

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Hugo Carlos Scheuermann Filho**

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DISPERSIVO COM PÓ DE  
VIDRO MOÍDO E CAL DE CARBURETO**

Porto Alegre  
fevereiro 2019

**Hugo Carlos Scheuermann Filho**

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DISPERSIVO COM PÓ DE  
VIDRO MOÍDO E CAL DE CARBURETO**

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 na modalidade Acadêmica

**Orientador: Nilo Cesar Consoli**  
**Orientadora: Cecilia Gravina da Rocha**

Porto Alegre  
fevereiro 2019

**HUGO CARLOS SCHEUERMANN FILHO**

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DISPERSIVO COM PÓ DE  
VIDRO MOÍDO E CAL DE CARBURETO**

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 na modalidade Acadêmica Porto Alegre, 25 de fevereiro de 2019

**Nilo Cesar Consoli**  
Ph.D Concórdia University, Canadá  
Orientador

**Cecília Gravina da Rocha**  
Dra. pela UFRGS  
Orientadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Lucas Festugato**  
**(UFRGS)**  
Dr Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Cezar Augusto Burkert Bastos**  
**(FURG)**  
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Cesar Alberto Ruver**  
**(UFRGS)**  
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Rodrigo Beck Saldanha**  
**(UFRGS)**  
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família por todo apoio e consideração durante a realização do meu mestrado acadêmico. Agradeço, também, à minha namorada Vanessa pelo imenso apoio, auxílio e compreensão durante a realização desse trabalho, especialmente pela ajuda com a elaboração dos slides para a defesa.

Sou extremamente grato ao professor e meu orientador Nilo Consoli por toda orientação, apoio, confiança e transmissão de conhecimentos durante a minha (ainda) breve vida acadêmica. Da mesma forma, agradeço à minha orientadora Cecília G. Rocha por todo auxílio e orientação prestadas na elaboração dessa pesquisa.

Agradeço muito ao colega de pesquisa Rodrigo Beck Saldanha por todo aprendizado, transmissão de conhecimento e colaboração desde que fui bolsista de iniciação científica. Da mesma forma, agradeço ao colega Ruben Alejandro Q. Samaniego por todo e qualquer auxílio prestado durante a realização desse trabalho.

Tenho enorme gratidão aos professores e colaboradores do PPGEC da UFRGS e do LEGG que estão diariamente trabalhando em prol do conhecimento, da pesquisa científica e dos alunos, em especial aos professores Lucas Festugato, Sérgio Marques e David E. Lourenço.

Agradeço aos bolsistas de iniciação científica do LEGG Pablo, Renato, João e Felipe por todo e qualquer auxílio prestado durante a realização dos ensaios de laboratório.

Agradeço muito aos meus colegas de laboratório/mestrado/pesquisa/PPGEC Gonçalo, Pasche, Lennon, Gustavo, Dionatas, Helena, Daniel, Vinícius, Mariana, Marina, Mozara, Caballero, Estefano, Eclesielter, Luciana, Ricardo Menezes, Matheus F, Bruna, Augusto... pela convivência diária no laboratório, todo e qualquer auxílio prestado e diversos momentos de descontração. Peço perdão se esqueci de mencionar alguém. Mais uma vez, muito obrigado colegas!

Aos colaboradores e pesquisadores ligados ao LACER pela realização dos ensaios lá solicitados.

À CAPES e ao CNPQ pela bolsa de estudos, a qual ajudou a realização desse mestrado acadêmico. Muito Obrigado!

## RESUMO

Solos dispersivos são caracterizados pela defloculação na presença de água relativamente pura e estática, entrando facilmente em suspensão e sendo propensos a fenômenos erosivos. Geralmente, tais características são observadas em argilas sódicas, pois o sódio ( $\text{Na}^+$ ) é fracamente carregado e implica em um sistema com baixo nível de forças eletroquímicas de natureza atrativa entre as partículas. A estabilização de solos desse tipo pode se dar através da substituição desses cátions monovalentes por íons de maior valência, o que acarreta no aumento das forças atrativas entre os argilominerais. Materiais à base de cálcio (e.g. cal hidratada e cimento Portland) podem ser empregados para tal fim, no entanto tendem a ser deletérios ao meio ambiente e economicamente onerosos. Uma alternativa é o uso de resíduos que apresentem propriedades adequadas, como atividade pozolânica e potencial de ativação alcalina. Nesse contexto, o presente trabalho propõe a estabilização de um solo dispersivo oriundo do Chaco paraguaio com o emprego de pó de vidro moído e cal de carbureto (dois resíduos). Para isso, o desempenho do solo estabilizado foi avaliado em termos de resistência à compressão simples, rigidez inicial, durabilidade e dispersibilidade com base em um projeto fatorial fracionado de resolução V para os ensaios de resistência e rigidez e de resolução IV para os demais. Desse modo, o impacto de fatores-chave como peso específico aparente seco, teor de cal, teor de vidro moído, umidade de moldagem e temperatura de cura pôde ser quantificado frente às variáveis respostas. Ademais, a microestrutura de algumas dessas misturas foi estudada através da difração de raios-X (DRX), termogravimetria e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com EDS. Os resultados indicaram grande efeito da temperatura de cura e da compacidade na resistência e rigidez inicial das amostras ensaiadas. Quanto à durabilidade, o teor de cal e a incorporação de pó de vidro moído mostraram-se fundamentais para promover a melhoria no desempenho das misturas. Também, constatou-se a supressão da dispersibilidade do solo, em decorrência das adições empregadas, através do *pinhole test*. No que diz respeito à microestrutura, pôde-se verificar mudanças, decorrentes das adições, na mineralogia do solo através dos resultados de DRX e mudanças substanciais na morfologia desse por meio das imagens de MEV.

Palavras-chave: Estabilização de Solos. Solos Dispersivos. Cal de Carbureto. Vidro moído. Sustentabilidade

## ABSTRACT

Dispersive soils are characterized by the deflocculation in the presence of pure and relative still water, being easily suspended and susceptible to erosive phenomena. Usually, such characteristics are observed among sodic clayey soils, as sodium ions ( $\text{Na}^+$ ) are poorly charged which imply in systems with low intensity electrostatic attractive forces. The suppression of such condition can be achieved through the replacement of the monovalent  $\text{Na}^+$  ions by cations with higher valences. Calcium based materials (e.g. hydrated lime and Portland cement) can be employed for such purpose; however they are notably harmful to the environment and economically costly. The use of residues that possess suitable properties (e.g. pozzolanic activity and alkali-activation potential) is a viable alternative. In this context, the present research proposes the stabilization of dispersive clay from the Paraguayan Chaco through the addition of ground glass powder and carbide lime (two residues). Therefore, the performance of the stabilized soil was assessed in terms of its unconfined compressive strength, initial shear modulus, durability and dispersivity potential through fractional factorial designs (resolution V for strength and stiffness and IV for the other tests). Thereby, the influence of the following key factors could be quantified in the response variables: dry unit weight, amount of lime, ground glass content, moulding moisture and curing temperature. Moreover, the microstructure of a few blends was evaluated through X-ray diffraction tests (XRD), thermogravimetric analysis and scanning electron microscopy (SEM) with EDS. In general, the results attested the great effect of the curing temperature and the porosity in the strength and stiffness of the studied blends. Concerning the durability, the lime content and the incorporation of ground glass were essential for the improvement in the performance of the tested mixtures. Besides, the pinhole tests demonstrated that the dispersive potential of the natural soil was suppressed due to the employed additions. Regarding the dispersive soil microstructure, it was possible to verify a few changes in its mineralogy through the XRD tests and substantial alterations in its morphology by the SEM images.

Keywords: Soil Stabilization. Dispersive Soils. Carbide Lime. Ground Glass. Sustainability

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Delineamento da pesquisa.....	17
Figura 2: Argilominerais e partículas .....	21
Figura 3: Dupla camada difusa e microestrutura.....	25
Figura 4: Comparação entre limites de consistência e dispersibilidade .....	27
Figura 5: Representação esquemática dos graus de dispersibilidade no <i>crumb test</i> .....	28
Figura 6: Esquema do <i>pinhole test</i> .....	29
Figura 7: Relação entre dispersão e a presença de sais dissolvidos .....	30
Figura 8: Diagrama para identificação de solos dispersivos .....	31
Figura 9: Relação $\eta$ x $q_u$ para solo estabilizado com cal.....	42
Figura 10: Relação $\eta$ x $q_u$ para solo estabilizado com cimento) .....	42
Figura 11: Exemplo da relação entre $q_u$ e $\eta/C_{iv}$ .....	44
Figura 12: Relação entre $q_u$ , teor de umidade e compactidade para solo argiloso) .....	47
Figura 13: Relação entre $q_u$ , teor de umidade e compactidade.....	47
Figura 14: Relação entre $q_u$ e teor de umidade de moldagem .....	48
Figura 15: tividade pozolânica e temperatura ao longo do tempo.....	49
Figura 16: Consumo de cal em função do tempo e da temperatura .....	49
Figura 17: Estabilização da resistência com a temperatura.....	50
Figura 18: Representação de um experimento $2^2$ .....	57
Figura 19: Representação de um experimento $2^3$ .....	57
Figura 20: Probabilidade normal dos efeitos.....	58
Figura 21: Exemplo de gráfico de Pareto .....	58
Figura 22: Método do pH para determinação do mínimo teor de cal.....	64
Figura 23: Moldes metálicos para moldagem .....	66
Figura 24: Tanque para cura a 23°C.....	67

Figura 25: Tanque para cura a 40°C.....	67
Figura 26: Ensaio de compressão simples.....	68
Figura 27: Comportamento típico de um solo cimentado quanto à propagação de onda cisalhante no ensaio ultrassônico.....	70
Figura 28: Molde preenchido e pronto para o <i>pinhole test</i> .....	72
Figura 29: Amostra após conclusão do <i>pinhole test</i> .....	72
Figura 30: <i>Pinhole test</i> em andamento .....	72
Figura 31: Fluxograma do <i>pinhole test</i> .....	73
Figura 32: Mapa geológico do Paraguai com destaque para a região do Baixo Chaco .....	75
Figura 33: Distribuição granulométrica do solo dispersivo.....	76
Figura 34: Variação dos limites de Atterberg com o teor de cal .....	77
Figura 35: Curvas de compactação do solo dispersivo .....	78
Figura 36: Difratoograma do solo dispersivo.....	79
Figura 37: Difratoograma do solo dispersivo através do método orientado .....	80
Figura 38: Imagem de MEV do solo dispersivo ampliada 400 x.....	81
Figura 39: Imagem de MEM do solo dispersivo ampliada 1000 x .....	81
Figura 40: Imagem de MEV do solo dispersivo ampliada 2500 x .....	82
Figura 41: Imagem de MEM do solo dispersivo ampliada 10000 x .....	82
Figura 42: Resultado de EDS geral do solo dispersivo .....	82
Figura 43: Resultado de EDS de grão do solo dispersivo .....	83
Figura 44: TGA e DTG do solo dispersivo .....	84
Figura 45: Distribuição granulométrica do pó de vidro moído .....	85
Figura 46: Difratoograma do pó de vidro moído.....	86
Figura 47: Difratoograma do pó de vidro moído com adição de cal de carbureto .....	87
Figura 48: Imagem de MEV do VM ampliada 400 x.....	88

Figura 49: Imagem de MEM do VM ampliada 1000 x .....	88
Figura 50: Imagem de MEV do VM ampliada 2500 x.....	89
Figura 51: Resultado de EDS do pó de vidro moído.....	89
Figura 52: TGA e DTG do pó de vidro moído .....	90
Figura 53: Distribuição granulométrica da cal de carbureto .....	91
Figura 54: Difratoograma da cal de carbureto.....	93
Figura 55: Imagem de MEV da CC ampliada 400 x .....	93
Figura 56: Imagem de MEM da CC ampliada 800 x .....	93
Figura 57: Resultado de EDS da cal de carbureto .....	94
Figura 58: Resultado de TGA da cal de carbureto .....	95
Figura 59: Média de $q_u$ e $G_0$ para cada tratamento na cura selada .....	97
Figura 60: Efeitos principais para $q_u$ e $G_0$ na cura selada.....	98
Figura 61: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cura selada .....	98
Figura 62: Gráfico de efeitos principais para a cura selada a 23°C.....	100
Figura 63: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cura selada a 23°C .....	101
Figura 64: Gráfico de efeitos principais para a cura selada a 40°C.....	101
Figura 65: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cura selada a 40°C .....	102
Figura 66: Média de $q_u$ e $G_0$ para cada tratamento na cura submersa .....	103
Figura 67: Efeitos principais para $q_u$ e $G_0$ na cura submersa.....	104
Figura 68: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cura submersa .....	105
Figura 69: Gráfico de efeitos principais para a cura submersa a 23°C .....	106
Figura 70: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cura submersa a 23°C.....	106
Figura 71: Gráfico de efeitos principais para a cura submersa a 40°C .....	107
Figura 72: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cura submersa a 40°C.....	107
Figura 73: Gráfico de efeitos principais comparativo entre os dois tipos de cura.....	108

Figura 74: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados comparativo entre os dois tipos de cura.....	109
Figura 75: PMA por ciclo para o ensaio de durabilidade .....	110
Figura 76: PMI por ciclo para o ensaio de durabilidade.....	111
Figura 77: Gráfico de efeitos principais para o ensaio de durabilidade .....	112
Figura 78: Gráfico de efeitos principais para o ensaio de durabilidade .....	112
Figura 79: Resultados de durabilidade para o mesmo solo dispersivo estabilizado com uma cal hidratada .....	114
Figura 80: Algumas amostras após o fim do ensaio de durabilidade .....	115
Figura 81: $G_0$ ao longo dos ciclos de molhagem – secagem para cura a 23°C .....	117
Figura 82: $G_0$ ao longo dos ciclos de molhagem – secagem para cura a 40°C .....	118
Figura 83: Relação entre RCS e o índice $\eta/L_{iv}$ para cura a 23°C.....	121
Figura 84: Relação entre RCS e o índice $\eta/L_{iv}$ para cura a 40°C.....	122
Figura 85: RCS e o parâmetro $\eta/L_{iv}$ para as duas temperaturas de cura .....	123
Figura 86: RCS normalizada e o parâmetro $\eta/L_{iv}$ para as duas temperaturas de cura .....	123
Figura 87: Relação entre $G_0$ e o índice $\eta/L_{iv}$ para cura a 23°C .....	124
Figura 88: Relação entre $G_0$ e o índice $\eta/L_{iv}$ para cura a 40°C .....	125
Figura 89: $G_0$ e o parâmetro $\eta/L_{iv}$ para as duas temperaturas de cura .....	126
Figura 90: Rigidez normalizada e o parâmetro $\eta/L_{iv}$ para as duas temperaturas de cura.....	126
Figura 91: Relação entre PMA e o parâmetro $\eta/L_{iv}$ .....	128
Figura 92: Relação entre $G_0$ e o parâmetro $\eta/L_{iv}$ ao longo dos ciclos para os espécimes curados a 23°C.....	129
Figura 93: Relação entre $G_0$ e o parâmetro $\eta/L_{iv}$ ao longo dos ciclos para os espécimes curados a 40°C.....	131
Figura 94: Vazões médias registradas no <i>pinhole test</i> .....	132

Figura 95: DRX para a mistura (i): 10% VM_5% cal.....	135
Figura 96: DRX para a mistura (ii): 30% VM_12% cal.....	136
Figura 97: TGA e DTG para a mistura (i): 10% VM_5% cal .....	139
Figura 98: TGA e DTG para a mistura (ii): 30% VM_12% cal.....	140
Figura 99: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 23°C e ampliada 400 x .....	142
Figura 100: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 23°C e ampliada 1000 x .....	142
Figura 101: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 23°C e ampliada 2500 x .....	142
Figura 102: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 23°C e ampliada 10000 .....	142
Figura 103: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 40°C e ampliada 400 x .....	143
Figura 104: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 40°C e ampliada 1000 x .....	143
Figura 105: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 40°C e ampliada 2500 x .....	144
Figura 106: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 40°C e ampliada 10000 x .....	144
Figura 107: EDS dos pontos 1 e 2 para a mistura (i) curada a 40°C.....	145
Figura 108: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 23°C e ampliada 400 x .....	145
Figura 109: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 23°C e ampliada 1000 x .....	145
Figura 110: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 23°C e ampliada 2500 x .....	146
Figura 111: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 23°C e ampliada 10000 x .....	146
Figura 112: EDS dos pontos 1 e 2 para a mistura (ii) curada a 23°C.....	147
Figura 113: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 40°C e ampliada 400 x .....	147
Figura 114: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 40°C e ampliada 400 x .....	147
Figura 115: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 40°C e ampliada 2500 x .....	148
Figura 116: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 40°C e ampliada 10000 x .....	148
Figura 117: Imagem ampliada da mistura (ii) curada a 40°C .....	149
Figura 118: EDS dos pontos 1 e 2 para a mistura (ii) curada a 40°C.....	149
Figura 119: EDS do solo desconsiderando a presença de carbono e oxigênio .....	150

Figura 120: EDS geral da mistura (i).....	150
Figura 121: DS geral da mistura (ii).....	151

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação dos principais tipos de vidro .....	52
Quadro 2: Aplicações com o uso de resíduos de vidro.....	54
Quadro 3: Resumo do programa experimental.....	60
Quadro 4: Resumo de resultados do <i>pinhole test</i> .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Taxas de reciclagem de vidro para recipientes .....	53
Tabela 2: Resumo dos fatores controláveis e seus níveis .....	65
Tabela 3: Características físicas do solo dispersivo .....	76
Tabela 4: Características químicas do solo dispersivo .....	77
Tabela 5: Fases minerais detectadas no solo dispersivo.....	81
Tabela 6: Características físicas do pó de vidro moído .....	85
Tabela 7: Composição química do vidro .....	88
Tabela 8: Propriedades físicas da cal de carbureto.....	92
Tabela 9: Composição química da cal de carbureto .....	92
Tabela 10: Tratamentos relativos aos ensaios de resistência e rigidez.....	96
Tabela 11: Tratamentos relativos aos ensaios de durabilidade e <i>pinhole test</i> .....	96

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Análise de Ciclo de Vida

ANOVA – Análise de Variância

ASTM – American Society for Testing and Materials

CC – Cal de Carbureto

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem

CRC – Cooperative Research Center for Sustainable Sugar Production

DCD – Dupla Camada Difusa

DRX – Difração de Raios-X

DTG – Derivada da Termogravimetria

EDS – Espectroscopia de Raios-X por Dispersão em Energia

FRX – Fluorescência de Raios-X

GL – Graus de Liberdade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

ICSD – Inorganic Crystal Structure Database

IP – Índice de Plasticidade

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MME – Ministério de Minas e Energia

MQ – Média dos Quadrados

PD – Porcentagem de Dispersão

PMA – Perda de Massa Acumulada

PST – Porcentagem de Sódio Trocável

PMI – Perda de Massa Individual

RAS – Razão de Absorção de Sódio

RCS – Resistência à Compressão Simples

SSA – Superfície Específica

SQ – Soma dos Quadrados

T – Temperatura de cura.

TGA – Termogravimetria

TRB – Transportation Research Board

USEPA – United States Environmental Protection Agency

VM – Vidro Moído

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma_d$  – peso específico aparente seco (kN/m<sup>3</sup>)

$\eta$  – porosidade (%)

$B_{iv}$  – teor volumétrico de agente cimentante

$C_{iv}$  – teor volumétrico de cimento

$q_u$  – resistência à compressão simples (kPa)

$G_0$  – módulo cisalhante inicial (MPa)

$L_{iv}$  – teor volumétrico de cal

$t_p$  – tempo da onda de compressão ( $\mu$ s)

$t_s$  – tempo da onda cisalhante ( $\mu$ s)

$w$  – teor de umidade (%)

$V_s$  – velocidade da onda cisalhante (m/s)

$V_p$  – velocidade da onda de compressão (m/s)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	13
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	15
<b>1.2.1 Objetivo Geral.....</b>	15
<b>1.2.2 Objetivos Específicos.....</b>	15
1.3 PRESSUPOSTO.....	16
1.4 PREMISA.....	16
1.5 DELIMITAÇÕES.....	16
1.6 LIMITAÇÕES.....	16
1.7 DELINEAMENTO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	19
2.1 ARGILOMINERAIS.....	19
2.2 SOLOS DISPERSIVOS.....	21
<b>2.2.1 O Fenômeno da Dispersão.....</b>	23
<b>2.2.2 Identificação de Solos Dispersivos.....</b>	26
2.2.2.1 Crumb Test.....	27
2.2.2.2 Pinhole Test.....	28
2.2.2.3 Sais Dissolvidos na Água Intersticial.....	29
2.2.2.4 Sedimentometria Comparativa.....	30
2.2.2.5 Capacidade de Troca Catiônica.....	30
2.2.2.6 Identificação dos Argilominerais via DRX.....	32
2.3 REAÇÕES POZOLÂNICAS.....	33
2.4 REAÇÕES NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS ARGILOSOS.....	35
<b>2.4.1 Solo – Cal.....</b>	35
<b>2.4.2 Solo – Cimento.....</b>	37
<b>2.4.3 Solo – Cal – Pozolana.....</b>	39
2.5 VARIÁVEIS DETERMINANTES NO COMPORTAMENTO SOLO-CAL- POZOLANA.....	39
<b>2.5.1 Efeito da Cal.....</b>	40
<b>2.5.2 Efeito da Pozolana.....</b>	41
<b>2.5.3 Efeito da Compacidade da Mistura.....</b>	42
<b>2.5.4 Efeito da Relação entre Porosidade e Teores Volumétricos de Cimento, Cal e Ligante.....</b>	42

<b>2.5.5 Efeito da Umidade de Moldagem.....</b>	<b>46</b>
<b>2.5.6 Efeito do Tempo de Cura.....</b>	<b>48</b>
<b>2.5.7 Efeito da Temperatura de Cura.....</b>	<b>49</b>
<b>2.6 SUSTENTABILIDADE E UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....</b>	<b>50</b>
<b>2.6.1 O Vidro e o Meio Ambiente.....</b>	<b>51</b>
<b>2.6.2 A Cal de Carbureto e o Meio Ambiente.....</b>	<b>55</b>
<b>2.7 PROJETO DE EXPERIMENTOS.....</b>	<b>55</b>
<b>2.7.1 Experimento Fatorial <math>2^k</math>.....</b>	<b>56</b>
<b>2.7.2 Experimento Fatorial Fracionado <math>2^{k-j}</math>.....</b>	<b>58</b>
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA.....</b>	<b>60</b>
<b>3.1 ABORDAGEM EXPERIMENTAL.....</b>	<b>61</b>
<b>3.2 DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DOS FATORES CONTROLÁVEIS.....</b>	<b>62</b>
<b>3.3 MISTURA, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....</b>	<b>65</b>
<b>3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....</b>	<b>67</b>
<b>3.5 ENSAIO DE PULSO ULTRASSÔNICO.....</b>	<b>69</b>
<b>3.6 ENSAIO DE DURABILIDADE POR MOLHAGEM – SECAGEM E ESCOVAÇÃO.....</b>	<b>70</b>
<b>3.7 PINHOLE TEST.....</b>	<b>71</b>
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>74</b>
<b>4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....</b>	<b>74</b>
<b>4.1.1 Solo Dispersivo.....</b>	<b>74</b>
<b>4.1.2 Pó de Vidro Moído.....</b>	<b>84</b>
<b>4.1.3 Cal de Carbureto.....</b>	<b>91</b>
<b>4.2 RESULTADOS DO PROJETO FATORIAL FRACIONADO.....</b>	<b>95</b>
<b>4.2.1 Ensaios de Compressão Simples e Pulso Ultrassônico (cura selada).....</b>	<b>97</b>
<b>4.2.2 Ensaios de Compressão Simples e Pulso Ultrassônico (cura imersa).....</b>	<b>103</b>
<b>4.2.3 Comparação entre Cura Selada e Imersa.....</b>	<b>108</b>
<b>4.2.4 Durabilidade por Ciclos de Molhagem – Secagem – Escovação.....</b>	<b>110</b>
<b>4.2.5 Ensaio de Pulso Ultrassônico ao Longo dos Ciclos de Molhagem – Secagem..</b>	<b>116</b>
<b>4.3 RELAÇÕES COM O ÍNDICE <math>\eta/L_{iv}</math>.....</b>	<b>119</b>
<b>4.3.1 Resistência à Compressão Simples.....</b>	<b>120</b>
<b>4.3.2 Módulo Cisalhante Inicial.....</b>	<b>124</b>
<b>4.3.3 Durabilidade.....</b>	<b>127</b>
<b>4.3.4 Pulso Ultrassônico ao Longo dos Ciclos de Molhagem – Secagem.....</b>	<b>128</b>

4.4 RESULTADOS DO PINHOLE TEST.....	131
4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MICROESTRUTURA.....	133
<b>4.5.1 Difração de Raios-X.....</b>	<b>134</b>
<b>4.5.2 Termogravimetria.....</b>	<b>138</b>
<b>4.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS.....</b>	<b>141</b>
<b>5 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>152</b>
5.1 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES .....	152
5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	159
5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	160
REFERÊNCIAS.....	161
ANEXO A.....	174
ANEXO B.....	176
ANEXO C.....	178

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Não é incomum a necessidade de se desenvolverem obras de Engenharia perante condições geotécnicas adversas, como solos com baixa capacidade de suporte, solos colapsíveis, solos dispersivos, solos expansivos, entre outros. Dentre as opções para se contornar o problema, sem que haja a necessidade de se abandonar ou modificar radicalmente o projeto, há distintas técnicas de melhoramento de solos (CHARLES, J. A., 2002). De modo genérico, Mitchell e Jardine (2002) as definem como alterações controladas no estado e/ou na natureza de geomateriais com o intuito de que esses obtenham um desempenho satisfatório quando em serviço.

Solos dispersivos inserem-se nessa conjuntura de condições adversas, pois são caracterizados pela defloculação e suspensão na presença de água relativamente pura e parada, sendo estruturalmente instáveis e propensos a fenômenos de erosão externa, interna (*piping*), dentre outros problemas de estabilidade geotécnica (ELGES, 1985; MITCHELL; SOGA, 2005; RYKER, 1977). Nesse sentido, solos dessa natureza podem inviabilizar e/ou prejudicar estruturas geotécnicas tais como barragens e aterros rodoviários (SHERARD et al., 1976). De maneira geral, altas quantidades de sódio adsorvido ( $\text{Na}^+$ ) tendem a tornar solos argilosos predispostos à dispersão, pois os cátions  $\text{Na}^+$  são pouco carregados e, conseqüentemente, fracamente aderidos aos argilominerais, o que, em última instância, resulta em um sistema com baixo nível de forças eletroquímicas de caráter atrativo entre as partículas (CRC, 2001).

Uma das formas de estabilização de solos dispersivos consiste na substituição dos íons monovalentes de sódio por cátions de maior valência, como o cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) ou alumínio ( $\text{Al}^{+3}$ ), o que implica em uma estrutura mais condensada do solo devido a fenômenos de ocorrência imediata como aglomeração e floculação (HERZOG; MITCHELL, 1963). Tal condição pode ser alcançada, por exemplo, mediante a incorporação de materiais à base de cálcio, como hidróxido de cálcio, cloreto de cálcio, silicato de cálcio, dentre outros. Outra maneira eficiente de contornar as adversidades relacionadas à dispersão é através do desenvolvimento de uma matriz cimentícia no geomaterial por meio da adição de cimento Portland, combinação

pozolana-ativador alcalino e, até mesmo, devido à precipitação de compostos ligantes decorrentes das reações de natureza pozolânica que podem ocorrer entre os argilominerais e os materiais à base de cálcio.

A despeito da eficiência comprovada do ponto de vista mecânico, a incorporação de materiais como o cimento Portland e a cal hidratada é, no entanto, danosa sob a ótica ambiental, haja vista aspectos como utilização intensa de recursos naturais, alto consumo energético e emissão de gases de efeito estufa associada aos processos produtivos desses insumos (GSCHÖSSER et al., 2012; SANTHANAM, 2013). Além das questões ambientais, tais materiais podem não ser favoráveis sob as perspectivas econômico-financeira e social, o que requer análises específicas em cada caso de estudo.

Uma alternativa à aplicação de materiais comerciais é o emprego de resíduos industriais e/ou domésticos que apresentem características úteis ao desenvolvimento dos processos necessários ao melhoramento de solos. Dentre essas, destacam-se a atividade pozolânica e a alta alcalinidade quando em solução. No primeiro quesito, enquadram-se resíduos tidos como pozolanas artificiais, como a cinza volante, escória de alto forno, cinza de casca de arroz, pó de vidro moído, dentre outros (MASSAZA, 2004). A cal de carbureto, a qual é um resíduo da produção de gás acetileno, condiz com o segundo critério, já que contém uma parcela expressiva de hidróxido de cálcio livre em sua composição, sendo, assim, um ótimo ativador alcalino (SALDANHA et al., 2018).

Em detrimento da utilização de materiais tradicionais, o emprego de resíduos pode ser vantajoso sob a ótica ambiental, já que evita muitos dos efeitos deletérios da produção daqueles. No entanto, tais benefícios estão atrelados à disponibilidade desses resíduos dentro de uma zona ótima, isto é, com certa proximidade aos locais de eventual uso, pois o transporte tende a ser um fator importante na avaliação ambiental de determinado material (ROCHA et al., 2016). Nesse contexto, o resíduo de vidro doméstico, devidamente moído, pode ser uma alternativa, dado que grandes centros urbanos geram toneladas de resíduos desse tipo, os quais, eventualmente, acabam não sendo reciclados ou devidamente reutilizados e são dispostos em aterros sanitários (MOHAJERANI et al., 2017; USEPA, 2015; CEMPRE, 2018).

Dada sua composição química e estrutura amorfa, o pó de vidro é um material que possui atividade pozolânica atestada por diversos autores (PATTENGIL; SHUTT, 1973, CARPENTER; CRAMER, 1999; METWALLY, 2007; SALES, 2014). Logo, quando

combinado a um ativador alcalino (em um ambiente hidratado), implica a precipitação de compostos ligantes hidratados à base de cálcio e sílica, como o C-S-H e o C-A-S-H. Sendo assim, pode ser empregado no melhoramento de solos, como documentado por Consoli et al. (2018). Com a função de ativador alcalino, pode-se utilizar a cal de carbureto como demonstrado por Consoli et al. (2001), Saldanha (2014), Novaes (2016), Winter (2018), Saldanha (2018), dentre outros. Alternativamente, cales comerciais, como, por exemplo, a dolomítica, são passíveis de uso e apresentam efeitos semelhantes (NUÑEZ, 1991; DALLA ROSA, 2009; SAMANIEGO, 2015; VILLALBA, 2015).

Nesse sentido, o presente trabalho se propõe a estudar o comportamento mecânico e a microestrutura da mistura entre um solo dispersivo estabilizado com pó de vidro moído e cal de carbureto. O solo é proveniente do Paraguai, da região do Baixo Chaco, o vidro é oriundo de embalagens de cor marrom e a cal é resíduo da produção de gás acetileno. Estima-se quantificar a influência das variáveis fundamentais no comportamento das misturas, assim como apresentar relações entre resistência, rigidez e durabilidade com a relação vazios/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_{iv}$ ). Ainda, procura-se caracterizar a microestrutura das misturas através de ensaios de difração de raios-X, termogravimetria e microscopia eletrônica de varredura com EDS.

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho estão divididos em objetivo geral, o qual pode ser entendido como um panorama global da pesquisa, e objetivos específicos, os quais têm embasamento no objetivo global e auxiliam o desenvolvimento das diretrizes de trabalho.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliação do comportamento mecânico, em termos de resistência, rigidez inicial e durabilidade, e da microestrutura na estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal de carbureto.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- a) quantificar e qualificar, com embasamento estatístico, o efeito do peso específico aparente seco, teor de cal, teor de vidro moído, umidade de moldagem, temperatura de cura e tipo de cura no comportamento da mistura quanto resistência à compressão simples, rigidez inicial e durabilidade;
- b) verificar a possibilidade de correlação entre as variáveis respostas (resistência, rigidez e durabilidade) e à relação entre porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_{iv}$ );
- c) avaliar a dispersibilidade após a estabilização das misturas com o *pinhole test*;
- d) analisar a natureza da microestrutura da mistura.

### 1.3 PRESSUPOSTO

O presente trabalho tem por pressuposto que a mistura entre solo dispersivo – pó de vidro moído – cal de carbureto pode proporcionar um desempenho adequado quanto à resistência e durabilidade, além de ser interessante do ponto de vista ambiental.

### 1.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que a simples estabilização do solo estudado com cal hidratada, apesar de eficiente do ponto de vista de resistência mecânica, é ineficiente sob a perspectiva de desempenho quanto à durabilidade. Além disso, a utilização de cimento Portland seria uma alternativa interessante sob a ótica de desempenho mecânico, contudo é ambientalmente ineficiente.

### 1.5 DELIMITAÇÕES

A pesquisa delimita-se a analisar o solo dispersivo proveniente de uma região específica do Chaco paraguaio e comparar os resultados da mistura proposta para estabilização com aqueles utilizando materiais tradicionais à base de cálcio.

### 1.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) quantidade limitada de solo disponível do mesmo lote para estudo;

- b) temperatura máxima de cura limitada à  $40 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- c) espaço físico e material insuficientes para realização de ensaios de durabilidade com duplicatas ou triplicatas.

## 1.7 DELINEAMENTO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado conforme o diagrama apresentado a seguir:

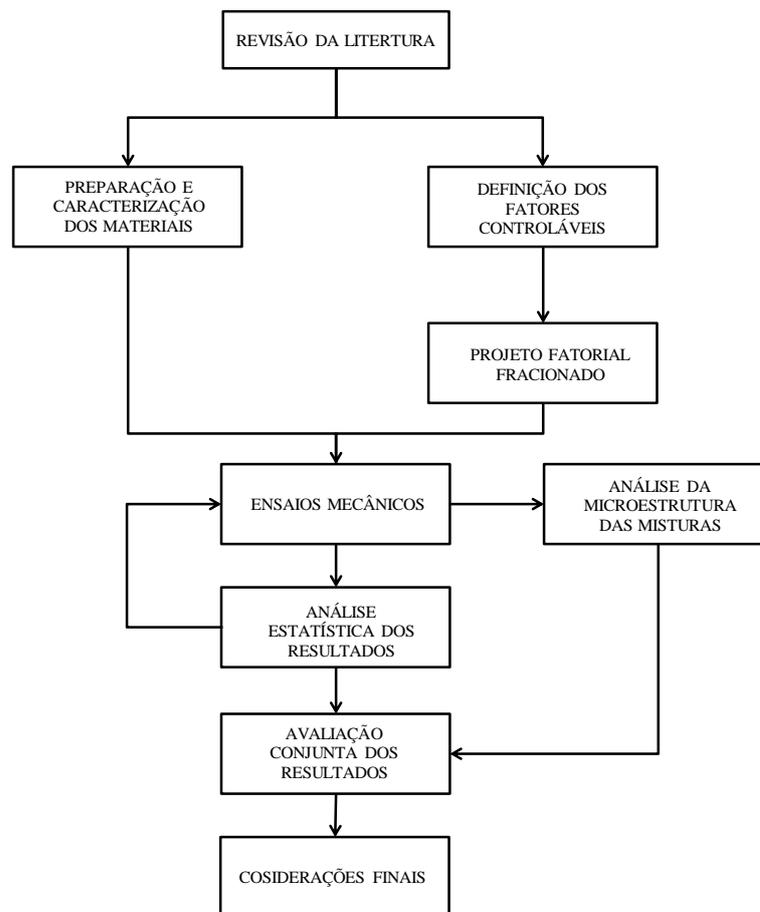


Figura 1: Delineamento da pesquisa  
(elaborado pelo autor)

Ademais, o **capítulo 2** apresenta a revisão da literatura. Logo, os principais tópicos relacionados a solos dispersivos, que incluem explicações sobre o fenômeno e mecanismos da dispersão, além de técnicas para identificação de solos dessa natureza, são apresentados. Ademais, esse capítulo contém um compilado bibliográfico acerca de temas relevantes à estabilização de solos, como o desenvolvimento de reações pozolânicas e a identificação de fatores chave no comportamento de solos estabilizados.

