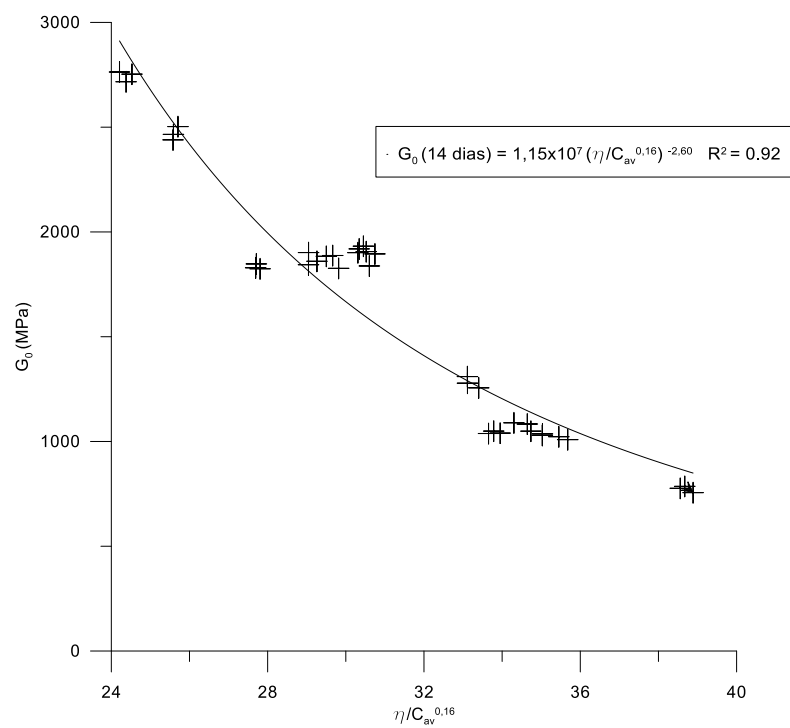


Figura 4.22 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 14 dias de cura

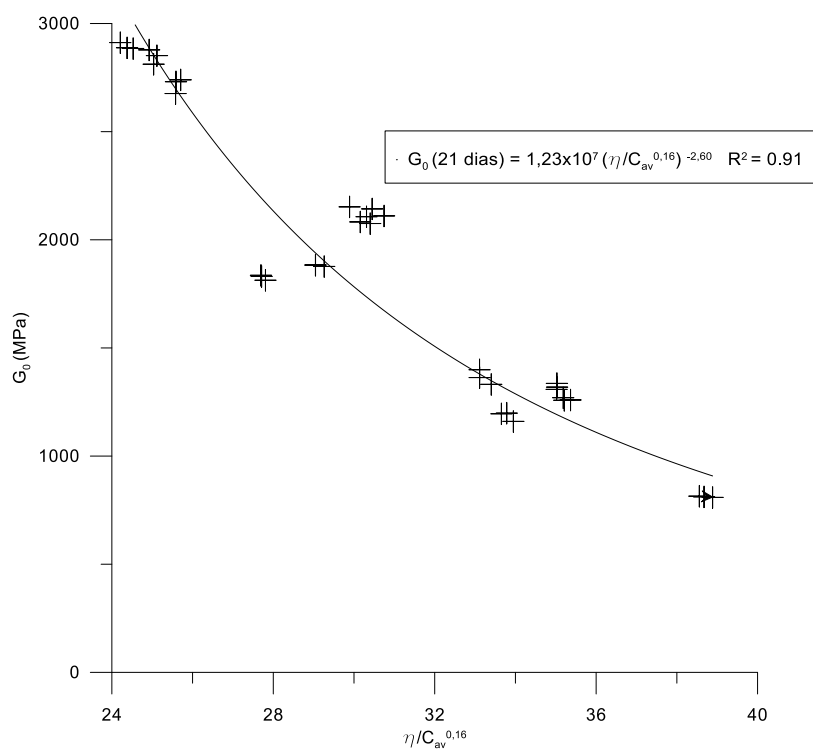


Figura 4.23 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 21 dias de cura

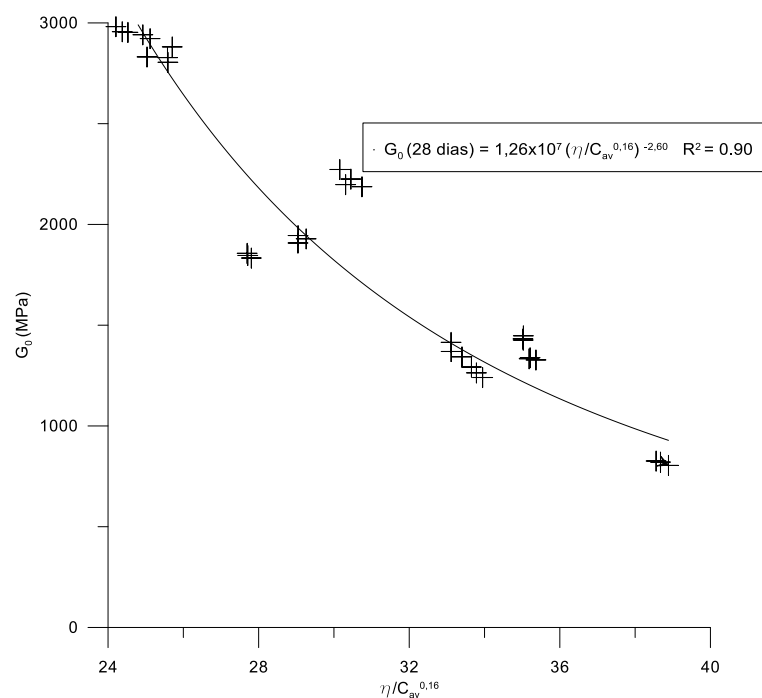


Figura 4.24 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 28 dias de cura

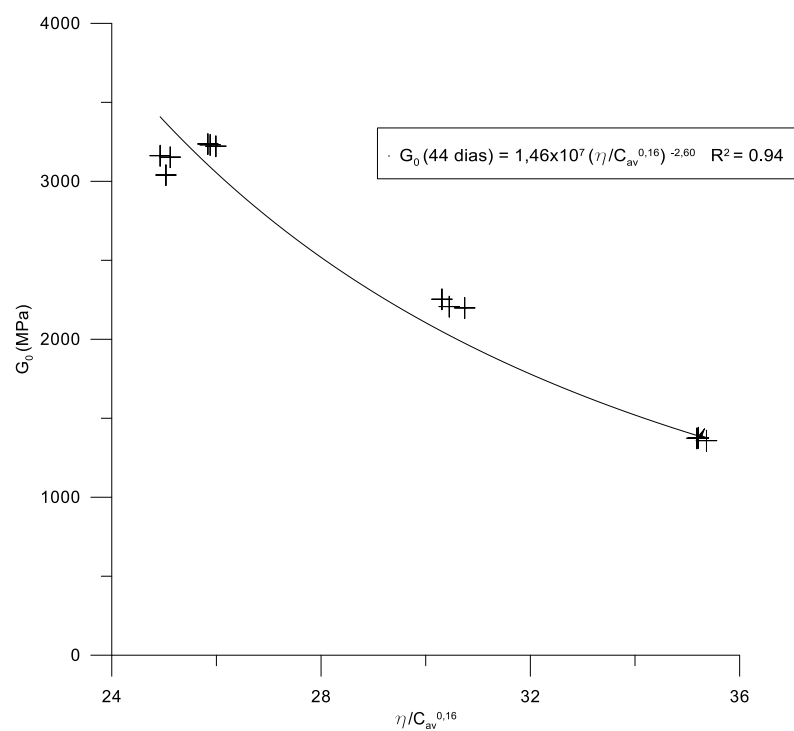


Figura 4.25 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 44 dias de cura

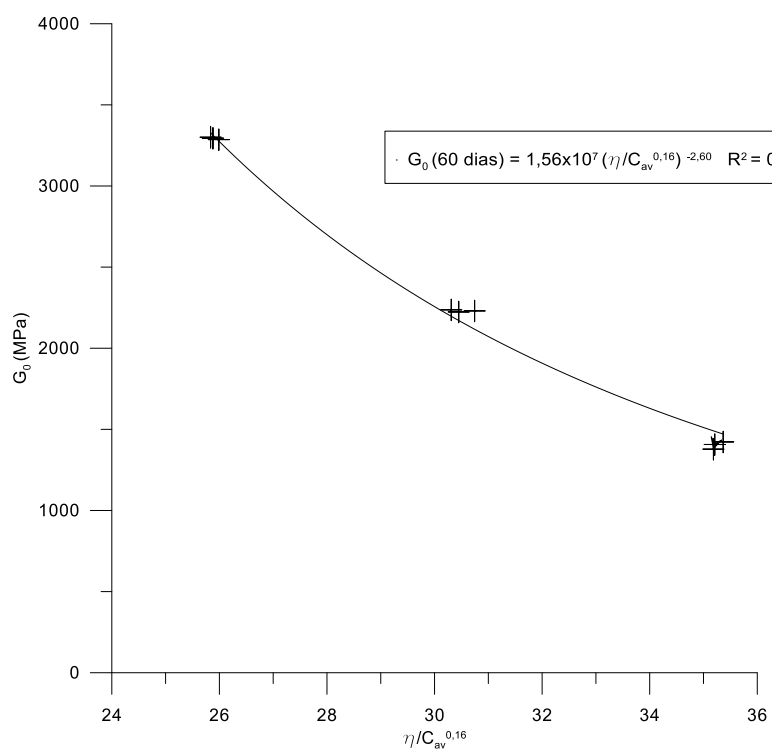


Figura 4.26 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 60 dias de cura

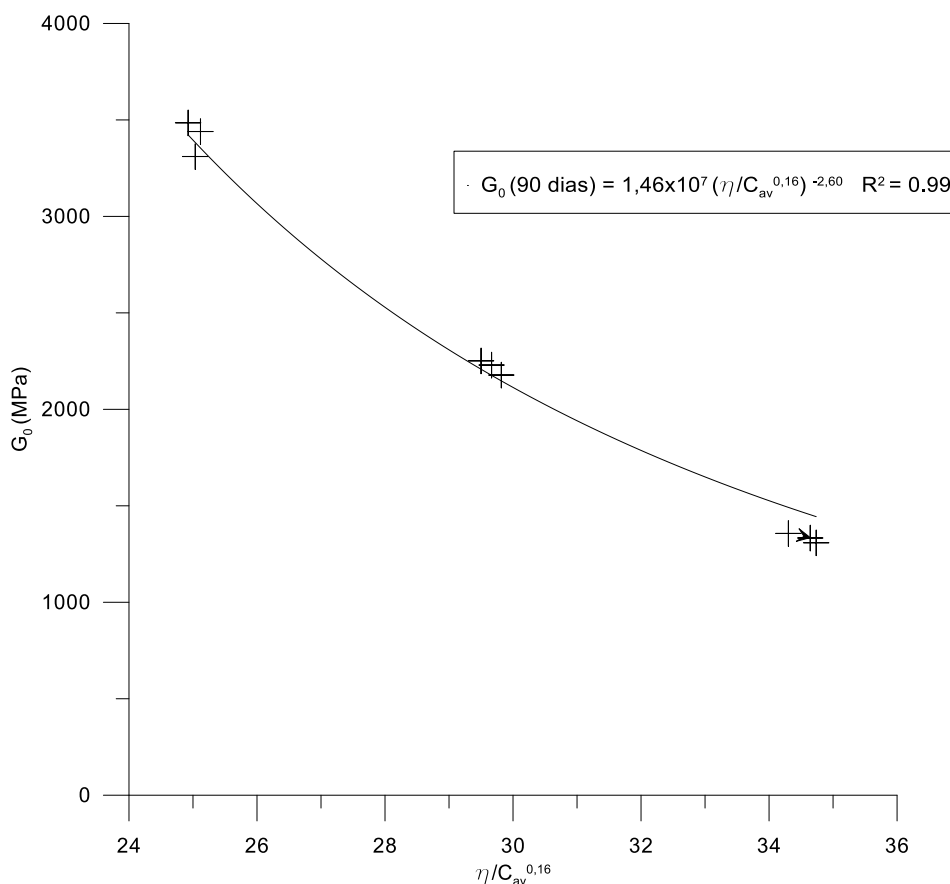


Figura 4.27 - Módulo Cisalhante versus Relação Vazios/Cal ajustado de amostras com 90 dias de cura

Foram observados que os resultados de medidas de rigidez inicial em função da relação $\eta/(C_{av})^{0,16}$ apresentam o mesmo comportamento que comparados com medidas de resistência. A explicação para este comportamento consiste em que a onda “S” está relacionada com a rigidez inicial do material, por isso a sua velocidade (e conseqüentemente o G_0 do material) cresce continuamente com o tempo, juntamente com o aumento da resistência do material, proporcionada pela cal.

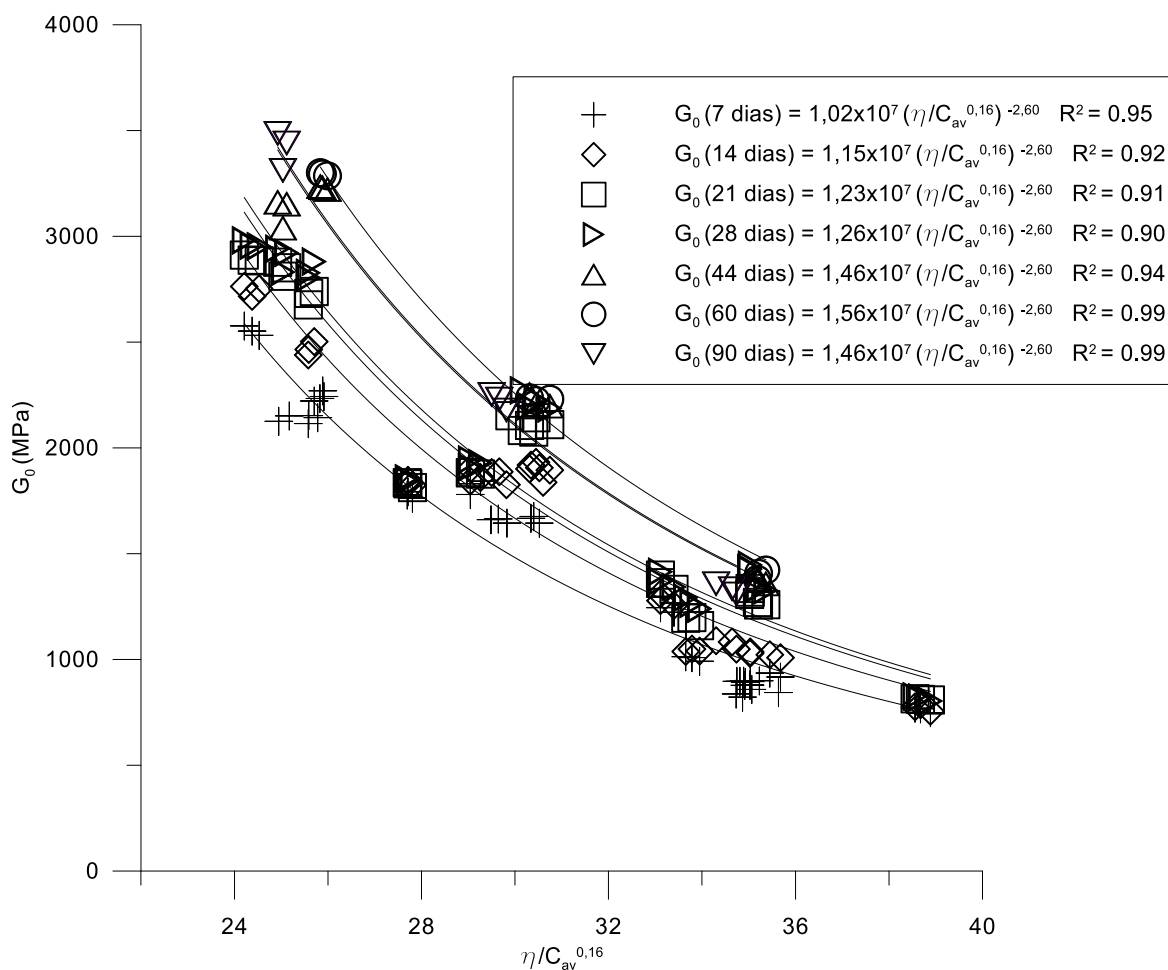


Figura 4.28 - Efeito do tempo de cura nas amostras de Solo-Cal nos ensaios de medidas de rigidez inicial.

Comparando as equações obtidas em cada tempo de cura, nota-se que o módulo cisalhante inicial tem um relacionamento direto com a relação η/C_{av} (ajustado) para todos os tempos de cura, tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito do tempo de cura. Portanto, uma relação única pode ser conseguida relacionando o módulo cisalhante inicial com a porosidade, com o teor volumétrico de cal e com o tempo de cura, como apresentado na Figura 4.29.

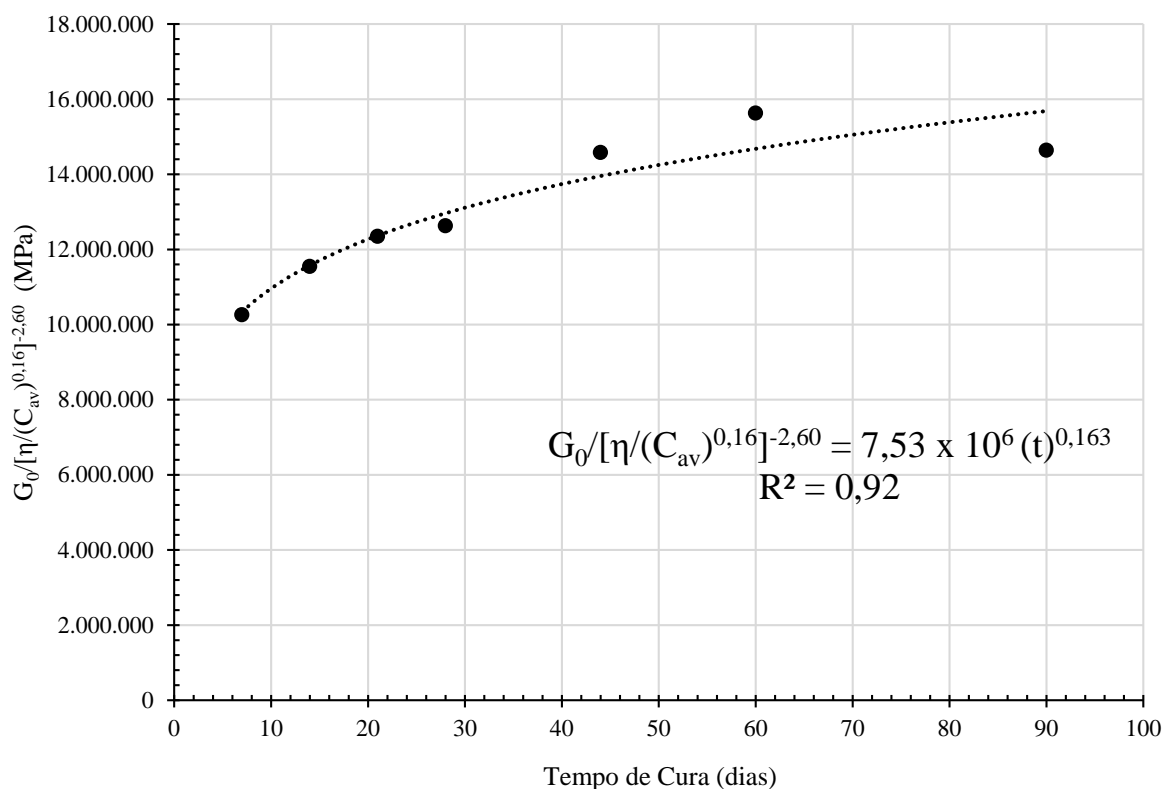


Figura 4.29 - Variação do G_0 em relação à Porosidade, Teor de Cal e Tempo de Cura

4.5 ENSAIOS DO FURO DE AGULHA (*PINHOLE*)

A Tabela 4.3 e a Figura 4.30 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios do furo de agulha (*Pinhole*).

Tabela 4.3 - Resultados no ensaio do furo de agulha.

| Teor de Cal | γ_d | | |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | 1,60 g/cm ³ | 1,75 g/cm ³ | 1,90 g/cm ³ |
| 0% | ND4 | ND4 | ND4 |
| 1% | ND3 | ND3 | ND3 |
| 2% | ND1 | ND1 | ND1 |
| 3% | ND1 | ND1 | ND1 |

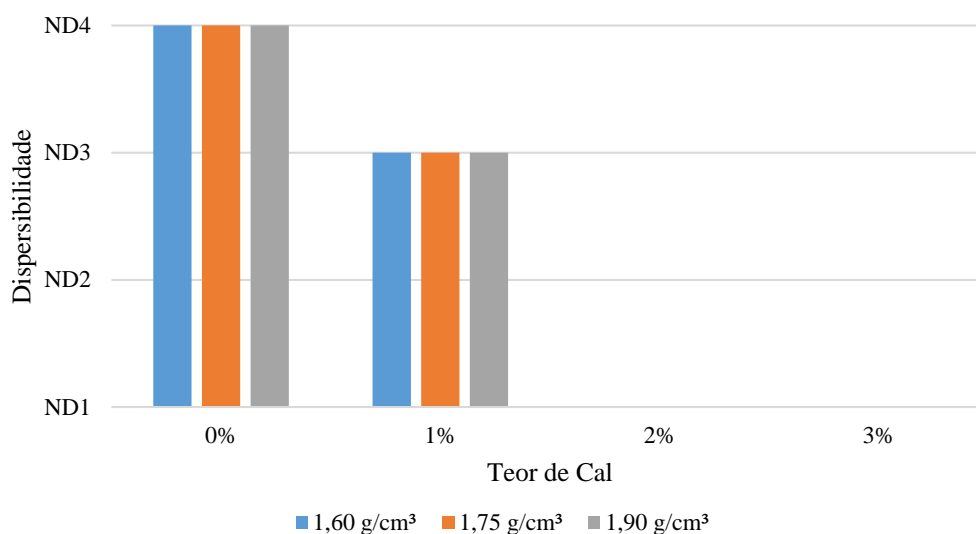


Figura 4.30 - Variação da dispersibilidade com o teor de cal e com o peso específico aparente seco.

Nota-se que o solo em estado natural apresentava uma dispersibilidade intermediária (ND4), com a adição de 1% de cal, a dispersibilidade diminuiu, tornando-se o tipo ND3 (levemente dispersivo), a partir da adição de 2% de cal a mistura de Solo-Cal torna-se completamente não dispersivo (ND1). Todas as misturas de Solo-Cal foram ensaiadas após 7 dias de cura. Não foi ensaiada as misturas com teores de cal de 5% e 7%, devido aos resultados apresentados acima. Em quanto à variação da dispersibilidade com respeito à massa específica aparente seca não foi observada nenhuma diferença.

4.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

Foram avaliados os impactos ambientais definidos para este estudo e são apresentados a seguir os quantitativos obtidos. A partir dos resultados, avaliam-se os processos mais potencialmente impactantes durante a construção de uma sub-base de Solo-Cal, segundo a contribuição dos processos na geração dos potenciais impactos ambientais avaliados.

Na Tabela 4.4, são apresentados os resultados obtidos da avaliação dos impactos ambientais, separados para cada tipo de mistura de Solo-Cal. Cada mistura foi identificada com o nome de SCX-Y, onde “X” obtém os valores de 1, 2 ou 3, de acordo com os três pesos específicos

aparente secos ($1,60 \text{ g/cm}^3$, $1,75 \text{ g/cm}^3$ ou $1,90 \text{ g/cm}^3$) e “Y”, os valores de 3, 5 ou 7, de acordo com a quantidade de cal na mistura (3%, 5% ou 7%).

Tabela 4.4 - Avaliação dos impactos ambientais do processo de construção de uma Sub-base de Solo-Cal

| Mistura Solo-Cal | Acidificação (kg SO ₂ -eq) | Eutrofização (kg PO ₄ -eq) | Oxidação Fotoquímica (kg C ₂ H ₄ -eq) | Depleção de Recursos Não Renováveis (kg Sb -eq) | Depleção da Camada de Ozônio (kg CFC-11 -eq) | Aquecimento Global (kg CO ₂ -eq) | Demanda de Energia Acumulada (MJ -eq) |
|------------------|--|--|--|--|---|--|--|
| SC1-3 | 0,072 | 0,014 | 1,69E-03 | 4,97E-02 | 9,02E-07 | 41,72 | 508,78 |
| SC2-3 | 0,075 | 0,015 | 1,78E-03 | 5,21E-02 | 9,46E-07 | 45,00 | 548,01 |
| SC3-3 | 0,079 | 0,015 | 1,87E-03 | 5,46E-02 | 9,89E-07 | 48,27 | 587,19 |
| SC1-5 | 0,083 | 0,016 | 2,06E-03 | 5,81E-02 | 1,04E-06 | 64,08 | 762,77 |
| SC2-5 | 0,088 | 0,017 | 2,19E-03 | 6,14E-02 | 1,10E-06 | 69,67 | 828,28 |
| SC3-5 | 0,093 | 0,018 | 2,32E-03 | 6,47E-02 | 1,16E-06 | 75,26 | 893,73 |
| SC1-7 | 0,095 | 0,019 | 2,44E-03 | 6,65E-02 | 1,18E-06 | 86,44 | 1.016,76 |
| SC2-7 | 0,101 | 0,020 | 2,59E-03 | 7,04E-02 | 1,25E-06 | 93,57 | 1.099,79 |
| SC3-7 | 0,106 | 0,021 | 2,76E-03 | 7,45E-02 | 1,32E-06 | 101,48 | 1.191,51 |

Para visualizar a diferença dos impactos entre as misturas de Solo-Cal, adotou-se a Mistura SC1-3 como referência, pois neste estudo é a mistura com menor teor de cal e peso específico aparente seco. Os valores de impactos foram normalizados matematicamente para se ter uma comparação do impacto gerado em cada tipo de mistura (Figura 4.31).

Atendendo os valores obtidos para cada tipo de impacto, nota-se que a variabilidade deles para cada mistura é a mesma independentemente do tipo de impacto.

Além, nota-se que os impactos são mais susceptíveis ao teor de cal do que à variação do peso específico aparente seco no caso das categorias aquecimento global e demanda de energia acumulada.

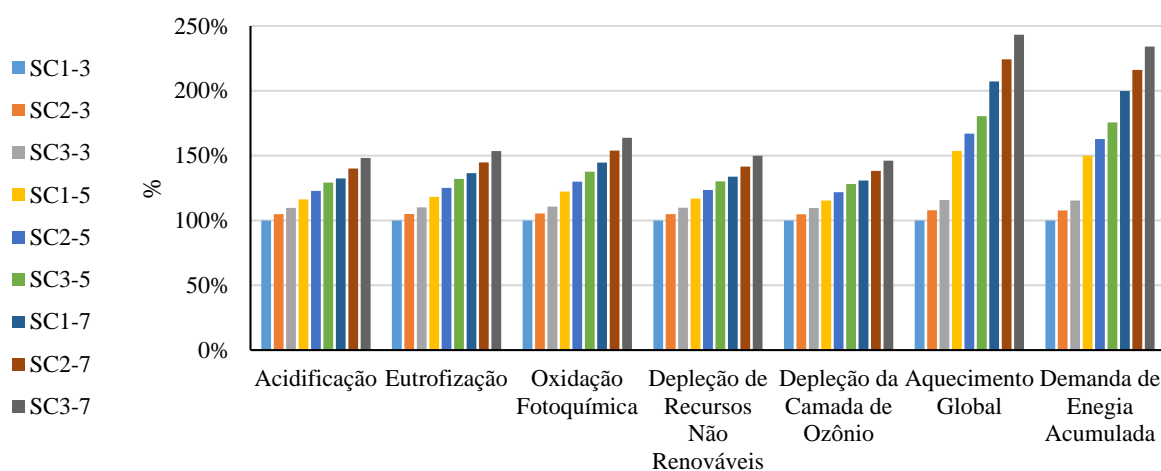


Figura 4.31 - Relação entre misturas de Solo-Cal pelos impactos ambientais resultantes.

4.6.1 Comparativo dos Impactos Ambientais

Nesta etapa da pesquisa, foi feita uma comparação apresentando cada impacto ambiental para cada tipo de mistura, com a proporção da contribuição dos processos mais significativos.

Os processos com mais de 1% de contribuição para cada impacto avaliado foram considerados nos gráficos apresentados abaixo. Destes processos cabe citar e definir:

- Produção da Cal: representa o impacto potencial gerado no processo de fabricação de cal hidratada, para construção de 1 m³ de Solo-Cal.
- Construção: representa o impacto potencial gerado na construção de 1 m³ de Solo-Cal.
- Transporte: representa o impacto potencial gerado nos transportes de solos e cal para a construção.
- Produção de Energia Elétrica: representa o impacto potencial na produção e o consumo da energia elétrica durante o processo de fabricação da cal hidratada, para construção de 1 m³ de Solo-Cal.

4.6.1.1 Acidificação

Os valores obtidos para impactos potencial gerados quanto à acidificação, são representados na Figura 4.32. Nota-se que a contribuição para este impacto é gerada, principalmente, na construção (47%), seguido dos processos de transporte (31%), processos de produção de cal (20%) e produção de energia elétrica (1%).

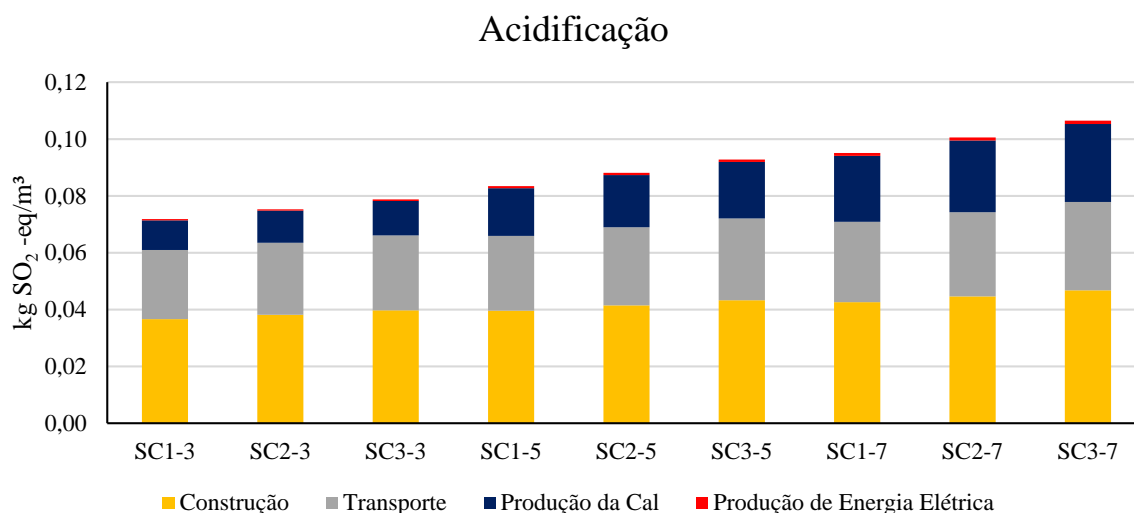


Figura 4.32 - Comparativo do impacto da acidificação entre misturas de Solo-cal

4.6.1.2 Depleção de recursos não renováveis

Na Figura 4.33, apresentam-se os valores comparativos para o impacto de depleção de recursos não renováveis. Nota-se que a contribuição para este impacto é gerada principalmente na construção (46%), o transporte gera 31%, a contribuição devido à produção de cal (20%) e à energia elétrica 3%. A notável contribuição da construção e o transporte neste impacto é devido ao grande consumo de energia fóssil pelos equipamentos utilizados nestas etapas.