O **capítulo 3** apresenta o programa experimental e a metodologia empregado na presente pesquisa. Portanto, expõe-se o projeto de experimentos, explicações a respeito dos processos de tomada de decisão e a descrição dos ensaios realizados.

No **capítulo 4** são expostos os resultados da caracterização dos materiais empregados (solo dispersivo, pó de vidro moído e cal de carbureto), bem como dos ensaios realizados. Essa última etapa é dividida entre os ensaios mecânicos e de microestrutura.

O **capítulo 5** contém uma discussão acerca dos resultados experimentais obtidos, além de considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ARGILOMINERAIS

Solos naturais podem ser entendidos como sistemas multicomponentes nos quais há concomitantemente a presença das fases sólida, líquida e gasosa, sendo a fração argilosa correspondente à porção de material sólido com partículas inferiores a 2  $\mu\text{m}$  (GILLOTT, 1968). Essa parcela é formada por componentes inorgânicos cristalinos, dentre os quais se destacam, apesar da presença de quartzo, zeólitas e óxidos ferrosos, os minerais secundários conhecidos como filossilicatos, família a qual pertencem os argilominerais (GILLOT, 1968; MITCHELL, SOGA, 2005). Solos classificados como argilas são, portanto, caracterizados por um comportamento plástico em contato com a água devido à presença considerável de argilominerais em sua composição (ZAMPIERI, 1989).

Do ponto de vista mineralógico, os argilominerais são minerais cristalinos cuja estrutura se apresenta em forma lamelar estratificada em virtude da combinação de lâminas elementares, isto é, a lâmina tetraédrica de silício e a octaédrica de alumínio ou magnésio (figura 3). (VELDE, 1982; SANTAMARINA et al., 2001) A combinação dessas lâminas minerais origina estratos ou camadas minerais que, quando devidamente arranjadas, formam o argilomineral propriamente dito, sendo que a classificação desses minerais dá-se em face de distintos arranjos cristalinos (MITCHELL; SOGA, 2005). Ainda, diferenças entre, e dentro, dos grupos minerais existem em decorrência de substituições isomórficas ocorridas nas unidades estruturais básicas e, também, devido à natureza e força de ligação existente entre os estratos minerais (MITCHELL; SOGA, 2005). Logo, as partículas de argilominerais não são estruturas simples, e sim uma combinação de inúmeras camadas minerais interligadas entre si.

Em geral, a ligação entre as camadas minerais pode ser feita por forças de Van der Waals, pontes de hidrogênio ou através de forças de valência secundárias, exercidas pelos íons adsorvidos (LAMB; WHITMAN, 1969). Logo, a magnitude da força de ligação difere de acordo com o grupo mineral, o que influi diretamente na reatividade e na estabilidade geométrica desse (SANTAMARINA et al., 2001). Uma ligação forte implica em uma estrutura estável e pouco reativa, já que as camadas não se separam em decorrência da adsorção de água.

Por outro lado, ligações fracas implicam em minerais mais reativos e instáveis do ponto de vista estrutural, uma vez que permitem a expansão das camadas, com conseqüente aumento do volume devido à adsorção de água (MITCHELL; SOGA, 2005). A caulinita é um exemplo de mineral formado por uma lâmina tetraédrica de  $\text{Si}^{+4}$  e uma lâmina octaédrica de  $\text{Al}^{+3}$  (1:1) não expansivo (estável), no qual as camadas são unidas por ligações fortes de hidrogênio, enquanto que a illita (2:1) apresenta comportamento intermediário, já que íons de potássio ( $\text{K}^+$ ) tendem a fazer essa união (MITCHELL; SOGA, 2005). Os minerais do grupo das esmectitas (2:1), por outro lado, têm tendência altamente expansiva em razão das ligações de baixa intensidade entre as lâminas minerais.

A forma mineral (laminar) e o tamanho ( $< 2 \mu\text{m}$ ) atribuem aos argilominerais grandes valores de área superficial em relação à massa das partículas (elevada superfície específica), o que, aliado à sua carga superficial, confere-lhes grande capacidade de adsorção de água e íons (VALDE, 1992). Nesse sentido, as argilas tendem a ser sensíveis à composição do líquido intersticial, ou seja, por terem grande capacidade de interação com soluções eletrolíticas, podem ter sua estrutura afetada devido a esses processos interativos. Por isso, em solos naturais, a presença de argilominerais está relacionada ao aumento da plasticidade, maiores potenciais de contração e retração, menor condutividade hidráulica e maior compressibilidade. Mitchell e Soga (2005) afirmam que, para teores de umidade da ordem de 15% a 40%, um máximo correspondente a um terço da composição do solo como argila já é suficiente para que essa fração envolva partículas granulares e domine o comportamento do solo.

Também, em determinadas condições ambientais, pode ocorrer o ataque às partículas minerais, com conseqüente dissolução das estruturas unitárias sílico-aluminosas e formação de novas fases com características cimentícias através de reações de natureza pozolânica (DIAMOND et al., 1964; MOH, 1965). Ainda, Valde (1992) destaca o uso de argilominerais em diversas áreas, seja em seu estado natural ou modificado por processos físicos, como agentes catalíticos, formação de materiais cerâmicos, matéria-prima para indústria do cimento, dentro outros usos.

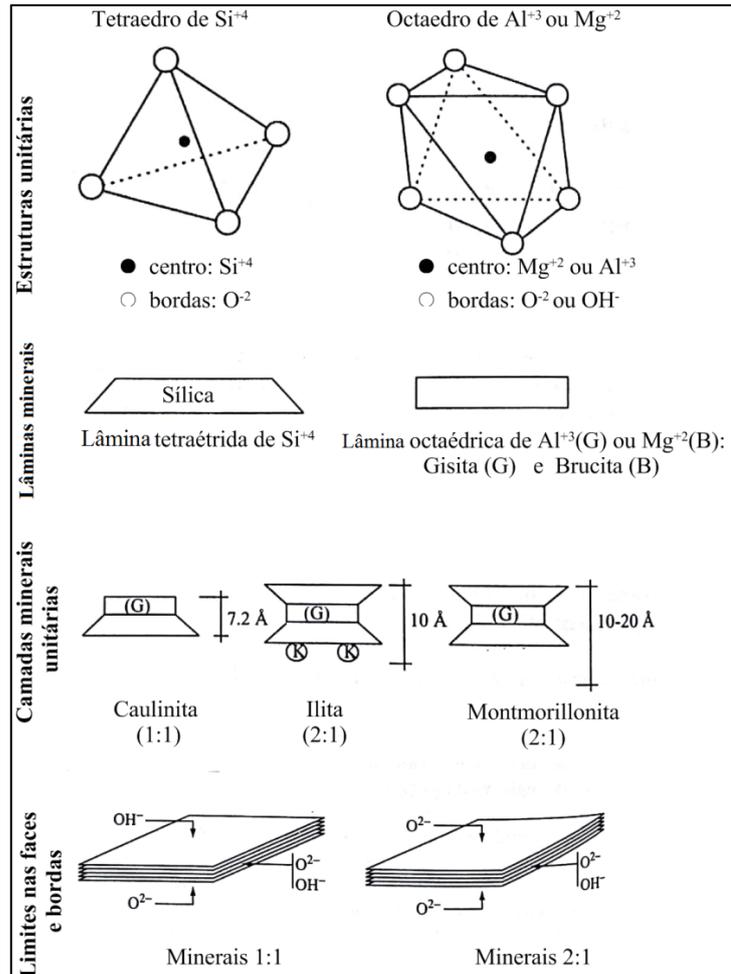


Figura 2: Argilominerais e partículas (SANTAMARINA et al, 2001)

## 2.2 SOLOS DISPERSIVOS

Em suma, a estabilidade estrutural dos solos depende de forças de caráter atrativo e repulsivo decorrente das interações intermoleculares e eletrostáticas entre as partículas do solo e a água intersticial (MARCHUK, 2013). Nesse sentido, solos dispersivos são estruturalmente instáveis e suas partículas argilosas são suscetíveis à suspensão devido ao baixo nível (ou ausência) de forças eletroquímicas de caráter atrativo entre elas, sendo, portanto, facilmente carregadas quando expostas a fluxos de água relativamente calmos (MITCHELL; SOGA, 2005; RYKER, 1977). Logo, solos dessa natureza podem vir a sofrer com casos severos de erosão, o que prejudica e/ou inviabiliza estruturas geotécnicas como barragens e aterros rodoviários (SHERARD et al., 1977).

Conceitualmente, os solos dispersivos distinguem-se de solos erodíveis e *slaking soils* por efeito dos mecanismos que implicam na desagregação das partículas com consequente erosão do solo.

Os solos erodíveis se caracterizam por apresentar coesão verdadeira entre as partículas devido a certo nível de cimentação e, portanto, a erosão observada nesses decorre da supressão da resistência cisalhante dessa cimentação devido à ação de forças como a da água corrente (GREEN, 2008). Logo, solos desse tipo não entram em suspensão imediata quando submetidos ao contato com a água. *Slaking soils*, por outro lado, tendem a se desintegrar, na presença de água, em partículas granulares de menor dimensão sem que, no entanto, os finos entrem em suspensão.

Nesse contexto, as primeiras pesquisas relativas ao tema de solos dispersivos, a sua maioria envolvendo relatos acerca do fenômeno observado em barragens, surgiram na segunda metade da década de 1960 na Austrália e no início da década de 1970 nos Estados Unidos (ELGES, 1985). Bourdeaux e Imaizumi (1977) relatam a investigação geotécnica e os procedimentos adotados com o intuito de identificar e controlar a utilização de argilas dispersivas presentes na área da Barragem de Sobradinho, localizada às margens do Rio São Francisco, na Bahia. Os autores observaram a presença de solos dispersivos em depósitos aluvionares, ao longo das margens do rio, não encontrando qualquer correlação entre o fenômeno da dispersibilidade e a natureza dos solos adjacentes. Também, eles atestam a eficiência da adição de 6% de sulfato de alumínio ( $Al_2[SO_4]_3$ ) na estabilização dos solos dispersivos locais.

Stapledon e Casinader (1977) expõem detalhadamente o processo de investigação para a barragem de Sugarloaf, situada próximo a Melbourne, Austrália, e relatam os problemas relacionados aos solos com características dispersivas por lá encontrados. Ademais, os autores comentam a respeito das soluções adotadas para contornar o problema e construir, efetivamente, a barragem. Bell e Maud (1994) apresentam uma revisão sobre a caracterização de solos dispersivos existentes na África do Sul, bem como relatam problemas locais envolvendo tais solos. Nagy et al. (2016), nessa mesma linha, apresenta uma caracterização geotécnica e mineralógica de solos dispersivos encontrados na Hungria. Ryke (1977), por sua vez, aborda a ocorrência de solos dispersivos no estado de Oklahoma, nos Estados Unidos, e comenta, também, sobre o uso de sulfato de alumínio para a estabilização desses, enquanto que Marshall e Workman (1977) fazem uma análise semelhante para a região do golfo do Texas.

Mais recentemente, Vakili et al. (2018) propõe a utilização conjunta de fibras de polipropileno de 12 mm e lignosulfonato (resíduo da produção de madeira e papel) na estabilização de um solo altamente dispersivo. Nesse estudo, constatou-se a redução em 76% do potencial dispersivo

com o uso combinado de 2% de lignosulfato e 0,35% de fibras polipropileno em relação à massa total de solo. Além disso, verificou-se um acréscimo na resistência à compressão simples do solo tratado, a qual aumentou, também, ao longo dos tempos de cura estudados (1, 3, 7 e 28 dias). Destaca-se, ainda, o fato de que o lignosulfonato é um resíduo não tóxico e não corrosivo, e, portanto, seu emprego pode ser interessante do ponto de vista ambiental.

### 2.2.1 O Fenômeno da Dispersão

O fenômeno da dispersão observado em solos naturais é caracterizado pela defloculação na presença de água relativamente pura, o que implica em alta susceptibilidade à erosão externa e interna (*piping*), dentre outros problemas de estabilidade geotécnica (ELGES, 1985). Argilas que contenham grandes quantidades de sódio adsorvido ( $\text{Na}^+$ ) tendem a ser predispostas à dispersão, já que os íons de  $\text{Na}^+$  são pouco carregados, e, portanto, fracamente aderidos aos argilominerais (CRC, 2001). Logo, a dupla camada difusa (DCD) é mais espessa se comparada a solos com a presença de íons de maior valência e, em condições úmidas ou saturadas, as forças eletrostáticas repulsivas superam as atrativas, o que resulta na defloculação e suspensão das partículas do solo. Através da substituição dos íons de sódio por cátions de maior valência, como cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) ou alumínio ( $\text{Al}^{+3}$ ), essa condição pode ser contornada ou minimizada devido à mudança na estrutura do solo para um estado mais condensado, resultado da diminuição da espessura da DCD.

Em geral, os argilominerais são carregados negativamente, isto é, são deficientes do ponto de vista iônico, e, por isso, adsorvem cátions, usualmente íons metálicos monovalentes, a fim de preservar a neutralidade (MITCHELL; SOGA, 2005). Esse déficit elétrico é oriundo, geralmente, de substituições isomórficas que ocorrem nos processos de formação desses minerais, nos quais o cátion do elemento original é substituído por outro, com manutenção da estrutura cristalográfica, como é o caso da substituição do alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) pelo magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) no octaedro da caulinita, que é responsável por desequilibrá-la ionicamente (MITCHELL; SOGA, 2005; SANTAMARINA et al., 2001). Esse processo independe do pH do meio.

A deficiência iônica também pode estar relacionada a desordens ou defeitos de caráter estrutural dos minerais, bem como às reações entre grupos funcionais desses argilominerais com íons em solução (SANTAMARINA et al., 2001). Nesse último caso, hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) dos octaedros de

alumínio ou magnésio podem estar expostas, entrar em contato com a solução intersticial e serem dissociadas ao liberar seus prótons ( $H^+$ ), o que deixa o octaedro com cargas negativas não neutralizadas (ver item 2.1) (SHARMA; REDDY, 2004). Esse processo, porém, depende do pH, pois a taxa de dissociação é proporcional a essa grandeza.

A quantidade de cargas negativas, isto é, o montante de cargas elétricas não equilibradas presentes em um solo, podem ser medidas em termos da capacidade de troca catiônica (CTC), expressa em centimol de carga por quilograma (cmol/kg) (CRC, 2001). Tal medida é um indicativo da reatividade do solo, já que revela a aptidão para adsorver e/ou “trocar” cátions com o meio e está relacionada com a densidade superficial de cargas e com a superfície específica (SHARMA; REDDY, 2004). Por isso, é função da quantidade da fração argila, tipo de argilominerais e existência de matéria orgânica, sendo que minerais como a caulinita, montmorillonita e illita apresentam valores para a CTC da ordem de, respectivamente, 3 – 15, 90 – 150 e 10 – 40 cmol/kg (USEPA, 2000).

Essa capacidade de adsorção de cátions, combinada com altos valores de superfície específica, faz com que os argilominerais tenham um comportamento físico-químico diferenciado, especialmente em ambientes hidratados (GILLOT, 1969). Lambe e Whitman (1969) afirmam que uma partícula de argila pode ser entendida como um coloide, já que, em consequência dessas características físicas, seu comportamento é controlado por forças superficiais. Nesse sentido, uma solução de argilominerais é uma suspensão coloidal (figura 4a), em que os cátions trocáveis situam-se ao redor da superfície dos minerais a fim de equilibrá-los eletricamente (GILLOT, 1969). O conjunto formado pelas cargas elétricas das partículas minerais, por esses cátions que as “orbitam” e pela água adsorvida é a dupla camada difusa (DCD), esquematizada na figura 4b, e a combinação do argilomineral com a DCD é conhecido como micela coloidal.

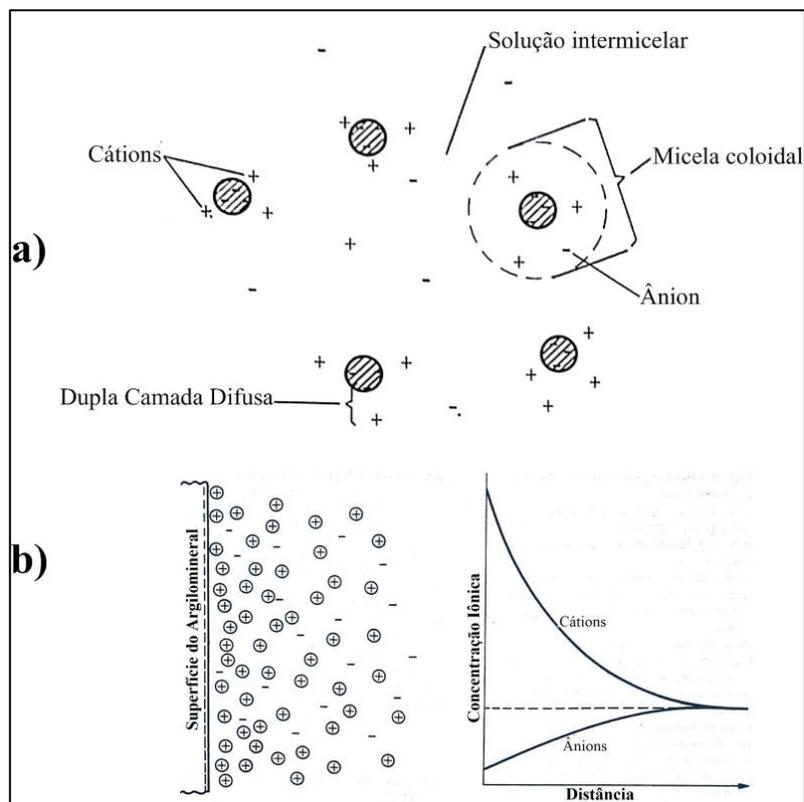


Figura 3: Dupla camada difusa e microestrutura  
(GILLOT, 1968; MITCHELL; SOGA, 2005)

Nesse contexto, a interação entre argilominerais suficientemente próximos ocorre através de forças eletrostáticas de repulsão, exercidas entre suas DCD, e de atração, constituídas pelas forças de Van der Waals (LAMBE; WHITMAN, 1969). Portanto, o tamanho da DCD influencia diretamente nesse processo interativo, sendo as forças repulsivas proporcionais ao tamanho da DCD. Logo, um estado disperso resulta de forças de repulsão e um estado agregado/floculado advém de forças atrativas entre as partículas do solo. A natureza e a extensão da dupla camada difusa dependem, então, de uma série de fatores, dentre os quais se destacam a concentração e a composição da solução eletrolítica, a densidade de cargas na superfície da partícula mineral e o pH do meio (GILLOT, 1969). Exemplificando, a extensão da DCD aumenta com a diminuição da valência dos cátions, diminuição da temperatura, aumento do pH e queda na concentração eletrolítica.

Uma maior valência resulta em uma maior força atrativa Coloumbiana entre os íons e o argilomineral, assim como um tamanho menor de íon permite maior proximidade com relação à superfície da partícula (SANTAMARINA et al., 2001). Dessa forma, cátions monovalentes aderem-se mais fracamente à extremidade mineral e, por terem menor carga elétrica, é necessário que haja maior número desses a fim de que a neutralidade elétrica seja atingida

(CRC, 2001). Nesse sentido, cátions monovalentes, como o sódio ( $\text{Na}^+$ ), tendem a formar estruturas nas quais os argilominerais se encontram mais dispersos e propensos à suspensão. Por outro lado, cátions bivalentes ou trivalentes implicam, como já mencionado, em estruturas floculadas. Daí o motivo da utilização de aditivos à base de cálcio e alumínio na tentativa de estabilização de solos dispersivos.

A concentração eletrolítica da solução intersticial afeta, também, o estado dos argilominerais, o que pode acarretar em uma condição floculada para, até mesmo, solos ricos em sódio. Em soluções salinas, a alta concentração dos íons pode forçar os cátions de sódio para junto das partículas minerais, comprimindo, assim, a dupla camada difusa de modo a agregar as partículas (CRC, 2001). Esse estado floculado pode ser mantido enquanto a solução intersticial permanecer salina, do contrário, assim que os sais são lixiviados, o solo salino agregado retorna o estado disperso.

### 2.2.2 Identificação de Solos Dispersivos

Originalmente, associava-se o fenômeno da dispersibilidade a solos formados em regiões áridas e semiáridas, além de locais com solos fortemente alcalinos. No entanto, tal fenômeno já foi verificado em solos com distintas origens e naturezas, não podendo ser relacionado, portanto, a algum tipo específico de origem geológica (KNODEL, 1991). Em campo, o reconhecimento de solos dispersivos é meramente visual e envolve a identificação de zonas de erosão em forma de canais e túneis (erosão interna/*piping*), juntamente com a turbidez excessiva de fontes de água parada e escassez de vegetação devido à salinidade do solo (ELGES, 1985). Contudo, embora tais fatores sejam um forte indicativo acerca da dispersibilidade, não são conclusivos e devem ser confirmados em ensaios adicionais.

Em laboratório, os resultados de ensaios de distribuição granulométrica, limites de Atterberg e ensaio de compactação não são definitivos em atestar o potencial dispersivo de um solo, sendo sua utilização inócua na distinção entre uma argila dispersiva e outra não (MITCHELL; SOGA, 2005). Como exemplo, têm-se os diagramas representados na figura 4, os quais demonstram a não existência de correlação entre o potencial dispersivo atestado por ensaio específico (*Pinhole Test*) e os limites de consistência verificados em solos distintos. Por esse motivo, há ensaios específicos, e normatizados, utilizados na identificação de solos com potencial dispersivo. Dentre esses, destacam-se o *Crumb Test* descrito na ASTM D 6572 (ASTM, 2013a) e na NBR

13601 (ABNT, 1996a), o *Pinhole Test* da ASTM D 4667 (ASTM, 2013b) e NBR 14114 (ABNT, 1998), teor de sais presentes na água intersticial (TDS) dado pela NBR 13603 (ABNT, 1996d) e a análise de sedimentometria comparativa descrita pela ASTM D 4221 (ASTM, 2018a) e NBR 13602 (ABNT, 1996c).

Além disso, é interessante a determinação da capacidade de troca catiônica do solo (CTC), descrita pela ASTM D 7503 (ASTM, 2018b) e a caracterização mineralógica da fração argilosa através de ensaios de difração de raios X, conforme procedimentos descritos, dentre outros, por Bush et al. (1966) e Velde (1992). Dessa forma, obtêm-se uma descrição mais ampla da microestrutura do solo, de modo a identificar as fases minerais presentes, assim como os cátions a elas adsorvidos.

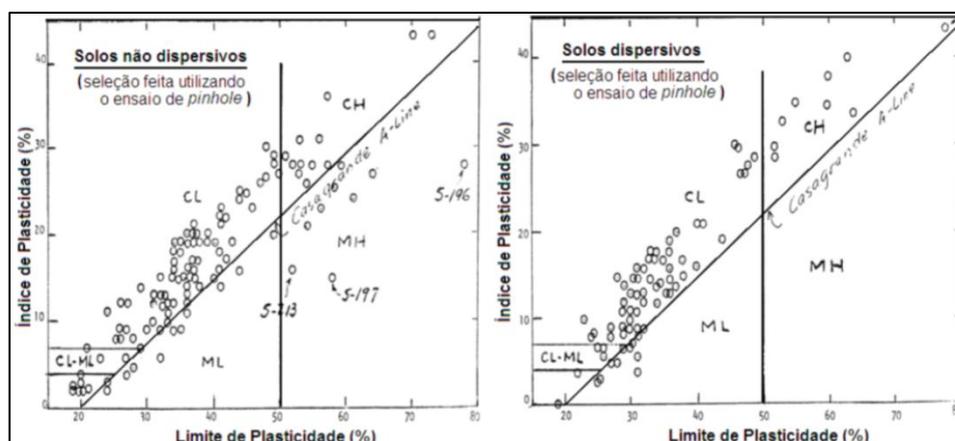


Figura 4: Comparação entre limites de consistência e dispersibilidade  
(adaptado SHERARD et al., 1976)

### 2.2.2.1 Crumb Test

O *Crumb Test*, ou ensaio do torrão de solo, é um procedimento bastante simples que consiste na imersão, em um béquer com 250 ml de água destilada, de pequenos torrões (~10 mm de diâmetro) a fim de se verificar o comportamento devido ao grau de reatividade do solo quando hidratado (ELGES, 1985). Segundo a NBR 13601 (ABNT, 1996b), o comportamento observado no teste pode ser classificado em quatro graus distintos, sendo a figura 5 uma representação de cada um desses níveis:

- a) Não dispersivo (grau 1): pode haver absorção e deposição do solo no fundo do béquer. No entanto, não se verifica qualquer sinal de turvação do líquido, isto é, não há colóides em suspensão;
- b) Levemente dispersivo (grau 2): existem pequenos índicos de turvação na água, mais próximos ao torrão do solo;

- c) Moderadamente dispersivo (grau 3): toda a água está turva e há finos veios de coloides em suspensão;
- d) Fortemente dispersivo (grau 4): a nuvem coloidal é caracterizada por ser uma película fina que cobre todo o fundo do béquer e a água está turva.

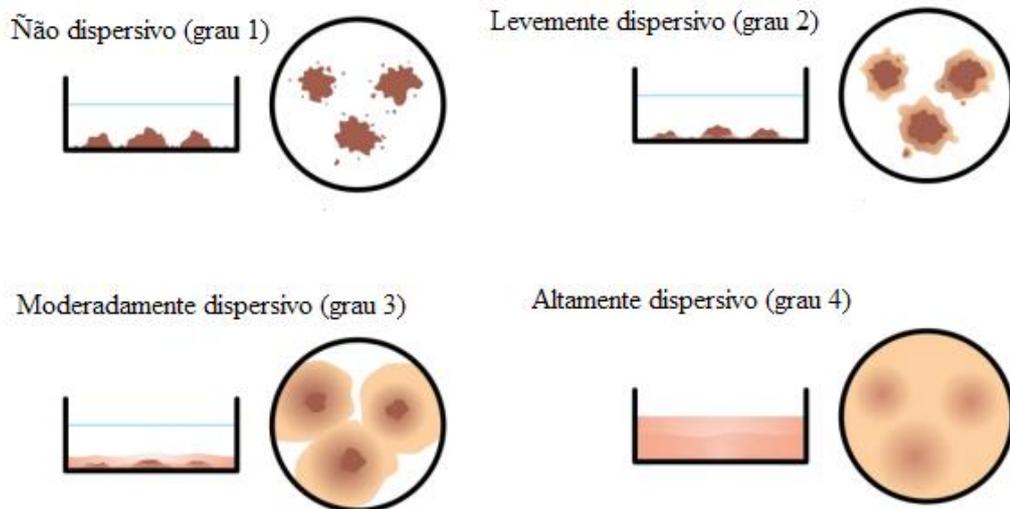


Figura 5: Representação esquemática dos graus de dispersibilidade no *crumb test* (adaptado de IPS, 2016)

Em geral, esse ensaio é um bom indicativo do potencial dispersivo de um solo, entretanto não é absolutamente conclusivo, especialmente para solos ricos em caulinita (ELGES, 1985). Logo, ensaios complementares devem ser feitos.

#### 2.2.2.2 Pinhole Test

O *Pinhole Test*, ou ensaio do furo de agulha, consiste na avaliação da vazão e turbidez da água que entra por um furo de 1 mm de diâmetro, feito em uma amostra de solo cilíndrica padronizada, conforme a representação esquemática exposta na figura 6. Quatro cargas hidráulicas distintas, correspondentes a 50, 180, 380 e 1020 mm, podem ser empregadas de acordo com a magnitude da vazão e as condições de turbidez observadas durante o ensaio (ABNT, 1998).

O corpo de prova utilizado pode ser constituído pelo solo natural indeformado ou remoldado e o ensaio é realizado conforme os procedimentos apresentados no fluxograma da figura 59 (ver item 6.7). Nesse, nota-se que a vazão da água que sai da amostra, bem como a turbidez dessa e o diâmetro do furo de saída, são parâmetros chave na classificação do solo quanto seu potencial dispersivo. Ainda, de acordo com Elges (1985), esse ensaio tem sido aceito como um bom

indicativo para solos dispersivos, pois tende a simular com certa fidedignidade o fenômeno de *piping* observado em campo em solos dessa natureza.

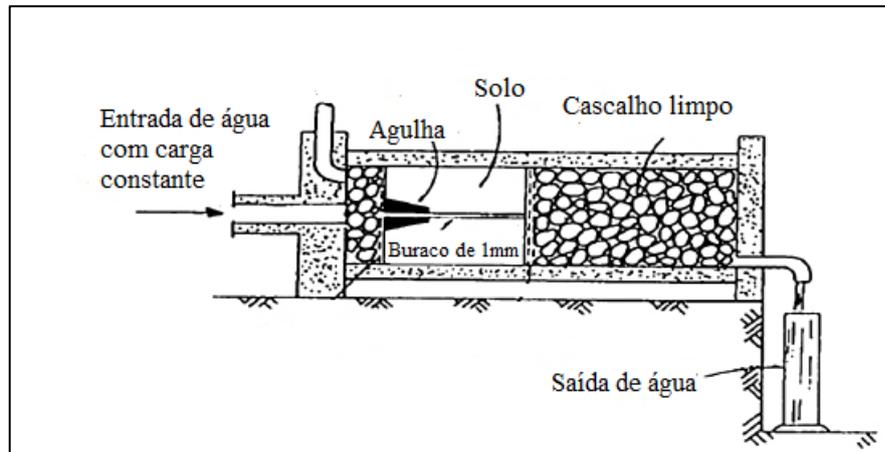


Figura 6: Esquema do *pinhole test*  
(adaptado de SHERARD et al., 1976)

### 2.2.2.3 Sais Dissolvidos na Água Intersticial

Apesar da capacidade de troca catiônica (CTC) e, por conseguinte, da porcentagem de sódio trocável (PST), serem ótimos indicativos a respeito do potencial dispersivo de um solo, não são de simples nem, tampouco, rápida determinação (MITCHELL; SOGA, 2005). Por outro lado, a avaliação do teor de sais dissolvidos (TDS) tem menor grau de complexidade e envolve a determinação do total de sais dissolvidos na água intersticial do solo, extraído de um solo com um teor de umidade próximo ao limite de liquidez, por meio de uma análise química por espectrofotometria. Portanto, pode-se expressar o TDS, em cmol/kg, como a soma das quantidades dos sais apresentados na relação 1 e, também, é possível obter a porcentagem de sódio (PS) presente, através do quociente entre a quantidade de sódio correspondente e o total de sais dissolvidos (relação 2), bem como a razão de absorção de sódio (RAS ou SAR) conforme a relação 3.

$$\text{TDS} = \text{Na}^+ + \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+ \quad (1)$$

$$\text{PS} = 100 \times \text{Na}^+ / \text{TDS} \quad (2)$$

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})^{0,5} \quad (3)$$

Nesse sentido, Sherard et al. (1976) propõe uma relação entre PS e TDS de modo a representar o comportamento do solo quanto aos padrões de dispersão observados. Tal correspondência é exposta na figura 7, a seguir.

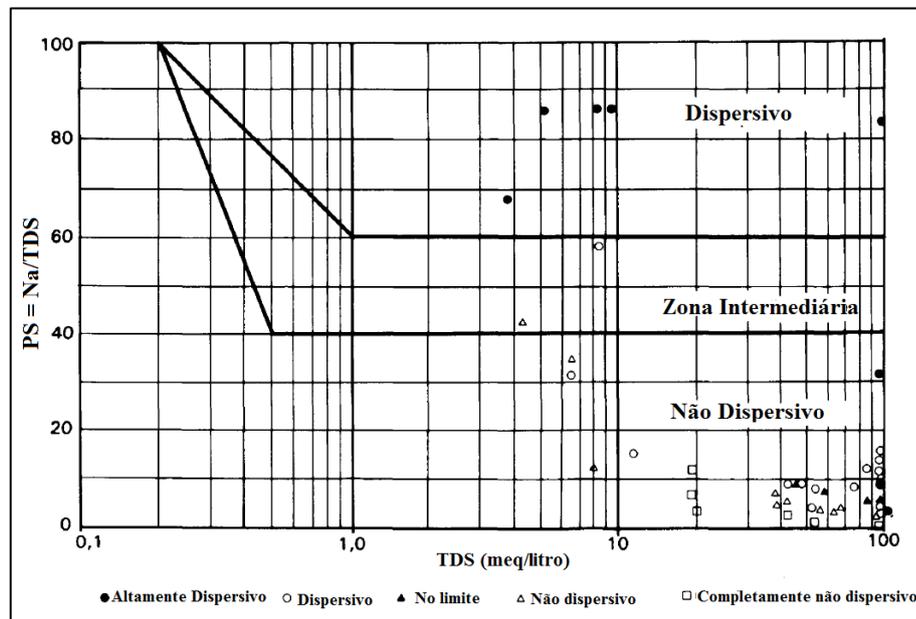


Figura 7: Relação entre dispersão e a presença de sais dissolvidos (SHERARD et al., 1976)

#### 2.2.2.4 Sedimentometria Comparativa

Esse ensaio consiste na comparação entre as distribuições granulométricas obtidas por um ensaio de sedimentação regular, isto é, com o uso de defloculante conforme a ASTM D 7928 (2017) ou a NBR 7181 (ABNT, 1988), e outro sem a utilização de defloculante (UMESH et al, 2011). A porcentagem de dispersão (PD) é, portanto, uma razão entre as massas das partículas com diâmetro inferior a 0,005 mm determinadas, respectivamente, pelo ensaio não usual (sem defloculante) e pelo convencional (com uso de defloculante). Maiores valores para a PD indicam, pois, um maior potencial dispersivo no solo e, também, a similaridade entre o comportamento do solo com ou sem o uso de defloculante.

#### 2.2.2.5 Capacidade de Troca Catiônica

A capacidade de troca catiônica (CTC) observada nos solos advém, basicamente, da deficiência elétrica dos argilominerais e da presença de matéria orgânica, sendo um indicativo da quantidade de cátions necessária para neutralizar uma parcela unitária de solo (MITCHELL; SOGA, 2005). A sua determinação envolve a substituição dos cátions adsorvidos às partículas

do solo por outros conhecidos através da aplicação de um reagente, quimicamente caracterizado, ao solo seco com posterior mistura, filtração e/ou centrifugação (SHARMA; REDDY, 2004). Esse processo é repetido algumas vezes até que se possam extrair os novos cátions adsorvidos no solo e, assim, determinar a CTC.

A CTC é diretamente proporcional à superfície específica e à densidade de cargas superficial, o que a torna, conseqüentemente, uma maneira de mensurar a reatividade das partículas do solo (SANTAMARINA et al., 2001). A substituição/troca dos íons adsorvidos ocorre de acordo com a disponibilidade e condições do meio e segue uma ordem de preferência (4) que dependa da valência e do tamanho dos cátions (LAMB; WHITMAN, 1969; MITCHELL; SOGA, 2005).