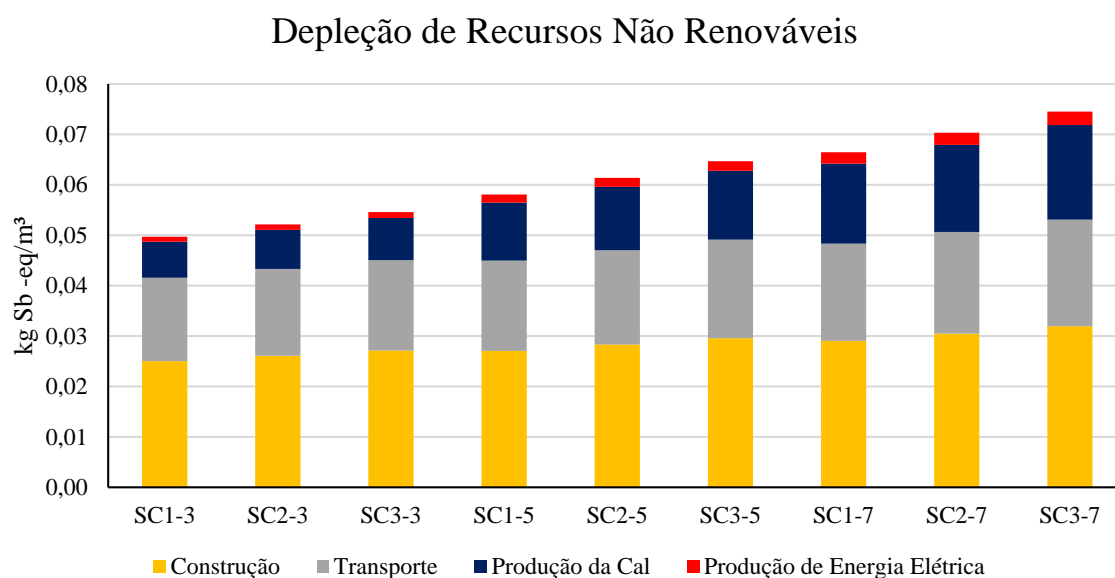


Figura 4.33 - Comparativo do impacto da depleção de recursos não renováveis entre misturas de Solo-cal

4.6.1.3 Eutrofização

Em relação às misturas avaliadas, os impactos de eutrofização gerados são apresentados na Figura 4.34. É importante salientar que a eutrofização causa o empobrecimento da diversidade de um ecossistema. A contribuição principal para este impacto é gerada na construção (45%), seguida do transporte e a produção de cal (29% e 25% respectivamente), e a produção de energia elétrica (1%).

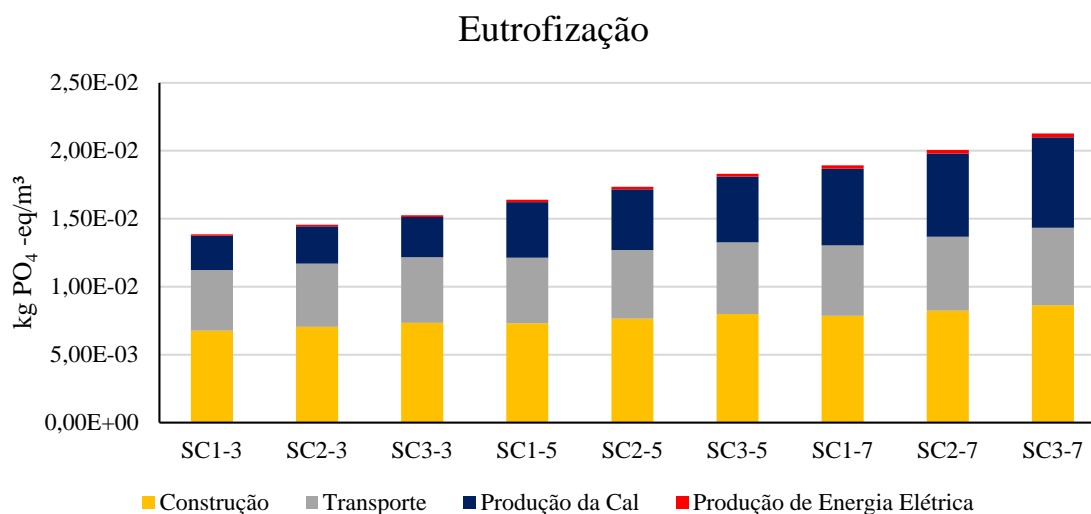


Figura 4.34 - Comparativo do impacto da eutrofização entre misturas de Solo-cal

4.6.1.4 Depleção da camada de ozônio

Na Figura 4.35 são apresentados os valores obtidos para as distintas misturas dos impactos gerados relativos à depleção da camada de ozônio. Nota-se, neste fator, que a maior contribuição deste impacto é gerada na construção (49%), seguido pelo transporte (32%), a produção de cal (17%) e a contribuição da produção de energia elétrica 2%.

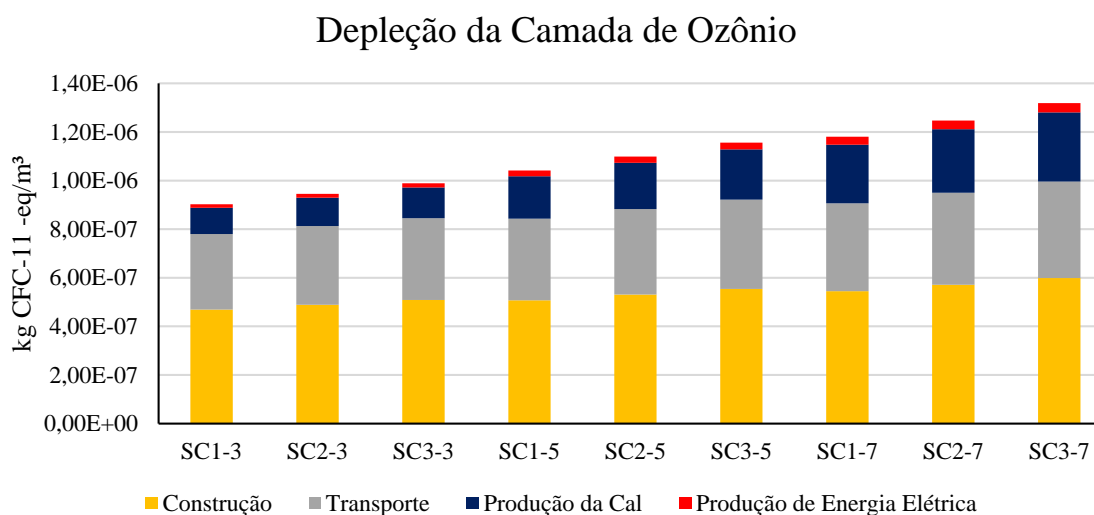


Figura 4.35 - Comparativo do impacto da depleção da camada de ozônio entre misturas de Solo-cal

4.6.1.5 Oxidação fotoquímica

Na Figura 4.36 são apresentados os valores obtidos para as distintas misturas os impactos relativos à oxidação fotoquímica. A contribuição da construção elevou o impacto gerado, representando 39% do impacto, seguido da produção da cal (32%), o transporte (26%) e a produção de energia elétrica (3%).

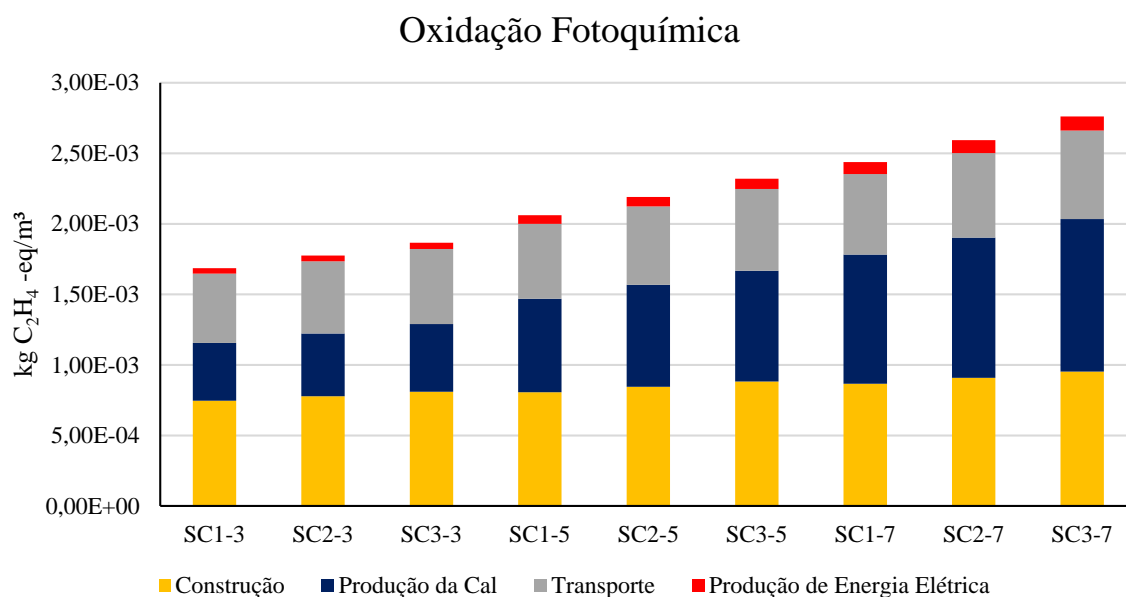


Figura 4.36 - Comparativo do impacto da oxidação fotoquímica entre misturas de Solo-cal

4.6.1.6 Demanda de energia acumulada

Na Figura 4.37 apresentam-se os resultados da demanda de energia acumulada para as distintas misturas avaliadas. Nota-se que a maior contribuição é gerada pela produção de cal (82%), a construção representa 10% de contribuição, o transporte, 6% e a produção de energia elétrica, 2%. É importante salientar a grande demanda de energia para a produção da cal em comparação com os outros processos.

Demanda de Energia Acumulada-Total

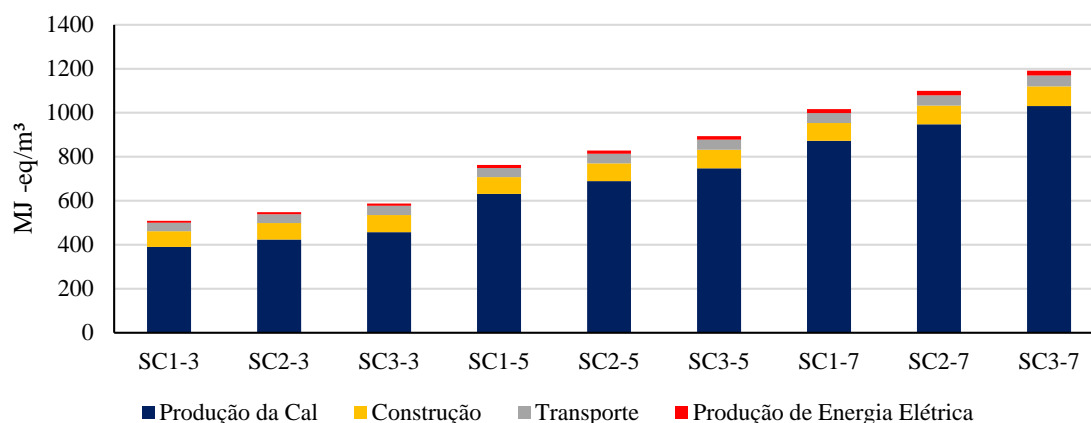


Figura 4.37 - Comparativo do impacto da demanda de energia acumulada entre misturas de Solo-cal.

Na Figura 4.38 é apresentada a demanda por fonte de energia consumida para cada mistura. Existe uma grande diferença de proporção, devido ao consumo de biomassa “lenha” na produção de cal e em menor proporção ao consumo de energia fóssil no transporte e na construção.

Demanda de Energia Acumulada

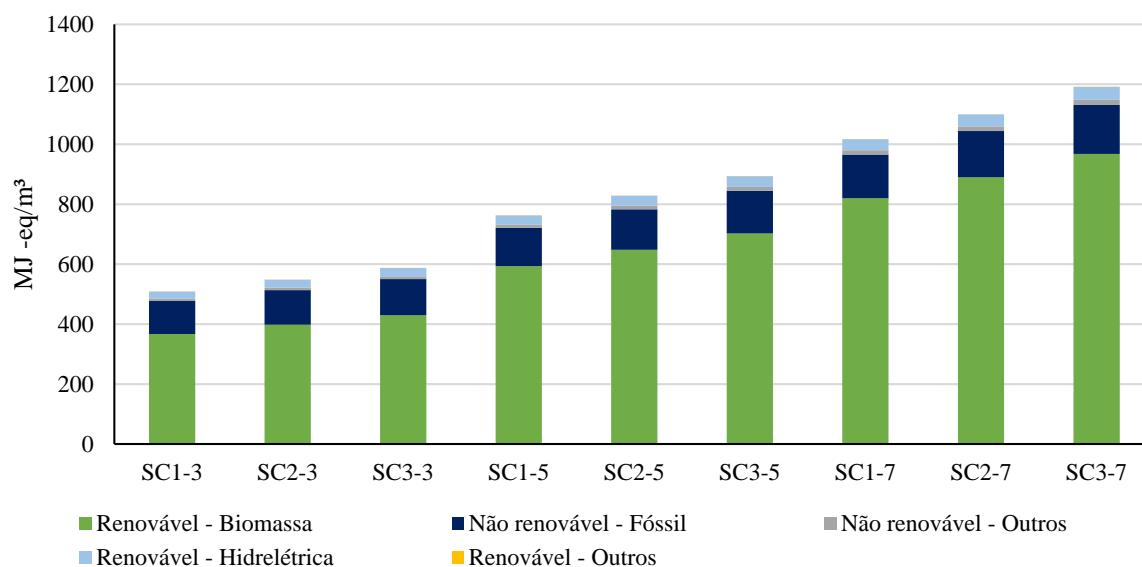


Figura 4.38 - Comparativo do impacto da demanda de energia acumulada entre misturas de Solo-cal por tipos de energia consumidos.

4.6.1.7 Aquecimento global ou Mudança climática

Os valores obtidos para impactos gerados relativos à mudança climática são apresentados na Figura 4.39. A maior contribuição para este impacto é gerada pela produção de cal, responsável do 88% do impacto, seguido pela construção, transporte e produção de energia elétrica, 7%, 4% e 1%, respectivamente. Nota-se que a elevada emissão de GEE na produção de cal é devida à calcinação (descarbonatação do calcário e queima de combustíveis para geração de energia térmica), que libera aproximadamente neste caso de estudo 750 kg CO₂, por tonelada de cal produzida.

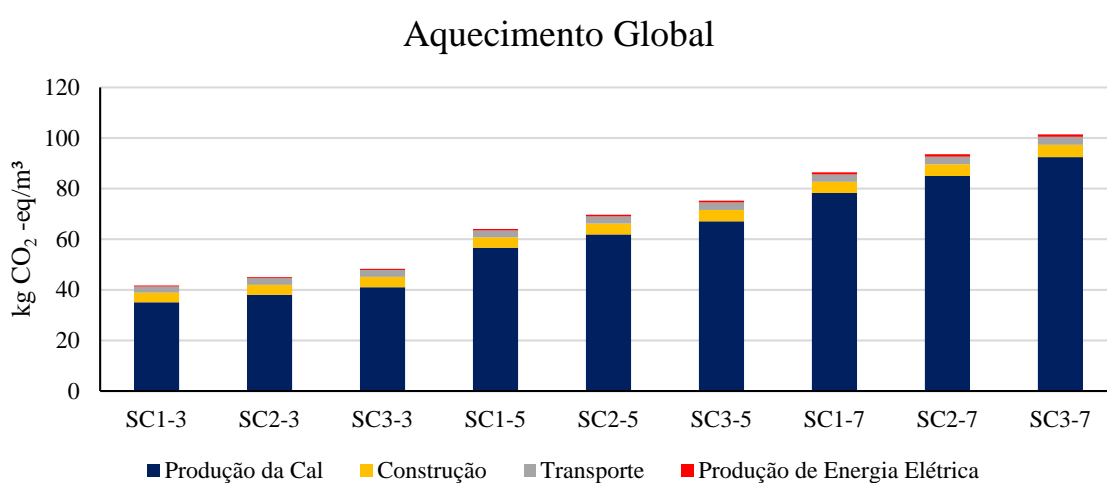


Figura 4.39 - Comparativo do impacto do aquecimento global entre misturas de Solo-cal

4.6.1.8 Comportamento mecânico vs. avaliação ambiental de solos estabilizados com cal

Conforme já dito anteriormente, todos os impactos ambientais avaliados neste trabalho comportam-se de forma similar, sendo mais susceptíveis ao teor de cal das misturas do que ao peso específico aparente seco. Por isso, foi selecionada uma destas categorias, neste caso, o potencial de aquecimento global para ser relacionado com os resultados de ensaios de durabilidade por molhagem e secagem com misturas de Solo-Cal (Figura 4.40). Os resultados apresentados a seguir demonstraram que o método empregado resulta em uma ferramenta que pode ser utilizada na etapa de um projeto, incluindo decisões do ponto de vista ambiental. Nota-se na Figura 4.40 uma tendência de aumento da durabilidade de misturas de Solo-Cal nas misturas de maior impacto potencial ambiental. Porém, para algumas misturas, é possível um correto desempenho em termos de durabilidade com menor impacto ambiental. Por exemplo, a

mistura SC3-5, apresenta o mesmo comportamento em quanto à durabilidade das misturas SC2-7 e SC3-7, mas com um menor impacto ambiental potencial gerado.