Pode-se, ainda, determinar a porcentagem de sódio trocável (PST) através da razão entre a quantidade de íons  $\text{Na}^+$  adsorvidos e a CTC. Nesse contexto, Mitchell e Soga (2005) afirmam que a PST é um bom parâmetro para indicar a estabilidade de sistemas argilosos na presença de água, sendo que PST superiores a 2% indicam alta suscetibilidade à dispersão. A figura 8 apresenta um diagrama, em função da PST e da CTC, proposto por Harmse e Gerber (1988) para identificar solos dispersivos. Os dados utilizados nesse diagrama são de Bell e Maud (1994).

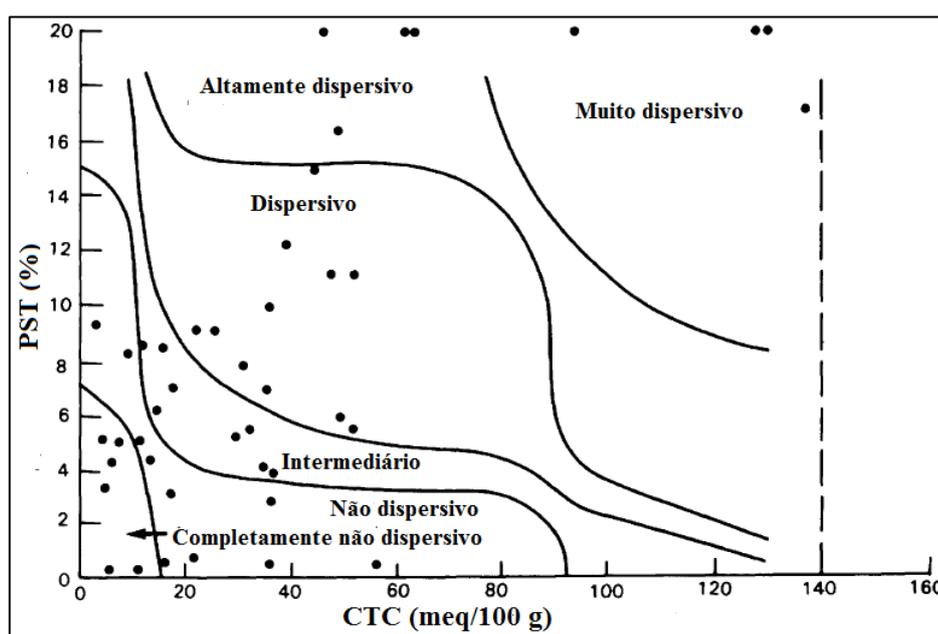


Figura 8: Diagrama para identificação de solos dispersivos  
(HARMSE; GERBER, 1988; BELL; MAUD, 1994)

### 2.2.2.6 Identificação dos Argilominerais via DRX

A difração de raios-X (DRX) é a técnica mais eficaz na identificação das fases minerais presentes na fração argilosa do solo, já que a ordem de grandeza do comprimento de onda do sinal emitido e difratado é da mesma magnitude do espaçamento atômico entre os planos cristalinos dos argilominerais ( $\sim 1 \text{ \AA}$ ) (MITCHELL; SOGA, 2005). Portanto, ao se incidir um feixe de raios-X com um comprimento de onda  $\lambda$  a um ângulo de incidência  $\theta$  em um material cristalino, haverá um pico de intensidade relativo ao plano cristalino  $h, k, l$ , cuja distância interplanar é dada por  $d_{hkl}$ , de modo a satisfazer a lei de Bragg (eq 1). Logo, podem-se identificar fases minerais presentes em uma amostra desconhecida a partir da comparação entre o difratograma obtido em um ensaio com padrões catalogados por entidades como a American Society for Testing Materials (ASTM) ou a Inorganic Crystal Structure Database (ICSD).

$$n\lambda = 2d_{hkl} \text{ sen } \theta \quad (\text{eq. 1})$$

Sendo:

n: número inteiro de ondas

$\lambda$ : comprimento de onda incidente

$d_{hkl}$ : distância interplanar

$\theta$ : ângulo de incidência

No entanto, a despeito da aparente simplicidade, a identificação dos argilominerais presentes em um solo é bastante complexa em virtude da presença de partículas minerais maiores (não argilominerais), como quartzo, feldspato e carbonatos, que podem mascarar o sinal difratado dos argilominerais (MOORE; REYNOLDS, 1997). Soma-se a isso o diminuto tamanho das partículas de argila, as quais, mesmo quando isoladas, tendem a produzir picos de fraca intensidade em amostras não orientadas (VALDE, 1992). Logo, a identificação das fases minerais em uma argila deve ser precedida por um processo prévio de separação da fração de interesse, seguida pela correta preparação da porção de material escolhido para o ensaio.

Em solos naturais, a separação da fração argilosa consiste no isolamento das partículas com tamanho inferior a, geralmente,  $4 \mu\text{m}$  ou  $2 \mu\text{m}$ , via sedimentação por centrifugação ou filtração através de sucção à vácuo com a utilização de papéis filtros especiais (VALDE, 1992). Ainda, é importante que haja a remoção da matéria orgânica e de óxidos de ferro, pois ambos podem prejudicar a identificação das fases minerais já que inibem a dispersão das partículas (MOORE;

REYNOLDS, 1997). O aumento da intensidade do sinal difratado é alcançado mediante a utilização de amostras nas quais os argilominerais se encontram orientados de forma sobreposta sobre o mesmo plano, o que magnifica a intensidade cristalográfica da direção paralela à estrutura foliar (VALDE, 1992). Conseqüentemente, a identificação dos argilominerais é feita por meio do espaçamento entre os planos cristalográficos paralelos à estrutura foliar, isto é, via séries do espaçamento basal (0 0 1), o que inibe a identificação através de outros planos que seria possível em amostras não orientadas.

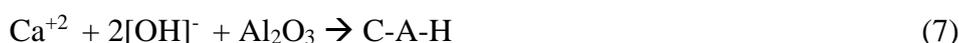
## 2.3 REAÇÕES POZOLÂNICAS

Conceitualmente, a compreensão dos mecanismos de interação que desencadeiam reações de cimentação em solos estabilizados quimicamente com materiais pozolânicos deve, necessariamente, estar embasada em conceitos básicos relativos às reações pozolânicas. Nesse sentido, pozolanas são, essencialmente, materiais inorgânicos silico-aluminosos (naturais ou artificiais) que, quando combinados com óxido de cálcio ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ) em um ambiente hidratado, endurecem em decorrência da produção de compostos cimentícios (MASSAZA, 2004). Essas reações ocorrem entre as fases ativas da pozolana e o óxido de cálcio, sendo caracterizadas pela quantidade total e taxa de consumo desse e são influenciadas pelas características químicas, físicas e mineralógicas intrínsecas à pozolana, assim como por condições ambientais externas ao sistema (MASSAZA, 1992). Nesse contexto, Zampieri (1991) destaca que as fases ativas apresentam estrutura amorfa e/ou minerais instáveis ante ao sistema alcalino hidratado e, por isso, a formação de compostos ligantes pode ser entendida como uma busca por equilíbrio físico-químico nas novas condições impostas aos materiais.

Pozolanas naturais compreendem os materiais que, para fins de uso, não necessitam, excetuando-se a moagem, qualquer tipo de processamento adicional que visem modificações químicas e/ou estruturais (MASSAZA, 2004). As artificiais, por outro lado, passam por esse tipo de processamento e, nessa categoria, enquadram-se resíduos como a cinza volante, oriunda da queima do carvão mineral, a cinza da casca de arroz, argilominerais calcinados, dentre outros tantos resíduos ou materiais processados.

Muito embora a estrutura (cristalina ou amorfa) e a proporção entre os componentes químicos de distintas pozolanas variem, os produtos cimentantes advindos das reações dessas com cal, em um ambiente hidratado, tendem a ser muito parecidos, isto é, são basicamente aluminatos

de cálcio hidratado (C-A-H) e silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) (MASSAZA, 2004). Genericamente, essas reações podem ser expressas conforme as relações 5, 6 e 7, na qual a primeira representa a dissociação do óxido de cálcio na água e as seguintes expressam, respectivamente, as reações desse com a sílica e a alumina, com conseqüente a formação de C-S-H e C-A-H.



Onde: C = CaO, S = SiO<sub>2</sub>, A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e H = H<sub>2</sub>O

Ainda, é usual a formação de outros compostos, além de aluminatos e silicatos de cálcio hidratados, uma vez que as presenças de óxidos de ferro, sais e óxidos sulfatados são comuns dentre as pozolanas (MATEOS, 1961). Nesse sentido, a formação de sulfo-aluminatos de cálcio, como a etringita ou a taumasita, é possível mediante a reação de compostos sulfatados com a alumina e o hidróxido de cálcio (PUPPALA et al., 2005). Em determinados sistemas, porém, a constituição de tais minerais pode ser um fenômeno deletério em decorrência do seu mecanismo crescimento e alta capacidade de adsorção de água, o que pode implicar em uma expansão indesejada (NAIR; LITTLE, 2011; MITCHELL; DERMATAS, 1992).

Como já mencionado, a atividade pozolânica de um material está ligada à máxima quantidade de hidróxido de cálcio que esse pode combinar em uma reação, expressa em termos da relação gramas de Ca[OH]<sub>2</sub> por 100 g de pozolana, e à taxa com que essa reação se desenvolve ao longo do tempo. Aspectos relativos à pozolana, como quantidade de fases ativas e superfície específica, fatores internos ao sistema, como relação pozolana/cal e teor de umidade, e circunstâncias ambientais externas, como temperatura de cura e tempo de cura, influenciam diretamente na atividade pozolânica e, portanto, no desenvolvimento das reações pozolânicas (MASSAZA, 2004).

Em curto prazo, a superfície específica (SSA) está intimamente relacionada à atividade pozolânica, enquanto que para um horizonte maior de tempo, é a quantidade disponível de sílica e alumina que exerce maior influencia no desenvolvimento das reações cimentantes. Há uma relação íntima entra a quantidade pozolana/cal, o teor de umidade e a atividade pozolânica, a

qual é melhor compreendida quando os materiais cimentantes estão imersos em meios praticamente inertes, como é caso de solos arenosos (MATEOS, 1961; MASSAZA, 2004; WINTER, 2018). Nesses, assumindo-se que há quantidade suficiente de água para o desenvolvimento das reações, dentro de certos limites, maiores teores de pozolana e de cal implicam em maior atividade pozolânica e, conseqüentemente, melhor resposta mecânica (DALLA ROSA, 2009).

Da mesma forma a temperatura, até certo ponto, atua como um catalisador das reações pozolânicas, aumentando o consumo de óxido de cálcio para o desenvolvimento dos produtos cimentantes (CONSOLI et al., 2014; SALDANHA, 2014). Maiores tempos de cura, igualmente, acarretam em maior consumo de óxido de cálcio e, portanto, no desenvolvimento dos compostos ligantes C-S-H e C-A-H.

## 2.4 REAÇÕES NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS ARGILOSOS

Muito embora os argilominerais, em sua forma natural, não são considerados materiais pozolânicos sob a ótica da ciência do concreto/cimento, já que possuem baixa atividade pozolânica e características tidas como deletérias quando incorporados ao cimento, como alta demanda por água e grande capacidade de sorção, eles são reativos e sensíveis a sistemas hidratados que incorporem materiais à base de cálcio (HE et al., 2000). Ainda, os mecanismos de interação ocorridos nesses sistemas, em pese que complexos, manifestam-se em solos constituídos por, no mínimo, 10% de argilominerais (MÜLLER, 2005). Nesse sentido, a compreensão conceitual dessas formas de interação é essencial a fim de que se entendam os processos de estabilização de solos dessa natureza quando utilizados materiais à base de cálcio e/ou pozolanas.

### 2.4.1 Solo – Cal

O emprego da cal como aditivo na estabilização química de solos que contenham quantidade suficiente da fração argilosa tem sido usado há mais de dois mil anos de forma prática e efetiva, podendo ser considerada uma das técnicas de construção mais antigas de que se tem conhecimento (HERRIN; MITCHELL, 1961). No entanto, apesar da existência de publicações na área a partir do início do século XX, particularidades acerca dos processos da reação solo – cal, bem como dos produtos dessa, passaram a ser melhor compreendidos apenas na segunda

metade da década de 1950 em decorrência do uso de técnicas como difração de raios-x e microscopia eletrônica (DIAMOND et al., 1964)

Em geral, a mistura de um solo úmido com cal desencadeia uma série de reações químicas com distintos tempos de duração. As rápidas, cujo processo tende a perdurar por apenas algumas horas após a mistura, compreendem as trocas iônicas e o processo de floculação, sendo responsáveis por mudanças nas características granulométricas, de plasticidade e de trabalhabilidade do solo (HERZOG; MITCHELL, 1963). As lentas, em contrapartida, podem estender-se por anos e correspondem às reações de cimentação, ao processo de carbonatação e à formação de novos minerais, estando relacionados ao ganho contínuo de resistência do material estabilizado (TRB, 1987).

Mediante condições ambientais específicas, os argilominerais adsorvem cátions, em geral íons metálicos monovalentes, em sua superfície com o intuito de balancear a deficiência iônica de suas partículas (MITCHELL; SOGA, 2005). Naturalmente, a valência desses cátions influencia diretamente no comportamento da argila, pois esses influem na magnitude das forças eletrostáticas existentes entre as micro-partículas do solo. Nesse contexto, as reações de troca iônica caracterizam-se pela substituição desses íons metálicos monovalentes pelos íons de cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), de maior valência, seguindo uma ordem preferencial (ver item 2.4.5) (HERRIN; MITCHELL, 1961; TRB, 1987). Esses processos implicam, portanto, em uma transformação na dinâmica das forças eletrostáticas do solo, pois há uma mudança na carga elétrica dessas com conseqüente aumento das forças atrativas aglomeração e floculação das partículas, induzindo a uma modificação na distribuição granulométrica e redução da plasticidade (MÜLLER, 2005).

As reações de cimentação, por outro lado, tendem a ocorrer lentamente e podem ser caracterizadas como pozolânicas em função da natureza do sistema solo-cal e dos produtos oriundos das reações, isto é, há a precipitação de compostos cimentantes hidratados em um ambiente alcalino no qual há a reação da cal dissolvida com os argilominerais e outros possíveis minerais silico-aluminosos presentes no solo (MÜLLER, 2005). Com a adição de quantidades suficientes de cal ao solo úmido, há uma progressiva dissolução e dissociação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ) na água intersticial, com conseqüente elevação do pH do meio (~12,4) e aumento da reatividade dos aluminatos e silicatos da fração argilosa (HERZOG; MITCHELL, 1963).

Desse modo, verifica-se uma progressiva dissolução dos argilominerais (ou de parte desses) devido ao ataque químico ocorrido nesse ambiente fortemente alcalino, seguido de uma gradual precipitação de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e de aluminatos de cálcio hidratado (C-A-H) responsáveis por gradual melhoria das características mecânicas do solo estabilizado, conforme exposto de forma simplificada e qualitativa nas relações 5, 6 e 7 apresentadas no item 3.1 (DIAMOND et al., 1964; MÜLLER, 2005).

A natureza dos produtos dessas reações pozolânicas é extremamente complexa, pois uma série de variações estruturais podem ocorrer sob aspectos distintos que envolvem, por exemplo, condições do solo, tipo e quantidade de cal empregada, teor de umidade, temperatura, pH natural, dentre outros fatores. De maneira geral, no entanto, os silicatos de cálcio hidratados tendem a ser compostos fracamente cristalinos, cujas fases são pouco distinguíveis via difração de raios-X (DRX), e os aluminatos de cálcio hidratados tendem a apresentar fases com maiores níveis de cristalização (DIAMOND et al., 1964).

O processo de carbonatação, por sua vez, dá origem ao carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) por meio da reação entre o óxido de cálcio ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ) e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente na atmosfera e nos vazios do solo (HERZOG; MITCHELL, 1963). O  $\text{CaCO}_3$ , apesar de ser um material cimentante capaz de unir as partículas do solo, tem menor resistência se comparado ao C-S-H e ao C-S-A e pode ser entendido como deletério às reações pozolânicas, uma vez que o  $\text{Ca}[\text{OH}]_2$  consumido na sua produção não é utilizado no desenvolvimento dessas reações (HERRIN; MITCHELL, 1961).

### **2.4.2 Solo – Cimento**

Genericamente, o cimento Portland é constituído por quatro fases minerais principais, as quais correspondem a silicatos e aluminatos de cálcio, além de uma pequena fração (< 3,5%) de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), sendo esse último responsável por evitar o endurecimento precoce da mistura de cimento quando hidratada. Alita, ou silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), é o principal constituinte do cimento Portland (até 70%), seguido de Belita, ou silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ) (até 30%) (TAYLOR, 1997). O primeiro é extremamente relevante no desenvolvimento de resistência até os 28 dias de cura, já o segundo pouco contribui nessa fase, sendo importante, porém, para tempos de cura mais longos. Aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) e ferrita, ou ferro alumina tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ), aparecem como minerais secundários na formação do cimento Portland,

não ultrapassando 15% de sua composição e apresentam uma taxa de reação elevada quando hidratados (TAYLOR, 1997). Geralmente, a porcentagem de óxido de cálcio livre nos cimentos é muito baixa, não ultrapassando 5 %.

As reações de hidratação do cimento Portland em um sistema água-cimento, bem como seus produtos, são relativamente bem caracterizados e envolvem, individualmente, a hidratação das fases minerais constituintes com a formação de silicatos de cálcio hidratados, aluminatos de cálcio hidratado, ferrita, alumino-sulfatos e a liberação de compostos como o óxido de cálcio (MOH, 1965; TAYLOR, 1997). As reações de  $C_3S$  e  $C_2S$ , a despeito de ocorrerem em taxas distintas, comportam-se de modo muito similar e implicam a formação de C-S-H pouco cristalino e  $Ca(OH)_2$ . De forma semelhante, distintas fases de C-A-H (cristalinas ou não) podem ser formadas por meio da hidratação do  $C_3A$  e do  $C_3AF$ , assim como outros compostos (minerais ou amorfos) de menor relevância para a mistura.

Um sistema solo argiloso-cimento, no entanto, não pode ser idealizado da mesma forma que um sistema solo inerte-cimento, no qual os compostos minerais do cimento reagem com a água e originam materiais cimentícios hidratados que aglomerariam as partículas inalteradas do solo (HERZOG; MITCHELL, 1963). Dada à natureza e reatividade dos argilominerais, Herzog e Mitchell (1963) e Moh (1965) comprovam que esses participam de processos de cimentação tidos como secundários, os quais se desenvolvem a partir do óxido de cálcio liberado nas reações primárias de hidratação, isto é, aquelas que originam os produtos cimentantes usuais.

Conceitualmente, esse processo secundário assemelha-se às interações solo-cal previamente descritas, as quais se iniciam com a floculação das partículas de argila devido à dissolução do óxido de cálcio liberado nas reações primárias. Progressivamente, há, também, um aumento no pH do sistema com consequente ataque alcalino aos argilominerais, o que implica a dissolução da sílica e da alumina e combinação dessas com os íons de cálcio, dando origem, assim, a C-S-H e C-S-A secundários que se combinam às partículas aglomeradas dos argilominerais, aumentando, desse modo, a resistência mecânica do sistema como um todo (HERZOG; MITCHELL, 1963). Logo, a estrutura idealizada de um solo argiloso tratado com cimento consiste em um esqueleto de material cimentante, composto pelos produtos das reações primárias e secundárias, embebido em uma matriz de solo, na qual alguns dos argilominerais podem estar alterados em decorrências das reações secundárias.

### 2.4.3 Solo – Cal – Pozolana

Mateos (1961) afirma que, quando cal e pozolana são adicionadas a um solo úmido, uma fração da cal pode reagir com as partículas do solo, outra porção com dióxido de carbono presente no ar e na água intersticial e o restante com a pozolana. Nesse sentido, em comparação com um sistema solo-cal, tem-se um maior nível de complexidade, pois pode haver certa competição pelo uso da cal entre o solo e a pozolana e, além disso, a quantidade de água pode não ser suficiente para o completo desenvolvimento do potencial pozolânico do material. Nesse contexto, além da cal e da pozolana, os argilominerais demonstram grande avidez por água, o que implica em uma incompatibilidade entre a umidade ótima, aferida através de um ensaio de compactação, e a umidade mínima necessária para o completo desenvolvimento das reações pozolânicas, isto é, o primeiro teor de umidade pode estar muito aquém em relação ao segundo (MATEOS, 1961).

## 2.5 VARIÁVEIS DETERMINANTES NO COMPORTAMENTO SOLO-CAL-POZOLANA

A resposta mecânica de solos estabilizados pozolanicamente pode ser expressa por uma série de fatores de baixa complexidade tais como resistência à compressão simples ( $q_u$ ), resistência à tração por compressão diametral ( $q_{t,d}$ ), resistência à tração por flexão ( $q_{t,f}$ ), módulo cisalhante inicial/rigidez inicial ( $G_0$ ), perda de massa verificada em ciclos de durabilidade (molhagem – secagem escovação e/ou gelo – degelo – escovação), dentre outros. Ensaio com maior nível de complexidade, como o triaxial, triaxial cíclico e de fadiga por aplicação de carregamentos cíclicos propiciam a obtenção de outros parâmetros de comportamento tais como resistência ao cisalhamento, degradação da rigidez do material, módulo de resiliência (MR) e vida de fadiga.

No entanto, necessariamente, as proporções de materiais empregados na estabilização de uma argila dispersiva (pozolana e cal), assim como energia de compactação, umidade de moldagem, tempo, temperatura e método de cura influem no comportamento do mecânico. Nesse sentido, faz-se necessária a abordagem dos tópicos citados.

### 2.5.1 Efeito da cal

Como já citado, o efeito imediato da adição de cal em um sistema solo argiloso-cal é verificado através das mudanças nas características granulométricas, de plasticidade, de trabalhabilidade e redução do potencial expansivo do solo em decorrência das reações de floculação e aglomeração (HERZOG; MITCHELL, 1963). Em longo prazo, assumindo que há quantidade suficiente de cal reativa e condições mínimas de hidratação, processam-se as reações pozolânicas com conseqüente precipitação de compostos cimentantes (TRB, 1987). Por outro lado, em um sistema solo argiloso-cal-pozolana, devidamente hidratado, a cal irá reagir tanto com os argilominerais do solo quanto com a pozolana, sendo as reações pozolânicas entre a cal e a pozolana possivelmente mais rápidas em função da disponibilidade imediata de materiais silico-aluminosos.

O processo de dosagem relativo ao emprego da cal envolve, necessariamente, testes de laboratório a fim de se verificar a quantidade mínima necessária para que se alcancem as modificações almejadas nas propriedades do solo tratado. Nesse sentido, com base na TRB (1987) e em Rogers e Glendinning. (1996), enumeram-se os seguintes aspectos que podem ser considerados no estabelecimento dessa porção mínima:

- a) estagnação do valor do índice de plasticidade (IP) com a crescente adição de cal a partir de um ponto conhecido como ponto de fixação da cal (*lime fixation point*), a partir do qual o excesso de cal estaria disponível para desenvolvimento das reações pozolânicas;
- b) redução aceitável no potencial de expansibilidade do solo tratado;
- c) parâmetros almejados de resistência e desempenho alcançados;
- d) estabilização do pH da mistura até um valor limite, a partir do qual o acréscimo de hidróxido de cálcio não modificaria o pH da mistura, estando disponível para consumo nas reações pozolânicas (*Initial Consumption of Lime Method*). Em geral, esse valor de pH é superior a 12.

Conseqüentemente, verifica-se que valores usuais para o teor de cal enquadram-se entre 3% e 10% em relação à quantidade de material seco da mistura (HILT; DAVIDSON, 1960; OSINUBI, 1998; KHATTAB et al., 2007; CONSOLI et al., 2011; CONSOLI et al., 2016; CONSOLI et al., 2017a; 2014; JHA; SIVAPULLAIAH, 2018; BALDOVINO et al., 2018). No entanto, um desempenho satisfatório do solo estabilizado só pode, eventualmente, ser alcançado mediante a utilização de teores superiores aos obtidos pelas metodologias supracitadas.

### 2.5.2 Efeito da Pozolana

Na estabilização de um solo, a adição de uma pozolana (e.g. pó de vidro moído, cinza de casca de arroz e/ou cinza volante), combinada a um ativador alcalino (hidróxido de cálcio), visa à melhoria das características mecânicas desse em decorrência da formação de uma matriz cimentícia oriunda das reações entre o hidróxido de cálcio e as frações sílico-aluminosas do material pozolânico adicionado. Logo, obtêm-se produtos finais com características conceitualmente comparáveis às decorrentes das reações de hidratação do cimento Portland (MASSAZA, 2004). Nesse contexto, a quantidade de pozolana adicionada deve ser suficiente para proporcionar tal aperfeiçoamento sem, no entanto, inviabilizar a exequibilidade técnica e econômica do projeto devido à adição de quantidades exageradas de material (>50%).

As técnicas relativas à dosagem e inspeção de solos tratados com cimento Portland estão documentadas e normatizada desde o final dos anos 1930 (NORLING, 1963; PCA, 2001). O mesmo não ocorre, no entanto, quando a estabilização se dá com o uso de materiais pozolânicos alternativos, especialmente aqueles que correspondem a resíduos, já que são poucas as normas específicas nesse sentido, como a ASTM C 593 (ASTM, 2011). Alternativamente, porém, é viável a utilização das normas, parâmetros mecânicos (resistência e deformabilidade) e de desempenho (durabilidade) aplicáveis às técnicas que utilizam o cimento Portland, pois, como já mencionado, o sistema estabilizado tende a se comportar de forma semelhante já que os produtos finais das reações são quimicamente muito parecidos.

Ao se considerar um sistema solo argiloso-cal-pozolana, devidamente hidratado, o aumento na quantidade de pozolana implicará na disponibilidade praticamente imediata de sílica e/ou alumina e, conseqüentemente, na formação de uma maior quantidade de compostos cimentantes em um prazo mais curto se comparado ao sistema solo argiloso-cal. Da mesma forma, porém com necessidade de uma menor magnitude nos níveis de hidratação, o mesmo se dá para sistemas formados por solos não argilosos-cal-pozolana. Nesse contexto, as quantidades usuais de pozolana empregada, geralmente em relação à massa de solo seco, variam entre 10% e 40% (MATEOS, 1961; CONSOLI et al., 2001; al-SWAIDANI et al., 2016; SILVANI et al., 2016; CONSOLI et al., 2017a; CONSOLI et al., 2018a; JHA; SIVAPULLAIAH, 2018; LIU et al., 2018).

### 2.5.3 Efeito da Compacidade da Mistura

O aumento na compacidade de solos estabilizados implica, necessariamente, a diminuição dos vazios, com consequente aumento do contato entre os grãos do solo (maior intertravamento), redução da permeabilidade até valores próximos a umidade ótima e aumento de resistência mecânica. Observa-se que com o aumento da energia de compactação ocorre o decréscimo da umidade ótima, uma vez que há menor número de vazios a serem preenchidos por água.

Nesse contexto, a compacidade do solo estabilizado pode ser expressa em termos da porosidade ( $\eta$ ) a qual, quando relacionada à resistência à compressão simples ( $q_u$ ), por exemplo, tende a apresentar uma relação aproximadamente linear (ou potencial) conforme apresentado por Consoli et al. (2009a, 2009b) e exemplificado nas figuras 9 e 10, abaixo. De maneira geral, portanto, o aumento no peso específico aparente seco da mistura provoca um aumento de resistência mecânica (VIANA DA FONSECA et al., 2009; al-SWAIDANI et al., 2016; SILVANI et al., 2016; CONSOLI et al., 2017a; CONSOLI et al., 2018a; JHA; SIVAPULLAIAH, 2018; LIU et al., 2018).

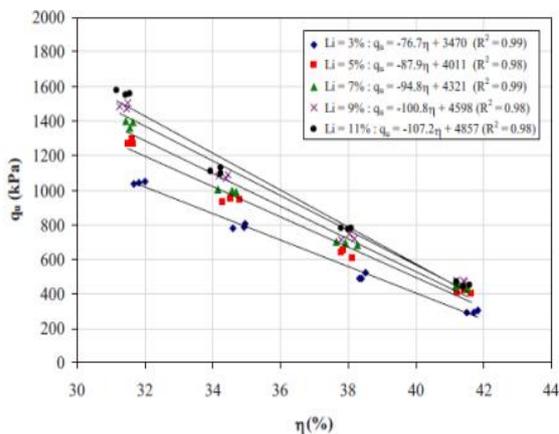


Figura 9: Relação  $\eta$  x  $q_u$  para solo estabilizado com cal (CONSOLI et al., 2009<sup>a</sup>)

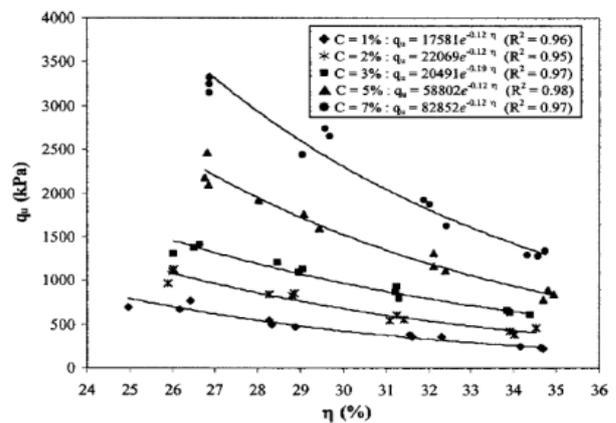


Figura 10: Relação  $\eta$  x  $q_u$  para solo estabilizado com cimento (CONSOLI et al., 2009<sup>b</sup>)

### 2.5.4 Efeito da Relação entre Porosidade e Teores Volumétricos de Cimento, Cal e Ligante

Da análise dos fatores que exercem maior influência sobre o comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados, Foppa (2005) e Consoli et al. (2007) introduziram um método

racional de dosagem baseado na relação entre o volume absoluto de vazios ( $V_v$ ) e o volume absoluto de cimento ( $V_c$ ). De forma equivalente, tal relação pode ser expressa como o quociente entre a porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico de cimento ( $C_{iv}$ ) conforme apresentado na equação 2, em que  $V_{total}$  corresponde ao volume total da amostra de solo cimentado.

$$\frac{V_v}{V_c} = \frac{V_v/V_{total}}{V_{cimento}/V_{total}} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad (\text{eq. 2})$$

Foppa (2005) e Consoli et al. (2007) demonstraram a existência de uma relação do tipo potência entre a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) dos espécimes de solo artificialmente cimentado e a relação ajustada entre porosidade e teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}^k$ ), conforme apresentado na equação 2 e, posteriormente, na figura 11. Dessa forma, o ajuste feito através do expoente  $k$  compatibiliza os efeitos da porosidade e do teor de cimento sobre a variável resposta. Em outras palavras, se o efeito da porosidade for maior que o do teor de cimento o valor de  $k$  é inferior a 1,0; caso contrário  $k$  é superior a 1,0. Ainda, se o efeito dos dois parâmetros for igual, o valor de  $k$  é zero.

$$q_u = A \left[ \frac{\eta}{(C_{iv})^k} \right]^{-B} \quad (\text{eq. 3})$$

Na equação 3,  $B$  é o expoente de ajuste polinomial e  $A$  é um escalar. Recentemente, Diambra et al. (2017) demonstrou que os valores de  $k$  e  $B$  dependem majoritariamente das características do solo, sendo que o valor de  $B$  aproxima-se do inverso de  $k$ , e que a magnitude do escalar  $A$  é governada pelas propriedades conjuntas do solo e da matriz cimentícia. Logo, o valor de  $A$  é fortemente influenciado pelas condições de cura, como tempo e temperatura, uma vez que esses afetam a dinâmica de hidratação do cimento e, portanto, a formação de compostos ligantes hidratados. Não obstante, tendo-se determinado uma relação da forma (eq. 3) para um material cimentado, pode-se, teoricamente, atingir determinada resistência pelo aumento na compacidade da mistura ou através do incremento no teor de cimento, desde que certos limites experimentais sejam respeitados.

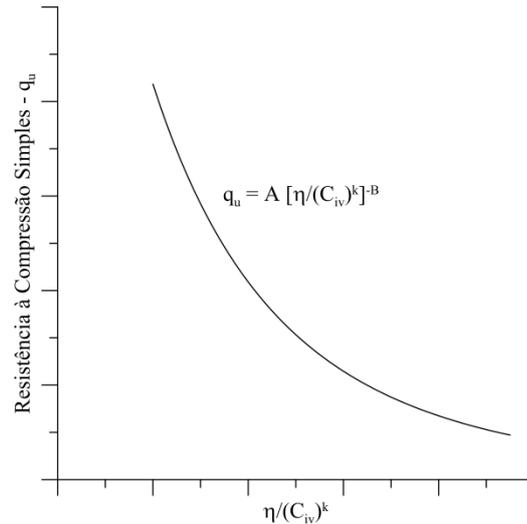


Figura 11: Exemplo da relação entre  $q_u$  e  $\eta/C_{iv}$   
(elaborado pelo autor)

Posteriormente, além do comportamento mecânico ligado à resistência, foi demonstrada a eficácia da relação  $\eta/(C_{iv})^k$  em descrever outros parâmetros de comportamento de materiais geotécnicos artificialmente cimentados com o uso de cimento Portland. Esses incluem a rigidez inicial (CONSOLI et al., 2017b), a durabilidade em termos de perda de massa acumulada (CONSOLI e TOMASI, 2018) e o parâmetro de estado para areias cimentadas (LEON, 2018).

Em seguida, Consoli et al. (2009a, 2009b) propôs uma relação análoga à exposta na eq. 3, na qual o teor volumétrico de cimento é substituído pelo teor volumétrico de cal ( $L_{iv}$ ), para emprego em solos finos estabilizados com esse material. De forma correlata ao verificado anteriormente com o uso do cimento Portland, a formulação desse novo índice foi possível, pois se verificou a existência de uma relação do tipo potência entre a resistência da areia argilosa tratada com cal e o novo índice  $\eta/(L_{iv})^k$ . Tal qual o  $\eta/(C_{iv})^k$ , o  $\eta/(L_{iv})^k$  deve ser ajustado com um expoente  $k$  a fim de que haja a compatibilização entre os efeitos da compactação e do teor de cal.

$$q_u = A \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^k} \right]^{-B} \quad (\text{eq. 4})$$

Mais tarde, o índice  $\eta/(L_{iv})^k$  foi aplicado por Consoli et al. (2011) a misturas entre uma areia siltosa, cinza volante e cal hidratada, mostrando-se eficaz na descrição do comportamento mecânico quanto à resistência à compressão simples para distintos tempos de cura e diferentes teores de cinza volante (0%, 12,5% e 25%). Isto é, o comportamento mecânico dessas misturas era descrito de forma satisfatória pelas relações do tipo potência da forma (eq. 2). No entanto,

cada relação incluía, apenas, um teor de pozolana para distintos teores de cal. Posteriormente essa mesma relação foi utilizada de maneira satisfatória a outras misturas solo – cal, solo – cal – pozolana e pozolana – cal, tanto na modelagem de parâmetros de resistência, quanto na descrição do comportamento frente à durabilidade e rigidez (CONSOLI et al. 2014, 2017a; SALDANHA, 2014, 2018; SAMANIEGO 2015; VILLALBA, 2015; MARIN, 2017).