Salienta-se também que as misturas SC1-3, SC2-3 e SC3-3, apesar de terem menor impacto, não são viáveis em termos de durabilidade.

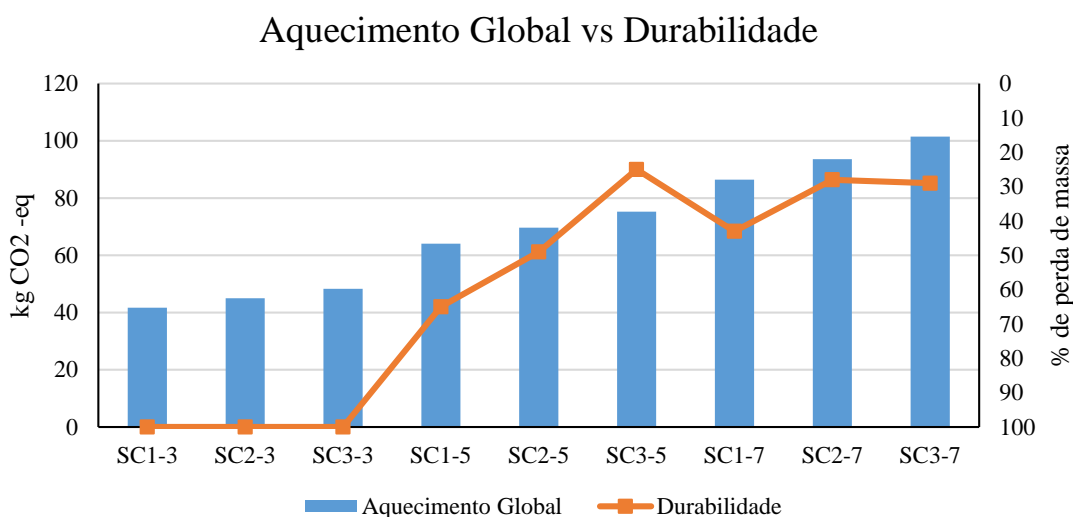


Figura 4.40 - Comparativo entre a Durabilidade e o Aquecimento global de misturas de Solo-Cal

O mesmo comportamento é apresentado na Figura 4.41, onde o impacto ambiental é relacionado com a rigidez inicial das misturas de Solo-Cal. Nota-se que a mistura SC3-5 apresenta o mesmo comportamento que a mistura SC3-7 em termos de rigidez, mas, com um menor impacto potencial gerado.

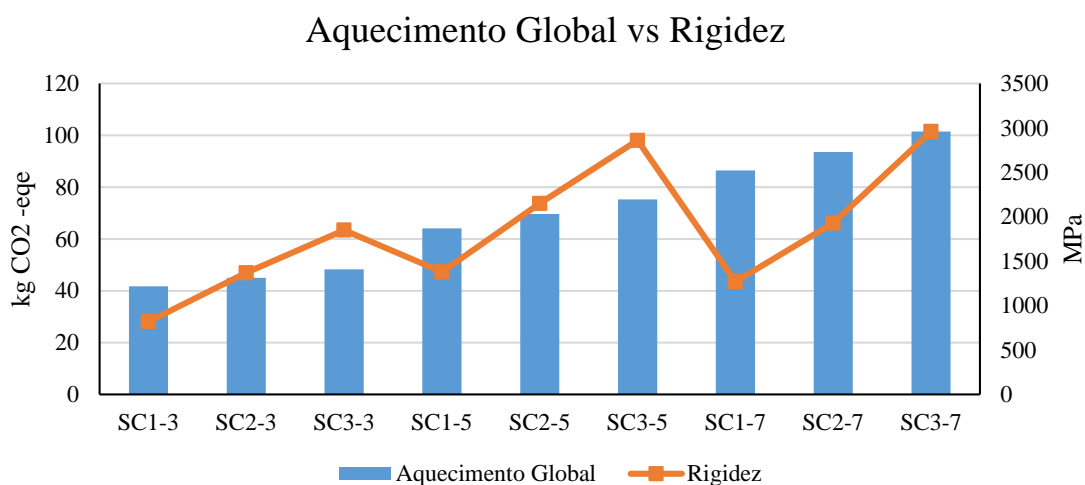


Figura 4.41 - Comparativo entre a Rigidez e o Aquecimento global de misturas de Solo-Cal

A tendência observada na Figura 4.42 é a mesma que no caso da Durabilidade e Rigidez. Também ressalta que a mistura SC3-5 tem uma resistência comparável com a mistura SC3-7, mas, com menor impacto potencial gerado.

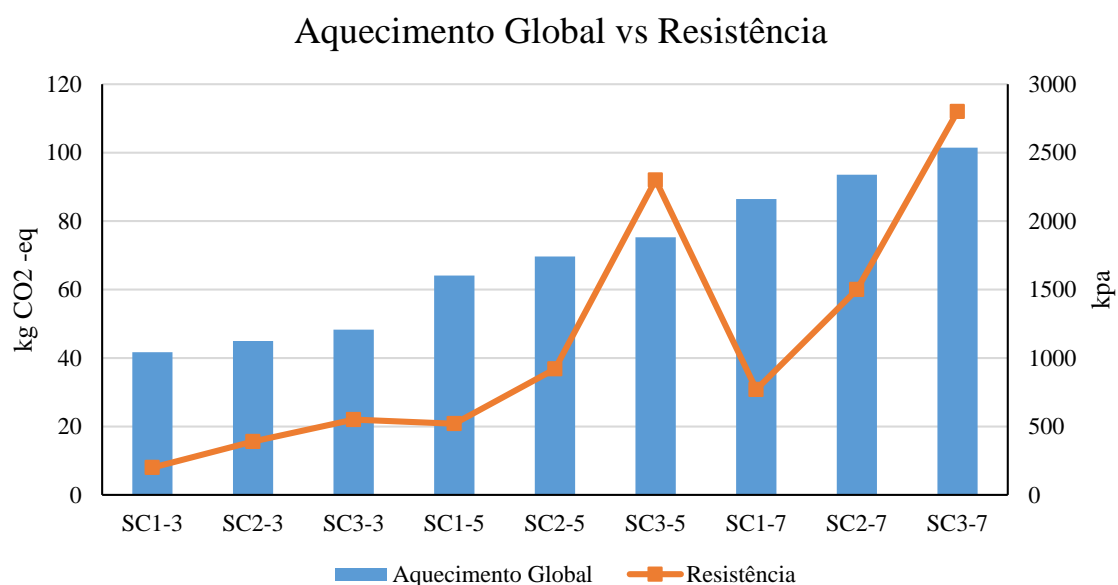


Figura 4.42 - Comparativo entre a Resistência e o Aquecimento global de misturas de Solo-Cal

Nota-se nas três figuras anteriores que os impactos estão diretamente relacionados ao teor de cal e à variação do peso específico aparente seco.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de laboratório apresentados e analisados nos capítulos anteriores permitiram, dentro das condições e limites específicos deste estudo, levaram às seguintes conclusões:

- a) Ensaio de Durabilidade por molhagem e secagem.

O método de avaliação de durabilidade adotado para Solo-Cimento, se mostrou muito severo para as misturas de Solo-Cal, devido às baixas resistências aos 7 dias de cura, especialmente em misturas com 3% de Cal. Além disso o método é muito influenciado pelo laboratório, devido a vários fatores não controláveis durante o ensaio.

Para todas as amostras de Solo-Cal, pode-se perceber a influência da quantidade de cal sobre a durabilidade do solo dispersivo estabilizado com cal, para todos os tempos de cura estudados. Apresenta-se menor perda de massa com o aumento da quantidade de cal. Este mesmo comportamento apresenta-se com o aumento do peso específico aparente seco da mistura.

A perda de massa foi maior para as misturas com 3% de cal, apresentando perdas de até 100% ao terceiro ciclo. No caso de misturas com 5% de cal, apresentaram médias de 40% de perdas de massa e para o caso de misturas com 7% de cal, 30% de perda de massa, para o tempo de cura de 28 dias.

- b) Ensaio de vácuo-saturação

A alta pressão de vácuo induz à retenção de mais água dentro dos corpos-de-prova, o que gera poro-pressões positivas durante a compressão, que resulta numa menor resistência. Baseados nos resultados poderíamos afirmar que este ensaio apresenta-se como uma forma rápida de avaliar o desempenho de misturas estabilizadas.

A perda de resistência foi influenciada pela quantidade de cal, sendo esta menor com o aumento do teor de cal, do mesmo modo, com o aumento do peso específico aparente seco, a perda de resistência foi menor. Em quanto ao tempo de cura, não foi identificada uma influência respeito

à perda de resistência, já que tanto a resistência à compressão simples como a resistência à vácuo-saturação aumentaram com o aumento do tempo de cura.

As misturas com 3% de cal apresentaram médias de 46% de perdas de resistências, as misturas com 5%, médias de 29% e as misturas com 7% de cal, médias de 7% de perdas de resistência, considerando o tempo de cura de 28 dias.

c) Ensaio de medidas de rigidez inicial

Destaca-se por ser um ensaio não destrutivo, que oferece resultados que ajudam na hora de estudar misturas estabilizadas. A rigidez inicial encontra-se relacionada diretamente com a onda de cisalhamento “S”, medida durante o ensaio. A velocidade desta onda cresce continuamente com o tempo, juntamente com o aumento da resistência do material, proporcionada pela cal ou devido a aumento do peso específico aparente seco da mistura de Solo-Cal.

O módulo cisalhante foi medido através da técnica de ondas ultrassônicas nas amostras tratadas com cal, com o objetivo de avaliar os efeitos das variáveis estudadas na rigidez inicial do solo-cal em estudo.

A adição de cal promoveu aumento substancial dos valores medidos de módulo cisalhante. Na faixa de teores estudados (3%, 5% e 7%), o módulo cisalhante tende a aumentar não-linearmente com o aumento da quantidade de cal. A taxa de aumento do módulo cisalhante, representada pela inclinação das retas de ajuste, não variou consideravelmente com o aumento do peso específico aparente seco do material compactado. Entretanto, a redução na porosidade do material compactado promoveu aumentos substanciais do módulo cisalhante. Verificou-se que o módulo cisalhante aumentou potencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada, efeito observado em todos os tempos de cura estudados (7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias).

Verificou-se que, para a utilização da relação vazios/cal na previsão do módulo cisalhante, é necessária a adoção de uma potência para compatibilizar as taxas de variação das grandezas envolvidas (quantidade de cal e porosidade). Após diversas tentativas obteve-se que, aplicando uma potência igual a 0,16 sobre o parâmetro C_{av} , haveria uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, resultando num melhor ajuste para a relação vazios/cal.

Observou-se a existência de relações distintas e únicas entre o módulo cisalhante e a relação $[\eta/(C_{av})^{0,16}]^{-2,60}$, tendo apenas um escalar diferente devido ao efeito do tempo de cura.

Portanto, abaixo é apresentada a equação resultante da correlação do módulo cisalhante com a porosidade, com o teor volumétrico de cal e com o tempo de cura:

$$G_0 = 7,53 \times 10^6 (t)^{0,163} \cdot \left[\frac{\eta}{(C_{av})^{0,16}} \right]^{-2,60}$$

d) Ensaio do furo de agulha (*Pinhole*)

Verificou-se que, a dispersibilidade que o solo apresentava naturalmente foi diminuindo com pequenas quantidades de cal. Foi suficiente 1 % de cal para trocar a dispersibilidade do solo de ND4 (moderadamente dispersivo) para ND3 (levemente dispersivo), e a partir de 2 % de cal, o solo já mudou a um solo tipo ND1 (não dispersivo).

Portanto, ressalta-se a importância do ensaio como uma das ferramentas para reconhecer estes tipos de solos, que quando não são tratados, podem gerar problemas. Destaca-se segundo os resultados obtidos que só foram necessárias pequenas quantidades de cal para controlar a dispersibilidade do solo (2%), mas como foi apresentado anteriormente, precisa-se de pelo menos 5% de cal para estabilizar o Solo-Cal enquanto a sua durabilidade.

e) Avaliação ambiental

O desenvolvimento da pesquisa de utilização do ciclo de vida para a comparação de misturas de Solo-Cal, demonstrou a potencialidade da ACV, permitindo diversas conclusões.

Foi demonstrado que tanto o desempenho mecânico das misturas como os impactos estão relacionados ao peso específico aparente seco e ao teor de cal e que nem sempre a mistura que gera um menor impacto ambiental apresenta um melhor comportamento enquanto a seu desempenho mecânico.

Os resultados obtidos comprovam que a ferramenta técnica ACV pode ser aplicada a distintas áreas da engenharia, desde que sejam observadas algumas precauções, como por exemplo, a necessidade da compilação de um banco de dados completo e confiável.

Os resultados ajudam a conhecer os impactos gerados em cada processo na construção de 1 m³ de Solo Cal e a projetar programas para melhorar os processos, visando reduzir os impactos ambientais.

Ressalta-se que a mistura SC3-5 apresentou um melhor comportamento mecânico comparável com a mistura SC3-7, mas, com um menor impacto potencial gerado. Estes tipos de resultados demonstram a grande importância da ferramenta da ACV em termos de sustentabilidade na construção.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de complementar os resultados obtidos nesta pesquisa, dar prosseguimento ao trabalho realizado nesta dissertação e ampliar o conhecimento sobre o comportamento de solos dispersivos estabilizados, o autor sugere os seguintes tópicos de pesquisa:

- A execução de ensaios de medidas de rigidez inicial e resistência à compressão simples com as amostras submersas em água;
- Verificação da influência da demora na compactação de misturas de Solo-Cal enquanto a durabilidade, rigidez inicial e resistência.
- A execução de ensaios de teor de sais na água intersticial para uma melhor identificação da dispersibilidade do solo e das misturas.
- A execução de ensaios como fotomicroscopia e difração por raios-x, para melhor compreensão dos mecanismos de reações entre o solo e a cal.
- A adaptação ou o desenvolvimento de um método de ensaio, que permita prever a durabilidade de misturas de Solo-Cal ao longo do tempo de cura.
- Avaliação econômica associados ao ciclo de vida das diferentes misturas de Solo-Cal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13600: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. 1996

_____NBR 13601: Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test). 1996

_____NBR 13602: Solo-avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - ensaio de dispersão s c s. 1996

_____NBR 13603: Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos, por meio de ensaios químicos em amostra de água intersticial.

_____NBR ISO 14044. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e Orientações. 2009.

_____NBR 14114: Solo – Solos argilosos dispersivos – Identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (Pinhole). 1998

_____NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 1986.

_____NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. 1984.

_____NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4.8 mm – Determinação da massa específica. 1984

_____NBR 7175: Cal hidratada para argamassa - Especificação. 1986.

_____NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. 1984.

_____NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. 1984

_____NBR ISO 14001. Sistemas de gestão ambiental – requisitos com orientações para uso. 2004.

_____NBR ISO 14040. Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. 2009a.

AITCHISON, M. E.; WOOD, C. C. **Some Interactions of Compaction, Permeability, and Post-Construction Deflocculation Affecting the Probability of Failure of Small Dams** – Proceedings. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 11, Montreal, Canada, 1965, pp. 442-446.

AITCHITSON, M. E.; INGLES, O. G.; WOOD, C. C. **Post-Construction Deflocculation as a Contributory Factor in Failure of Earth Dams** – Proceedings, 4th Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canada, 1963, pp. 275-279.

ARAUJO, J.; OLIVEIRA J.; SILVA, HUGO. **The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements**. Elsevier. Transportation Research Part D 32 (2014) 97–110.

ASTM C 593: Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization. 2006

ASTM D 5102: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures. 1996

ASTM D 559: Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. 2003

ATTOH-OKINE, N. O. **Lime Treatment of laterite soils and gravels** – revisited. Construction and Building Material, v.9, n.5, p.283-287. 1995.

AWAD, M.A. (2002). **Identification of dispersive clay in gaza strip área; anda filter effects on dam safety**. First International Conference on Scour of Foundations, pp 471- 484.

BARANDICA, J.; FERNANDEZ, G.; BERZOSA, A.; DELGADO, J.; ACOSTA, F. **Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects**. Elsevier. Journal of Cleaner Production 57 (2013) 79 e 91.

BELL, F. G. **Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils**. Engineering Geology, n.42, p.223-237, 1996.

BHATTACHARJA, S. and BHATTY, J.I., (2003), **Comparative Performance of Portland Cement and Lime Stabilization of Moderate to High Plasticity Clay Soils**. Research and Development Bulletin RD125, Portland Cement Association.

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.