Com o intuito de expressar através de uma única relação os efeitos combinados da porosidade, do teor de cal e do teor de pozolana, no comportamento mecânico de solos estabilizados com o uso conjunto desses materiais, Consoli et al. (2018a, 2018b) propôs o índice  $\eta/(B_{iv})^k$ . Basicamente, esse é a relação entre a porosidade e o teor volumétrico de ligante, o qual nada mais é que a soma entre os teores volumétricos da pozolana e da cal, ajustado com um expoente  $k$ , cuja função é correlata ao que foi anteriormente explanado. Dessa forma, expressa-se o parâmetro de comportamento escolhido com uma relação potência análoga a eq. 3 e eq. 4.

A relação entre resistência, rigidez inicial e durabilidade (expressa em termos de perda de massa acumulada) com esse novo índice se mostrou satisfatória quando distintas pozolanas (e.g. cinza volante e pó de vidro moído), em diferentes teores, foram combinadas com teores de cal variados. No entanto, a relação porosidade/teor volumétrico de ligante só foi aplicada, até então, em solos cuja quantidade da fração argilosa não supera a marca de 5,0%. Nesse sentido, entende-se que solos dessa natureza são pouco reativos, já que a parcela de argilominerais é inexpressiva. Logo, a tendência é que a cal reaja quase que exclusivamente com a pozolana adicionada. Em sistemas solo – cal – pozolana, nos quais o solo é argiloso, pode haver reações consideráveis entre a cal adicionada e os argilominerais do solo. Portanto, nesses casos particulares, o índice  $\eta/(B_{iv})^k$  talvez se mostre inviável.

As relações expressas pelas eq. 3 e eq. 4 podem ser normalizadas quando divididas por um valor particular de resistência ( $q_u$ ), o qual necessariamente corresponde a um valor  $\eta/(C_{iv})^k = \Delta$ . Tem-se, portanto, um valor de  $q_u$  ( $X$ ) para um determinado  $\Delta$ , o que resulta na seguinte expressão generalizada:

$$\frac{X}{X(\text{para um } \eta \text{ particular})} = \frac{A \cdot \left[ \frac{\eta}{(C_{iv})^k} \right]^{-B}}{A[\Delta]^{-B}} = \frac{\left[ \frac{\eta}{(C_{iv})^k} \right]^{-B}}{[\Delta]^{-B}} = [\Delta]^B \cdot \left[ \frac{\eta}{(C_{iv})^k} \right]^{-B} \quad (\text{eq. 5})$$

Tal equação é útil, pois permite, teoricamente, a avaliação do comportamento mecânico de amostras cimentadas de solo, dentro de um espectro de porosidade e teores de agente

cimentante, com apenas um valor relativo à resistência à compressão simples. Logo, uma vez que se possua uma equação do tipo (eq. 2), pode-se normalizá-la segundo o procedimento descrito e aplicá-la a um material com comportamento mecânico análogo a fim de que se obtenha outra equação do tipo (eq. 5).

### 2.5.5 Efeito da Umidade de Moldagem

O pleno desenvolvimento das reações pozolânicas, caracterizado pelo consumo de óxido de cálcio na combinação com os materiais sílico-aluminosos que compõem os argilominerais e/ou a pozolana, depende, necessariamente, de condições adequadas de hidratação (i.e. disponibilidade de água). Da mesma forma, há uma relação intrínseca entre o teor de umidade empregado na moldagem e a compacidade da mistura, pois certos níveis de densidade só podem ser alcançados mediante teores ótimos de umidade (ensaio de compactação).

No entanto, esse teor pode não ser favorável para a ocorrência das reações de cimentação quando se tem uma quantidade significativa de argilominerais com grande avidez por água (MATEOS, 1961). Logo, em sistemas solo argiloso-cal-pozolona ou solo argiloso-cal pode-se estar subaproveitando o potencial pozolânico dos materiais devido à indisponibilidade de água para o irrestrito desenvolvimento das reações, o que caracterizar-se-ia pela atuação de parte da pozolona como meramente um material inerte de enchimento (*filler*).

Situações que demonstram a estabilização com o emprego de cinza volante e cal hidratada em um solo argiloso e um solo arenoso estão expostas, respectivamente, nas figuras 12 e 13. Na primeira nota-se que os maiores valores para a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) não estão relacionados ao maior nível de compacidade (expresso pelo peso específico aparente seco –  $\gamma_d$ ) e, sim, à disponibilidade de água. O inverso ocorre quando se trata da areia limpa, na qual as maiores resistências são alcançadas para pontos próximos às umidades ótimas, especialmente para a energia de compactação modificada.

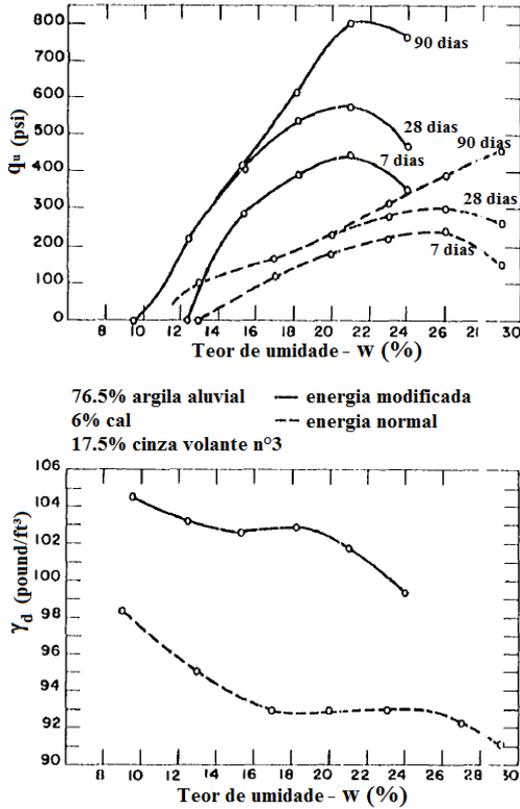


Figura 12: Relação entre  $q_u$ , teor de umidade e compactação para solo argiloso (MATEOS, 1961)

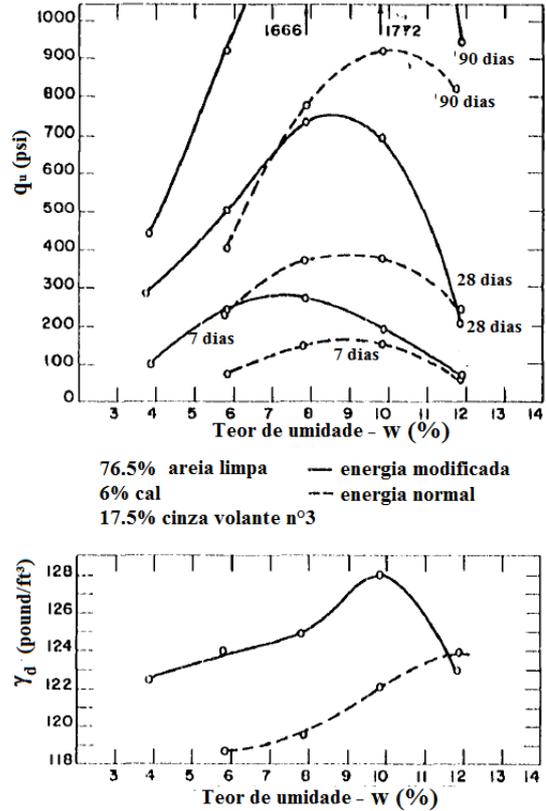


Figura 13: Relação entre  $q_u$ , teor de umidade e compactação (MATEOS, 1961)

Para o caso de um areia argilosa (~ 5% de argila) tratada com cimento Portland, Consoli et al. (2009b) demonstrou o efeito do teor de umidade (4 a 13%) fixando-se valores para o peso específico aparente seco (figura 14) . Nesse caso, nota-se uma considerável variação da resistência com o teor de umidade de moldagem empregado quando se utilizou 9 e 12% de cimento, sendo as maiores resistências alcançadas para umidades próximas ao teor ótimo (~11%). Esse teor, se comparado ao correspondente a do melhor desempenho do solo argiloso representado na figura 12 (~22%), é bastante inferior. Isso pode ser explicado pelo baixo conteúdo de argilominerías em relação às outras frações do solo para solos arenosos.

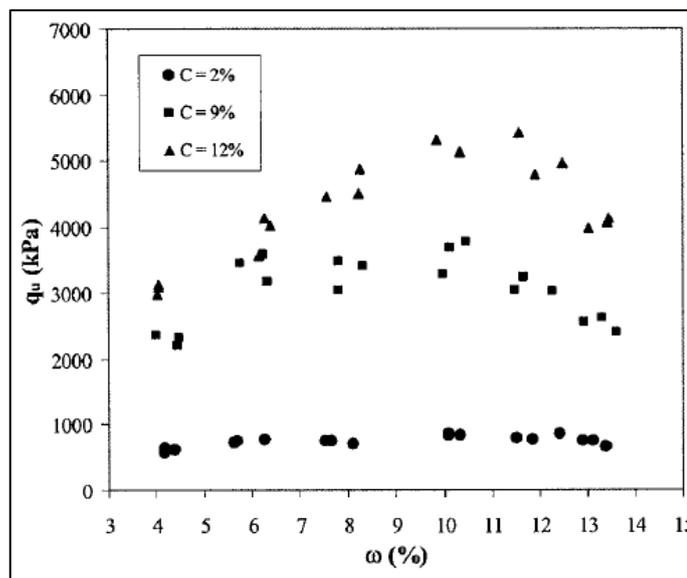


Figura 14: Relação entre  $q_u$  e teor de umidade de moldagem (CONSOLI et al.; 2007)

### 2.5.6 Efeito do Tempo de Cura

Dada a natureza das reações pozolânicas, tempos de cura maiores permitem a combinação de maiores quantidades de cal, com conseqüente formação de C-S-H e C-A-H e melhoramento das propriedades mecânicas do material estabilizado (MASSAZA, 2004). Contudo, essa melhora progressiva depende da disponibilidade de hidróxido de cálcio livre, sílica e alumina, bem como de condições necessárias de hidratação.

Enquanto Thomé (1994) creditou o ganho limitado de resistência (em um solo argiloso tratado com cal), observado entre os tempos de cura avaliados (7, 28 e 90 dias), à indisponibilidade de cal para o desenvolvimento das reações pozolânicas, Consoli et al. (2016) observou um aumento considerável na resistência com o tempo de cura (7, 28 e 60 dias) para uma argila dispersiva tratada com cal hidratada. Nessa linha, Dalla Rosa (2009) também observou ganho de resistência com o aumento do tempo de cura (28, 60, 90, 180 e 360 dias) para uma areia siltosa até os 180 dias de cura e Marin (2017) constatou um acréscimo na resistência de uma argila dispersiva sulfatada estabilizada com cal hidratada e cinza volante com o aumento no tempo de cura.

### 2.5.7 Efeito da Temperatura de Cura

De maneira geral, a cinética das reações pozolânicas é influenciada, dentre outros fatores, pela temperatura de cura (ZAMPIERI, 1989). Consequentemente, há faixas ótimas de temperaturas nas quais se verificam maiores taxas de atividade pozolânica (consumo de hidróxido de cálcio) para distintos sistemas solo-cal e/ou solo-pozolana-cal em determinados tempos de cura. Nesse sentido, as figuras 15 e 16 apresentam, respectivamente, o consumo de hidróxido de cálcio com o tempo avaliado para uma mistura entre cinza volante e cal hidratada e o tempo necessário para o consumo de 50% da cal com relação à temperatura de cura (para diferentes cinzas volantes). Nota-se, nesse contexto, que a fixação do  $\text{Ca}[\text{OH}]_2$  depende da temperatura e, também, da natureza da pozolana, pois verificaram-se taxas distintas para cinzas diferentes.

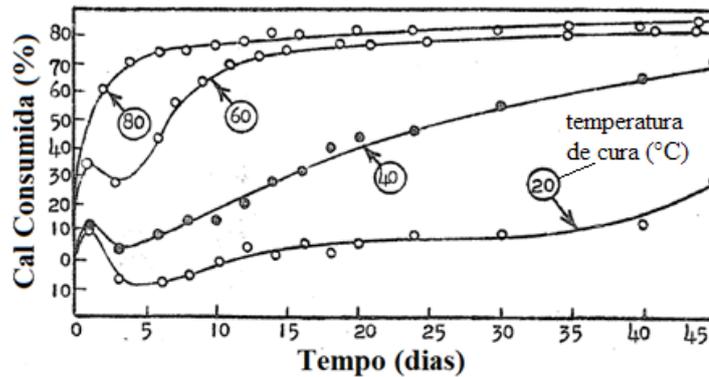


Figura 15: tividade pozolânica e temperatura ao longo do tempo  
(LEONARD, 1958)

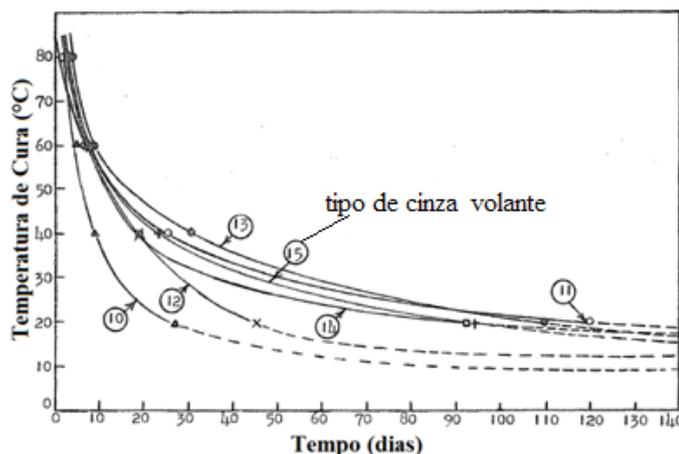


Figura 16: Consumo de cal em função do tempo e da temperatura  
(LEONARD, 1958)

Nesse sentido, Saldanha (2014) avaliou o efeito de quatro temperaturas de cura (23, 40, 60 e 80°C), durante três tempos de cura distintos (1, 3 e 7 dias), na resistência à compressão simples (RCS) de uma mistura entre cinza volante e cal de carbureto. Foi constatado pelo autor que, para os dois tempos de cura mais longos, não houve diferenças significativas na RCS das misturas curadas a 60°C e 80°C, apesar do ganho de resistência observado entre 23°C e 60°C (Figura 17). Analogamente, Silvani (2013) encontrou um comportamento assintótico na relação entre resistência e temperatura de cura, a partir dos 35°C, para um solo arenoso estabilizado com cinza volante e cal de carbureto ao longo de um período de cura igual de 28 dias.

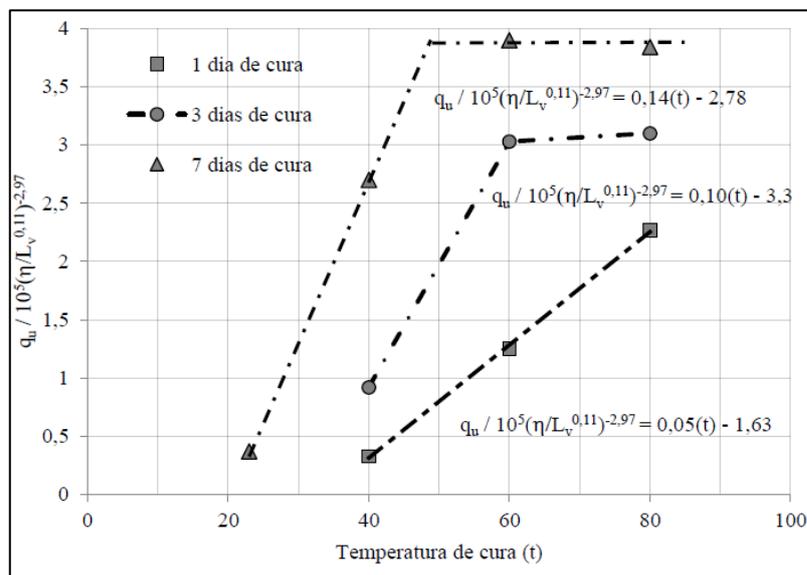


Figura 17: Estabilização da resistência com a temperatura  
(SALDANHA, 2014)

## 2.6 SUSTENTABILIDADE E UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O conceito de sustentabilidade surgiu na década de 1970 e não é imutável, tendo sido revisto e contextualizado a partir de óticas distintas. Em 1987, por exemplo, o relatório da *World Commission on Environment and Development* (1987) definiu o desenvolvimento sustentável como aquele que supre as necessidades das gerações presentes sem comprometer o desenvolvimento das futuras. A IUCN/WWF/UNEP (1991), por sua vez, de modo menos antropocêntrico, o definiu como aquele capaz de melhorar a qualidade de vida humana dentro dos limites impostos pela capacidade dos ecossistemas existentes. No entanto, para Ficker (1998), definições dessa natureza são demasiadamente abstratas e carecem de objetividade, pois

a compreensão das necessidades humanas é extremamente variável e depende, dentre outros fatores, de aspectos socioeconômicos locais.

### **2.6.1 O Vidro e o Meio Ambiente**

A definição de vidro na linguagem popular designa um material incolor e frágil, enquanto que na científica o termo é utilizado para descrever sólidos não cristalinos obtidos mediante resfriamento rápido (SALES, 2014). Nesse sentido, pode-se dizer que o vidro é um sólido amorfo no qual há ausência total de ordem de longo alcance e periodicidade, exibindo uma região de transição vítrea. Logo, qualquer material que exiba tais características é um vidro. No entanto, a tipificação usual desse material se aplica aos vidros cerâmicos de silicatos, os quais são constituídos majoritariamente por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) com estrutura amorfa. Outros elementos, em proporções minoritárias, também fazem parte da composição desse tipo de vidro no sentido de modificar propriedades físicas e químicas do material.

Além dos silicatos, há vidros cerâmicos constituídos por grandes parcelas de compostos à base de boro (B), germânio (Ge) e outros (SALES, 2014). Nesse contexto, o quadro 1, a seguir, apresenta um esquema da classificação (quanto à composição química majoritária) dos principais tipos de vidros produzidos atualmente.

<b>Tipo de Vidro</b>	<b>Características</b>
<b>Soda - Cal</b>	Tipo mais comum de vidro produzido. Utilizado na fabricação de produtos como embalagens, janelas e itens que não necessitam de grande resistência química e/ou ao calor
<b>Chumbo</b>	Dotados de elevado índice de refração, brilho e densidade. São comumente utilizados como proteção para radiação e invólucros de lâmpadas fluorescentes
<b>Boro-Silicatos</b>	Tem baixa expansão térmica, boa resistência ao choque térmico e grande estabilidade química, sendo empregado em situações que requerem alta durabilidade do material vítreo
<b>Ópticos</b>	Possuem alta densidade e grande índice de refração. Majoritariamente usados na fabricação de lentes e afins
<b>Alumino-Silicatos</b>	Tem resistência a altas temperaturas e baixos coeficientes de expansão

Quadro 1: Classificação dos principais tipos de vidro  
(elaborado pelo autor)

Dentre todos os tipos de vidros, é o sodo-cálcico o mais comumente utilizado e, por isso, totaliza mais de 85% do total produzido globalmente (MOHAJERANI et al., 2017; SCHMITZ et al., 2011). Além da sílica, nesse tipo de vidro há a adição de óxido de cálcio (8 % a 20 %), responsável pela cristalização da sílica, e a incorporação de 10 a 20 % de sódio (como carbonato ou óxido), o qual confere resistência e evita formação de bolhas no material. Além dessas adições, há a inclusão de compostos em fração minoritária, como alumina e óxido de magnésio. O vidro soda-cal representa, portanto, a maior parcela dos resíduos de vidro que são gerados diariamente, os quais, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004a), NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2004c), classificam-se como resíduos inertes não perigosos de classe II-A.

No que diz respeito à produção do vidro, uma tonelada consome, em média, 560 kg de areia (fonte de sílica), 190 kg de carbonato ou óxido de sódio, 146 kg de calcário (fonte de carbonato de cálcio) e 64 kg de rochas dolomíticas (fonte de feldspato) (MOHAJERANI et al., 2017). Ainda, em decorrência da necessidade de altas temperaturas para ocasionar a fusão dessas matérias primas (1500°C – 1600°C), a indústria do vidro é caracterizada como sendo de alta demanda energética (SCHMITZ et al., 2011; ZHANG; WEI, 2010). Associado a esse consumo energético, há também a liberação de gases de efeito estufa, principalmente CO<sub>2</sub>, durante o aquecimento dos materiais devido à decomposição de compostos carbonáceos.

Em 2005, estima-se que a produção global de vidro tenha sido de 130 milhões de toneladas, sendo 60% desse total correspondente a vidros para recipientes e 30% de vidros planos (IEA, 2007). O montante de vidro reciclado varia bastante conforme o local em questão (tabela 1), porém alguns países da União Europeia se destacam pelas altas taxas de reciclagem praticadas em vidros utilizados para recipientes, em alguns casos superiores a 90%. Nos Estados Unidos, por outro lado, essa taxa é bem inferior, sendo que em 2013, em torno de 30% de toda produção anual de vidro (10,3 milhões de toneladas) foi efetivamente reciclada; o restante foi disposto em aterros sanitários (USEPA, 2015). No Brasil, os resíduos de vidro correspondem a cerca de 3 % dos resíduos urbanos produzidos, sendo 1% proveniente de embalagens e o restante de quebras e descarte de peças (CEMPRE, 2018). Desse montante, cerca de 45% é reciclado.

Tabela 1: Taxas de reciclagem de vidro para recipientes (CRC, 2010)

Local	Taxa de Reciclagem (%)
Suíça	96
Luxemburgo	94
Países Baixos	91
Suécia	91
Noruega	89
Alemanha	82
Itália	74
França	67
Reino Unido	61
Espanha	57
Austrália	34
Estados Unidos	33 – 28

Dada a diferenças existentes nas composições químicas dos vidros comumente encontrados em aterros sanitários, a reciclagem completa desses materiais visando à produção de novas peças de vidro compostas inteiramente por elementos reciclados é praticamente inviável

(MOHAJERANI et al., 2017). Porém, o vidro é um material altamente reciclado no sentido de incorporação do resíduo à fabricação de novas peças vítreas o que, segundo Schmitz et al. (2011), implica em uma diminuição do gasto energético no processo produtivo e redução na emissão de CO<sub>2</sub>. Dados da ABIVIDRO (2013), por exemplo, indicam que a adição de 10% de resíduo de vidro à produção de novos artefatos de vidro provoca uma economia de 4% de energia total, redução de 5% no consumo de CO<sub>2</sub> e diminuição de 9,5% no consumo de água.

Aplicações além desse escopo são ainda bastante incipientes e, em geral, encontram-se em nível acadêmico. De Exemplos dessas são expostas no quadro 2 e incluem (i) estudos visando o emprego do vidro na substituição parcial e/ou total de agregados finos em concreto com cimento Portland, (ii) incorporação de vidro moído às misturas de concreto asfáltico como agregado e/ou material de preenchimento (*filler*), (iii) uso de pó de vidro em misturas com materiais pétreos para bases e sub-bases de pavimentos, (iv) utilização de resíduos de vidro para fabricação de fibras e incorporação dessas a concretos ultraleves e (v) utilização de pó de vidro moído como um ligante pozolânico (MOHAJERANI et al., 2017)

Finalidade	Autor
Emprego como agregado fino em concreto	Park et al. (2004)
	Chen et al. (2006)
	Malik et al. (2013)
	Abdallah e Fan (2014)
Incorporação a misturas de concreto asfáltico	Day et al. (1970)
	Su e Chen (2002)
	Hughes (1990)
	West et al. (1996)
	Jony et al. (2011)
Base e/ou sub-bases de pavimentos	Ali et al. (2011)
	Disfani et al. (2011)
	Arulrajah et al. (2014)
Concretos ultraleves com fibras de vidro	Yu et al. (2016)
Material pozolânico com distintas finalidades	Pattengill and Shutt (1973)
	Carpenter e Cramer (1999)
	Metwally (2007)
Material pozolânico com distintas finalidades	Sales (2014)
	Sales et al. (2014)
	Consoli et al. (2018a, 2018b)

Quadro 2: Aplicações com o uso de resíduos de vidro

(elaborado pelo autor)

## 2.6.2 A Cal de Carbureto e o Meio Ambiente

Compostos formados por materiais à base de cálcio, como cales comerciais e cimento Portland, são notoriamente prejudiciais do ponto de vista ambiental, já que envolvem o consumo de recursos naturais, têm alta demanda energética e emitem quantidades consideráveis de gases de efeito estufa. Estima-se, por exemplo, que a produção de 1,0 tonelada de cal hidratada gere 1,10 t de CO<sub>2</sub>, consuma 1,75 t de calcário virgem e 240 l de água (MME, 2009a). De modo semelhante, a produção de 1,0 t de cimento Portland consome em torno de 1,40 t de calcário virgem, gera 0,70 t de CO<sub>2</sub> e utiliza 3500 l de água (MME, 2009b).

A cal de carbureto (CC), por outro lado, é um subproduto da produção do gás acetileno, o qual é produzido a partir da hidrólise do carbonato de cálcio (SALDANHA et al., 2018). Essencialmente, portanto, a CC é composta por hidróxido de cálcio e pequenas porções de carbonato de cálcio e dióxido de silício. Globalmente, a produção de gás acetileno estava em torno de 500.000 t em 2014, o que corresponde à geração de 1.423.000 de toneladas CC como resíduo e é esperado um crescimento de 3% nesse mercado até 2020 (MRS, 2015). Países como China, Tailândia e Brasil geram, anualmente, em torno de, respectivamente, 100.000 t, 20.000 t e 17.000 t ano de cal de carbureto (SALDANHA et al., 2018; HORPIBULSUK et al. 2015).

Dada a suas características físicas e químicas favoráveis (abundância de óxido de cálcio livre), a cal de carbureto pode ser efetivamente reciclada e empregada na agricultura para correção do pH de solos, processos industriais, tratamento de água e esgoto, construção civil (produção de argamassas) e na engenharia geotécnica, visando a estabilização de solos. Desse modo, previnem-se a disposição de um resíduo nobre em aterros sanitários e, também, certos impactos ambientais oriundos dos processos de produção de cales hidratadas comerciais. Nesse sentido, Rocha et al. (2016) demonstrou que o processo produtivo da cal hidratada foi o fator de maior impacto ambiental na estabilização de um solo dispersivo.

## 2.7 PROJETO DE EXPERIMENTOS

Um experimento envolve, necessariamente, a avaliação dos efeitos de determinados fatores sobre, ao menos, uma variável resposta (MONTGOMERY, 2009). Nesse sentido, experimentos fatoriais completos, nos quais todas as combinações possíveis dentre os níveis (n) de cada fator (f) são ensaiadas, podem ser entendidos como a forma mais ampla de se analisar esses efeitos

sobre a resposta. No entanto, ao passo que crescem o número de fatores e níveis a serem avaliados, há, obrigatoriamente, o aumento no número de tratamentos com consequente acréscimo no número de experimentos, especialmente quando réplicas devem ser executadas. Exemplificando, um experimento com 5 fatores, cada qual a 3 níveis, replicado por três vezes, geraria um total de 243 tratamentos distintos e 729 experimentos processados aleatoriamente. Todavia, há planejamentos alternativos nos quais se pode avaliar efeito dos fatores estudados sobre a variável resposta a partir de um menor número de experimentos. Dentre esses se destacam o experimento fatorial  $2^k$  e o experimento fatorial fracionado  $2^{k-1}$ .

Em planejamentos experimentais, é fundamental que os testes sejam conduzidos de forma aleatória a fim de que se garanta a independência entre os erros (resíduos), isto é, esses não podem estar relacionados (BOX et al., 2005; MONTGOMERY, 2009). Caso contrário, fere-se o pressuposto de randomização que é base para vários métodos estatísticos, como a análise de variância (ANOVA). Ainda, a randomização auxilia a homogeneização do efeito de eventuais ruídos entre os tratamentos avaliados e garante que variações observadas entre réplicas experimentais sejam reflexos de variabilidades inerentes a qualquer processo experimental

### **2.7.1 Experimento Fatorial $2^k$**

Um experimento fatorial  $2^k$  permite a avaliação dos efeitos de  $k$  fatores sobre a variável resposta, sendo esses definidos em dois níveis distintos, sem que haja qualquer confundimento entre os efeitos principais e interações de ordens superiores (BOX et al., 2005). Nesse sentido, esse tipo de planejamento é extremamente útil no estudo preliminar para avaliar quais os principais fatores (e seus níveis) que influem no comportamento de determinada característica estudada, já que são executados  $2^k$  tratamentos (com ou sem replicação). A partir da conclusão de estudos dessa natureza, podem-se tomar decisões acerca das próximas etapas, no sentido de, por exemplo, realizar novos testes com a exclusão (ou manutenção em um nível) dos fatores tidos como insignificantes e ampliação nos níveis dos que se mostraram significantes.

As figuras 18 e 19 exemplificam, respectivamente, um experimento fatorial  $2^2$  e um  $2^3$ . Genericamente, o primeiro conta com 2 fatores (A e B) e o segundo com 3 (A, B e C), sendo que cada um desses aparece em 2 níveis (-1 e +1) com diferentes magnitudes. Cada vértice das figuras geométricas corresponde a um tratamento, no qual os níveis dos fatores podem ser máximos (+1) ou mínimos (-1). A determinação do efeito de um fator principal se dá a partir

da subtração entre a média dos tratamentos nos quais o fator se encontra em seu nível máximo pela média dos tratamentos em que ele se encontra em seu nível mínimo. A interação entre dois ou mais fatores, por sua vez, consiste nas médias tomadas entre os tratamentos diagonais correspondentes. No entanto, apesar da aparente complexidade de determinação dos efeitos principais e suas interações, softwares de estatística os calculam facilmente a partir do correto arranjo dos resultados experimentais.

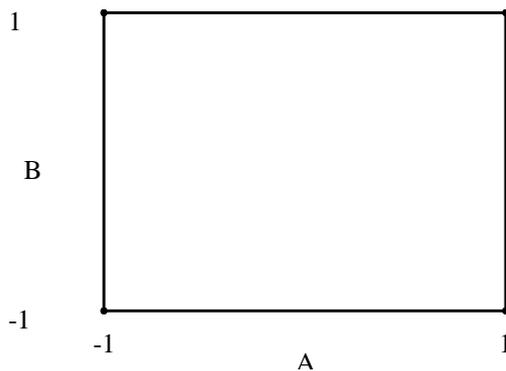


Figura 18: Representação de um experimento  $2^2$  (elaborado pelo autor)

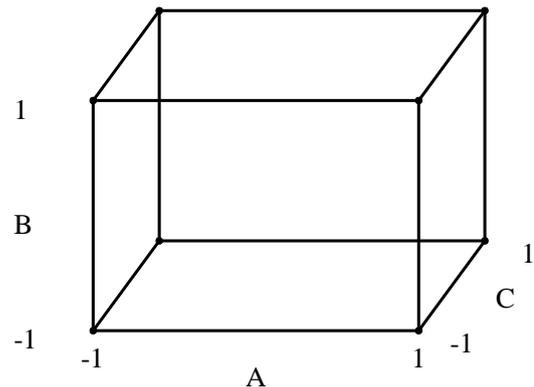


Figura 19: Representação de um experimento  $2^3$  (elaborado pelo autor)

A partir dos resultados desse tipo de experimento é possível o traçado de relações gráficas entre os efeitos principais dos fatores e suas interações, bem como a construção de um gráfico de probabilidade normal dessas grandezas. Esse tipo de abordagem é extremamente útil no caso de experimentos executados sem replicação, pois o que é estatisticamente significativo tende a se afastar da linha reta, a qual representa os efeitos não significativos com média zero e variância  $\sigma^2$ , conforme figura 20 (MONTGOMERY et al., 2009).

Ainda, outra forma de quantificar e avaliar a significância estatística dos efeitos, considerando-se um nível de significância ( $\alpha$ ) pré-determinado, é através de um gráfico de Pareto. Esse apresenta os valores absolutos dos efeitos padronizados de cada fator e uma linha de referência, sendo que os fatores estatisticamente significativos cruzam tal linha (figura 21). Tal abordagem é análoga a uma análise de variância, na qual se pode considerar estatisticamente significativo o efeito de algum fator (ou interações) quando o p-valor é menor que o  $\alpha$  adotado (ANEXO C).

Nesse gráfico de Pareto, os feitos padronizados são estatísticas t que testam a hipótese nula de que o efeito é zero e a linha tem sua determinação atrelada ao nível de significância adotado ( $\alpha$ ) e à existência (ou não) de um termo relativo ao erro, isto é, se o termo de erro possui ou não

graus de liberdade (GL). Em caso afirmativo ( $GL > 0$ ) essa linha é traçada em T, no qual t é o  $(1 - \alpha/2)$  quantil de um distribuição t, cujos GL equivalem aos GL do termo de erro. Na inexistência desse termo de erros ( $GL = 0$ ), faz-se o uso do pseudo erro padrão de Lenth (PSE). Esse é baseado no conceito de efeitos esparsos e assume que a variação nos efeitos de menor importância se deve a erros aleatórios. Logo, multiplica-se o PSE obtido pelo t a fim de que se obtenha a magnitude da linha.

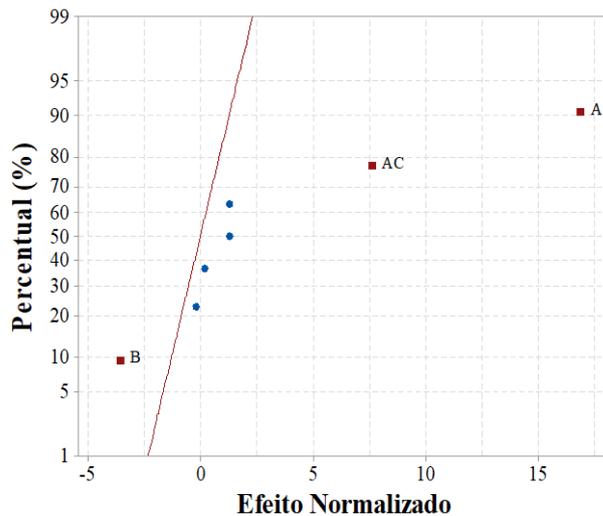


Figura 20: Probabilidade normal dos efeitos (elaborado pelo autor)

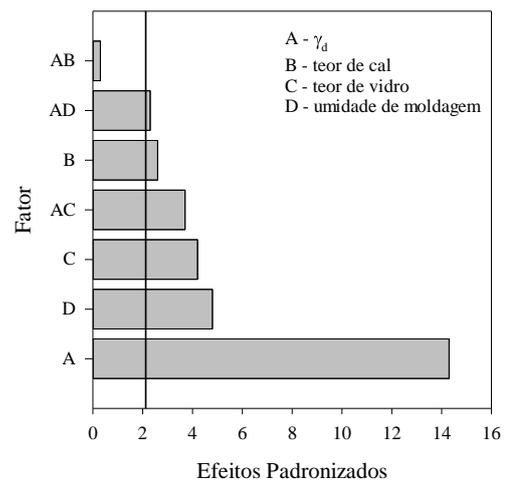


Figura 21: Exemplo de gráfico de Pareto (elaborado pelo autor)

### 2.7.2 Experimento Fatorial Fracionado $2^{k-j}$

Mesmo que o número de tratamentos necessários em um experimento fatorial  $2^k$  possa ser reduzido em relação a um completo, pode-se ainda ter uma elevada quantidade de experimentos caso o número de variáveis controláveis seja grande e/ou necessitem-se várias réplicas experimentais (MONTGOMERY, 2009). Isso pode acabar por inviabilizar um planejamento  $2^k$ , pois, ocasionalmente, dispõe-se de limitações quanto a recursos, tempo e/ou materiais. Uma alternativa a esse planejamento pode ser um experimento fatorial fracionado do tipo  $2^{k-1}$ , no qual se avaliam  $k$  fatores, em dois níveis, a partir de  $2^{k-j}$  tratamentos.

Nesse sentido, Montgomery (2009) enumera três ideias principais responsáveis pelo sucesso no emprego de experimentos fatoriais fracionados:

- a) princípio da esparsidade de efeitos: quando há muitas variáveis influenciando em um sistema, esse tende a ser controlado pelos efeitos principais e interações de baixa ordem;
- b) propriedade de projeção: projetos fatoriais fracionados podem ser transformados em projetos maiores no subconjunto dos fatores com efeitos mais significativos;
- c) experimentação sequencial: é possível a combinação dos tratamentos de mais de um projeto fatorial fracionado a fim de que se tenha um experimento fatorial mais completo.

A depender do número de fatores avaliados e algumas considerações, é possível a obtenção de uma estimativa eficiente dos efeitos principais e interações de segunda ordem. Isso depende da resolução empregada ( $R$ ), a qual indica a ordem  $p$  do efeito de um fator que não está confundido com outro efeito que contenha  $R - p$  fatores. Na prática, a resolução de um projeto fatorial fracionado do tipo  $2^{k-1}$  é igual ao número  $k$ , sendo que a resolução é representada em números romanos. Montgomery (2009) destaca os experimentos fracionados com resolução III, IV e V como os principais:

- a) resolução III: experimentos nos quais os efeitos principais não estão confundidos entre si, mas sim com interações de segunda ordem. Ainda, essas interações de ordem dois podem estar confundidas entre si.  $I = ABC (2_{III}^{3-1})$ ;
- b) resolução IV: não há o confundimento dos efeitos principais com efeitos de segunda ordem nem, tampouco, entre si. Os efeitos de segunda ordem estão confundidos entre si, no entanto.  $I = ABCD (2_{IV}^{4-1})$ ;
- c) resolução V: os efeitos principais e de segunda ordem não estão confundidos entre si, mas os de segunda ordem estão confundidos com os de terceira ordem.  $I = ABCDE (2_{V}^{5-1})$ .

Ao se tomar como válido o princípio da esparsidade de efeitos, é coerente desprezar os efeitos de ordem superior ou igual a três na variável resposta e, com isso, estimar os efeitos de primeira e segunda ordem em um experimento de resolução V, por exemplo. A análise dos resultados procede, então, da mesma forma como exemplificado para o experimento  $2^k$ .

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

O programa experimental pode ser dividido em quatro fases distintas e é exposto no quadro 3, a seguir. Uma descrição resumida de cada uma das etapas é apresentada na sequência. Ainda, nos itens subsequentes, apresenta-se a abordagem experimental empregada, as metodologias para escolha dos fatores controláveis e descrições acerca dos ensaios realizados.

Fases		Material	Tipo de ensaio/procedimento	
Primeira fase	Preparação e caracterização dos materiais	Solo dispersivo Cal de carbureto Vidro moído	Caracterização	Massa Específica Real dos grãos
				Análise granulométrica
				Limites físicos
				Compactação
				Mineralogia (DRX)
				Análise química (FRX)
				Microscopia eletrônica (MEV+EDS)
				Termogravimetria (TGA+DTG)
Segunda fase	Avaliação do efeito dos fatores controláveis na resistência, rigidez, durabilidade e dispersibilidade da mistura	Mistura solo - vidro moído - cal de carbureto	Ensaio	Resistência à compressão simples
				Ensaio de pulso ultrassônico
				Durabilidade por molhagem-secagem
				Avaliação da degradação da rigidez
				<i>Pinhole test</i>
Terceira Fase	Comparações de resultados	Mistura solo - vidro moído - cal de carbureto	Abordagem	Relação dos resultados obtidos na segunda fase com o parâmetro $\eta$ /Liv
Quarta Fase	Caracterização da microestrutura da mistura	Mistura solo - vidro moído - cal de carbureto	Ensaio	Mineralogia (DRX)
				Termogravimetria (TGA+DTG)
				Microscopia eletrônica de varredura com EDS (MEV+EDS)

Quadro 3: Resumo do programa experimental

(elaborado pelo autor)

A **primeira fase** compreendeu a preparação e a caracterização dos materiais utilizados, cujos resultados são apresentados no item 4.1. Com esses, características físicas, químicas e mineralógicas, pertinentes ao presente estudo, foram avaliadas para os materiais estudados (solo dispersivo, do pó de vidro moído e da cal de carbureto).

A execução dos ensaios relativos à **segunda fase** embasa-se em um projeto fatorial fracionado  $2^{k-1}$  de resolução V para os ensaios de resistência à compressão simples e pulso ultrassônico e de resolução IV para os demais (ver item 2.7.2). Isso possibilitou a avaliação do efeito dos fatores controláveis sobre as variáveis respostas analisadas, permitindo, assim, elencar os mais influentes. Nesse sentido, a segunda fase permitiu um entendimento aprofundado acerca do comportamento mecânico das misturas estudadas, já que a influência de pelo menos quatro fatores pode ser quantificada.

Na **terceira etapa**, a maior parte dos resultados apresentados anteriormente foi relacionado ao parâmetro porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_{iv}$ ). Desse modo, a viabilidade de tal índice em descrever os comportamentos aqui abordados foi avaliada.

A **quarta fase** compreendeu o estudo da microestrutura das misturas estudadas. Portanto, buscou-se avaliar as modificações na estrutura do solo decorrentes dos materiais adicionados, bem como caracterizar os possíveis ligantes hidratados formados a partir das reações entre essas adições. Também, os resultados oriundos dos ensaios de DRX, TGA/DTG e MEV auxiliaram na interpretação das respostas de desempenho apresentados na segunda etapa. Nesse sentido, na sequência apresenta-se a abordagem experimental utilizada, as metodologias para escolha dos fatores controláveis e descrições acerca dos ensaios realizados.

### 3.1 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

A abordagem experimental aqui empregada está embasada em conceitos estatísticos de projeto e análise de experimentos, os quais permitem a avaliação dos efeitos dos fatores controláveis (e interações em alguns casos) nas variáveis respostas analisadas (MONTGOMERY, 2009). Dessa forma, procurou-se analisar (em dois níveis), através de projetos fatoriais fracionados de resolução IV e V (ver item 2.7.2), os fatores expostos abaixo. Lembrando que a temperatura só era incluída dentro do projeto para os planejamentos  $2^{5-1}$ .

- a) peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ );
- b) umidade de moldagem ( $w$ );
- c) temperatura de cura ( $T$ );
- d) teor de vidro moído (VM);
- e) teor de cal de carbureto (CC).

Como fatores constantes tinham-se:

- a) tipo de vidro;
- b) tipo de cal;
- c) tempo de cura (7 dias);
- d) procedimentos para realização dos ensaios.

Ainda duas condições de cura distintas (selada e imersa/úmida) foram utilizadas para os ensaios de resistência e rigidez inicial. Com isso, foi possível avaliar o impacto do tipo de cura nas variáveis dependentes, pois, nesses casos, todos os tratamentos foram igualmente repetidos e replicados em cada uma das condições de cura. Sistemática semelhante já foi anteriormente utilizada por Marin (2017).

### 3.2 DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DOS FATORES CONTROLÁVEIS

Uma vez que a abordagem experimental utilizada no presente estudo teve como base projetos fatoriais fracionados de resolução IV e V, a definição dos níveis de cada um dos fatores controláveis avaliados buscava incluir dois extremos (mínimo e máximo). Nesse sentido, o estabelecimento desses níveis, para cada um dos fatores, seguiu critérios distintos, os quais estão consonância com procedimentos e a literatura da área geotécnica. Como já mencionado anteriormente, tinha-se como fatores controláveis o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), a umidade de moldagem ( $w$ ), o teor pó de vidro moído (VM), o teor de cal de carbureto (CC) e a temperatura de cura (T), sendo esse último fator excluído dos ensaios de durabilidade e do *pinhole test*.

Os valores para o **peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )** foram embasados nas curvas de compactação apresentadas na figura 35 (item 4.1), considerando-se experiências prévias de moldagem e limitações técnicas impostas pelas condições de moldagem, isto é, capacidade do macaco hidráulico e dos moldes metálicos cilíndricos. Consequentemente, os valores máximo e mínimo escolhidos correspondiam a, respectivamente, 18 kN/m<sup>3</sup> e 16 kN/m<sup>3</sup>, independentemente dos teores de vidro e cal utilizados. Nota-se que esses enquadram-se dentro dos valores de  $\gamma_d$  obtidos nos ensaios de compactação para a energia modificada. Valores acima de 18 kN/m<sup>3</sup> eram tecnicamente impraticáveis devido à incapacidade dos moldes. Além disso, espécimes moldados abaixo de 16 kN/m<sup>3</sup> apresentavam-se muito porosos após a moldagem, sendo suscetíveis a degradação.

Os **teores de umidade** ( $w$ ) foram determinados em consonância com o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e com as práticas anteriormente empregadas por Samaniego (2015) e Villalba (2015), para esse mesmo solo, e por Consoli et al. (2009a; 2009b) em solos distintos. Esses utilizaram apenas o teor de umidade ótimo na energia modificada, variando o peso específico aparente seco com essa quantidade inicial de água, independente do teor de cal ou cimento adicionado. No presente estudo, seguiu-se a mesma abordagem, porém variaram-se os  $\gamma_d$  escolhidos ao longo de dois valores para  $w$  (13 % e 16 %). O primeiro corresponde à umidade ótima para a mistura solo + 30 % VM e o segundo ao máximo teor no qual a moldagem era viável, isto é, ocorria sem exsudação para o maior peso específico em conjunto com o maior teor de cal. Dessa forma, pôde-se avaliar a influência do teor de umidade nas variáveis respostas estudadas.

A definição dos **teores de pó de vidro moído (VM)** baseou-se em pesquisas da área que utilizaram pozolanas, em conjunto com algum ativador alcalino, na estabilização de solos de distintas naturezas (CONSOLI et al., 2018a; CONSOLI et al., 2011a; CONSOLI et al., 2011; MARIN, 2017). Nesse sentido, uma vez que o comportamento desse solo dispersivo quando tratado com cal hidratada já é conhecido, o VM mínimo foi fixado em 10%. O máximo, por sua vez, foi estabelecido com base nas pesquisas citadas anteriormente e no que foi exposto no 3.3.2. O teor de pó de vidro moído era calculado com relação à massa seca de solo.

Para a determinação do pH da mistura (em função do teor de cal adicionado), seguiram-se os procedimentos descritos pela norma ASTM D 6276 (ASTM, 1999). No entanto, o **teor mínimo de cal (CC)** foi escolhido com base nos critérios do *Initial Consumption of Lime Method* (ICL), o qual o estabelece com sendo aquele em que não há mais variação no pH da mistura (ver item 2.5.1). Desse modo, a partir dos resultados expostos na figura 22, estabeleceu-se o 5 % como o valor mínimo adotado. Ainda, ressalta-se que a mistura utilizada no ensaio não foi feita com o teor máximo estabelecido de vidro (30 %), pois esse tem o pH alto (~10,50). O teor máximo, por outro lado, foi definido como 12 % a fim de que se obtivesse uma ampla faixa de variação desse. Além disso, considerou-se que os teores determinados pelo método do pH podem não ser suficientes para o pleno desenvolvimento das reações pozolânicas, como constatado por Nuñez (1991) e por Thomé (1994). Logo, um máximo igual a 12 % é bastante superior ao mínimo verificado segundo o método do pH e sua utilização parece adequada. O teor de cal é calculado com relação à soma entre as massas secas de solo e de pó de vidro moído.

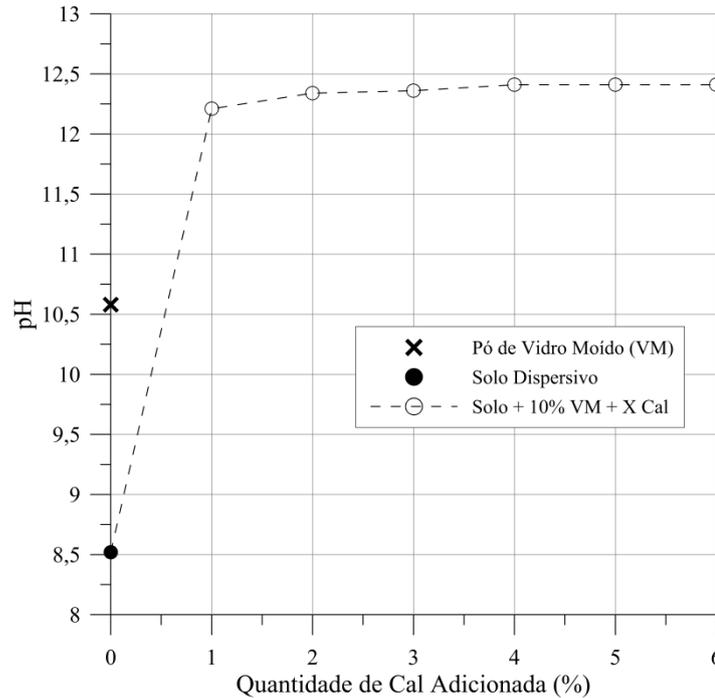


Figura 22: Método do pH para determinação do mínimo teor de cal  
(elaborado pelo autor)

Quanto à **temperatura de cura (T)**, utilizou-se como valor mínimo a tida como ambiente, isto é, igual a 23°C, e como valor máximo a temperatura de 40°C. O estabelecimento desse máximo teve como base os estudos prévios de Silvani (2013) e Saldanha (2014, 2018). Além disso, ressalta-se o fato de que a temperatura média máxima, em certos períodos do ano, aproxima-se de 40°C na região da qual o solo provém (DGEEC, 2013). Para os ensaios de durabilidade, optou-se pela utilização apenas da temperatura de 23°C, pois o ensaio, em si, já envolve o aquecimento dos espécimes ao longo dos ciclos. A tabela 2, abaixo, resume os fatores controláveis e seus níveis para os projetos fracionados de resolução IV e V.

Tabela 2: Resumo dos fatores controláveis e seus níveis

<b>Projeto Fatorial Fracionado de resolução IV (<math>2^{4-1}</math>)</b>	
<b>Fator Controlável</b>	<b>Níveis</b>
peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )	16 e 18 kN/m <sup>3</sup>
umidade de moldagem ( $w$ )	13 e 16 %
teor de vidro (VM)	10 e 30 %
teor de cal (CC)	5 e 12 %
<b>Projeto Fatorial Fracionado de resolução V (<math>2^{5-1}</math>)</b>	
<b>Fator Controlável</b>	<b>Níveis</b>
peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )	16 e 18 kN/m <sup>3</sup>
umidade de moldagem ( $w$ )	13 e 16 %
teor de vidro (VM)	10 e 30 %
teor de cal (CC)	5 e 12 %
temperatura de cura (T)	23 e 40°C

### 3.3 MISTURA, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram moldados individualmente de acordo com a ordem pré-estabelecida a fim de que o procedimento de completa randomização fosse cumprido (tabelas 10 e 11). Quanto aos materiais empregados, a fração do solo dispersivo utilizada na moldagem dos corpos de prova (CPs correspondia a passante na peneira de malha # 10 ( $d < 2,00$  mm), a de vidro foi a inferior a peneira de malha # 200 ( $d < 0,075$  mm) e a de cal de carbureto era a passante na peneira # 100 (0,149 mm). O solo e a cal de carbureto eram manualmente destorroados com o intuito de que tal condição fosse alcançada.

O procedimento de mistura e moldagem iniciava com a pesagem individual dos materiais em balança com resolução de décimos de grama, com posterior acondicionamento individual desses em sacos plásticos de forma a preservar suas condições secas. Após isso, misturavam-se os materiais sólidos (solo, cal e pó de vidro moído) até que esses atingissem uma uniformidade/homogeneidade visual. Posteriormente, acrescentava-se água destilada e a mistura prosseguia por cerca de 10 minutos até que uma consistência uniforme fosse alcançada. Da mistura úmida e homogeneizada era retirado material suficiente para o preenchimento de três cápsulas a fim de que a umidade de moldagem fosse futuramente verificada. Subsequentemente, a mistura era dividida em frações iguais que correspondem ao número de camadas necessárias ao tipo de corpo de prova empregado.

A moldagem ocorria de forma estática em moldes metálicos (figura 23). Para os corpos de prova cilíndricos utilizados nos ensaios de durabilidade e resistência, três camadas foram necessárias para que se atingisse a altura e, portanto, o peso específico aparente seco pré-determinado. Após a compactação estática de cada camada, escarificava-se o seu topo de modo a garantir a aderência com a camada subsequente. Ao término da moldagem de cada corpo de prova, eram verificadas as dimensões (altura e diâmetro), em três medidas com o paquímetro, e a massa total. Em seguida, o corpo de prova era devidamente selado em três sacos plásticos e prosseguia para cura em um ambiente com temperatura controlada (figura 24 e figura 25).



Figura 23: Moldes metálicos para moldagem  
(foto do autor)

Para os ensaios de resistência à compressão simples, utilizaram-se corpos de prova cilíndricos com 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, para durabilidade foram usados espécimes do mesmo tipo mas com 12,70 cm de altura e 10 cm de diâmetro, para os de pulso ultrassônico ao longo dos ciclos de durabilidade foram usadas amostras cilíndricas com altura e diâmetro iguais a 5 cm e para o *pinhole test* cilindros com diâmetro 3,70 cm e altura de 3,80 cm. Com relação às especificações de moldagem, tolerava-se uma variação de  $\pm 1,50\%$  nas dimensões médias de cada corpo de prova, de  $\pm 1\%$  na sua massa e de 5% na sua umidade média aferida pela média das três cápsulas. Caso alguma dessas restrições não fosse satisfeita, o corpo de prova era descartado e um novo era moldado.

A cura de todos os corpos de prova deu-se em um dois tanques de água com temperatura controlada, um a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e outro a  $40 \pm 2^\circ\text{C}$  (figuras 24 e 25). Para a **cura selada**, os corpos de prova eram depositados dentro da água sem que houvesse contato do corpo de prova com a água, pois os espécimes eram hermeticamente fechados com três sacos plásticos. Para os

espécimes destinados aos ensaios de resistência e rigidez, rasgavam-se os sacos plásticos um dia antes de terminar o tempo de cura, a fim de que esses tivessem seu grau de saturação aumentado de modo a reduzir a influência da sucção na resistência. O procedimento de **cura imersa** era feita de maneira análoga, no entanto os corpos de prova eram colocados em contato com a água após o período de um dia de cura selada, isto é, rasgavam-se os sacos plásticos após 24 horas do período de cura inicial. Após o período de cura os espécimes eram novamente pesados.



Figura 24: Tanque para cura a 23°C (foto do autor)



Figura 25: Tanque para cura a 40°C (foto do autor)

### 3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de resistência à compressão simples seguiram as diretrizes propostas pela norma norte-americana ASTM D5102 (ASTM, 2004) e eram realizados em uma prensa automática com deslocamento controlado. Um dia antes de o corpo de prova cumprir o tempo de cura pré-estabelecido pelo autor (7 dias), ele era imerso em água por 24 horas (na mesma temperatura a que estava sendo curado) a fim de que os eventuais efeitos da sucção fossem minimizados. Esse procedimento é, também, uma forma indireta de se qualificar a ocorrência (ou não) de alguma reação que desencadeie certo tipo de cimentação na mistura, pois, caso essa não tenha ocorrido de forma suficiente, a tendência é que ocorra a desagregação do espécime na água. Após o prazo de imersão, cada corpo de prova tinha sua massa novamente aferida, era submetido ao ensaio de módulo cisalhante inicial (item 3.5) e, ensaiado à compressão uniaxial.

Durante o ensaio, compelia-se o corpo de prova, a uma taxa constante de deslocamento (1,14 mm/min), contra a base cilíndrica de um anel dinamométrico devidamente fixado a um sistema de reação (figura 26). Lia-se em um relógio comparador, portanto, o valor relativo à reação do corpo de prova contra o anel, o qual era convertido em carga pela respectiva equação de calibração. Para os espécimes curados a 40°C foi utilizado um anel dinamométrico com capacidade máxima de 50 kN e para os curados a 23°C o anel era o de 10 kN. A resistência à compressão simples ( $q_u$ ) de cada amostra era determinada segundo a relação:

$$q_u = \frac{Q}{\left(\frac{\pi D_m^2}{4}\right)} \quad (\text{eq. 6})$$

Sendo:

$Q$  = carregamento aplicado ao corpo de prova e obtido pela calibração do anel dinamométrico;

$D_m$  = diâmetro médio do corpo de prova obtido a partir das medições de topo, centro e base.



Figura 26: Ensaio de compressão simples  
(foto do autor)

### 3.5 ENSAIO DE PULSO ULTRASSÔNICO

O módulo cisalhante ( $G$ ) é definido como a relação entre tensão cisalhante aplicada ( $\tau$ ) e a deformação cisalhante resultante ( $\gamma$ ). Em meios elásticos, infinitos e contínuos há uma relação intrínseca entre ele, a massa específica desse meio ( $\rho$ ) e a velocidade de propagação de uma onda cisalhante ( $V_s$ ) (eq 8) (SANTAMARINA et al., 2001). Essas ondas caracterizam-se pela propagação em uma direção, indução do movimento das partículas do meio em uma direção perpendicular à dessa propagação e por necessitarem de meios com certa rigidez ( $G > 0$ ) para se propagarem, sendo filtradas em fluidos como a água (SANTAMARINA et al., 2001). Ondas de compressão, por outro lado, propagam-se e induzem o movimento das partículas do meio na mesma direção e podem se propagar por sólidos e fluidos, sendo filtradas no vácuo.

$$G_0 = \rho \times V_s^2 \quad (\text{eq. 7})$$

Sendo:

$\rho$  = massa específica do material;

$V_s$  = velocidade da onda cisalhante.

Os ensaios eram realizados com o uso do instrumento PundiLab(+) e envolviam a medição dos tempos de propagação de ondas de compressão e de cisalhamento pelos corpos de prova cilíndricos de modo a se obter uma estimativa do módulo cisalhante a pequeníssimas deformações ( $G_0$ ). A primeira (compressão) era induzida pela vibração de transdutores a uma frequência de 54 kHz e a segunda, por sua vez, devia-se à vibração de outros tipos transdutores a 250 kHz. Em meios considerados não dispersivos o tempo de propagação da onda cisalhante independe da frequência empregada. O procedimento de ensaio se iniciava após o término do período de cura e imersão dos corpos de prova. Primeiramente lia-se o tempo do deslocamento da onda de compressão através corpo de prova ( $t_p$ ) e, em seguida, o tempo de deslocamento da onda cisalhante ( $t_s$ ). Para a realização de cada leitura, a interface entre o corpo de prova e o transdutor era preenchida com um gel específico que auxiliava a transmissão e leitura do sinal. As respectivas velocidades ( $V_p$  e  $V_s$ ) eram determinadas a partir da relação entre a altura média de cada corpo de prova e o tempo aferido. Eram feitas, ao menos, três medições correspondentes ao tempo  $t_p$ , sendo esse tido como a média das três, e mais de dez relativas ao tempo  $t_s$ .

A leitura do  $t_p$  dava-se diretamente no instrumento enquanto que a leitura do  $t_s$  era realizada na interface computacional do PundiLab(+), já que devia ser devidamente interpretada. A figura

27 apresenta o resultado típico do ensaio de pulso ultrassônico; nessa nota-se a chegada da onda de compressão ( $t_p$ ) e, posteriormente, a da onda cisalhante ( $t_s$ ). De maneira geral, o  $t_s$  é superior ao  $t_p$ .

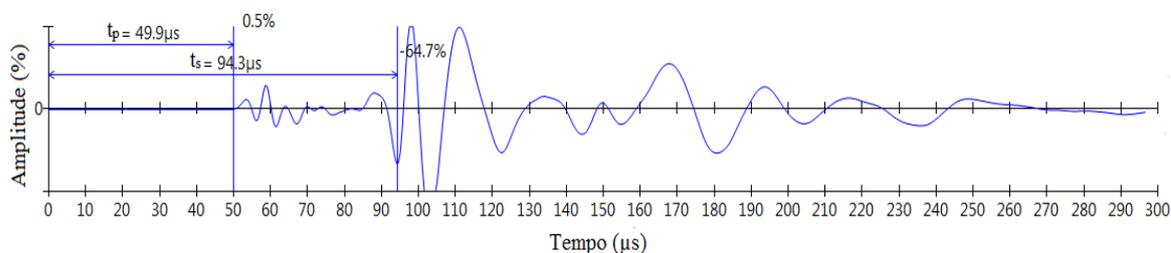


Figura 27: Comportamento típico de um solo cimentado quanto à propagação de onda cisalhante no ensaio ultrassônico (elaborado pelo autor)

### 3.6 ENSAIO DE DURABILIDADE POR MOLHAGEM – SECAGEM E ESCOVAÇÃO

Segundo Dempsey e Thompsom (1968), durabilidade é a capacidade de um material em se manter íntegro e estável quando exposto às condições ambientais e às intempéries por longos períodos de tempo. Nesse sentido, com o intuito de se avaliar o desempenho das misturas estudadas, realizou-se o ensaio de durabilidade por molhagem – secagem – escovação de acordo com a norma ASTM D 559 (ASTM, 2015). Esse consiste em aferir a perda de massa em cada ciclo, com 48 horas de duração, devido à escovação de corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 12,70 cm de altura. Nesse ensaio, a mistura compactada é submetida a condições ambientais extremas, já que é imersa em água e, posteriormente, seca a alta temperatura e escovada.

Findado o tempo de cura, os corpos de provas eram imersos em água durante 5 horas (i). Após esse período, colocavam-se os espécimes na estufa a  $71^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$  durante 42 horas (ii). Terminado o tempo de secagem, escovava-se cada corpo de prova (iii), com uma escova metálica padronizada, da seguinte maneira: 18 a 20 escovações ao longo da circunferência do corpo de prova e 4 escovações no topo e na base, todas com uma força de 13 N. Registrava-se a perda de massa devido a essas escovações, pois os corpos de prova são pesados logo após saírem da estufa e logo após a escovação. Repetia-se o processo voltando à etapa (i) até que 12 ciclos fossem completados.

Por escassez de material e espaço físico, moldou-se apenas um espécime de cada tratamento. Portanto, a avaliação da umidade do corpo de prova durante a escovação era feita a partir do material (pó) que era retirado do corpo de prova em consequência do processo de escovação.

### 3.7 PINHOLE TEST

O *Pinhole Test*, ou ensaio do furo de agulha, é descrito pela norma NBR 14114 (ABNT 1998). A execução dá-se em corpos de prova cilíndricos com 3,80 cm de altura e 3,70 cm de diâmetro moldados em cilindros com o mesmo diâmetro, porém com 8,0 cm de altura. O procedimento de mistura segue os mesmos processos descritos no item 3.3, porém o processo de compactação é manual e executado em quatro camadas com aproximadamente 0,95 cm de altura cada. Após a moldagem, os cilindros metálicos eram selados em plástico e seguiam para ambiente de cura com temperatura controlada. Terminado o período de cura, procedia-se à preparação de cada espécime para o ensaio.

O ensaio iniciava com o posicionamento do cilindro no suporte plástico, com posterior encaixe na guia, colocação de tela de arame e vidro moído (correspondente à fração de areia média e grossa) na parte superior (figura 28). Posteriormente, fazia-se um furo com uma agulha de 1 mm de diâmetro por toda a extensão do corpo de prova e se procedia ao ensaio conforme as etapas descritas no diagrama exposto na figura 31. Isto é, submetia-se o corpo de prova a cargas hidráulicas constantes, durante intervalos de tempo iguais a 5 minutos, verificando-se a vazão média e a turbidez da água nesses períodos. Dessa forma, podia-se classificar a mistura quanto o seu potencial dispersivo em seis categorias diferentes:

- a) não dispersivo (ND1);
- b) incipientemente dispersivo (ND2);
- c) levemente dispersivo (ND3);
- d) moderadamente dispersivo (ND4);
- e) dispersivo (D2);
- f) altamente dispersivo (D1).

As figuras apresentadas na sequência apresentam o molde preenchido pronto para o ensaio (figura 28), o corpo de prova após a realização do ensaio (figura 29) e o ensaio em andamento (figura 30). Ainda, o diagrama de controle do ensaio é exposto na sequência (figura 31).



Figura 28: Molde preenchido e pronto para o *pinhole test* (foto do autor)



Figura 29: Amostra após conclusão do *pinhole test* (foto do autor)



Figura 30: *Pinhole test* em andamento (foto do autor)

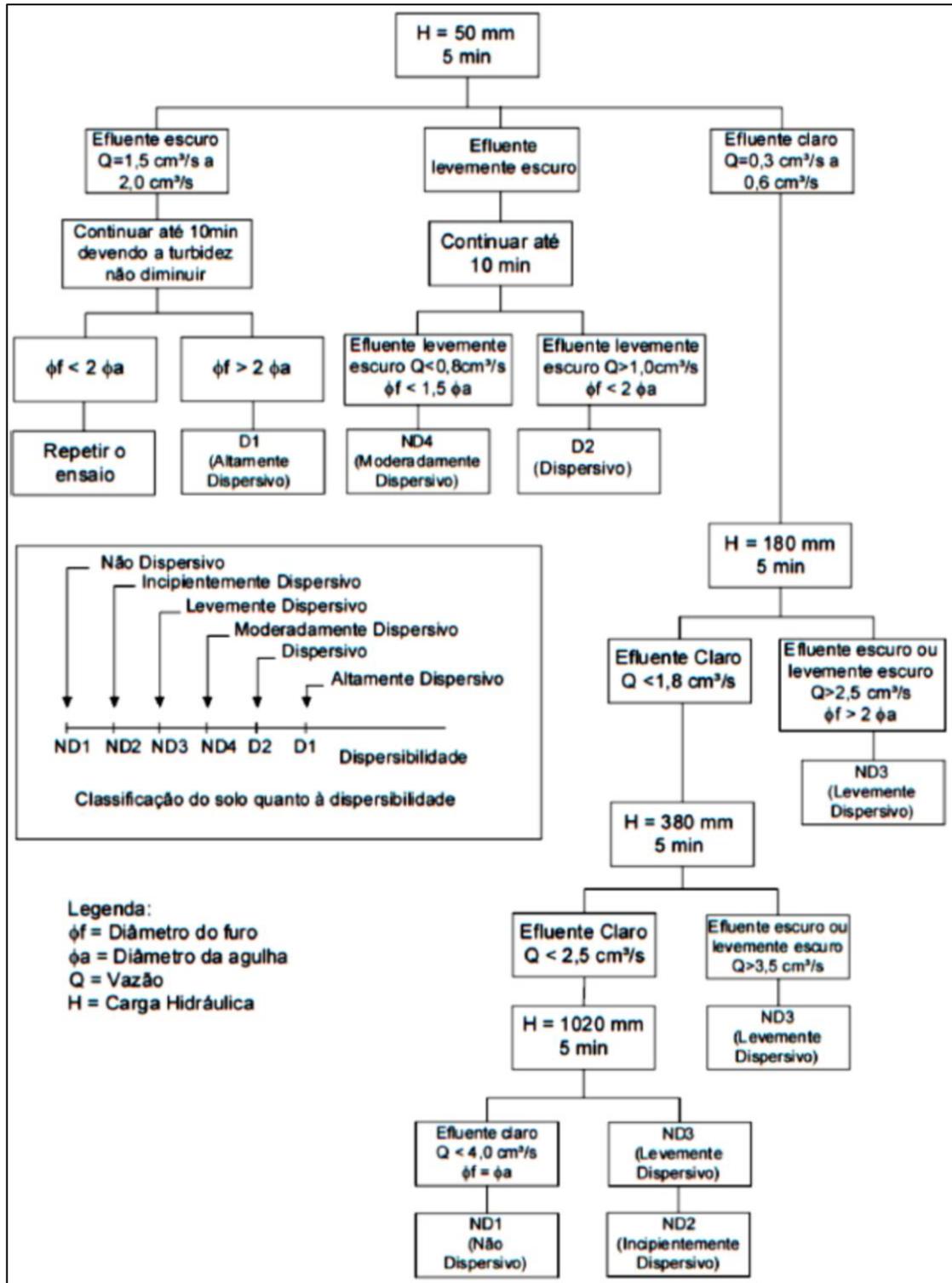


Figura 31: Fluxograma do *pinhole test* (ABNT, 1998)

## **4 RESULTADOS**

No presente capítulo apresenta-se a caracterização dos materiais empregados e os resultados dos ensaios mecânicos e de microestrutura.

### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

A caracterização do solo dispersivo, do pó de vidro moído e da cal de carbureto é apresentada na sequência. Essa inclui aspectos físicos, químicos e mineralógicos.

#### **4.1.1 Solo Dispersivo**

O solo utilizado no presente trabalho provém do Paraguai, de uma região denominada Baixo Chaco, a qual se localiza próxima aos rios Paraguai e Picolmayo, e está situada em uma bacia sedimentar do período quaternário (REDIEX, 2009). A figura 32 apresenta o mapa geológico do Paraguai, com a localidade do Baixo Chaco destacada em um círculo vermelho. Os solos desse local são conhecidos pela sua alcalinidade ( $\text{pH} > 8,5$ ) e presença de sódio adsorvido, o que os torna suscetíveis à dispersão e, por isso, a fenômenos erosivos. Nessa zona predominam terras baixas e inundáveis na época chuvosa (verão), sendo que a média pluviométrica anual está em torno de 1400 mm e a temperatura média é de  $28^{\circ}\text{C}$  (MARTÍNEZ e CABALLERO, 2017).