BISWAS, W. K. **Carbon footprint and embodied energy assessment of a civil works program in a residential estate of western australia**. The International Journal of Life Cycle Assessment, v.19 (4), p. 732–744, 2013.

BLANKENDAAL, T.; SCHUUR, P.; VOORDIJK, H. **Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach**. Elsevier. Journal of Cleaner Production 66 (2014) 27e36.

BOURDEAUX, G., NAKAO, H. (1974). **Ensaio sobre Argilas Dispersivas**. V Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **BRE environmental profiles 2013: product category rules for type III environmental product declaration of construction products to EM 15804:2012**. [Watford], 2013.

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

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)**. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 1995

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.

CHESTER, M., HORVATH, A. **Life-cycle assessment of high-speed rail: the case of California**. Environ. Res. Lett. 5, 8pp. 2010.

CLARE, K. E.; CRUCHLEY, A. E. **Laboratory experiments in the stabilization of clays with hydrated lime**. Géotechnique. London, v.7, p.97-111, 1957.

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.

COLE, B. A., Ratanasen, C., Maiklad, P., Liggins, T.B., Chirapuntu, S. (1977). **Dispersive Clay in Irrigation Dams in Thailand**, ASTM – STP, pp. 25-41.

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

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

DALLA ROSA, A. **Metodologias para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura**. 273p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013.

DASCAL, O.; HURTUBISE, J. **Chemical Treatment of Dispersive clays in Mississippi Dams**. Proceedings. American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 69-73.

DEMPSEY, B. J., e THOMPSON, M. R., (1973), **Vacuum Saturation Method for Predicting Freeze-Thaw Durability of Stabilized Materials**. In Highway Research Record 442, HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 44-57.

DUGGAN, A. R.; MCCABE, B. A.; GOGGINS, J.; CLIFFORD, E. **An embodied carbon and embodied energy appraisal of a section of irish motorway constructed in peatlands.** *Construction and Building Materials*, v. 79, p. 402–419, 2015.

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.

EIPPCB. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau; IPTS – European Commission’s Joint Reserch Centre – Institute for Prospective Technological Studies. Supervisores: Serge Roudier e Luis Delgado. **Best Available Techniques (BAT) Reference for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide.** European Union. 2013

FIESP Construbussines – **Habitação, Infra-estrutura e emprego.** São Paulo: FIESP, 3º Seminário Brasileiro da Indústria da Construção, 26 p., 1999.

FONINI, A. **Comportamento Mecânico de uma Areia Cimentada: Análise Experimental e Micromecânica.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2012.

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

FRANKL, P.; RUBIK, F. **Life Cycle Assessment in Industry and Business: adoption of patterns, applications and implications.** Berlin: Springer-Verlag, 2000. 280 p.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H.-J.; BAUER, C.; DOKA, G.; DONES, R.; HISCHIER, R.; HELLWEG, S.; HUMBERT, S.; KÖLLNER, T.; LOERINCIK, Y.; MARGNI, M.; NEMECEK, T. **Implementation of life cycle impact assessment methods: data v2.0 (2007).** Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.

FURTADO, G.R.G., MACHADO, N. (1982). **Argilas Dispersivas na Barragem de Sobradinho.** Seminário Internacional sobre Represas y Operación de Embalses, Comissão de Integração Elétrica Regional – CIER.

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.

GHUMAN, O. S.; ALLEN, R. L.; Mc NEILL, R. L. **Erosion, Corrective Maintenance and Dispersive Clays.** Proceedings. American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 172-190.

GLOBA, R.,S., BARBOUR, S., L. (2001). **A case history of shallow sloughing within cut slopes of an irrigation canal in salt-rich clayey colluvium.** Can. Geotech. Journal n.38, pp 665-677.

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

GUIMARÃES, J.E.P. (1971). **Estabilização de Solos – Nova e Importante Aplicação da Cal seus Conceitos e suas Vantagens.** ABPC, Boletim n° 5, São Paulo, SP, 67 p.

HERRIN, M.; MITCHELL, H. **Lime-soil-mixtures.** Highway Research Board Bulletin, Washington, n.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.

HOLMGREN, G. G. S. e FLANAGAN, C. P. **Factors Affecting Spontaneous Dispersion of Soil Materials as Evidenced by Crumb Test.** Proceedings. American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 218-239.

ICOLD BOLETIN 77. **Dispersive Soils in Embankment Dams.** Review. Paris, 1990.

INGLES, O. G. **Discussion of Piping in Earth Dams of Dispersive Clay, by J. L. Sherard; N. L. Ryker and R. S. Decker** – Proceedings. Speciality Conference on the Performance of Earth & Earth-Supported Structures. ASCE, v. 3, 1997, pp. 135-141.

INGLES, O. G.; AITCHISON, G. D. **Soil-Water Disequilibrium as a Cause of Subsidence in Natural Soils and Earth Embankments**. Colloquium on Land Subsidence, International Association of Scientific Hydrology-United Nations Economic, Social and Cultural Organization. Tokyo, Japan, v. 11, 1969, pp. 342-352.

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

INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION (CIB); CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT (CSTB) (Eds.). **INTERNATIONAL CONFERENCE BUILDINGS AND THE ENVIRONMENT**, Paris. Proceedings... Paris: CIB Task Group 8; Environmental Assessment of Buildings, 1997

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JULLIEN, M.; DAUVERGNE, M.; CERESO, V. **Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA**. Elsevier. Transportation Research Part D 29 (2014) 56–65.

KELLENBERGER, D.; ALTHAUS, H.; JUNGLUTH, N.; KÜNNIGER, T.; LEHMANN, M.; THALMANN, P. **Final report of the project of a national life cycle inventory database "ecoinvent 2000" commissioned by buwal/bfe/astra/blw**. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, v2.0, 2007.

KÉZDI, Á. **Stabilized Earth Roads**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1979. 327p.

KIM, G. W. (1984). **A Study on the physical and Chemical Characteristics of Dispersive Soils**. Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol.4, N.4, pp.137-143.

LEWIS, D.; SCHMIDT, A. **Erosion of Unsaturated Clay in a Pinhole Test**. Proceedings. American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 260-273.

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**. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007

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

LUNDSTRÖM, K. **Influence des chaussées en béton et asphalte sur le milieu**. In: International Symposium on Concrete Road, Lisbon (Portugal), p. 195. 1998.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 366 p., 2005.

MARCON, A. **Durabilidade e Módulo de Elasticidade de Misturas Areis-Cal-Cinza Volante**. Tese (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro. 1977.

MATEOS, M. **Physical and Mineralogical Factors in Stabilization of Iowa Soils with lime and Fly Ash**. PhD Thesis (Iowa University). 1961.

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.

MELLO, L. G. S., BILFINGER, W., CAMARGO, V.L.B., PIMENTEL, R.N.F. (2002). **Solos dispersivos na região de Xique-xique – Problemática e técnicas de solução em canais de irrigação**. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of Soil Behavior**. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1993, 437p.

MORAIS, F., BARCELAR, L.A.P., SOBREIRA, F., G. (2004). **Análise da erodibilidade de saprólitos de gnaise**. Revista Brasileira da Ciência do Solo, n.28, pp1005-1062.

MOURAD, A. L.; GARCIA, E. E. C.; VILHENA, A. **Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Aplicações**. Campinas: CETEA/CEMPRE, 92p. 2002.

Mroueh, U.M. Eskola, P. Laine-Ylijoki, J. **Life Cycle Assessment of road Construction**, Final Report, Teilat, Finnish National Road Administration, Helsinki (Finland), p. 65. 2000.

MROUEH, U.M., ESKOLA, P., LAINE-YLIJOKI, J. **Waste Manage** 21 (3), 271–277. 2001.

MÜLLER, V., PINTO, L.F.S., ÁVILA, A.L.M. (2003). **Argilas Dispersivas: Estudo da Área de Empréstimo da Barragem de Santa Bárbara**. Pelotas – RS.

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.

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.

PAIGE-GREEN, P. **The long-term durability of lime-treated soils**. In: **Geotechnics in the African Environment** (Edited by Blight, GE, Fourie, AB, Luker, I, Mouton, DJ and Scheurenberg, RJ.). Rotterdam: Balkema. 1991.

PAIGE-GREEN, P, Netterberg, F and Sampson, LR. **The carbonation of chemically stabilized road construction materials: guide to its avoidance**. Project Report PR 89/146/1, Department of Transport, Pretoria. 1990.

PESSOA, F. H. C. (2004). **Análises dos Solos de Urucu para Fins de Uso Rodoviário**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151p.

PEUPORTIER, B. **Analyse de vie d'un kilomètre de route et comparaison de six variantes**, Ecole des Mines de Paris, CIM béton, Paris, p. 48. 2003.

PONTAROLLOP, G. and SMITH, T. **A life-Cycle Analysis Of the Environmental Impacts of Asphalt and Concrete Road**. IRF World Road Congress, Paris. 2001.

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.

RALLINGS, R. A. (1966). **An investigation into the causes of failure of farm Dams in the Brigalow Belt of Central Queensland**. Bulletin n.10, Water Research Foundation of Austrália.

ROBNETT, Q. L. e THOMPSON, M. R. Soil Stabilization Literature Reviews. Civil Engineering Studies. Highway Engineering Series N° 34, Urbana, Illinois. 1969.

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.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. **Lime Requirement for Stabilization**. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. 79 TH ANNUAL MEETING, 2000. Washington, D.C., 2000.

RYKER, N. L. **Encounting Dispersive Clays on Soil Conservation Service in Oklahoma**. ASTM STP-623, pp. 370-389.

SANDHOLZER, D. NARODOSLAWSKY, M. SPionExcel: **Fast and easy calculation of the Sustainable Process Index via computer**. Resources, Conservation and Recycling. Graz, v. 50, p. 130-142, abril, 2007.

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.

SANTERO, N., MASANET, E., HORVATH, A. **Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review**. Resour. Conserv. Recycl. 55, 801–809. 2011a.

SANTERO, N., MASANET, E., HORVATH, A. **Life-cycle assessment of pavements. Part II: Filling the Research Gaps**. Resour. Conserv. Recycl. 55, 810–818. 2011a.

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.

SHERARD, J.L., DECKER, R. S., RYKER, N.L. (1972a). **Piping in Earth Dams of Dispersive Clay**. Performance of earth and earth-support structures, ASCE, Vol.I., pp.589-626.

SHERARD, J.L., DECKER, R. S., RYKER, N.L. (1972b). **Hydraulic Fracturing in Low Dams of Dispersive Clay**. Performance of earth and earth-support structures, ASCE, Vol.I, pp.653-689.

SHERARD, J.L., DUNNIGAN, L.P., DECKER, R. S. (1976). **Identification and Nature of Dispersive Soils**. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, N. 4, pp. 287 – 301.

SHERARD, J.L., DUNNIGAN, L.P., DECKER, R. S., STEELE, E. F. (1975). **Pinhole test for identifying dispersive soils**. Paper submitted for consideration, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE.

SHRESTHA, D., P. (1997). **Assessment of soil erosion in the Nepalese Himalaya, A case study in Likhu Valley, Middle Mountain region**. Land Husbandry, volume 2, no. 1. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd, pp.59-80.

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.

SJÖSTRÖM, C. **Service life of the building. In: Applications of the performance concept in building**. Proceedings. CIB: Tel Aviv, V. 2, p. 6-1:6-11, 1996.

SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. **A Technical Framework for Life-Cycle Assessment**. SETAC Foundation for Environmental Education, Inc, Washington, DC. 1991.

SOTELO, R. R. (2001). **Identificación de Arcillas Erodibles Dispersivas Utilizando Ensayos Agronómicos de Suelos**. Centro de Geociências Aplicadas, U.N.N.E, Argentina.

STRIPPLE, H. **Life cycle assessment of road**. A Pilot Study for Inventory Analysis. 2nd revised Edition, Report from the IVL Swedish Environmental Research Institute, B 1210E; 97p. 2001.

SU, Z. **Durability Performance of Cementitiously Stabilized layers**. Thesis (Master of Science) – University of Wisconsin, Madison. 2012.

TATSUOKA, F.; JARDINE, R.J.; LO PRESTI, D.; DI BENEDETTO, H.; KODAKA, T. **Characterising the pre-faliure deformation properties of geomaterials** – theme lecture. In: International conference on soil mechanics and foudation 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. 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 (1998). Earth Manual. , Bureau of Reclamation, Third Edition, United States Department of the Interior, Denver, Colorado.

VAKILI1, A. H.; SELAMAT, M. R.; MOAYEDI, H. e AMANI, H. **Stabilization of Dispersive Soils by Pozzolan**. Forensic Engineering 2012. ASCE, 2013, pp 726-735

ZHANG, H.; LEPECH, M.; KEOLEIAN, G. A.; QIAN, S.; LI, V. **Dynamic life-cycle modeling of pavement overlay systems: Capturing the impacts of users, construction, and roadway deterioration**. Journal of Infrastructure Systems, v. 16, p. 299–309, 2010.

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Dados dos corpos-de-prova ensaiados com ciclos de molhagem e secagem

| Corpo-de-prova | C _a (%) | C _{av} (%) | γ _d (g/cm ³) | Cura (dias) | e | η (%) | ω (%) | V _{cp} (cm ³) | V _v (cm ³) | V _{ca} (cm ³) | V _v /V _{ca} | η/C _{av} | Perda de Massa (%) | | | | | |
|----------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------|------|-------|--------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | | | | | | | | | | | 1° Ciclo | 2° Ciclo | 3° Ciclo | 4° Ciclo | 5° Ciclo | 6° Ciclo |
| D1331 | 3% | 1,76 | 1,57 | 28 | 0,74 | 42,56 | 14,30% | 1.006,88 | 428,52 | 17,70 | 24,21 | 24,21 | | | | | | |
| D1332 | 3% | 1,76 | 1,57 | 28 | 0,73 | 42,35 | 14,25% | 1.003,74 | 425,10 | 17,71 | 24,01 | 24,01 | 12,69% | 85,96% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| D1333 | 3% | 1,77 | 1,58 | 28 | 0,73 | 42,24 | 14,22% | 1.001,91 | 423,17 | 17,71 | 23,89 | 23,89 | 13,33% | 86,54% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| D2331 | 3% | 1,93 | 1,73 | 28 | 0,58 | 36,80 | 14,21% | 1.001,64 | 368,57 | 19,37 | 19,02 | 19,02 | | | | | | |
| D2332 | 3% | 1,93 | 1,72 | 28 | 0,59 | 37,09 | 14,37% | 1.005,05 | 372,79 | 19,35 | 19,27 | 19,27 | 6,89% | 70,09% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| D2333 | 3% | 1,93 | 1,73 | 28 | 0,58 | 36,80 | 14,11% | 1.002,56 | 368,93 | 19,39 | 19,03 | 19,03 | 7,04% | 71,04% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| D3331 | 3% | 2,11 | 1,88 | 28 | 0,45 | 31,20 | 13,41% | 1.005,02 | 313,55 | 21,16 | 14,82 | 14,82 | | | | | | |
| D3332 | 3% | 2,10 | 1,88 | 28 | 0,46 | 31,32 | 13,31% | 1.007,56 | 315,52 | 21,18 | 14,90 | 14,90 | 23,19% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| D3333 | 3% | 2,11 | 1,88 | 28 | 0,45 | 31,22 | 13,41% | 1.005,36 | 313,83 | 21,16 | 14,83 | 14,83 | 15,68% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| D1531 | 5% | 2,92 | 1,59 | 28 | 0,71 | 41,58 | 12,86% | 1.003,48 | 417,24 | 29,30 | 14,24 | 14,24 | | | | | | |
| D1532 | 5% | 2,92 | 1,59 | 28 | 0,71 | 41,57 | 12,83% | 1.003,22 | 417,05 | 29,30 | 14,23 | 14,23 | 9,01% | 26,26% | 38,28% | 50,36% | 57,88% | 65,00% |
| D1533 | 5% | 2,92 | 1,59 | 28 | 0,71 | 41,58 | 13,35% | 999,55 | 415,66 | 29,19 | 14,24 | 14,24 | 9,46% | 23,04% | 33,96% | 44,33% | 53,61% | 60,55% |
| D2531 | 5% | 3,20 | 1,75 | 28 | 0,56 | 36,00 | 13,07% | 1.000,07 | 360,05 | 31,99 | 11,25 | 11,25 | | | | | | |
| D2532 | 5% | 3,17 | 1,73 | 28 | 0,58 | 36,57 | 13,62% | 1.003,74 | 367,03 | 31,83 | 11,53 | 11,53 | 7,71% | 11,48% | 20,68% | 34,90% | 40,78% | 45,41% |
| D2533 | 5% | 3,18 | 1,74 | 28 | 0,57 | 36,29 | 13,35% | 1.001,91 | 363,64 | 31,90 | 11,40 | 11,40 | 8,00% | 13,81% | 27,18% | 40,31% | 48,09% | 53,37% |
| D3531 | 5% | 3,44 | 1,88 | 28 | 0,45 | 31,17 | 12,92% | 1.009,50 | 314,66 | 34,73 | 9,06 | 9,06 | | | | | | |
| D3532 | 5% | 3,44 | 1,88 | 28 | 0,45 | 31,18 | 12,96% | 1.009,24 | 314,70 | 34,72 | 9,06 | 9,06 | 7,63% | 8,81% | 12,36% | 18,57% | 21,32% | 25,10% |
| D3533 | 5% | 3,43 | 1,87 | 28 | 0,46 | 31,31 | 13,14% | 1.009,76 | 316,20 | 34,67 | 9,12 | 9,12 | 7,60% | 8,51% | 13,08% | 17,99% | 21,34% | 24,65% |
| D1731 | 7% | 3,98 | 1,58 | 28 | 0,72 | 41,98 | 14,17% | 999,81 | 419,69 | 39,80 | 10,54 | 10,54 | | | | | | |
| D1732 | 7% | 3,97 | 1,58 | 28 | 0,73 | 42,13 | 13,94% | 1.004,26 | 423,05 | 39,88 | 10,61 | 10,61 | 6,15% | 17,45% | 24,26% | 32,29% | 38,06% | 43,26% |
| D1733 | 7% | 3,96 | 1,57 | 28 | 0,73 | 42,31 | 13,93% | 1.007,67 | 426,33 | 39,88 | 10,69 | 10,69 | 6,16% | 17,51% | 24,86% | 32,40% | 38,81% | 43,59% |
| D2731 | 7% | 4,34 | 1,73 | 28 | 0,58 | 36,73 | 13,75% | 1.006,62 | 369,78 | 43,69 | 8,46 | 8,46 | | | | | | |
| D2732 | 7% | 4,32 | 1,72 | 28 | 0,59 | 36,99 | 14,24% | 1.006,10 | 372,11 | 43,50 | 8,55 | 8,55 | 6,16% | 9,04% | 12,81% | 19,73% | 24,06% | 27,69% |
| D2733 | 7% | 4,34 | 1,72 | 28 | 0,58 | 36,74 | 13,89% | 1.005,44 | 369,37 | 43,64 | 8,46 | 8,46 | 6,21% | 9,49% | 12,95% | 20,73% | 24,28% | 28,53% |
| D3731 | 7% | 4,70 | 1,87 | 28 | 0,46 | 31,42 | 13,16% | 1.012,25 | 318,10 | 47,62 | 6,68 | 6,68 | | | | | | |
| D3732 | 7% | 4,73 | 1,88 | 28 | 0,45 | 31,04 | 12,93% | 1.008,71 | 313,14 | 47,72 | 6,56 | 6,56 | 6,49% | 10,32% | 15,74% | 20,89% | 26,14% | 30,25% |
| D3733 | 7% | 4,72 | 1,87 | 28 | 0,45 | 31,24 | 13,36% | 1.007,72 | 314,86 | 47,54 | 6,62 | 6,62 | 6,64% | 10,98% | 15,74% | 20,08% | 25,86% | 29,37% |