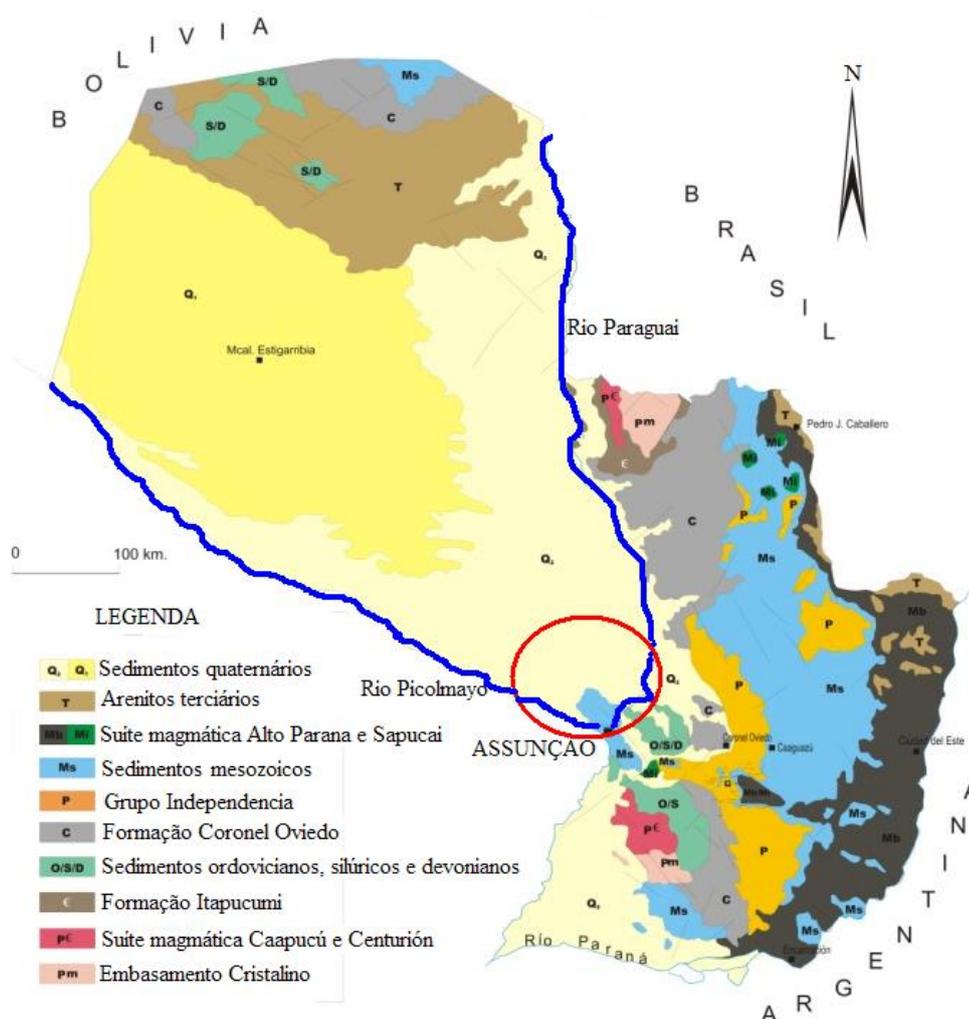


Figura 32: Mapa geológico do Paraguai com destaque para a região do Baixo Chaco (adaptado de REDIEX, 2009)

A distribuição granulométrica do solo dispersivo é apresentada a seguir (figura 33). Realizou-se o ensaio convencional, segundo a NBR 7181 (ABNT 1988), no qual a sedimentação se dá com o uso de defloculante, e o ensaio de sedimentometria comparativo segundo a NBR 13602 (ABNT 1996c). Nessa segunda norma, o procedimento de sedimentação é feito somente com o uso de água destilada, já que a tendência é que solos de natureza dispersiva se comportem de maneira semelhante na presença de água destilada pura ou água com defloculante. Dessa forma, foi possível a avaliação da porcentagem de dispersão do solo (PD), o qual é definido como a razão entre a porcentagem das partículas com diâmetro inferior a 0,005 mm determinada segundo a NBR 13602 pela mesma porcentagem aferida de acordo com a NBR 7181. O valor obtido para a PD foi de 88,90% (ver item 2.2.2.4).

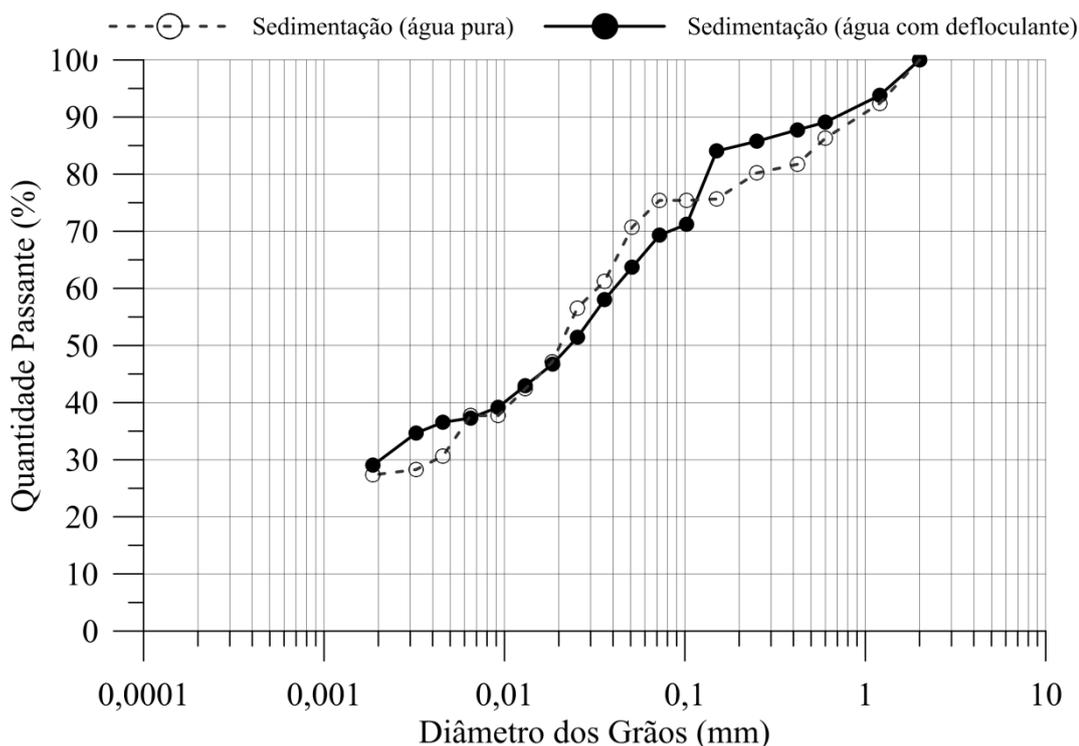


Figura 33: Distribuição granulométrica do solo dispersivo  
(elaborado pelo autor)

A tabela 3, a seguir, apresenta um resumo das demais características físicas do solo estudado. A figura 34, por sua vez, expõe as variações nos limites de Atterberg devido à adição de cal hidratada.

Tabela 3: Características físicas do solo dispersivo

Característica	Resultado	Norma
Limite de liquidez (LL)	43%	NBR 6459
Limite de plasticidade (LP)	19%	NBR 7180
Índice de plasticidade (IP)	24%	-
Peso específico real dos grãos (Gs)	2,74 g/cm <sup>3</sup>	NBR 7181
% Areia grossa (0,6 < d < 2 mm)	9	NBR 7181
% de Areia média (0,2 < d < 0,6 mm)	21	
% de Areia fina (0,06 < d < 0,2 mm)	32	
% Silte (0,002 < d < 0,06 mm)	8	
% Argila ( d < 0,002 mm)	30	
Crumb test	Grau 4	NBR 13601
Pinhole test	ND4	NBR 14114
Porcentagem de Dispersão	88,90%	NBR 13602

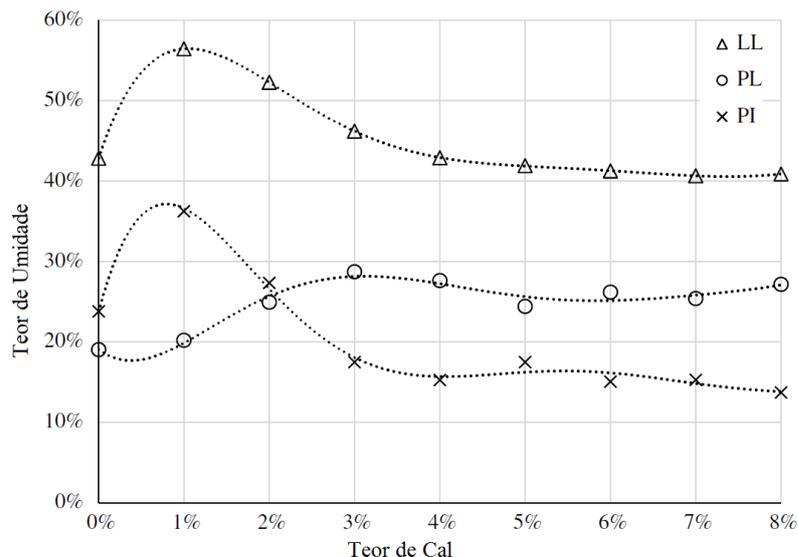


Figura 34: Variação dos limites de Atterberg com o teor de cal (CONSOLI et al., 2016)

As características químicas do solo no que diz respeito aos sais dissolvidos (e suas quantidades) e ao pH são apresentadas na tabela 4, a seguir. Com base nessas, é possível enquadrar, também, esse solo como dispersivo segundo o diagrama apresentado por Sherard et al. (1976) (figura 7). A CTC foi avaliada a pH 7,0 e considerou, apenas, a presença dos íons trocáveis: Al, Ca, Mg e Mn.

Tabela 4: Características químicas do solo dispersivo

Cátion	Resultado
Sódio – Na <sup>+</sup> (cmol/kg)	13,90
Potássio – K <sup>+</sup> (cmol/kg)	0,50
Cálcio – Ca <sup>+2</sup> (cmol/kg)	0,60
Magnésio – Mg <sup>+2</sup> (cmol/kg)	0,20
Característica	Resultado
Total de sais dissolvidos - TSD (cmol/kg)	15,20
Porcentagem de sódio – PS (%)	91,40
Razão de absorção de sódio (RAS)	21,98
Matéria orgânica (%)	0,20
Capacidade de troca catiônica – CTC (cmol/kg)	26,50
pH	8,52

As curvas de compactação do solo, do solo com adição de cal 5 % e do solo com a adição de 30 % de vidro moído são apresentadas na figura 35. Optou-se pela não realização de ensaio com a adição de 10 % de pó de vidro moído por se considerar irrisória essa quantidade na mudança granulométrica do solo original e, portanto, o efeito na curva de compactação seria

mínimo. Utilizaram-se as energias normal e modificada, sendo que os ensaios do solo com pó de vidro moído foram feitos com reaproveitamento de material e, desse modo, a cal não poderia ser adicionada nesse caso já que reagiria ao longo do ensaio. Os pontos destacados no gráfico representam as condições de moldagem dos corpos de prova em duas umidades distintas. As curvas de saturação foram traçadas para considerando apenas o solo.

Ainda, observa-se que a adição de cal hidratada implica em uma queda acentuada no máximo peso específico aparente seco atingido e em um acréscimo na umidade ótima. Isso está em consonância com o afirmado pela TRB (1987) e ocorre devido a mudanças na granulometria do solo decorrente dos processos de floculação e aglomeração das partículas pela adição do hidróxido de cálcio.

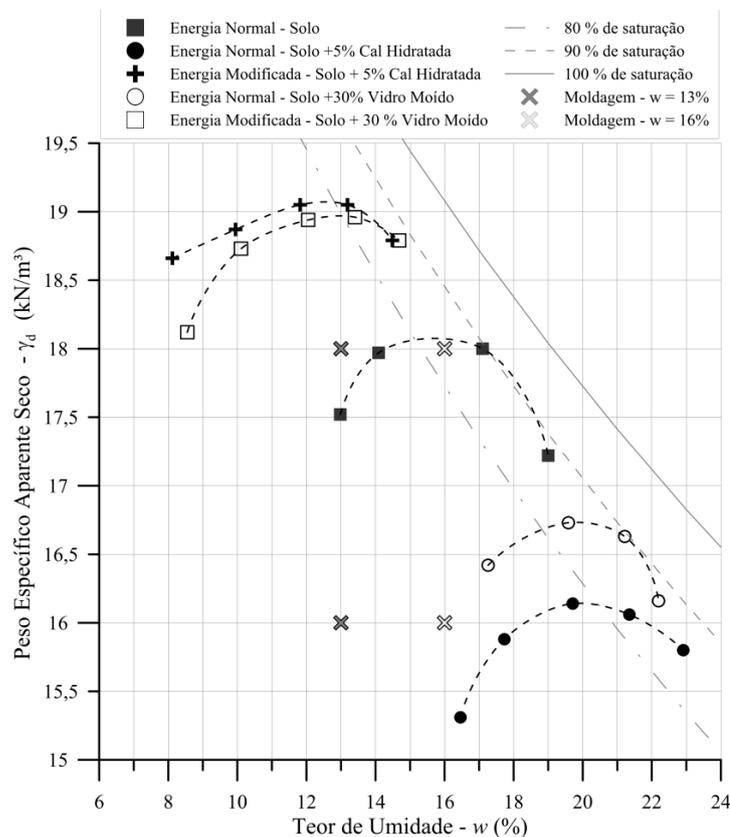


Figura 35: Curvas de compactação do solo dispersivo  
(elaborado pelo autor e adaptado de SAMANIEGO, 2015)

A caracterização mineralógica do solo compreendeu quatro ensaios de difração de raios-X executados em um difratômetro da marca Siemens (modelo D-5000) equipado com tubo de ânodo fixo de Cobre ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ). O **primeiro** (figura 36) foi realizado através do método do pó, no qual o material pulverizado e desagregado é depositado no porta-amostra de modo a preservar a desorientação das partículas minerais do solo. Nesse, o intervalo angular analisado

foi de 2 a 72° 2θ em passo de 0,02°/s utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 1° e 0,6 mm no detector, sendo as fases cristalinas identificadas através das distâncias interplanares (valores de  $d$ ) e das intensidades relativas aos picos do difratograma. Foram encontradas as seguintes fases minerais: quartzo, ilita, caulinita, plagioclásio, K-feldspato e esmectita. Os principais picos relativos a essas estão indicados no difratograma e os demais picos correspondem, da mesma forma, a essas fases.

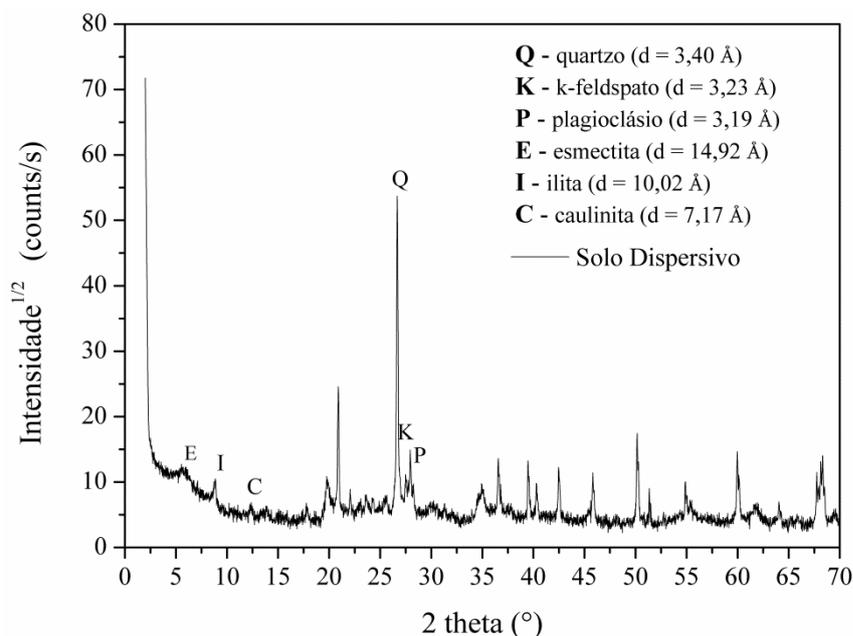


Figura 36: Difratograma do solo dispersivo

(elaborado pelo autor)

Os outros três ensaios (figura 37) foram executados na fração do solo cujas partículas têm diâmetro inferior a 4  $\mu\text{m}$  e seguiu o método orientado no qual as faces (001) são privilegiadas com o intuito de identificação dos argilominerais presentes. Para separação dessa porção de solo, a amostra foi previamente quarteada, desagregada por três métodos distintos (em gral de porcelana, agitação orbital durante 14 horas e ultrassom de ponteira por 5 minutos) e decantada durante 1h 19 min 52 s (tempo estipulado pela Lei de Stokes). Os ensaios tiveram intervalo angular de 2 a 28° 2θ em passo de 0,02°/2s (amostras orientada natural e calcinada) e 0,02°/3s (amostra glicolada). As técnicas de preparação das amostras para cada ensaio foram as seguintes:

- a) amostra natural: a fração de solo inferior a 4  $\mu\text{m}$  era posicionada de forma orientada para o ensaio;

- b) amostra glicolada: a amostra natural era saturada com etileno glicol a fim de que se verificasse com maior exatidão a presença de minerais expansivos;
- c) amostra calcinada: visando uma identificação mais precisa de argilominerais que colapsassem em altas temperaturas (i.e. caulinita), a amostra natural era previamente aquecida a 550°C durante duas horas antes de ser testada.

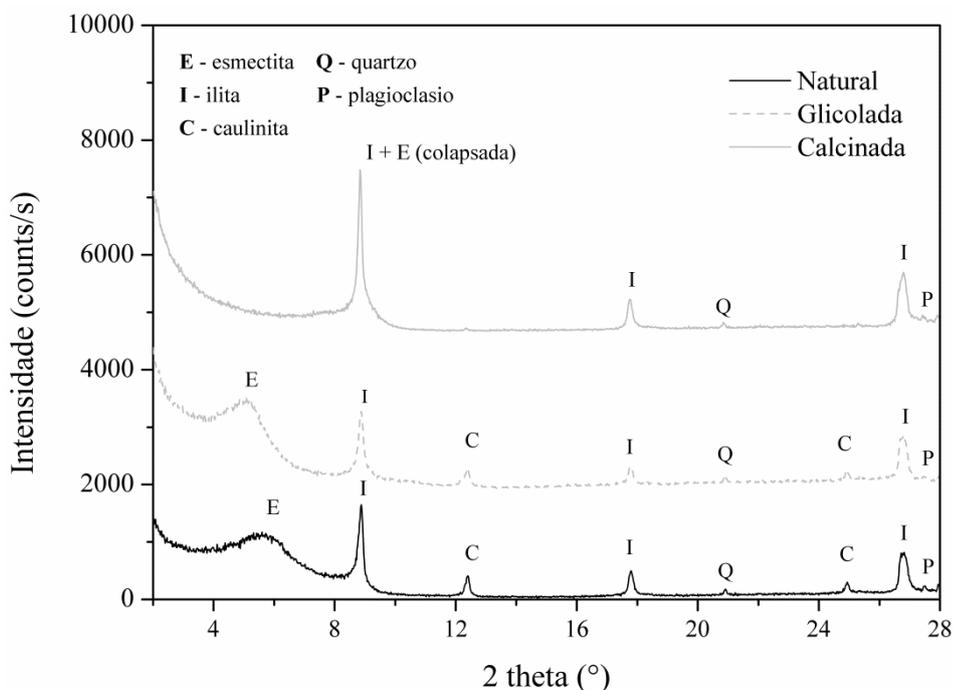


Figura 37: Difratograma do solo dispersivo através do método orientado (elaborado pelo autor)

A partir dos difratogramas apresentados na figura 37, atesta-se a presença do mineral expansivo esmectita, já que houve um deslocamento do pico observado entre as amostras natural (15,797 Å) e glicolada (17,099 Å), isto é, nota-se a expansão desse mineral em função da absorção de etileno glicol. Também, observou-se a presença de caulinita, tendo em vista que essa não resiste à temperatura de 550°C e seu pico correspondente desaparece na amostra calcinada. Ainda, nota-se o deslocamento do pico de esmectita para junto do pico de ilita na amostra calcinada, pois há o colapso da estrutura daquele mineral devido ao elevado aquecimento do solo.

Uma aproximação semiquantitativa, calculada a partir do fator de escala de cada fase, é apresentada na tabela 5, lembrando que a ficha cristalográfica provém do ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*).

Tabela 5: Fases minerais detectadas no solo dispersivo

Fase Mineral	Ficha Cristalográfica	Aproximação Semiquantitativa (%)
Quartzo	01-086-1630	47,60
Ilita	00-002-0056	4,10
Caulinita	01-075-0938	3,40
Plagioclásio	01-083-1371	14,80
K-Feldspato	01-084-1455	19,30
Esmeectita	00-003-0015	10,80

Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS) foram realizadas no solo a fim de que se pudesse avaliar o formato, o arranjo e a composição química das partículas que o compõem. Nesse sentido, as figuras 38 a 39 apresentam as imagens de MEV, para ampliações de 400, 1000, 2500 e 10000 vezes, e as figuras 40 e 41 expõem os resultados de EDS contendo a composição química geral e de um grão específico do solo. Utilizou-se o solo destorroado passante na peneira de malha # 100 ( $d < 0,149$  mm) e, por restrições do equipamento, o solo empregado no ensaio deveria estar seco, o que torna inviável a visualização da estrutura de natureza dispersiva desse quando em contato com a água. Além disso, a preparação da amostra de solo deu-se através de metalização com carbono a fim de que uma visualização mais nítida dos grãos fosse possível.

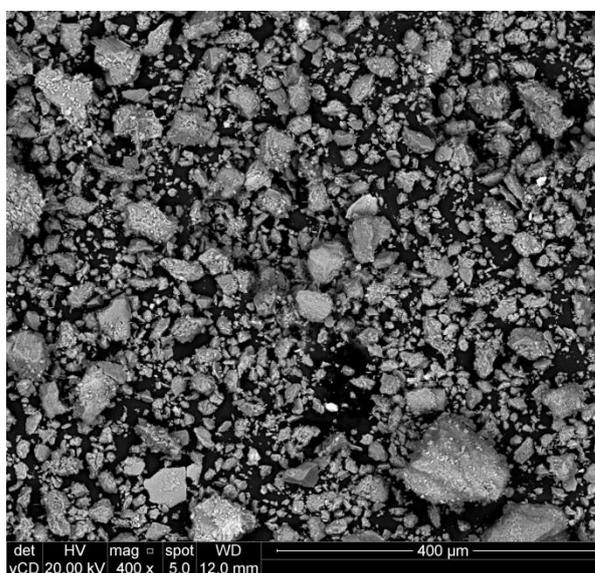


Figura 38: Imagem de MEV do solo dispersivo ampliada 400 x (foto do autor)

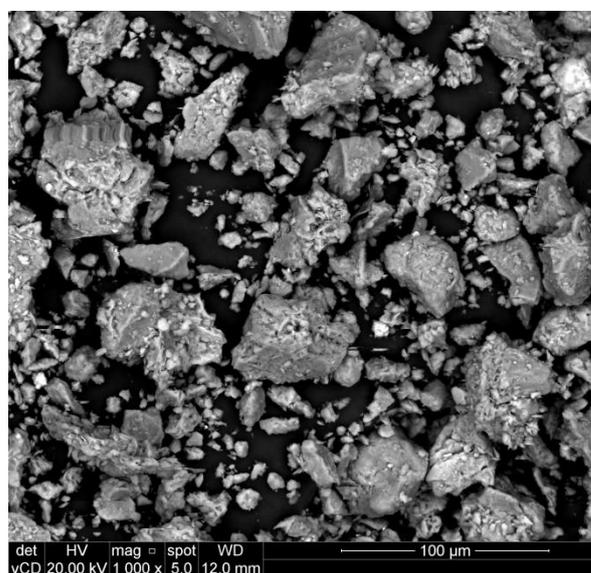


Figura 39: Imagem de MEM do solo dispersivo ampliada 1000 x (foto do autor)

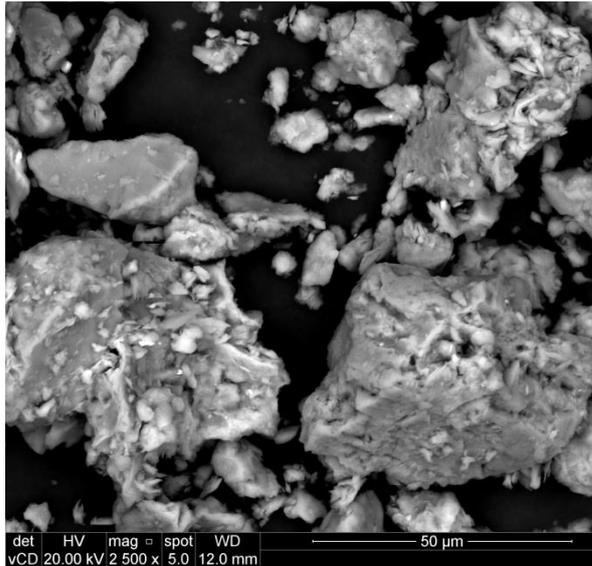


Figura 40: Imagem de MEV do solo dispersivo ampliada 2500 x (foto do autor)

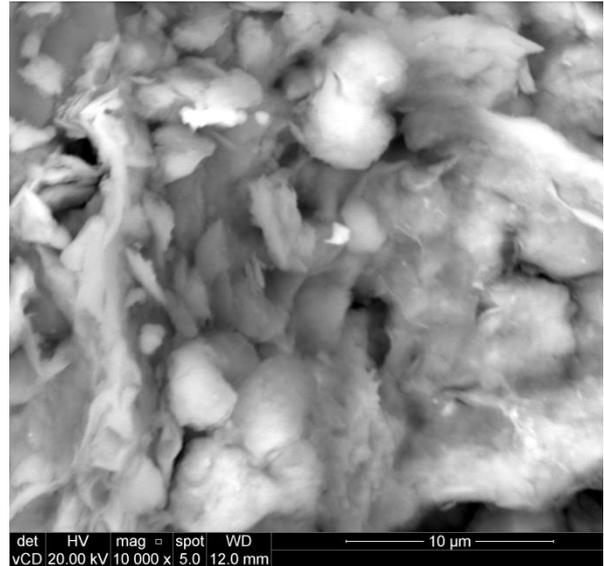


Figura 41: Imagem de MEM do solo dispersivo ampliada 10000 x (foto do autor)

Das imagens de MEV, nota-se que o solo estudado é formado, em geral, por partículas siltosas medianamente esféricas e um tanto angulosas, possuindo um formato irregular. Percebe-se, ainda, que a essas estão aderidas partículas de menor dimensão (figura 40), provavelmente argilominerais, os quais são responsáveis pela conexão entre os grãos de maior dimensão. Ilacões acerca da distribuição e tamanho dos poros não podem ser feitas, pois o material ensaiado não se encontrava em seu estado natural, isto é, não estava intacto.

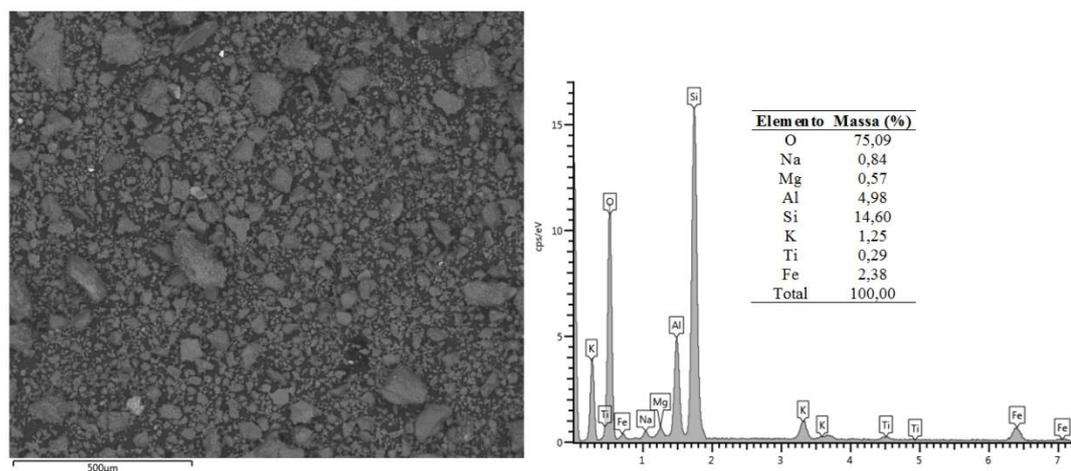


Figura 42: Resultado de EDS geral do solo dispersivo (elaborado pelo autor)

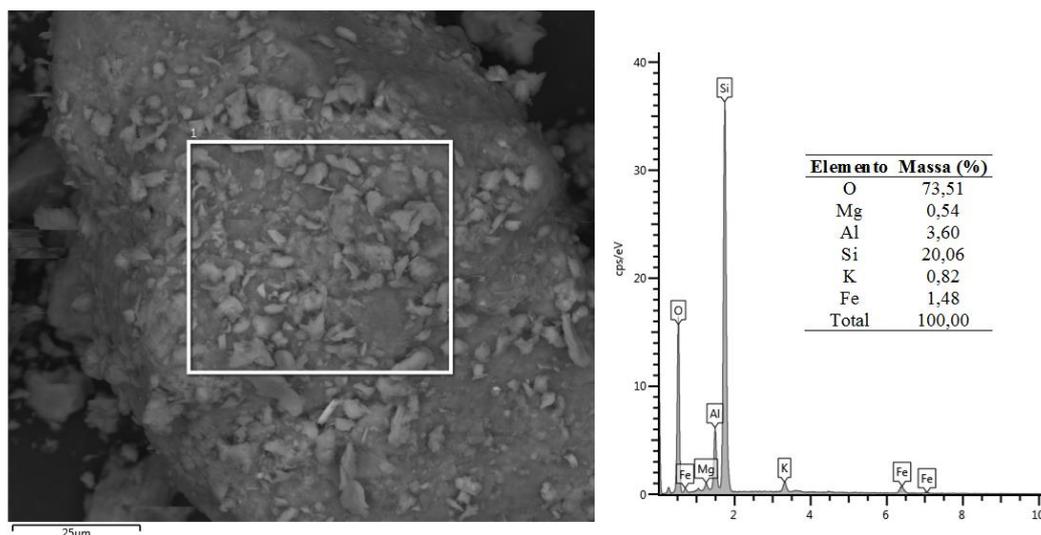


Figura 43: Resultado de EDS de grão do solo dispersivo  
(elaborado pelo autor)

A partir dos resultados de EDS apresentados nas figuras acima, nota-se que o solo é constituído majoritariamente por componentes à base de silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), potássio (K) e magnésio (Mg). Nota-se, como esperado, a presença de sódio (Na) e, ainda em menor proporção, de titânio (Ti). Ressalta-se, ademais, que os pontos que exibem maior claridade na figura 42 são relativos a substâncias compostas por elementos de maior massa atômica. De maneira geral, esses resultados estão de acordo com a composição mineralógica verificada nos ensaios de difração de raios-X, bem como com o relatório exposto na tabela 4. Outrossim, nota-se a distinção na composição química geral do solo ensaiado (figura 42) e de um dos grãos desse (figura 43), já que nesse último não foram detectadas as presenças de sódio e de titânio.

A figura 44, abaixo, apresenta os resultados da análise térmica realizada no solo dispersivo, a qual foi realizada com o material destorroado a fim de que passasse na peneira de malha #200 (0,075 mm). Essa análise englobou a termogravimetria (TGA), que atesta a perda de massa em decorrência do aumento da temperatura, e a derivada da termogravimetria (DTG), a qual possibilita a identificação de picos característicos relativos à decomposição de certas substâncias. No DTG apresentado notam-se 3 picos bem demarcados em torno de 70°C, 170°C e 530°C. O primeiro refere-se à evaporação da umidade higroscópica (água livre) da amostra, o segundo deve-se à perda de água adsorvida de alguns argilominerais e o terceiro à desidroxilação de argilominerais como a caulinita e a esmectita (SOUSA et al., 2005; PAIVA et al., 2008; LIMA JUNIOR et al. 2011). A perda de massa total fica em torno de 9 %, sendo que 5 % corresponde à evaporação de água livre.

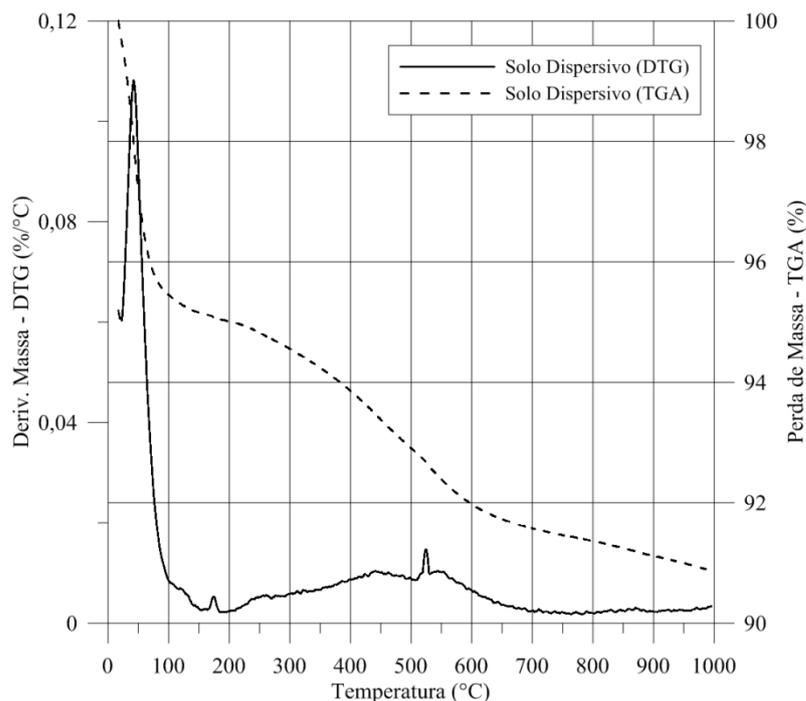


Figura 44: TGA e DTG do solo dispersivo  
(elaborado pelo autor)

#### 4.1.2 Pó de Vidro Moído

O vidro utilizado no presente trabalho é da cor marrom (encontrado em garrafas comuns) e o procedimento de moagem e peneiramento seguiu um processo padronizado a fim de que se obtivesse um material com o maior nível de homogeneidade possível. Em suma, 1,30 kg de vidro eram separados e devidamente limpos para serem posteriormente moídos durante 6 horas em um moinho de bolas metálicas. O número de bolas metálicas utilizadas por batelada de moagem também era controlado. Ao final desse processo, o material era peneirado até a fração que era realmente utilizada, isto é, a passante na peneira de malha # 200 ( $d < 0,075$  mm). O rendimento médio desse processo está em torno de 30 a 35% ou seja, para cada 1,30 kg de vidro moído durante seis horas, obtinha-se em torno de 450 g de pó passante na peneira #200.

As distribuições granulométricas do pó de vidro obtidas via ensaio de sedimentação com o uso de defloculante (peneiramento) e por difração a laser (sem o uso de dispersante) são apresentadas na figura 45 e na tabela 6. Nota-se uma considerável diferença entre as distribuições oriundas dos dois ensaios, já que pelo ensaio de sedimentação obtém-se um material com granulometria mais fina devido a completa dispersão entre as partículas de menor dimensão do material, o que pode indicar dispersão do agente sobre as partículas de vidro.