Tabela A.1 (continuação) - Dados dos corpos-de-prova ensaiados com ciclos de molhagem e secagem

| Corpo-de-prova | C _a (%) | C _{av} (%) | γ _d (g/cm ³) | Cura (dias) | e | η (%) | ω (%) | V _{ep} (cm ³) | V _v (cm ³) | V _{ca} (cm ³) | V _v /V _{ca} | η/C _{av} | Perda de Massa (%) | | | | | |
|----------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------|------|-------|--------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | | | | | | | | | | | 1° Ciclo | 2° Ciclo | 3° Ciclo | 4° Ciclo | 5° Ciclo | 6° Ciclo |
| D3731 | 7% | 4,70 | 1,87 | 28 | 0,46 | 31,42 | 13,16% | 1.012,25 | 318,10 | 47,62 | 6,68 | 6,68 | | | | | | |
| D3732 | 7% | 4,73 | 1,88 | 28 | 0,45 | 31,04 | 12,93% | 1.008,71 | 313,14 | 47,72 | 6,56 | 6,56 | 6,49% | 10,32% | 15,74% | 20,89% | 26,14% | 30,25% |
| D3733 | 7% | 4,72 | 1,87 | 28 | 0,45 | 31,24 | 13,36% | 1.007,72 | 314,86 | 47,54 | 6,62 | 6,62 | 6,64% | 10,98% | 15,74% | 20,08% | 25,86% | 29,37% |
| D1511 | 5% | 2,91 | 1,59 | 7 | 0,72 | 41,79 | 13,75% | 999,55 | 417,72 | 29,08 | 14,36 | 14,36 | | | | | | |
| D1512 | 5% | 2,92 | 1,59 | 7 | 0,71 | 41,62 | 13,13% | 1.002,04 | 417,05 | 29,24 | 14,26 | 14,26 | 12,59% | 34,59% | 50,39% | 66,74% | 80,03% | 100,00% |
| D1513 | 5% | 2,93 | 1,60 | 7 | 0,71 | 41,47 | 13,17% | 999,03 | 414,30 | 29,23 | 14,17 | 14,17 | 12,82% | 39,75% | 57,21% | 71,90% | 86,85% | 100,00% |
| D2511 | 5% | 3,17 | 1,73 | 7 | 0,58 | 36,52 | 13,32% | 1.003,22 | 366,37 | 31,83 | 11,51 | 11,51 | | | | | | |
| D2512 | 5% | 3,19 | 1,74 | 7 | 0,57 | 36,28 | 13,51% | 1.000,34 | 362,88 | 31,86 | 11,39 | 11,39 | 7,84% | 21,96% | 30,85% | 40,34% | 46,03% | 50,57% |
| D2513 | 5% | 3,18 | 1,74 | 7 | 0,57 | 36,29 | 13,29% | 1.002,43 | 363,78 | 31,92 | 11,40 | 11,40 | 7,79% | 19,42% | 28,62% | 38,82% | 44,05% | 50,63% |
| D3511 | 5% | 3,43 | 1,87 | 7 | 0,46 | 31,40 | 13,68% | 1.006,10 | 315,91 | 34,50 | 9,16 | 9,16 | | | | | | |
| D3512 | 5% | 3,43 | 1,87 | 7 | 0,46 | 31,45 | 13,40% | 1.008,71 | 317,25 | 34,56 | 9,18 | 9,18 | 7,57% | 14,09% | 17,18% | 25,58% | 31,54% | 35,64% |
| D3513 | 5% | 3,43 | 1,87 | 7 | 0,46 | 31,43 | 13,37% | 1.009,50 | 317,30 | 34,60 | 9,17 | 9,17 | 7,78% | 13,72% | 17,36% | 24,87% | 31,90% | 36,77% |
| D1521 | 5% | 2,89 | 1,58 | 14 | 0,73 | 42,23 | 14,11% | 1.003,74 | 423,84 | 28,99 | 14,62 | 14,62 | | | | | | |
| D1522 | 5% | 2,89 | 1,58 | 14 | 0,73 | 42,27 | 14,34% | 1.002,43 | 423,75 | 28,93 | 14,65 | 14,65 | 8,78% | 32,78% | 48,11% | 65,59% | 87,04% | 100,00% |
| D1523 | 5% | 2,90 | 1,58 | 14 | 0,73 | 42,03 | 14,22% | 999,29 | 420,00 | 28,96 | 14,50 | 14,50 | 9,69% | 35,60% | 49,84% | 64,56% | 78,77% | 100,00% |
| D2521 | 5% | 3,16 | 1,73 | 14 | 0,58 | 36,70 | 13,33% | 1.008,66 | 370,16 | 31,92 | 11,60 | 11,60 | | | | | | |
| D2522 | 5% | 3,17 | 1,73 | 14 | 0,57 | 36,50 | 13,38% | 1.005,00 | 366,83 | 31,90 | 11,50 | 11,50 | 8,10% | 27,24% | 48,34% | 54,84% | 66,94% | 80,14% |
| D2523 | 5% | 3,16 | 1,73 | 14 | 0,58 | 36,79 | 13,35% | 1.009,84 | 371,49 | 31,91 | 11,64 | 11,64 | 8,82% | 28,68% | 50,89% | 57,72% | 70,46% | 84,35% |
| D3521 | 5% | 3,42 | 1,87 | 14 | 0,46 | 31,55 | 13,12% | 1.013,69 | 319,82 | 34,68 | 9,22 | 9,22 | | | | | | |
| D3522 | 5% | 3,42 | 1,87 | 14 | 0,46 | 31,52 | 13,32% | 1.011,44 | 318,82 | 34,62 | 9,21 | 9,21 | 7,57% | 19,21% | 29,05% | 37,36% | 46,11% | 53,26% |
| D3523 | 5% | 3,43 | 1,87 | 14 | 0,46 | 31,45 | 13,24% | 1.010,62 | 317,87 | 34,63 | 9,18 | 9,18 | 7,50% | 21,15% | 27,74% | 37,64% | 44,91% | 53,39% |
| D1541 | 5% | 2,91 | 1,59 | 60 | 0,72 | 41,75 | 13,91% | 997,04 | 416,23 | 29,03 | 14,34 | 14,34 | | | | | | |
| D1542 | 5% | 2,91 | 1,59 | 60 | 0,72 | 41,77 | 13,89% | 997,85 | 416,84 | 29,04 | 14,35 | 14,35 | 10,39% | 38,14% | 46,79% | 57,59% | 67,58% | 75,84% |
| D1543 | 5% | 2,90 | 1,58 | 60 | 0,72 | 41,94 | 14,03% | 999,13 | 419,03 | 29,00 | 14,45 | 14,45 | 9,99% | 34,87% | 44,75% | 52,38% | 62,23% | 68,68% |
| D2541 | 5% | 3,17 | 1,73 | 60 | 0,58 | 36,62 | 13,82% | 1.003,03 | 367,31 | 31,78 | 11,56 | 11,56 | | | | | | |
| D2542 | 5% | 3,18 | 1,73 | 60 | 0,57 | 36,47 | 13,82% | 1.000,60 | 364,88 | 31,78 | 11,48 | 11,48 | 8,61% | 16,84% | 34,84% | 37,90% | 40,40% | 60,00% |
| D2543 | 5% | 3,15 | 1,72 | 60 | 0,59 | 36,94 | 14,35% | 1.003,35 | 370,68 | 31,62 | 11,72 | 11,72 | 9,20% | 18,01% | 32,62% | 39,21% | 42,46% | 56,65% |
| D3541 | 5% | 3,42 | 1,87 | 60 | 0,46 | 31,64 | 13,59% | 1.009,76 | 319,45 | 34,51 | 9,26 | 9,26 | | | | | | |
| D3542 | 5% | 3,42 | 1,87 | 60 | 0,46 | 31,51 | 13,23% | 1.011,88 | 318,87 | 34,64 | 9,21 | 9,21 | 5,83% | 14,21% | 22,18% | 37,63% | 45,67% | 52,00% |
| D3543 | 5% | 3,43 | 1,87 | 60 | 0,46 | 31,46 | 13,35% | 1.010,21 | 317,84 | 34,61 | 9,18 | 9,18 | 5,66% | 17,52% | 23,38% | 42,60% | 46,88% | 56,98% |

Tabela A.2 - Dados dos corpos-de-prova ensaiados a resistência à compressão simples e vácuo-saturação

| Corpo-de-prova | C _a (%) | C _{av} (%) | γ _d (g/cm ³) | Cura (dias) | e | η (%) | ω (%) | V _{cp} (cm ³) | V _v (cm ³) | V _{ca} (cm ³) | V _v /V _{ca} | η/C _{av} | Compressão Simples | | Vácuo-Saturação | |
|----------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------|------|-------|--------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|------------------|-----------------|------------------|
| | | | | | | | | | | | | | qu (kPa) | qu (kPa) - Média | qu (kPa) | qu (kPa) - Média |
| V1331 | 3% | 1,77 | 1,58 | 28 | 0,72 | 42,01 | 13,85% | 199,85 | 83,95 | 3,55 | 23,67 | 23,67 | | | | |
| V1332 | 3% | 1,76 | 1,57 | 28 | 0,74 | 42,53 | 14,61% | 200,42 | 85,23 | 3,53 | 24,18 | 24,18 | | | | |
| V1333 | 3% | 1,77 | 1,58 | 28 | 0,73 | 42,30 | 14,19% | 200,30 | 84,73 | 3,54 | 23,96 | 23,96 | | | | |
| V1334 | 3% | 1,77 | 1,58 | 28 | 0,73 | 42,13 | 13,85% | 200,22 | 84,36 | 3,55 | 23,79 | 23,79 | | | | |
| V2331 | 3% | 1,93 | 1,73 | 28 | 0,58 | 36,81 | 13,90% | 200,55 | 73,81 | 3,88 | 19,03 | 19,03 | 528,00 | | | |
| V2332 | 3% | 1,93 | 1,72 | 28 | 0,59 | 36,99 | 14,06% | 200,71 | 74,24 | 3,87 | 19,18 | 19,18 | 636,00 | | | |
| V2333 | 3% | 1,93 | 1,72 | 28 | 0,58 | 36,89 | 14,42% | 199,66 | 73,66 | 3,86 | 19,10 | 19,10 | 575,00 | | | |
| V2334 | 3% | 1,92 | 1,72 | 28 | 0,59 | 37,20 | 14,34% | 200,87 | 74,73 | 3,86 | 19,36 | 19,36 | 675,00 | | | |
| V3331 | 3% | 2,12 | 1,90 | 28 | 0,44 | 30,59 | 12,48% | 203,10 | 62,12 | 4,31 | 14,40 | 14,40 | 1.285,00 | | | |
| V3332 | 3% | 2,13 | 1,90 | 28 | 0,44 | 30,42 | 12,55% | 202,62 | 61,63 | 4,31 | 14,28 | 14,28 | 1.109,00 | | | |
| V3333 | 3% | 2,13 | 1,90 | 28 | 0,44 | 30,51 | 12,82% | 202,43 | 61,76 | 4,31 | 14,35 | 14,35 | 1.350,00 | | | |
| V3334 | 3% | 2,13 | 1,90 | 28 | 0,44 | 30,38 | 12,49% | 202,58 | 61,54 | 4,32 | 14,26 | 14,26 | 1.360,00 | | | |
| V1531 | 5% | 2,90 | 1,58 | 28 | 0,73 | 42,06 | 13,65% | 200,51 | 84,33 | 5,81 | 14,52 | 14,52 | 623,09 | | | |
| V1532 | 5% | 2,90 | 1,58 | 28 | 0,72 | 42,01 | 13,43% | 200,95 | 84,43 | 5,82 | 14,50 | 14,50 | 845,00 | | | |
| V1533 | 5% | 2,90 | 1,58 | 28 | 0,72 | 41,98 | 13,32% | 200,94 | 84,35 | 5,83 | 14,47 | 14,47 | 905,00 | | | |
| V1534 | 5% | 2,89 | 1,58 | 28 | 0,73 | 42,20 | 12,81% | 202,58 | 85,48 | 5,85 | 14,60 | 14,60 | 832,00 | | | |
| V2531 | 5% | 3,19 | 1,74 | 28 | 0,57 | 36,16 | 12,23% | 201,92 | 73,02 | 6,44 | 11,33 | 11,33 | 841,28 | | | |
| V2532 | 5% | 3,20 | 1,75 | 28 | 0,56 | 36,04 | 12,04% | 202,24 | 72,89 | 6,47 | 11,27 | 11,27 | 1.478,00 | | | |
| V2533 | 5% | 3,22 | 1,76 | 28 | 0,55 | 35,54 | 11,70% | 200,86 | 71,38 | 6,47 | 11,03 | 11,03 | 1.458,00 | | | |
| V2534 | 5% | 3,20 | 1,75 | 28 | 0,56 | 35,97 | 11,65% | 202,39 | 72,81 | 6,48 | 11,24 | 11,24 | 1.567,00 | | | |
| V3531 | 5% | 3,48 | 1,90 | 28 | 0,44 | 30,44 | 12,47% | 202,96 | 61,77 | 7,06 | 8,75 | 8,75 | 1.834,80 | | | |
| V3532 | 5% | 3,47 | 1,89 | 28 | 0,44 | 30,57 | 12,42% | 203,44 | 62,20 | 7,06 | 8,81 | 8,81 | 2.423,00 | | | |
| V3533 | 5% | 3,50 | 1,91 | 28 | 0,43 | 30,05 | 12,39% | 201,96 | 60,68 | 7,06 | 8,59 | 8,59 | 2.610,00 | | | |
| V3534 | 5% | 3,50 | 1,91 | 28 | 0,43 | 30,07 | 12,24% | 202,17 | 60,80 | 7,07 | 8,60 | 8,60 | 2.511,00 | | | |
| V1731 | 7% | 3,91 | 1,56 | 28 | 0,75 | 42,96 | 13,90% | 203,56 | 87,45 | 7,97 | 10,98 | 10,98 | 747,86 | | | |
| V1732 | 7% | 3,96 | 1,57 | 28 | 0,73 | 42,30 | 13,97% | 200,99 | 85,01 | 7,96 | 10,68 | 10,68 | 771,00 | | | |
| V1733 | 7% | 3,96 | 1,57 | 28 | 0,73 | 42,26 | 13,75% | 201,27 | 85,05 | 7,97 | 10,67 | 10,67 | 831,00 | | | |
| V1734 | 7% | 3,98 | 1,58 | 28 | 0,73 | 42,05 | 13,72% | 200,57 | 84,35 | 7,97 | 10,58 | 10,58 | 926,00 | | | |
| V2731 | 7% | 4,38 | 1,74 | 28 | 0,57 | 36,20 | 12,35% | 201,61 | 72,99 | 8,82 | 8,27 | 8,27 | 1.531,63 | | | |
| V2732 | 7% | 4,39 | 1,74 | 28 | 0,56 | 36,06 | 12,36% | 201,35 | 72,61 | 8,83 | 8,22 | 8,22 | 1.554,00 | | | |
| V2733 | 7% | 4,38 | 1,74 | 28 | 0,57 | 36,21 | 12,55% | 201,57 | 73,00 | 8,82 | 8,28 | 8,28 | 1.878,00 | | | |
| V2734 | 7% | 4,36 | 1,73 | 28 | 0,57 | 36,39 | 12,57% | 202,27 | 73,61 | 8,83 | 8,34 | 8,34 | 1.861,00 | | | |
| V3731 | 7% | 4,79 | 1,90 | 28 | 0,43 | 30,24 | 11,94% | 203,38 | 61,51 | 9,73 | 6,32 | 6,32 | 2.848,88 | | | |
| V3732 | 7% | 4,77 | 1,90 | 28 | 0,44 | 30,50 | 12,61% | 203,01 | 61,92 | 9,68 | 6,40 | 6,40 | 3.014,00 | | | |
| V3733 | 7% | 4,79 | 1,91 | 28 | 0,43 | 30,12 | 12,32% | 202,41 | 60,96 | 9,70 | 6,28 | 6,28 | 2.845,00 | | | |
| V3734 | 7% | 4,77 | 1,89 | 28 | 0,44 | 30,53 | 12,66% | 203,28 | 62,07 | 9,69 | 6,41 | 6,41 | 3.100,00 | | | |