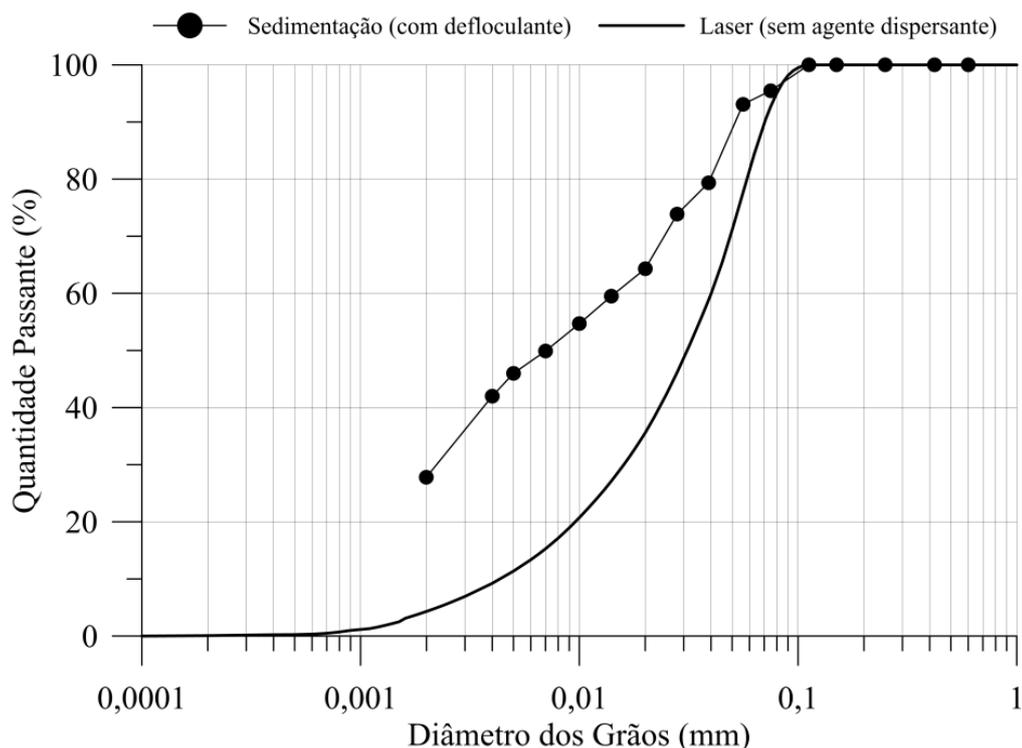


Figura 45: Distribuição granulométrica do pó de vidro moído  
(elaborado pelo autor)

Tabela 6: Características físicas do pó de vidro moído

Característica	Resultado	Norma
Peso específico real dos grãos (Gs)	2,45 g/cm <sup>3</sup>	NBR 6508
Superfície específica (SSA)	5,45 m <sup>2</sup> /g	BET
pH	10,58	ASTM D 4972
% Passante peneira #200	100	NBR 7181
% de Areia fina (0,06 < d < 0,2 mm)	49	
% Silte (0,002 < d < 0,06 mm)	23	
% Argila (d < 0,002 mm)	28	

Nota-se que a superfície específica, determinada pelo método de BET, do pó de vidro utilizado é da ordem de 5,45 m<sup>2</sup>/g. Sales (2014) encontrou valores semelhantes para o pó de vidro com que estava trabalhando, isto é, 5,23 m<sup>2</sup>/g para o pó oriundo do vidro incolor e 3,06 m<sup>2</sup>/g para o oriundo do vidro âmbar. Valores esses são superiores aos que indicariam uma pozolana reativa (COUTINHO<sup>1</sup>, 1997 apud SALES, 2014). O pH do pó de vidro moído, medido em uma solução com água destilada em concentração 1:1, foi de 10,58. O ensaio de difração de raios-X realizado no pó de vidro moído foi executado conforme o método do pó em um intervalo angular de 5 a

<sup>1</sup> COUTINHO, A.S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, v. 1, Lisboa, 1997.

75° de 2θ e o seu difratograma, em conjunto com o halo amorfo (background) estimado pelo software *Xpert Highscore*, está apresentado na figura 46, a seguir.

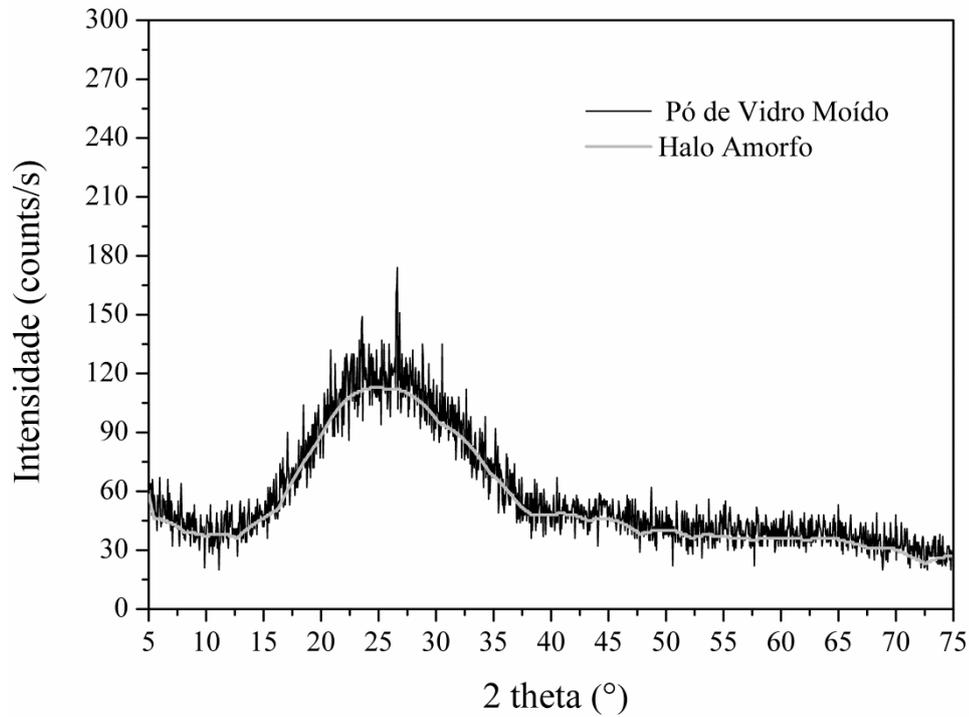


Figura 46: Difratograma do pó de vidro moído  
(elaborado pelo autor)

A despeito da existência de um pequeno pico em torno de 26°, não foram identificadas quaisquer fases minerais, o que indica a inexistência de uma estrutura bem definida, isto é, denota um alto grau de amorfismo. Nesse sentido, empregou-se o Método da Cristalinidade (eq 8) relativa para estimar o percentual da fração amorfa do material (%<sub>A</sub>) do material. Essa resultou em aproximadamente 99,00%.

$$\%_A = 100 \times \left( 1 - \frac{I_{DRX} - I_{H.A}}{I_{H.A}} \right) \quad (\text{eq. 8})$$

Sendo:

$I_{DRX}$  : integral do resultado do DRX calculado ao longo do intervalo 5 -75° de 2 theta;

$I_{H.A}$  : integral do resultado do halo amorfo calculado (*background*) ao longo do intervalo 5 - 75° de 2 theta.

Ainda, a atividade pozolânica do pó de vidro moído (VM) aqui empregado foi constatada através da elaboração de uma argamassa composta unicamente por ele e 12 % de cal de carbureto (CC), com um teor de umidade de 20 %. Realizaram-se dois ensaios de difratometria

de raios-X nesse material, sendo um aos 7 dias de cura e outro aos 30 dias de cura. Os resultados desses são expostos na figura 47, na qual se apresenta, também, o difratograma do pó de vidro moído para fins de comparação. Aos 7 dias, notam-se os picos relativos ao hidróxido de cálcio (ver figura 54), os quais desaparecem aos 30 dias, indicando, assim, seu consumo nas reações com os silicatos presentes no pó de vidro moído. Um dos produtos dessa reação é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que pôde ser identificado aos 30 dias de cura.

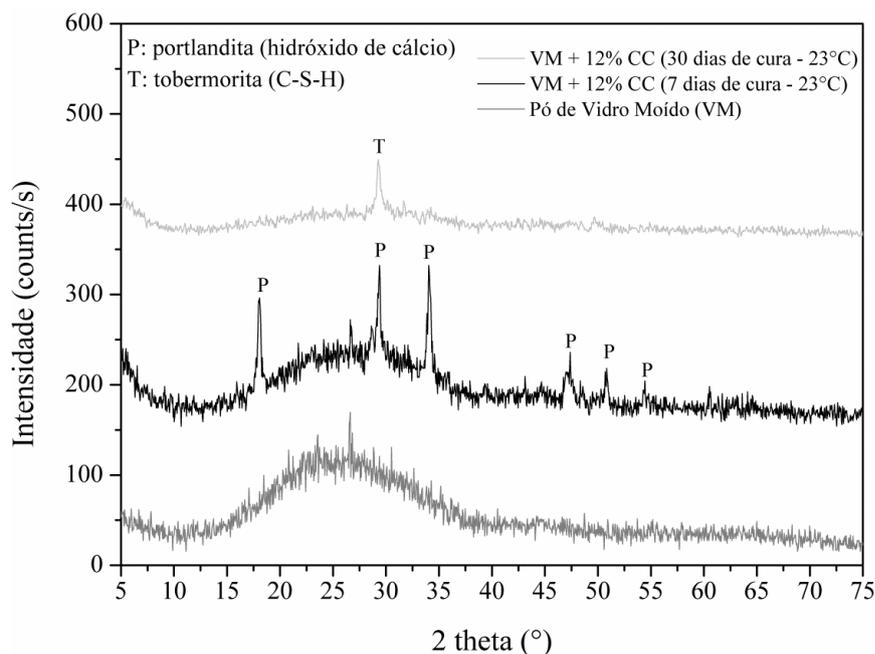


Figura 47: Difratograma do pó de vidro moído com adição de cal de carbureto  
(elaborado pelo autor)

A composição química do pó de vidro utilizado no presente estudo é exposta na tabela 7, a seguir. Também, apresentam-se resultados obtidos por outros autores, em vidros similares, com o intuito de comparação. Todos os resultados foram obtidos a partir de ensaios de fluorescência de raios-X (FRX), lembrando que, embora esse tipo de resultado seja apresentado em termos de óxidos, a composição química obtida é elementar, não havendo distinção entre substâncias diferentes compostas pelo mesmo elemento. Isto é, CaO, por exemplo, refere-se ao elemento cálcio (Ca) e não necessariamente ao óxido de cálcio.

Tabela 7: Composição química do vidro

Óxido	Presente Estudo	Sales et al. (2014)*	Pereira et al. (2012)*	Degirmenci et al. (2011)***
SiO <sub>2</sub>	75,00 %	72,95 %	72,25 %	68,92 %
CaO	17,36 %	9,28 %	12,35 %	8,76 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,64 %	0,82 %	2,54%	1,02 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,74 %	0,66 %	-	0,52 %
Na <sub>2</sub> O	1,44 %	6,00 %	10,54 %	8,42 %
K <sub>2</sub> O	1,19 %	-	1,18 %	3,43 %
MgO	0,21 %	3,58 %	-	-
TiO	0,19 %		1,15 %	-
SO <sub>3</sub>	0,12 %	-	-	0,13 %
SrO	0,08 %	0,25%	-	0,20 %

\*vidro âmbar    \*\*vidro marrom    \*\*\*vidro branco

Analogamente ao que foi realizado para o solo dispersivo, efetuaram-se ensaios de MEV com EDS para o pó de vidro moído a fim de que características visuais microscópicas, bem como a composição química do material, fossem verificadas. Nesse sentido, as figuras 48, 49 e 50 apresentam as imagens de microscopia eletrônica de varredura para as ampliações de, respectivamente, 400, 1000 e 2500 vezes e a figura 51 expõe o resultado de EDS para o material como um todo.

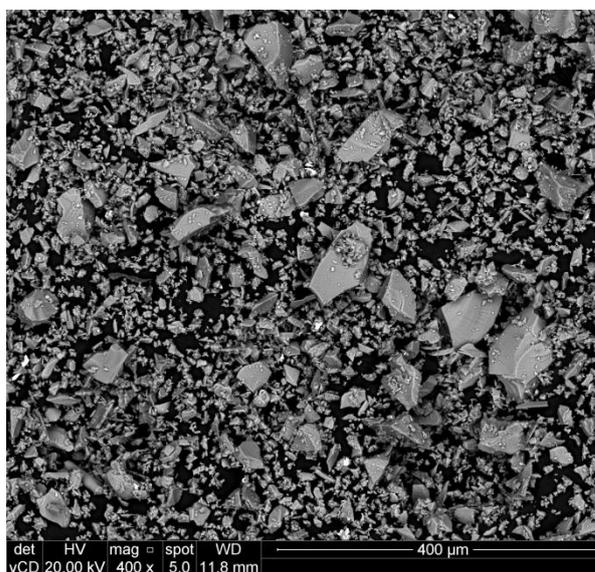


Figura 48: Imagem de MEV do VM ampliada 400 x (foto do autor)

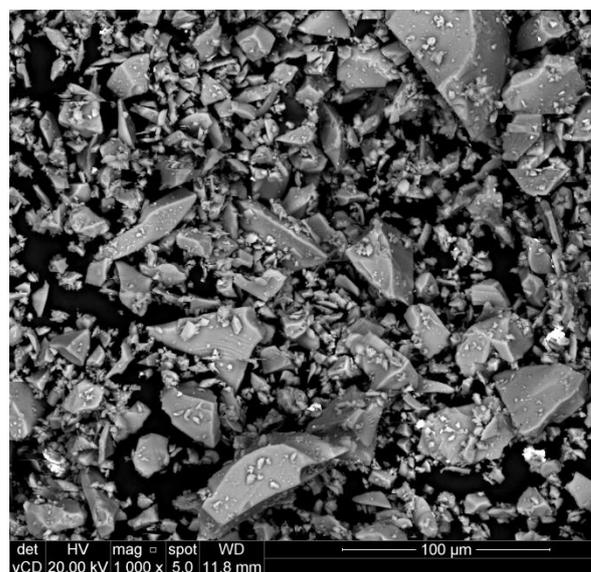


Figura 49: Imagem de MEM do VM ampliada 1000 x

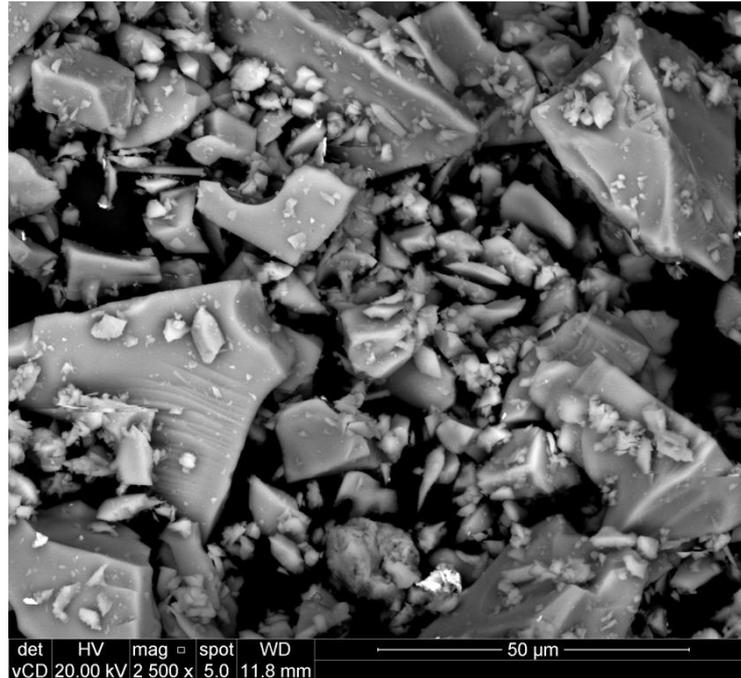


Figura 50: Imagem de MEV do VM ampliada 2500 x  
(foto do autor)

De maneira geral, nota-se que o pó de vidro moído é constituído por partículas com geometria irregular, poucos esféricas e bastante angulosas, sendo que a maioria dessas tem tamanho deveras inferior a 50  $\mu\text{m}$ . A textura superficial das partículas aparenta ser regular e pouco rugosa. Além disso, observa-se que não há uma ligação efetiva entre as partículas, ocorrendo somente contatos grão-grão.

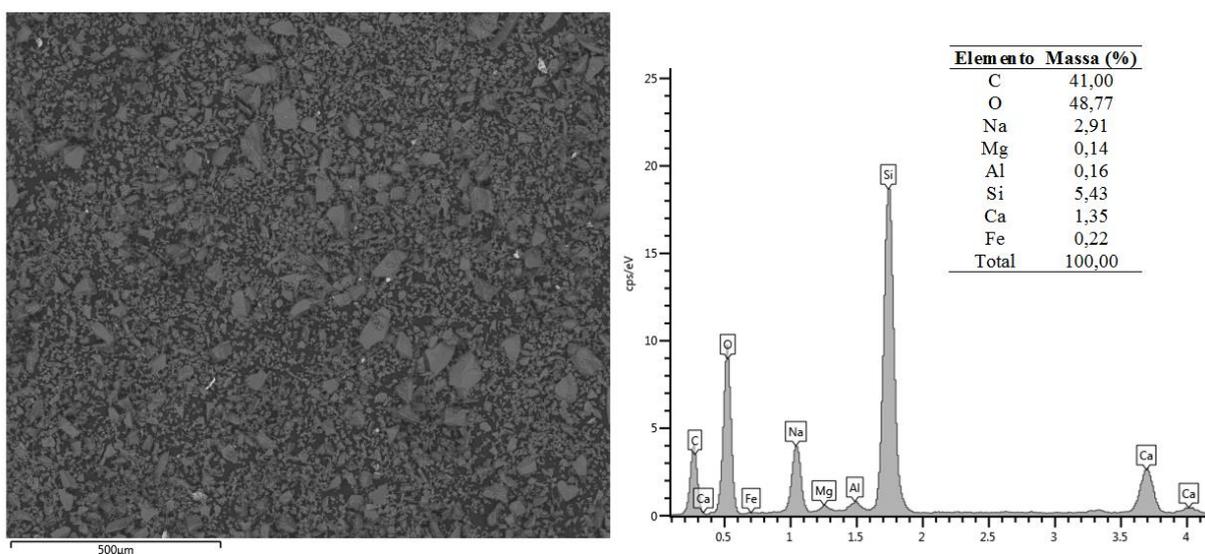


Figura 51: Resultado de EDS do pó de vidro moído  
(elaborado pelo autor)

Os resultados de EDS mostram que o pó de vidro moído é composto majoritariamente por silício (Si), sódio (Na), cálcio (Ca), ferro (Fe), alumínio (Al) e magnésio (Mg). O carbono detectado é oriundo do banho de carbono realizado na amostra em procedimento prévio ao ensaio. De maneira geral, esses resultados estão em concordância com o que foi verificado na fluorescência de raios-X (tabela 6) e com o que é esperado para a composição química de vidros soda-cal. Resultados semelhantes foram verificados por Galvão et al. (2014).

Os resultados dos ensaios térmicos (TGA e DTG) para o pó de vidro moído são expostos na figura 52, a seguir. Apesar de ter sido registrada uma perda de massa total de, aproximadamente, 2,5 %, não foi possível a identificação de nenhum padrão específico relativo à degradação de determinado material. Nota-se que a linha da termogravimetria a é contínua e não há qualquer pico que se destaque.

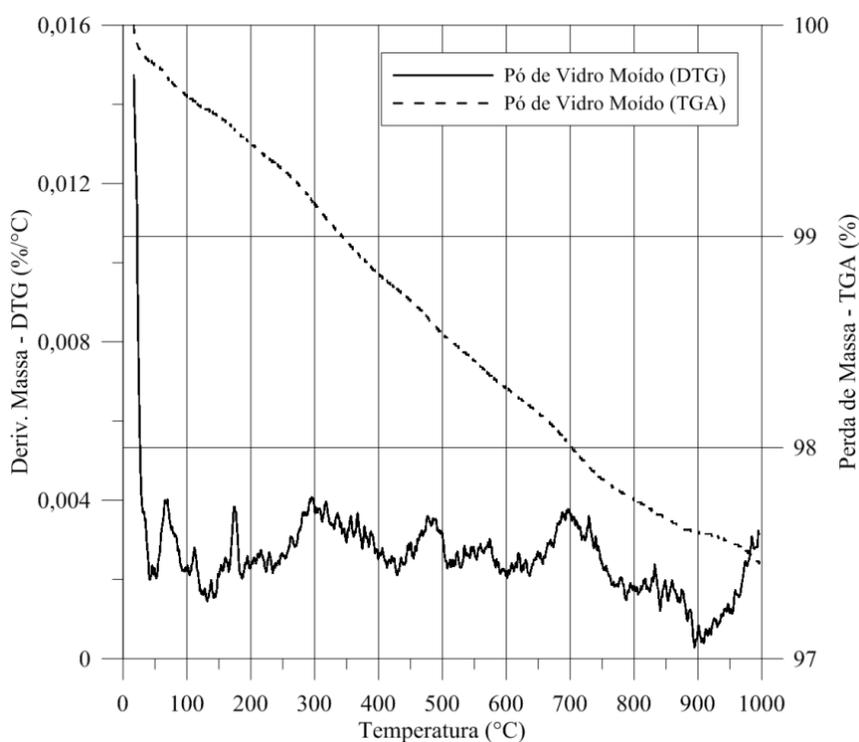


Figura 52: TGA e DTG do pó de vidro moído  
(elaborado pelo autor)

### 4.1.3 Cal de Carbureto

A cal de carbureto utilizada no presente estudo é um resíduo da produção de gás acetileno de uma indústria localizada na região metropolitana de Porto Alegre – RS. O material, quando coletado, vem úmido e com uma consistência aquosa. Portanto, anteriormente ao seu uso, deve ser seco a 50°C durante dois ou três dias. Após seco, o material é destorroado e passado na peneira de malha #100 ( $d < 0,149$  mm), a fim de que se obtenha um pó com certo nível de uniformidade. O material em pó é então guardado em uma embalagem hermética de modo a evitar a reação do óxido de cálcio com o dióxido de carbono presente no ar que levaria a carbonatação do material (formação de  $\text{CaCO}_3$ ).

A distribuição granulométrica da cal de carbureto é apresentada na figura 53, a seguir. Um resumo das propriedades físicas dessa é exposta na tabela 8. Nota-se o elevado valor encontrado para a superfície específica, o que pode ser um indicativo de grande reatividade do material.

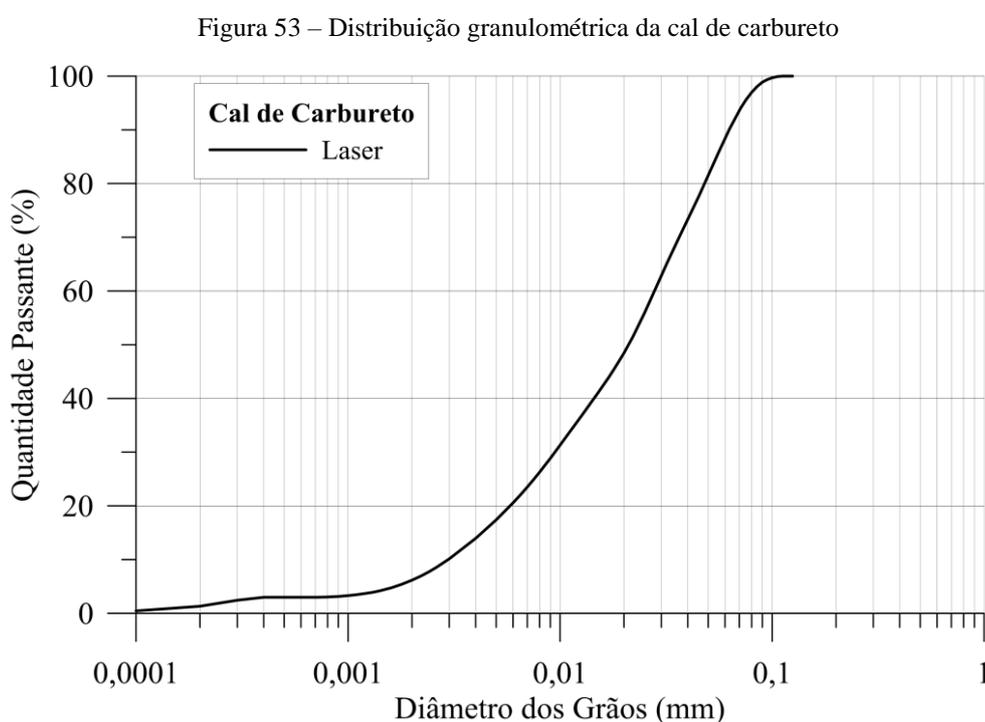


Figura 53: Distribuição granulométrica da cal de carbureto  
(SALDANHA et al., 2018)

Tabela 8: Propriedades físicas da cal de carbureto (SALDANHA et. al., 2018)

Característica	Resultado	Norma
Peso específico real dos grãos (Gs)	2,19 g/cm <sup>3</sup>	NBR 6508
Superfície específica (SSA)	22.60 m <sup>2</sup> /g	BET
% de Areia fina (0,06 < d < 0,2 mm)	82	Análise da granulometria a laser
% Silte (0,002 < d < 0,06 mm)	16	
% Argila (d < 0,002 mm)	2	

A composição química da cal de carbureto utilizada é apresentada na tabela 9. Também, são apresentadas as composições químicas de outras cales de carbureto encontradas na literatura.

Tabela 9: Composição química da cal de carbureto

Óxido	Presente Estudo	Horpibulsuk et al. (2013)	Vichan e Rachan. (2013)	Jiang et al. (2016)
CaO	74,00 %	70,78 %	83,10 %	68,99 %
SiO <sub>2</sub>	3,10 %	6,49 %	5,71 %	2,84 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,46 %	2,55 %	2,61 %	2,16 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26 %	3,25 %	0,72 %	0,15 %
MgO	0,72 %	0,69 %	0,80 %	0,12 %
SO <sub>3</sub>	0,54 %	0,66 %	0,05 %	0,76%
Na <sub>2</sub> O	-		0,29%	-
K <sub>2</sub> O	-	7,93 %	-	-
LOI*	20,9 %	7,70 %	6,70 %	25,0 %

\* LOI = *loss on ignition* (perda ao fogo)

O ensaio de difração de raios-X é exposto na figura 54, a seguir. Nota-se a presença majoritária do mineral portlandita, o qual corresponde à fase cristalina do hidróxido de cálcio presente na cal de carbureto. Também, mas de forma minoritária, detectou-se a presença de calcita, a qual é oriunda do processo de carbonatação do hidróxido de cálcio quando em contato com o ar. No entanto, percebe-se que a presença de carbonato de cálcio em relação ao hidróxido de cálcio é praticamente irrisória. O carbono aparece na forma de grafite como um mineral traço, provavelmente da produção de gás acetileno. Uma análise semiquantitativa indicou que, no que diz respeito às fases minerais, essa cal possui em torno de 96% de portlandita e 4% de calcita.

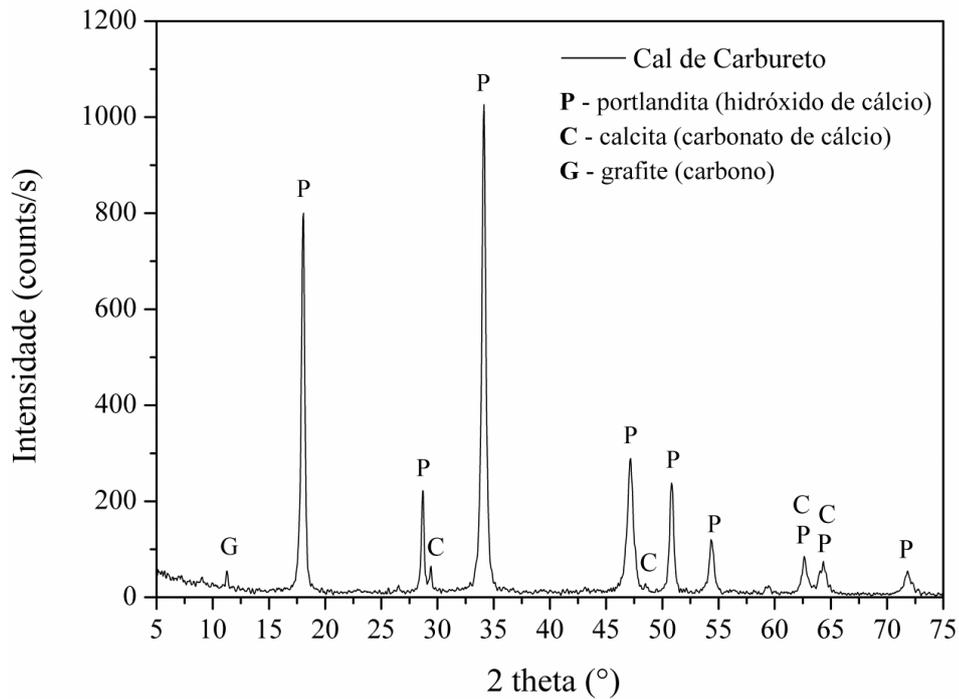


Figura 54: Difratoograma da cal de carbureto  
(elaborado pelo autor)

Duas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da cal de carbureto são expostas nas figuras 55 e 56, abaixo. Na sequência apresenta-se, também, o resultado de EDS para o mesmo material.

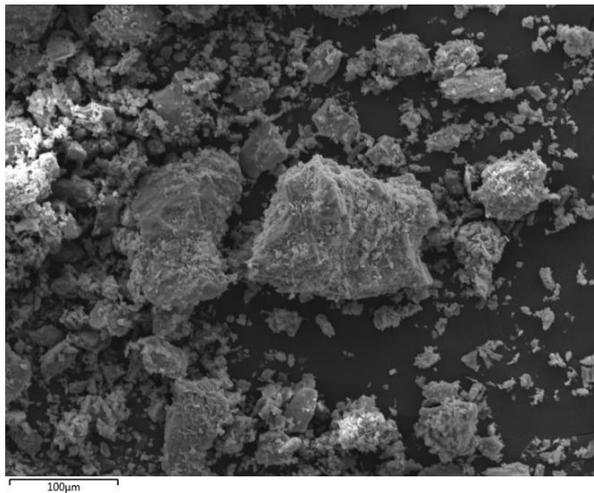


Figura 55: Imagem de MEV da CC ampliada 400 x (foto do autor)

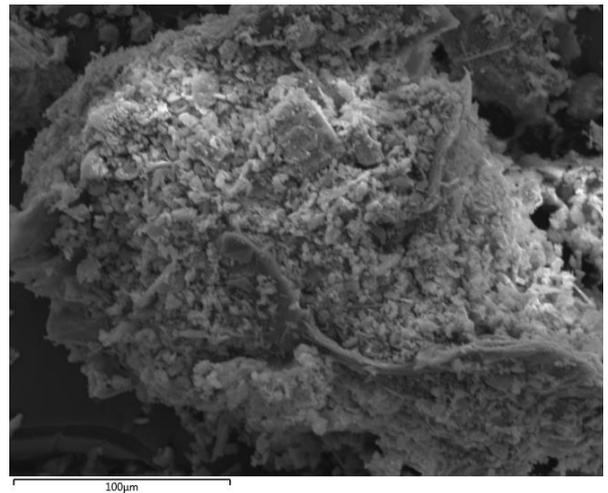


Figura 56: Imagem de MEM da CC ampliada 800 x (foto do autor)

Das imagens acima é possível notar que essa cal é constituída por partículas aglomeradas, de formato medianamente esférico, levemente angular e cuja textura superficial parece bastante irregular. Aparentemente, não há qualquer partícula com características muito distintas dessas.

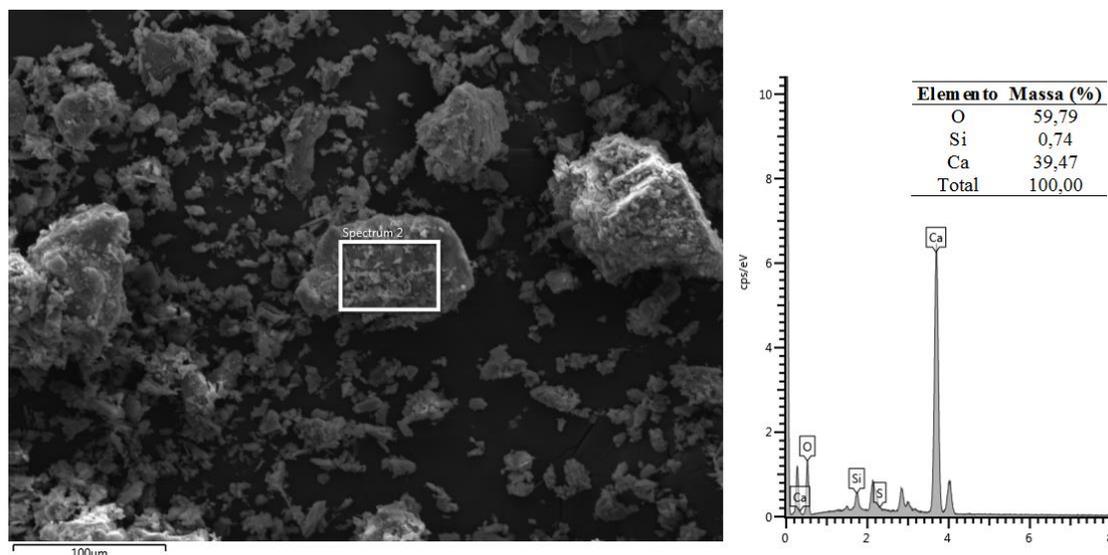


Figura 57: Resultado de EDS da cal de carbureto  
(elaborado pelo autor)

Os elementos verificados no ensaio de EDS estão em concordância com os resultados de fluorescência de raios-X apresentados na tabela 8, mesmo que alguns elementos de menor importância não tenham sido identificados no primeiro. O EDS atestou a presença majoritária de cálcio (Ca) e uma pequena fração de silício (Si).

O resultado da análise termogravimétrica (TGA) da cal de carbureto é apresentado na figura 58. Nesse, notam-se dois picos distintos em 500°C e 700°C, sendo o primeiro correspondente à degradação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ) e o segundo é relativo à decomposição do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Ao final do ensaio a perda de massa total da amostra foi de 27,50 %, sendo que 19,71 % pode ser atribuído à deterioração do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e 4,14 % à decomposição do  $\text{CaCO}_3$ . O restante é relativo à perda de água adsorvida pela amostra. Por estequiometria, portanto, essa cal possui em torno de 81 % de hidróxido de cálcio livre e 9,40 % de carbonato de cálcio. Cabe ressaltar que esse último pode aumentar devido ao processo de carbonatação se a cal não estiver propriamente acondicionada.

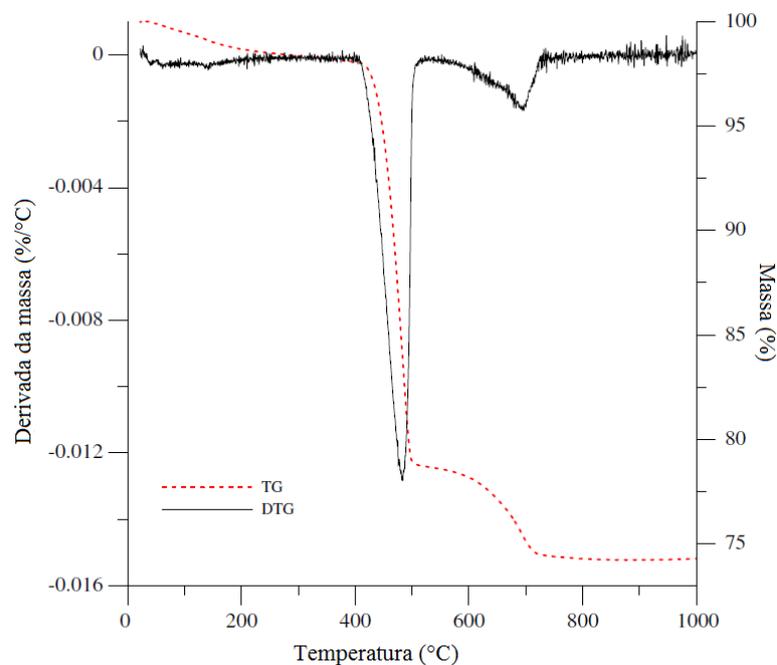


Figura 58: Resultado de TGA da cal de carbureto  
(SALDANHA et al., 2018)

## 4.2 RESULTADOS DO PROJETO FATORIAL FRACIONADO

A execução do projeto fatorial fracionado está dividida em (a) ensaios de compressão simples, (b) módulo cisalhante inicial, (c) durabilidade, (d) avaliação do módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de durabilidade e (e) *pinhole test*. Nesse sentido, a tabela 10 apresenta os tratamentos relativos aos experimentos (a) e (b) e a tabela 11 expõe os referentes aos demais. Ainda, ressalta-se que houve replicação completa nos dois métodos de cura (selada e imersa) dos tratamentos expostos na tabela 10. Da mesma forma, isso ocorreu para duas temperaturas de cura nos ensaios (d) apresentados na tabela 11. O software de estatística *Minitab 17* foi utilizado na elaboração dos projetos experimentais e na análise estatística dos resultados.