Tabela A.2 (continuação) - Dados dos corpos-de-prova ensaiados a resistência à compressão simples e vácuo-saturação

| Corpo-de-prova | C _a (%) | C _{av} (%) | γ _a (g/cm ³) | Cura (dias) | e | η (%) | ω (%) | V _{cp} (cm ³) | V _v (cm ³) | V _{ca} (cm ³) | V _v /V _{ca} | η/C _{av} | Compressão Simples | | Vácuo-Saturação | |
|----------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------|------|-------|--------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|------------------|-----------------|------------------|
| | | | | | | | | | | | | | qu (kPa) | qu (kPa) - Média | qu (kPa) | qu (kPa) - Média |
| V1511 | 5% | 2,87 | 1,57 | 7 | 0,74 | 42,58 | 15,95% | 200,47 | 85,37 | 5,75 | 14,84 | 14,84 | 538,59 | 522,40 | 583,49 | 595,15 |
| V1512 | 5% | 2,96 | 1,62 | 7 | 0,69 | 40,70 | 12,67% | 199,72 | 81,29 | 5,92 | 13,73 | 13,73 | 521,00 | | | |
| V1513 | 5% | 2,95 | 1,61 | 7 | 0,69 | 40,98 | 12,62% | 200,72 | 82,25 | 5,92 | 13,89 | 13,89 | 497,00 | | | |
| V1514 | 5% | 2,97 | 1,62 | 7 | 0,68 | 40,58 | 12,23% | 200,12 | 81,20 | 5,94 | 13,66 | 13,66 | 533,00 | | | |
| V2511 | 5% | 3,19 | 1,74 | 7 | 0,56 | 36,09 | 12,44% | 201,28 | 72,64 | 6,43 | 11,30 | 11,30 | 740,36 | 918,59 | 681,99 | 703,48 |
| V2512 | 5% | 3,21 | 1,75 | 7 | 0,56 | 35,86 | 12,49% | 200,61 | 71,94 | 6,43 | 11,18 | 11,18 | 927,00 | | | |
| V2513 | 5% | 3,19 | 1,74 | 7 | 0,57 | 36,17 | 12,17% | 201,93 | 73,04 | 6,44 | 11,34 | 11,34 | 1.034,00 | | | |
| V2514 | 5% | 3,19 | 1,74 | 7 | 0,57 | 36,23 | 12,54% | 201,71 | 73,08 | 6,43 | 11,37 | 11,37 | 973,00 | | | |
| V3511 | 5% | 3,45 | 1,89 | 7 | 0,45 | 30,88 | 12,85% | 203,48 | 62,84 | 7,03 | 8,94 | 8,94 | 1.790,64 | 1.883,66 | 1.572,73 | 1.812,53 |
| V3512 | 5% | 3,45 | 1,88 | 7 | 0,45 | 31,00 | 12,86% | 203,79 | 63,17 | 7,03 | 8,99 | 8,99 | 1.809,00 | | | |
| V3513 | 5% | 3,47 | 1,90 | 7 | 0,44 | 30,48 | 12,92% | 202,24 | 61,64 | 7,03 | 8,77 | 8,77 | 1.974,00 | | | |
| V3514 | 5% | 3,47 | 1,89 | 7 | 0,44 | 30,59 | 12,94% | 202,60 | 61,98 | 7,03 | 8,82 | 8,82 | 1.961,00 | | | |
| V1521 | 5% | 2,94 | 1,60 | 14 | 0,70 | 41,20 | 13,17% | 200,30 | 82,53 | 5,89 | 14,02 | 14,02 | 724,42 | 724,42 | 708,58 | 659,96 |
| V1522 | 5% | 2,94 | 1,61 | 14 | 0,70 | 41,17 | 13,39% | 199,91 | 82,30 | 5,88 | 14,00 | 14,00 | | | | |
| V1523 | 5% | 2,96 | 1,61 | 14 | 0,69 | 40,83 | 13,15% | 199,15 | 81,30 | 5,89 | 13,80 | 13,80 | | | | |
| V1524 | 5% | 2,93 | 1,60 | 14 | 0,70 | 41,33 | 13,13% | 200,79 | 82,98 | 5,89 | 14,09 | 14,09 | | | | |
| V2521 | 5% | 3,20 | 1,75 | 14 | 0,56 | 36,00 | 12,71% | 202,27 | 72,82 | 6,47 | 11,25 | 11,25 | 1.279,68 | 1.279,68 | 1.405,73 | 1.403,98 |
| V2522 | 5% | 3,20 | 1,75 | 14 | 0,56 | 35,97 | 12,91% | 201,79 | 72,57 | 6,46 | 11,24 | 11,24 | | | | |
| V2523 | 5% | 3,20 | 1,75 | 14 | 0,56 | 35,95 | 12,93% | 201,79 | 72,55 | 6,46 | 11,23 | 11,23 | | | | |
| V2524 | 5% | 3,20 | 1,75 | 14 | 0,56 | 36,03 | 13,01% | 202,03 | 72,79 | 6,46 | 11,27 | 11,27 | | | | |
| V3521 | 5% | 3,47 | 1,90 | 14 | 0,44 | 30,54 | 12,86% | 202,58 | 61,86 | 7,03 | 8,79 | 8,79 | 2.491,71 | 2.491,71 | 2.430,87 | 2.405,25 |
| V3522 | 5% | 3,46 | 1,89 | 14 | 0,45 | 30,83 | 13,11% | 202,91 | 62,55 | 7,02 | 8,92 | 8,92 | | | | |
| V3523 | 5% | 3,47 | 1,89 | 14 | 0,44 | 30,61 | 13,12% | 202,16 | 61,88 | 7,01 | 8,83 | 8,83 | | | | |
| V3524 | 5% | 3,46 | 1,89 | 14 | 0,44 | 30,77 | 12,83% | 203,07 | 62,48 | 7,03 | 8,89 | 8,89 | | | | |
| V1541 | 5% | 2,94 | 1,61 | 60 | 0,70 | 41,17 | 13,58% | 200,21 | 82,43 | 5,89 | 14,00 | 14,00 | 732,50 | 993,50 | 886,85 | 771,22 |
| V1542 | 5% | 2,92 | 1,59 | 60 | 0,71 | 41,59 | 13,62% | 200,90 | 83,55 | 5,87 | 14,24 | 14,24 | 1.172,00 | | | |
| V1543 | 5% | 2,93 | 1,60 | 60 | 0,71 | 41,38 | 13,55% | 200,38 | 82,92 | 5,87 | 14,12 | 14,12 | 1.076,00 | | | |
| V1544 | 5% | 2,95 | 1,61 | 60 | 0,70 | 41,03 | 13,47% | 199,40 | 81,82 | 5,88 | 13,92 | 13,92 | | | | |
| V2541 | 5% | 3,18 | 1,74 | 60 | 0,57 | 36,35 | 13,43% | 201,74 | 73,34 | 6,42 | 11,43 | 11,43 | 1.237,27 | 1.641,82 | 1.578,01 | 1.506,13 |
| V2542 | 5% | 3,18 | 1,73 | 60 | 0,57 | 36,43 | 13,52% | 202,55 | 73,79 | 6,44 | 11,46 | 11,46 | 1.728,00 | | | |
| V2543 | 5% | 3,18 | 1,73 | 60 | 0,57 | 36,45 | 13,42% | 203,16 | 74,04 | 6,45 | 11,47 | 11,47 | 1.792,00 | | | |
| V2544 | 5% | 3,21 | 1,75 | 60 | 0,56 | 35,74 | 13,33% | 200,80 | 71,77 | 6,45 | 11,13 | 11,13 | 1.810,00 | | | |
| V3541 | 5% | 3,44 | 1,88 | 60 | 0,45 | 31,26 | 13,21% | 204,09 | 63,79 | 7,01 | 9,10 | 9,10 | 1.861,98 | 2.657,40 | 2.312,06 | 2.506,39 |
| V3542 | 5% | 3,43 | 1,87 | 60 | 0,46 | 31,34 | 13,59% | 203,45 | 63,76 | 6,98 | 9,13 | 9,13 | 2.616,20 | | | |
| V3543 | 5% | 3,43 | 1,87 | 60 | 0,46 | 31,43 | 13,73% | 203,63 | 64,01 | 6,98 | 9,17 | 9,17 | 2.742,10 | | | |
| V3544 | 5% | 3,43 | 1,87 | 60 | 0,46 | 31,36 | 13,63% | 203,46 | 63,80 | 6,98 | 9,14 | 9,14 | 2.613,90 | | | |

Tabela A.3 - Dados dos corpos-de-prova ensaiados a medição do módulo de rigidez inicial

| Corpo-de-prova | C _a (%) | 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} | η/C _{av} | G ₀ (Mpa) | | | | | | |
|----------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|------|-------|--------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| | | | | | | | | | | | | 7 dias | 14 dias | 21 dias | 28 dias | 44 dias | 60 dias | 90 dias |
| D1331 | 3% | 1,76 | 1,57 | 0,74 | 42,56 | 14,30% | 1.006,88 | 428,52 | 17,70 | 24,21 | 24,21 | 750,95 | 757,28 | 810,38 | 805,53 | | | |
| D1332 | 3% | 1,76 | 1,57 | 0,73 | 42,35 | 14,25% | 1.003,74 | 425,10 | 17,71 | 24,01 | 24,01 | 769,02 | 787,32 | 813,11 | 822,08 | | | |
| D1333 | 3% | 1,77 | 1,58 | 0,73 | 42,24 | 14,22% | 1.001,91 | 423,17 | 17,71 | 23,89 | 23,89 | 771,98 | 778,05 | 816,06 | 827,51 | | | |
| D2331 | 3% | 1,93 | 1,73 | 0,58 | 36,80 | 14,21% | 1.001,64 | 368,57 | 19,37 | 19,02 | 19,02 | 1.296,65 | 1.311,12 | 1.400,68 | 1.416,22 | | | |
| D2332 | 3% | 1,93 | 1,72 | 0,59 | 37,09 | 14,37% | 1.005,05 | 372,79 | 19,35 | 19,27 | 19,27 | 1.225,25 | 1.257,45 | 1.333,10 | 1.344,52 | | | |
| D2333 | 3% | 1,93 | 1,73 | 0,58 | 36,80 | 14,11% | 1.002,56 | 368,93 | 19,39 | 19,03 | 19,03 | 1.246,68 | 1.279,71 | 1.364,44 | 1.370,97 | | | |
| D3331 | 3% | 2,11 | 1,88 | 0,45 | 31,20 | 13,41% | 1.005,02 | 313,55 | 21,16 | 14,82 | 14,82 | 1.779,47 | 1.830,35 | 1.837,33 | 1.858,08 | | | |
| D3332 | 3% | 2,10 | 1,88 | 0,46 | 31,32 | 13,31% | 1.007,56 | 315,52 | 21,18 | 14,90 | 14,90 | 1.764,82 | 1.825,72 | 1.814,39 | 1.834,75 | | | |
| D3333 | 3% | 2,11 | 1,88 | 0,45 | 31,22 | 13,41% | 1.005,36 | 313,83 | 21,16 | 14,83 | 14,83 | 1.794,49 | 1.848,78 | 1.832,05 | 1.847,42 | | | |
| D1531 | 5% | 2,92 | 1,59 | 0,71 | 41,58 | 12,86% | 1.003,48 | 417,24 | 29,30 | 14,24 | 14,24 | 879,83 | 1.030,43 | 1.337,45 | 1.427,78 | | | |
| D1532 | 5% | 2,92 | 1,59 | 0,71 | 41,57 | 12,83% | 1.003,22 | 417,05 | 29,30 | 14,23 | 14,23 | 881,55 | 996,42 | 1.309,83 | 1.433,35 | | | |
| D1533 | 5% | 2,92 | 1,59 | 0,71 | 41,58 | 13,35% | 999,55 | 415,66 | 29,19 | 14,24 | 14,24 | 897,26 | 1.037,46 | 1.320,23 | 1.448,83 | | | |
| D2531 | 5% | 3,20 | 1,75 | 0,56 | 36,00 | 13,07% | 1.000,07 | 360,05 | 31,99 | 11,25 | 11,25 | 1.498,62 | 1.736,14 | 2.153,79 | 2.341,06 | | | |
| D2532 | 5% | 3,17 | 1,73 | 0,58 | 36,57 | 13,62% | 1.003,74 | 367,03 | 31,83 | 11,53 | 11,53 | 1.677,89 | 1.681,90 | 2.076,69 | 2.300,39 | | | |
| D2533 | 5% | 3,18 | 1,74 | 0,57 | 36,29 | 13,35% | 1.001,91 | 363,64 | 31,90 | 11,40 | 11,40 | 1.700,87 | 1.695,06 | 2.084,14 | 2.274,06 | | | |
| D3531 | 5% | 3,44 | 1,88 | 0,45 | 31,17 | 12,92% | 1.009,50 | 314,66 | 34,73 | 9,06 | 9,06 | 2.116,84 | 2.440,97 | 2.677,65 | 2.829,34 | | | |
| D3532 | 5% | 3,44 | 1,88 | 0,45 | 31,18 | 12,96% | 1.009,24 | 314,70 | 34,72 | 9,06 | 9,06 | 2.154,45 | 2.467,08 | 2.732,32 | 2.806,07 | | | |
| D3533 | 5% | 3,43 | 1,87 | 0,46 | 31,31 | 13,14% | 1.009,76 | 316,20 | 34,67 | 9,12 | 9,12 | 2.223,58 | 2.504,25 | 2.741,11 | 2.882,52 | | | |
| D1731 | 7% | 3,98 | 1,58 | 0,72 | 41,98 | 14,17% | 999,81 | 419,69 | 39,80 | 10,54 | 10,54 | 1.014,97 | 1.039,46 | 1.197,06 | 1.293,84 | | | |
| D1732 | 7% | 3,97 | 1,58 | 0,73 | 42,13 | 13,94% | 1.004,26 | 423,05 | 39,88 | 10,61 | 10,61 | 1.010,83 | 1.050,96 | 1.199,90 | 1.264,98 | | | |
| D1733 | 7% | 3,96 | 1,57 | 0,73 | 42,31 | 13,93% | 1.007,67 | 426,33 | 39,88 | 10,69 | 10,69 | 993,55 | 1.041,44 | 1.161,79 | 1.241,77 | | | |
| D2731 | 7% | 4,34 | 1,73 | 0,58 | 36,73 | 13,75% | 1.006,62 | 369,78 | 43,69 | 8,46 | 8,46 | 1.781,74 | 1.844,96 | 1.884,39 | 1.909,37 | | | |
| D2732 | 7% | 4,32 | 1,72 | 0,59 | 36,99 | 14,24% | 1.006,10 | 372,11 | 43,50 | 8,55 | 8,55 | 1.845,01 | 1.861,50 | 1.878,22 | 1.930,16 | | | |
| D2733 | 7% | 4,34 | 1,72 | 0,58 | 36,74 | 13,89% | 1.005,44 | 369,37 | 43,64 | 8,46 | 8,46 | 1.832,16 | 1.903,03 | 1.884,97 | 1.946,34 | | | |
| D3731 | 7% | 4,70 | 1,87 | 0,46 | 31,42 | 13,16% | 1.012,25 | 318,10 | 47,62 | 6,68 | 6,68 | 2.533,97 | 2.754,57 | 2.886,04 | 2.954,59 | | | |
| D3732 | 7% | 4,73 | 1,88 | 0,45 | 31,04 | 12,93% | 1.008,71 | 313,14 | 47,72 | 6,56 | 6,56 | 2.578,43 | 2.764,75 | 2.913,33 | 2.983,08 | | | |
| D3733 | 7% | 4,72 | 1,87 | 0,45 | 31,24 | 13,36% | 1.007,72 | 314,86 | 47,54 | 6,62 | 6,62 | 2.554,18 | 2.718,27 | 2.889,40 | 2.957,96 | | | |

Tabela A.3 (continuação) - Dados dos corpos-de-prova ensaiados a medição do módulo de rigidez inicial

| Corpo-de-prova | C _a (%) | 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} | η/C _{av} | G ₀ (Mpa) | | | | | |
|----------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|------|-------|--------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | | | | | | | | | | 7 dias | 14 dias | 21 dias | 28 dias | 44 dias | 60 dias |
| D1511 | 5% | 2,91 | 1,59 | 0,72 | 41,79 | 13,75% | 999,55 | 417,72 | 29,08 | 14,36 | 14,36 | 901,17 | | | | | |
| D1512 | 5% | 2,92 | 1,59 | 0,71 | 41,62 | 13,13% | 1.002,04 | 417,05 | 29,24 | 14,26 | 14,26 | 860,27 | | | | | |
| D1513 | 5% | 2,93 | 1,60 | 0,71 | 41,47 | 13,17% | 999,03 | 414,30 | 29,23 | 14,17 | 14,17 | 893,62 | | | | | |
| D2511 | 5% | 3,17 | 1,73 | 0,58 | 36,52 | 13,32% | 1.003,22 | 366,37 | 31,83 | 11,51 | 11,51 | 1.758,52 | | | | | |
| D2512 | 5% | 3,19 | 1,74 | 0,57 | 36,28 | 13,51% | 1.000,34 | 362,88 | 31,86 | 11,39 | 11,39 | 1.768,24 | | | | | |
| D2513 | 5% | 3,18 | 1,74 | 0,57 | 36,29 | 13,29% | 1.002,43 | 363,78 | 31,92 | 11,40 | 11,40 | 1.736,03 | | | | | |
| D3511 | 5% | 3,43 | 1,87 | 0,46 | 31,40 | 13,68% | 1.006,10 | 315,91 | 34,50 | 9,16 | 9,16 | 2.145,00 | | | | | |
| D3512 | 5% | 3,43 | 1,87 | 0,46 | 31,45 | 13,40% | 1.008,71 | 317,25 | 34,56 | 9,18 | 9,18 | 2.094,95 | | | | | |
| D3513 | 5% | 3,43 | 1,87 | 0,46 | 31,43 | 13,37% | 1.009,50 | 317,30 | 34,60 | 9,17 | 9,17 | 2.121,50 | | | | | |
| D1521 | 5% | 2,89 | 1,58 | 0,73 | 42,23 | 14,11% | 1.003,74 | 423,84 | 28,99 | 14,62 | 14,62 | 845,60 | 941,56 | | | | |
| D1522 | 5% | 2,89 | 1,58 | 0,73 | 42,27 | 14,34% | 1.002,43 | 423,75 | 28,93 | 14,65 | 14,65 | 919,03 | 1.010,23 | | | | |
| D1523 | 5% | 2,90 | 1,58 | 0,73 | 42,03 | 14,22% | 999,29 | 420,00 | 28,96 | 14,50 | 14,50 | 937,70 | 1.024,20 | | | | |
| D2521 | 5% | 3,16 | 1,73 | 0,58 | 36,70 | 13,33% | 1.008,66 | 370,16 | 31,92 | 11,60 | 11,60 | 1.646,43 | 1.907,66 | | | | |
| D2522 | 5% | 3,17 | 1,73 | 0,57 | 36,50 | 13,38% | 1.005,00 | 366,83 | 31,90 | 11,50 | 11,50 | 1.669,21 | 1.920,61 | | | | |
| D2523 | 5% | 3,16 | 1,73 | 0,58 | 36,79 | 13,35% | 1.009,84 | 371,49 | 31,91 | 11,64 | 11,64 | 1.580,03 | 1.839,08 | | | | |
| D3521 | 5% | 3,42 | 1,87 | 0,46 | 31,55 | 13,12% | 1.013,69 | 319,82 | 34,68 | 9,22 | 9,22 | 2.244,81 | 2.200,16 | | | | |
| D3522 | 5% | 3,42 | 1,87 | 0,46 | 31,52 | 13,32% | 1.011,44 | 318,82 | 34,62 | 9,21 | 9,21 | 2.271,64 | 2.240,79 | | | | |
| D3523 | 5% | 3,43 | 1,87 | 0,46 | 31,45 | 13,24% | 1.010,62 | 317,87 | 34,63 | 9,18 | 9,18 | 2.235,52 | 2.226,61 | | | | |
| D1541 | 5% | 2,91 | 1,59 | 0,72 | 41,75 | 13,91% | 997,04 | 416,23 | 29,03 | 14,34 | 14,34 | 989,00 | 1.149,51 | 1.271,34 | 1.335,04 | 1.375,37 | 1.379,91 |
| D1542 | 5% | 2,91 | 1,59 | 0,72 | 41,77 | 13,89% | 997,85 | 416,84 | 29,04 | 14,35 | 14,35 | 1.005,87 | 1.156,04 | 1.259,51 | 1.340,19 | 1.379,06 | 1.408,65 |
| D1543 | 5% | 2,90 | 1,58 | 0,72 | 41,94 | 14,03% | 999,13 | 419,03 | 29,00 | 14,45 | 14,45 | 973,19 | 1.114,50 | 1.260,86 | 1.329,12 | 1.360,24 | 1.424,49 |
| D2541 | 5% | 3,17 | 1,73 | 0,58 | 36,62 | 13,82% | 1.003,03 | 367,31 | 31,78 | 11,56 | 11,56 | 1.529,32 | 1.933,56 | 2.144,35 | 2.226,67 | 2.208,93 | 2.225,59 |
| D2542 | 5% | 3,18 | 1,73 | 0,57 | 36,47 | 13,82% | 1.000,60 | 364,88 | 31,78 | 11,48 | 11,48 | 1.522,59 | 1.902,64 | 2.108,21 | 2.199,14 | 2.255,59 | 2.238,55 |
| D2543 | 5% | 3,15 | 1,72 | 0,59 | 36,94 | 14,35% | 1.003,35 | 370,68 | 31,62 | 11,72 | 11,72 | 1.507,42 | 1.896,65 | 2.111,93 | 2.188,74 | 2.200,55 | 2.231,98 |
| D3541 | 5% | 3,42 | 1,87 | 0,46 | 31,64 | 13,59% | 1.009,76 | 319,45 | 34,51 | 9,26 | 9,26 | 2.481,71 | 2.804,48 | 3.032,95 | 3.163,15 | 3.224,49 | 3.287,71 |
| D3542 | 5% | 3,42 | 1,87 | 0,46 | 31,51 | 13,23% | 1.011,88 | 318,87 | 34,64 | 9,21 | 9,21 | 2.538,73 | 2.842,06 | 3.047,37 | 3.170,94 | 3.232,88 | 3.296,70 |
| D3543 | 5% | 3,43 | 1,87 | 0,46 | 31,46 | 13,35% | 1.010,21 | 317,84 | 34,61 | 9,18 | 9,18 | 2.491,36 | 2.836,68 | 3.035,45 | 3.176,33 | 3.238,52 | 3.302,60 |

Tabela A.3 (continuação) - Dados dos corpos-de-prova ensaiados a medição do módulo de rigidez inicial

| Corpo-de-prova | C _a (%) | 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} | η/C _{av} | G ₀ (Mpa) | | | | | | |
|----------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|------|-------|--------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|
| | | | | | | | | | | | | 7 dias | 14 dias | 21 dias | 28 dias | 44 dias | 60 dias | 90 dias |
| V1511x | 5% | 2,93 | 1,60 | 0,70 | 41,35 | 12,53% | 1.002,48 | 414,51 | 29,39 | 14,10 | 14,10 | 898,94 | | | | | | |
| V1512x | 5% | 2,94 | 1,60 | 0,70 | 41,28 | 12,37% | 1.002,72 | 413,92 | 29,43 | 14,06 | 14,06 | 898,66 | | | | | | |
| V1513x | 5% | 2,93 | 1,60 | 0,71 | 41,43 | 12,76% | 1.001,49 | 414,95 | 29,32 | 14,15 | 14,15 | 899,77 | | | | | | |
| V2511x | 5% | 3,22 | 1,76 | 0,55 | 35,56 | 12,39% | 999,29 | 355,30 | 32,19 | 11,04 | 11,04 | 1.662,70 | | | | | | |
| V2512x | 5% | 3,21 | 1,75 | 0,56 | 35,73 | 12,36% | 1.001,98 | 358,00 | 32,19 | 11,12 | 11,12 | 1.666,20 | | | | | | |
| V2513x | 5% | 3,20 | 1,75 | 0,56 | 35,93 | 12,51% | 1.003,90 | 360,74 | 32,15 | 11,22 | 11,22 | 1.646,58 | | | | | | |
| V3511x | 5% | 3,45 | 1,88 | 0,45 | 31,01 | 13,31% | 1.004,29 | 311,42 | 34,63 | 8,99 | 8,99 | 2.579,06 | | | | | | |
| V3512x | 5% | 3,47 | 1,90 | 0,44 | 30,53 | 12,22% | 1.007,19 | 307,48 | 34,98 | 8,79 | 8,79 | 2.587,81 | | | | | | |
| V3513x | 5% | 3,47 | 1,89 | 0,44 | 30,57 | 12,29% | 1.006,93 | 307,82 | 34,95 | 8,81 | 8,81 | 2.556,79 | | | | | | |
| V1521x | 5% | 2,94 | 1,61 | 0,70 | 41,17 | 12,59% | 999,05 | 411,30 | 29,38 | 14,00 | 14,00 | 981,33 | 1.084,83 | 1.124,46 | 1.166,31 | 1.224,52 | | 1.335,11 |
| V1522x | 5% | 2,96 | 1,62 | 0,69 | 40,80 | 12,43% | 994,16 | 405,66 | 29,42 | 13,79 | 13,79 | 1.008,54 | 1.090,56 | 1.136,02 | 1.184,40 | 1.229,46 | | 1.358,74 |
| V1523x | 5% | 2,94 | 1,60 | 0,70 | 41,27 | 12,55% | 1.000,96 | 413,08 | 29,39 | 14,06 | 14,06 | 968,38 | 1.050,72 | 1.090,52 | 1.132,65 | 1.187,03 | | 1.310,29 |
| V2521x | 5% | 3,21 | 1,75 | 0,56 | 35,75 | 12,82% | 998,48 | 356,99 | 32,07 | 11,13 | 11,13 | 1.742,40 | 1.889,01 | 1.919,16 | 1.950,05 | 2.075,76 | | 2.231,43 |
| V2522x | 5% | 3,22 | 1,76 | 0,55 | 35,57 | 12,28% | 1.000,39 | 355,85 | 32,22 | 11,05 | 11,05 | 1.791,52 | 1.885,31 | 1.918,37 | 1.952,32 | 2.088,49 | | 2.253,23 |
| V2523x | 5% | 3,20 | 1,75 | 0,56 | 35,92 | 12,65% | 1.002,40 | 360,08 | 32,11 | 11,21 | 11,21 | 1.782,49 | 1.827,75 | 1.867,97 | 1.909,55 | 2.044,77 | | 2.179,71 |
| V3521x | 5% | 3,47 | 1,89 | 0,44 | 30,64 | 12,39% | 1.006,99 | 308,59 | 34,91 | 8,84 | 8,84 | 2.547,42 | 2.785,07 | 2.853,10 | 2.923,68 | 3.155,04 | | 3.441,79 |
| V3522x | 5% | 3,48 | 1,90 | 0,44 | 30,42 | 12,36% | 1.003,82 | 305,41 | 34,91 | 8,75 | 8,75 | 2.576,94 | 2.818,34 | 2.879,56 | 2.942,83 | 3.164,24 | | 3.486,96 |
| V3523x | 5% | 3,47 | 1,90 | 0,44 | 30,55 | 12,38% | 1.005,99 | 307,35 | 34,92 | 8,80 | 8,80 | 2.528,90 | 2.793,91 | 2.813,25 | 2.832,80 | 3.041,80 | | 3.312,31 |
| V1531x | 5% | 2,93 | 1,60 | 0,71 | 41,46 | 12,42% | 1.005,28 | 416,79 | 29,42 | 14,17 | 14,17 | 879,74 | 955,54 | 983,16 | 1.033,46 | 1.053,69 | | |
| V1532x | 5% | 2,93 | 1,60 | 0,71 | 41,41 | 12,38% | 1.004,92 | 416,12 | 29,43 | 14,14 | 14,14 | 824,09 | 896,27 | 918,17 | 972,50 | 993,23 | | |
| V1533x | 5% | 2,94 | 1,60 | 0,70 | 41,26 | 12,54% | 1.000,83 | 412,96 | 29,38 | 14,05 | 14,05 | 838,97 | 892,16 | 910,79 | 958,91 | 974,71 | | |
| V2531x | 5% | 3,19 | 1,74 | 0,57 | 36,11 | 12,45% | 1.007,14 | 363,71 | 32,16 | 11,31 | 11,31 | 1.528,87 | 1.628,32 | 1.656,17 | 1.699,16 | 1.740,53 | | |
| V2532x | 5% | 3,19 | 1,74 | 0,56 | 36,10 | 12,32% | 1.008,14 | 363,93 | 32,20 | 11,30 | 11,30 | 1.492,18 | 1.581,53 | 1.615,05 | 1.637,44 | 1.694,10 | | |
| V2533x | 5% | 3,20 | 1,75 | 0,56 | 36,03 | 12,32% | 1.007,22 | 362,89 | 32,21 | 11,27 | 11,27 | 1.491,70 | 1.583,15 | 1.605,22 | 1.634,52 | 1.695,79 | | |
| V3531x | 5% | 3,47 | 1,89 | 0,44 | 30,64 | 12,27% | 1.007,51 | 308,65 | 34,93 | 8,84 | 8,84 | 2.103,76 | 2.170,18 | 2.247,39 | 2.297,76 | 2.314,63 | | |
| V3532x | 5% | 3,46 | 1,89 | 0,44 | 30,71 | 12,51% | 1.006,41 | 309,04 | 34,86 | 8,87 | 8,87 | 2.153,17 | 2.218,58 | 2.305,92 | 2.319,77 | 2.352,53 | | |
| V3533x | 5% | 3,48 | 1,90 | 0,44 | 30,45 | 12,35% | 1.004,21 | 305,79 | 34,91 | 8,76 | 8,76 | 2.127,66 | 2.188,27 | 2.273,81 | 2.283,63 | 2.319,46 | | |