Tabela 10: Tratamentos relativos aos ensaios de resistência e rigidez

Tratamento	Ordem de ensaio	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	CC (%)	VM (%)	w (%)	T (°C)
1	14, 15, 18	18	5	10	13	23
2	7, 9, 39	16	5	10	16	23
3	17, 48, 43	16	5	10	13	40
4	5, 16, 33	16	12	10	13	23
5	3, 10, 21	18	5	10	16	40
6	1, 32, 44	16	5	30	13	23
7	8, 27, 40	18	12	10	16	23
8	24, 34, 37	18	5	30	16	23
9	6, 30, 31	18	12	10	13	40
10	22, 42, 47	16	12	10	16	40
11	13, 23, 48	18	5	30	13	40
12	20, 28, 46	16	5	30	16	40
13	2, 11, 35	18	12	30	13	23
14	25, 29, 36	16	12	30	16	23
15	12, 16, 41	16	12	30	13	40
16	5, 19, 45	18	12	30	16	40
17	49, 50, 51	17	8,5	20	14,5	31,50

Tabela 11: Tratamentos relativos aos ensaios de durabilidade e *pinhole test*

Tratamento	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	CC (%)	VM (%)	w (%)
1	16	5	10	13
2	16	5	10	16
3	18	5	10	13
4	18	12	10	13
5	18	5	10	16
6	16	5	30	13
7	18	12	10	16
8	16	5	30	16
9	17	8,5	20	14,5

A apresentação dos resultados dos ensaios relativos aos tratamentos da tabela 10 está dividida por tipo de cura, isto é, selada e imersa/submersa, sendo posteriormente feita uma comparação final entre esses dois. Basicamente, o modelo de exposição e análise dos dados experimentais é o mesmo e inicia com a exibição de um gráfico de barras que contém os resultados médios de cada tratamento, seguido de um gráfico de efeitos principais e, por fim, de um diagrama de Pareto com os efeitos padronizados. Também, para cada tipo de cura, é apresentada uma equação matemática, resultante de uma regressão linear, a qual é função dos fatores controláveis e suas interações de segunda ordem.

Desse modo, pode-se ter uma ideia global acerca dos fatores que exercem maior influência sobre as variáveis avaliadas. As tabelas de análise de variância (ANOVA) relativas a cada avaliação estatística são apresentadas no ANEXO C. Ainda, a exposição e análise dos resultados para o ensaio de durabilidade, cujos tratamentos são exibidos na tabela 11, segue padrão similar ao que foi anteriormente descrito, porém não apresentam a correlação linear devido ao reduzido número de dados experimentais. Os demais ensaios (*pinhole* e pulso ultrassônico ao longo dos ciclos de molhagem-secagem) são apresentados de forma diferente.

#### 4.2.1 Ensaios de Compressão Simples e Pulso Ultrassônico (cura selada)

Os resultados relativos aos ensaios de resistência à compressão simples e pulso ultrassônico para os espécimes curados de forma selada são exibidos na figura 59. Por sua vez, os gráficos de efeitos principais (de primeira ordem) são expostos na figura subsequente, em que o tratamento referente ao ponto central é destacado na cor cinza. Os resultados foram obtidos a partir da média simples da triplicata de cada tratamento. Lembrando que as execuções de cada ensaio deram-se de forma aleatória, conforme a ordem exposta na tabela 10. Os resultados dos ensaios individuais são expostos no anexo A e as tabelas ANOVA estão no anexo C.

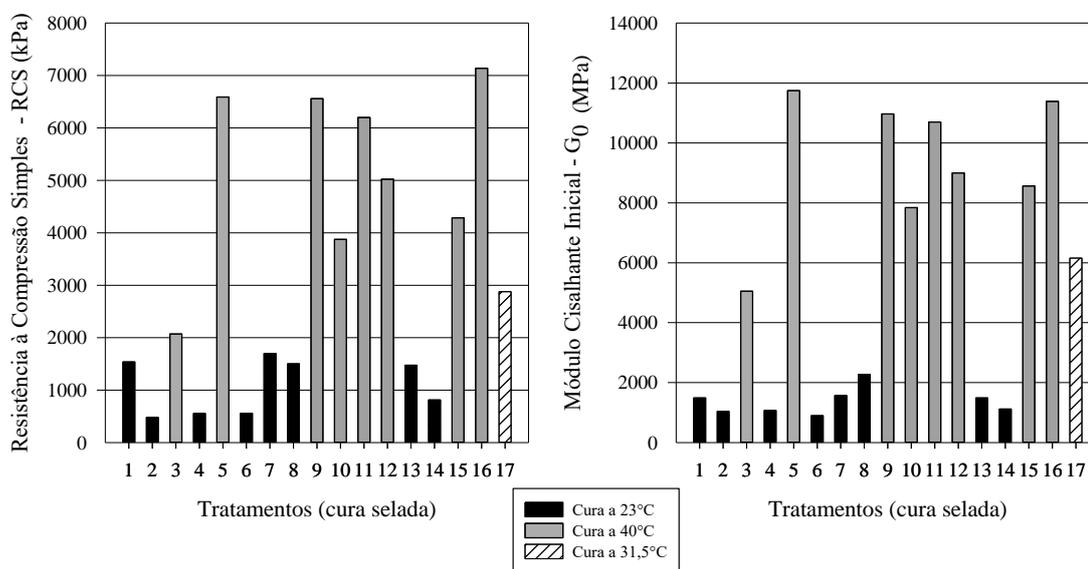


Figura 59: Média de  $q_u$  e  $G_0$  para cada tratamento na cura selada  
(elaborado pelo autor)

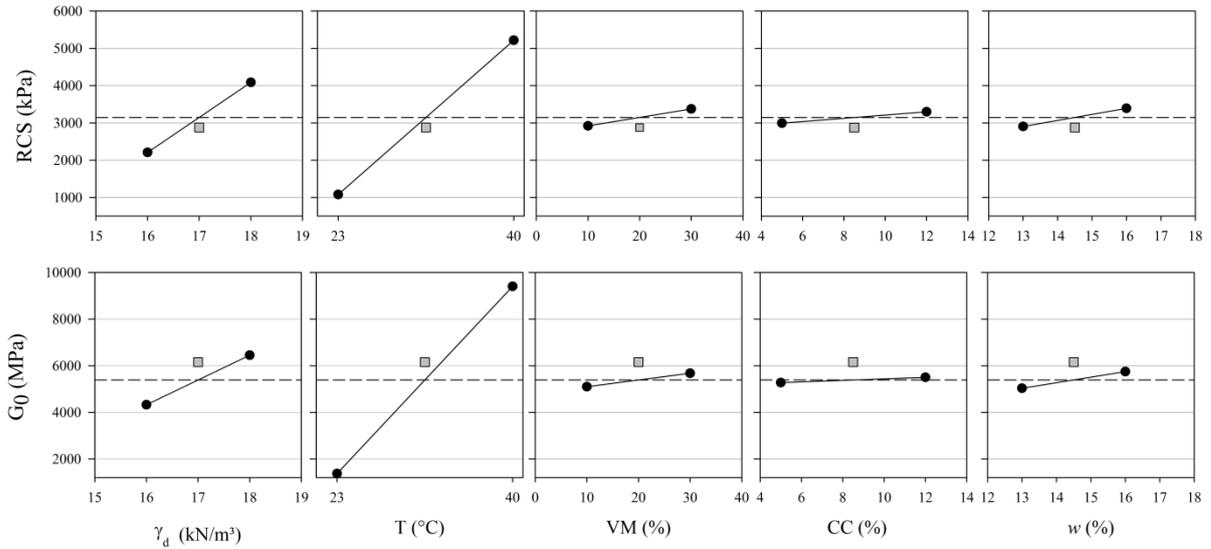


Figura 60: Efeitos principais para  $q_u$  e  $G_0$  na cura selada  
(elaborado pelo autor)

A partir dos resultados expostos, nota-se o grande efeito da temperatura sobre a resistência e a rigidez das misturas ensaiadas. Também, percebe-se que a linearidade entre as variáveis respostas e os fatores controláveis (para os níveis aqui testados) é corroborada pela tendência observada no ponto central. Ainda, os efeitos de cada fator, bem como das interações de segunda ordem, são expostos de forma quantitativa nos gráficos de Pareto expostos na figura 61. Os que se mostraram estatisticamente significativos são os que cruzam a linha, a qual foi determinada para um nível de significância de 5%.

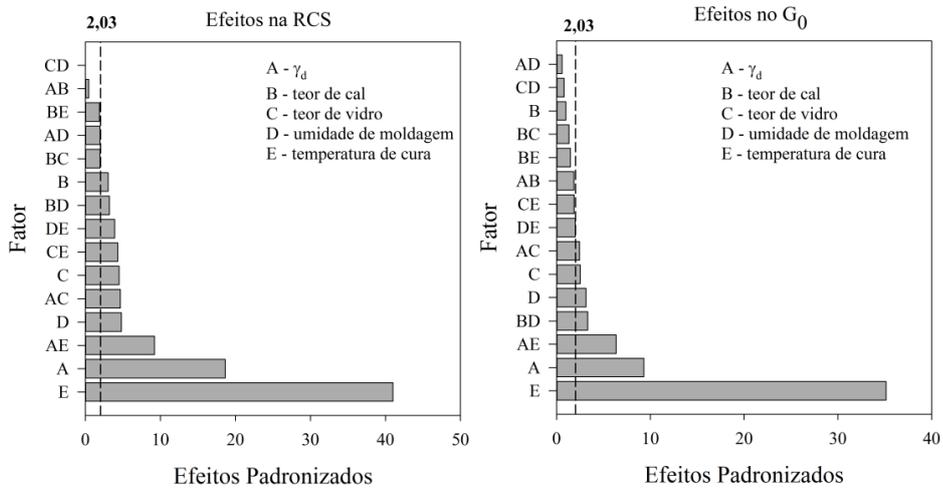


Figura 61: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cura selada  
(elaborado pelo autor)

Os resultados de resistência à compressão simples (RCS) e módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) foram correlacionados aos fatores controláveis e, através de uma regressão linear executada no software *Minitab* 17, determinaram-se equações em função dos efeitos principais e, também, com e sem as interações entre esses. Esse processo aplicado aos dados de RCS resultou nas equações (eq. 9 e eq. 10), nas quais as letras correspondem aos seguintes fatores controláveis: peso específico aparente seco (A), teor de cal (B), teor de vidro (C), teor de umidade de moldagem (D), temperatura de cura (E).

$$RCS (kPa) = -23313 + 939,9A + 22,7C + 161,5D + 243,5E \quad (\text{eq. 9})$$

$$RCS (kPa) = -1,33 + 636,1A + 445B + 366,5C + 1044D - 987E - 23,35AC - 65,1AE + 54,6AE - 2,82BC + 3,18BE + 2,56CE + 15,44DE \quad (\text{eq. 10})$$

A equação 9, que incorpora apenas os efeitos de primeira ordem, apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 90,15 %. A relação 10, por outro lado, mostrou-se capaz de explicar 97,87 % da variabilidade dos dados experimentais com relação ao ajuste linear. Logo, observa-se que a incorporação dos efeitos de segunda ordem na predição linear do comportamento das misturas aqui estudadas implicou em um aumento de mais de 7 pontos percentuais no  $R^2$ . Cabe ressaltar, ainda, que só são incorporados nos modelos os fatores e/ou interações que exercem maior impacto na variável resposta.

A mesma metodologia aplicada aos resultados de rigidez inicial resultou nas seguintes equações:

$$G_0 (MPa) = -31017 + 1064,3A + 239D + 472,8E \quad (\text{eq. 11})$$

$$G_0 (MPa) = -3592 + 552A + 2182B + 427C + 293D - 1291E - 60,8AB - 85,6AE - 72,5BD + 2,53CE + 17,85DE \quad (\text{eq. 12})$$

Com relação ao coeficiente de determinação, tendência semelhante à observada nos resultados de resistência foi constatada nos dados de rigidez inicial. O  $R^2$  para a equação 11 foi de 91,88%, enquanto que o verificado na relação 12 foi de 96,32%, isto é, houve um pequeno aumento devido à incorporação dos efeitos de segunda ordem.

Dos resultados expostos até então, evidencia-se o grande efeito da temperatura de cura sobre as variáveis respostas (RCS e  $G_0$ ) em detrimento dos demais fatores controláveis, o que dificulta

uma análise mais aprofundada acerca do real efeito de cada um dos demais fatores avaliados. Logo, os efeitos dos demais fatores foram, também, quantificados separadamente para cada uma das temperaturas de cura. Dividiu-se, portanto, um projeto fatorial fracionado de resolução V ( $2^{5-1}$ ) em dois projetos fatoriais fracionados de resolução IV ( $2^{4-1}$ ), cada qual submetido a uma das temperaturas de cura ( $23^{\circ}\text{C}$  e  $40^{\circ}\text{C}$ ). Ressalta-se, no entanto, que a avaliação das interações entre dois fatores é prejudicada nesse último caso, já que algumas interações são confundidas com outras e, dessa forma, elas não são expostas nos gráficos de Pareto. Nesse sentido, as figuras 62 e 63 apresentam os gráficos de efeitos principais e o diagrama de Pareto para a temperatura de cura de  $23^{\circ}\text{C}$  e as figuras 64 e 65 expõem os mesmos gráficos para os espécimes curados a  $40^{\circ}\text{C}$ .

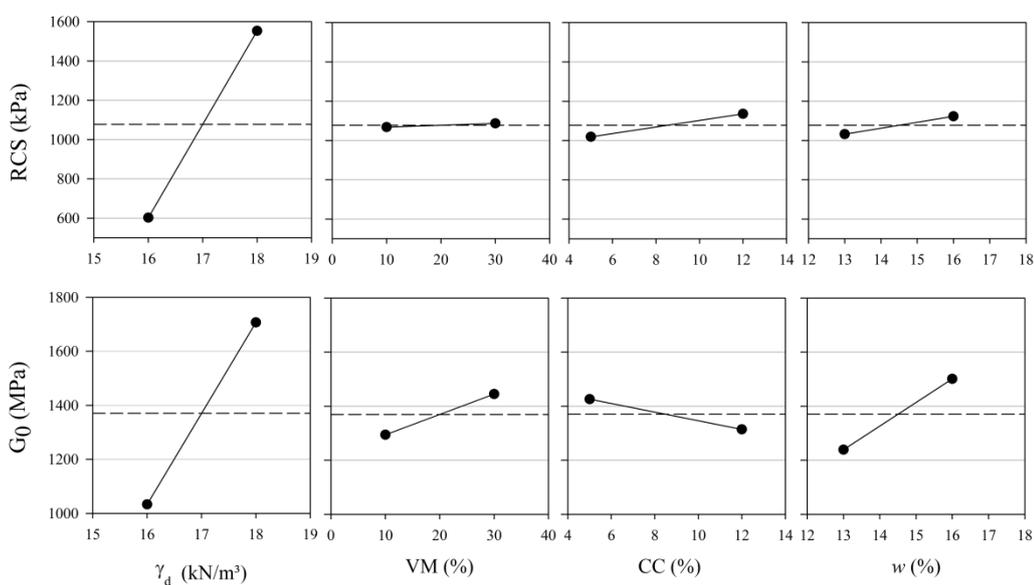


Figura 62: Gráfico de efeitos principais para a cura selada a  $23^{\circ}\text{C}$

(elaborado pelo autor)

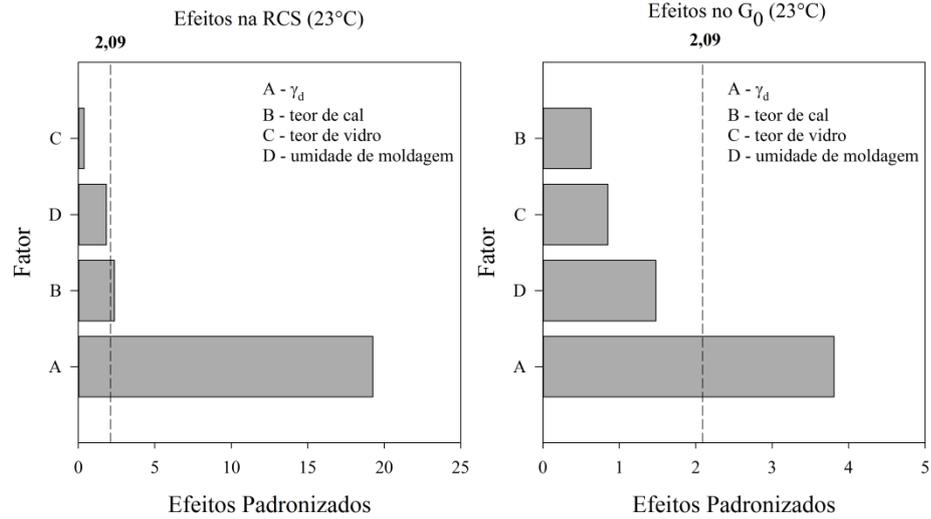


Figura 63: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cura selada a 23°C (elaborado pelo autor)

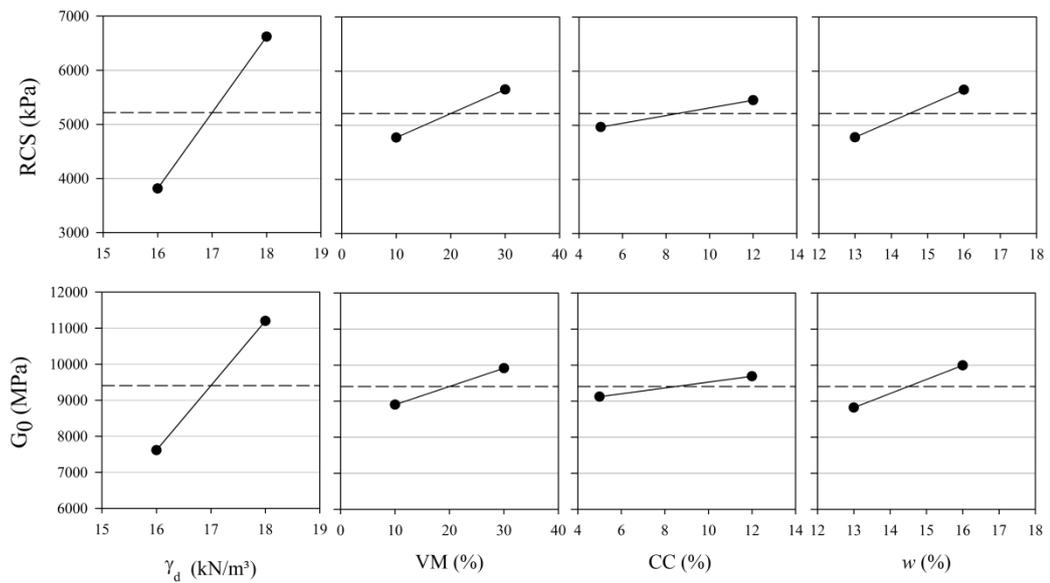


Figura 64: Gráfico de efeitos principais para a cura selada a 40°C (elaborado pelo autor)

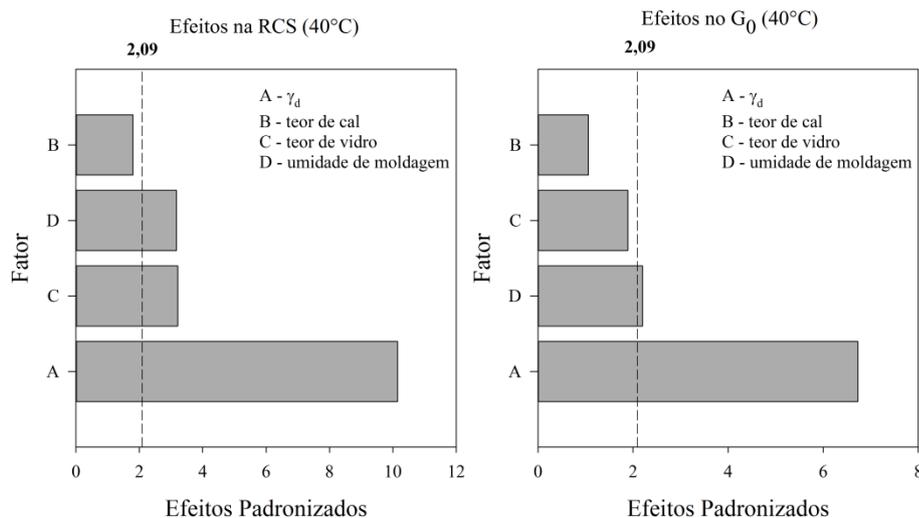


Figura 65: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cura selada a 40°C  
(elaborado pelo autor)

A partir dos resultados apresentados nota-se, que o peso específico aparente seco (**A**) é o fator com maior influência, tanto na resistência quanto na rigidez, para ambas as temperaturas de cura. Isso é explicado, em parte, pelo maior intertravamento entre as partículas de solo em decorrência da maior compactidade e da maior área de contato para o desenvolvimento das reações no sistema solo – cal – pó de vidro moído. Quanto ao teor de cal (**B**), seu efeito foi pequeno em ambas as temperaturas, só havendo evidência estatística de sua significância para o caso dos ensaios de resistência na temperatura de cura igual a 23°C. Isso pode indicar que um teor de 5 % já é o suficiente, nas condições aqui testadas, para que se alcancem valores de resistência e rigidez elevados. Por outro lado, um maior tempo de cura, mesmo para a temperatura de 40°C, talvez seja necessário para que tal informação seja, de fato, corroborada, pois parte do hidróxido de cálcio em excesso pode não ter reagido.

No que diz respeito ao de pó de vidro moído (**C**), percebe-se que não há evidência estatística para afirmar que a variação no seu teor influi nas variáveis respostas quando a temperatura de cura é de 23°C. O efeito do teor de vidro é o menor na RCS e o segundo menor no G<sub>0</sub>. Provavelmente, nessas condições (7 dias a 23°C), não houve tempo suficiente para reação do hidróxido de cálcio com os silicatos presentes no pó de vidro moído. Por outro lado, para a temperatura de 40°C, percebe-se que o teor de vidro foi, de fato, significativo do ponto de vista estatístico tanto para a RCS quanto para o G<sub>0</sub>. Isso pode ser um indicativo de sua reação com o Ca(OH)<sub>2</sub>, com conseqüente formação de compostos ligantes hidratados.

Excetuando-se a rigidez inicial para a menor temperatura, a umidade de moldagem (**D**) mostrou-se significativa do ponto de vista estatístico para os demais ensaios. Nota-se que seu efeito é considerável, especialmente para a temperatura de 40°C. Isso pode ser um indicativo de que os sistemas aqui estudados são sensíveis à disponibilidade de água, isto é, as reações de hidratação na cura selada serão facilitadas quando há maior umidade inicial. Para a temperatura de cura de 23°C seu efeito foi menos expressivo, possivelmente devido à diferença entre as dinâmicas das reações nas duas temperaturas de cura.

#### 4.2.2 Ensaios de Compressão Simples e Pulso Ultrassônico (cura imersa)

A mesma abordagem utilizada no 4.2.1 (relativo aos ensaios com cura selada) é empregada na exposição e análise dos resultados para a cura imersa, isto é, em contato direto com a água a partir do segundo dia de cura. Logo, a figura 66, a seguir, apresenta os resultados de resistência à compressão simples e módulo cisalhante inicial para os espécimes submetidos a essa modalidade de cura. O valor exposto em cada tratamento advém da média, de, ao menos, uma duplicata (ANEXO B). Optou-se pela não utilização de triplicatas em todos os tratamentos visando economia do solo. Os resultados, todavia, mostraram-se adequados, visto que foram executados de forma completamente aleatorizada. As tabelas ANOVA são apresentadas no anexo C. Um nível de significância de 5 % foi adotado.

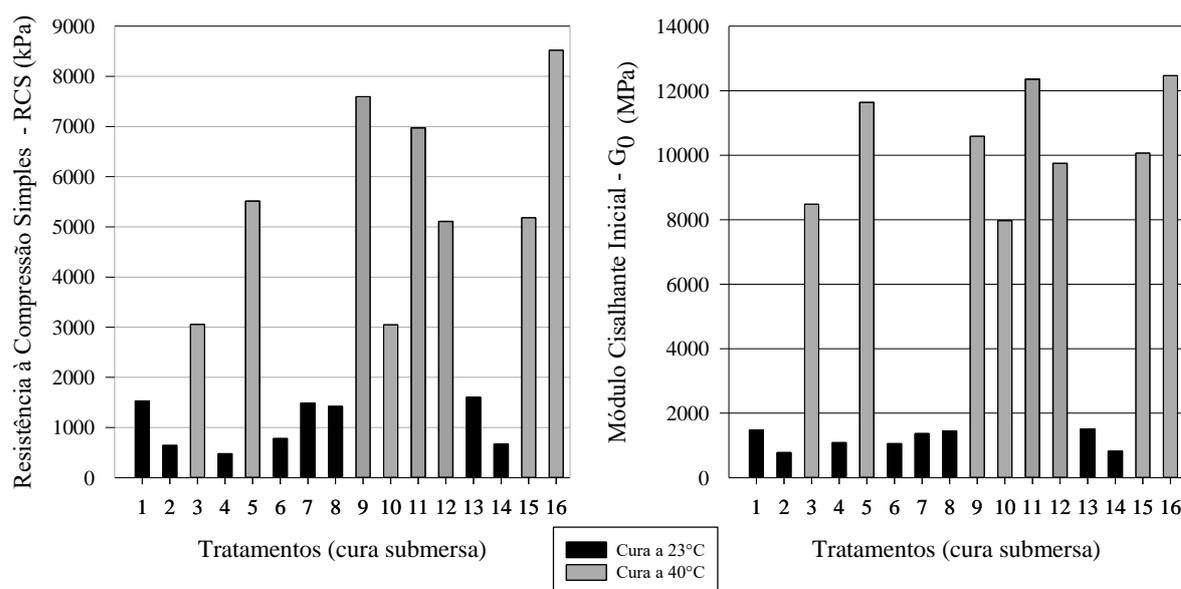


Figura 66: Média de  $q_u$  e  $G_0$  para cada tratamento na cura submersa  
(elaborado pelo autor)

A figura 67, por sua vez, apresenta os gráficos de efeitos principais relativos à resistência à compressão simples e ao módulo cisalhante inicial para os espécimes com cura submersa. Evidencia-se, da mesma forma que na cura selada, o enorme efeito da temperatura com relação aos demais fatores controláveis.

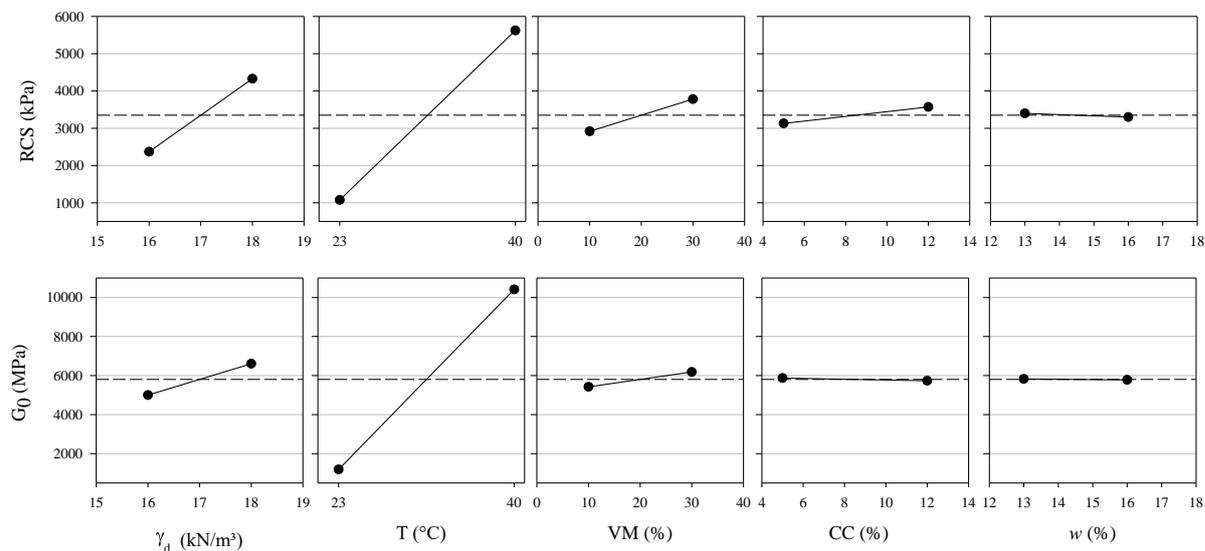


Figura 67: Efeitos principais para  $q_u$  e  $G_0$  na cura submersa  
(elaborado pelo autor)

O gráfico de Pareto contendo os efeitos dos fatores e interações de segunda ordem é apresentado na figura 68, abaixo. A tendência é a mesma que o observado para a cura selada, porém fica evidente que a umidade de moldagem é o fator com o menor efeito sobre as variáveis respostas.

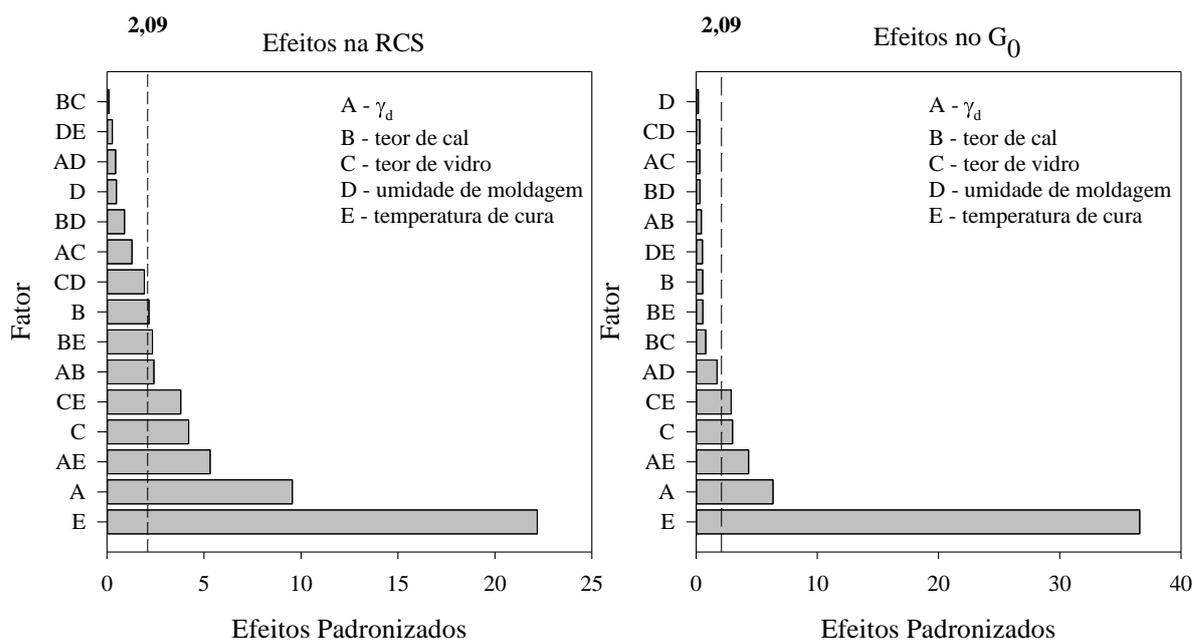


Figura 68: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cura submersa  
(elaborado pelo autor)

De forma análoga ao que foi anteriormente realizado para os dados de resistência e rigidez verificados na cura selada, apresentam-se as equações oriundas da regressão linear para os dados obtidos na cura submersa. Dessa forma, as equações 13 e 14 referem-se à RCS, enquanto que as equações 15 e 16 são relativas ao  $G_0$ . Lembrando que as letras correspondem aos seguintes fatores controláveis: peso específico aparente seco (A), teor de cal (B), teor de vidro (C), teor de umidade de moldagem (D), temperatura de cura (E).

$$RCS (kPa) = -22899 + 935,3A + 41,6C + 270,3E \quad (\text{eq. 13})$$

$$RCS (kPa) = 31482 - 1677,2A - 1416B - 394C - 306D - 1001E + 71,8AB + 63,1AE + 8,22BE + 13,48CD + 4,47CE \quad (\text{eq. 14})$$

O coeficiente de determinação verificado na eq 13, contendo apenas os efeitos de primeira ordem, foi de 87,81 %, enquanto que esse foi de 96,94% para a relação que incorpora os efeitos de segunda ordem. Para o módulo cisalhante inicial obtiveram-se as seguintes equações, cujos coeficientes de determinação foram iguais a, respectivamente, 96,70% e 98,43 %.

$$G_0 (MPa) = -25895 + 812,4A + 37,1C + 544,6E \quad (\text{eq. 15})$$

$$G_0 (MPa) = 86932 + 83,3A + 390C - 83334EE + 0,56AE + 371CE \quad (\text{eq. 16})$$

Como feito anteriormente (item 4.2.1) o projeto fatorial fracionado de resolução V é dividido em dois projetos fatoriais fracionados de resolução IV a fim de que se exclua o efeito da temperatura na análise dos outros fatores. Dessa forma, as figuras 69 e 70 apresentam os gráficos de efeitos principais e o diagrama de Pareto para a temperatura de cura de 23°C, enquanto que as figuras 71 e 72 representam o mesmo para a temperatura de 40°C.

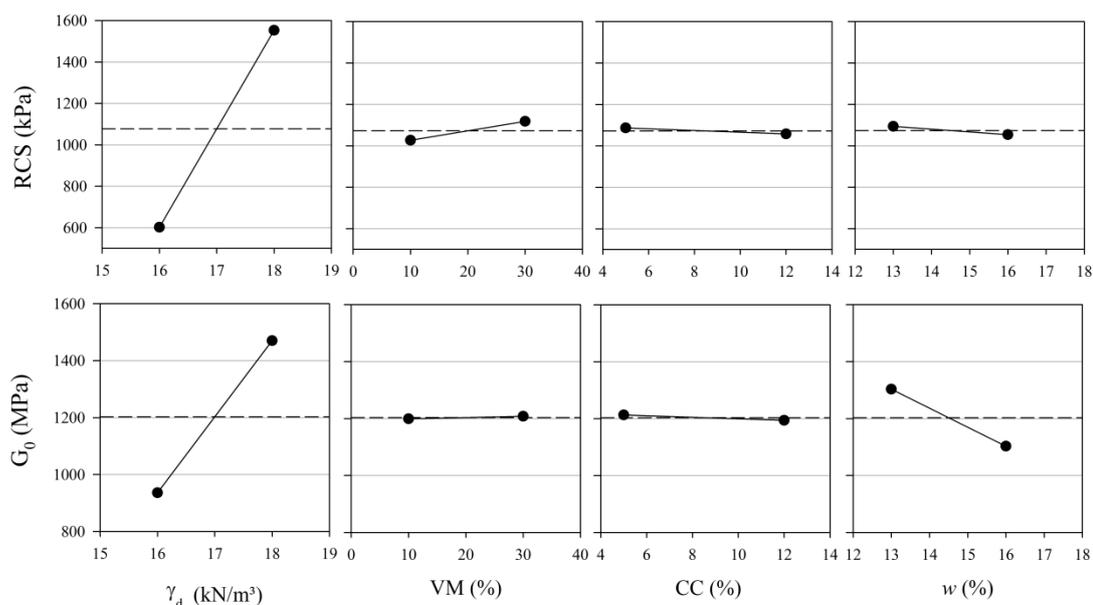


Figura 69: Gráfico de efeitos principais para a cura submersa a 23°C  
(elaborado pelo autor)

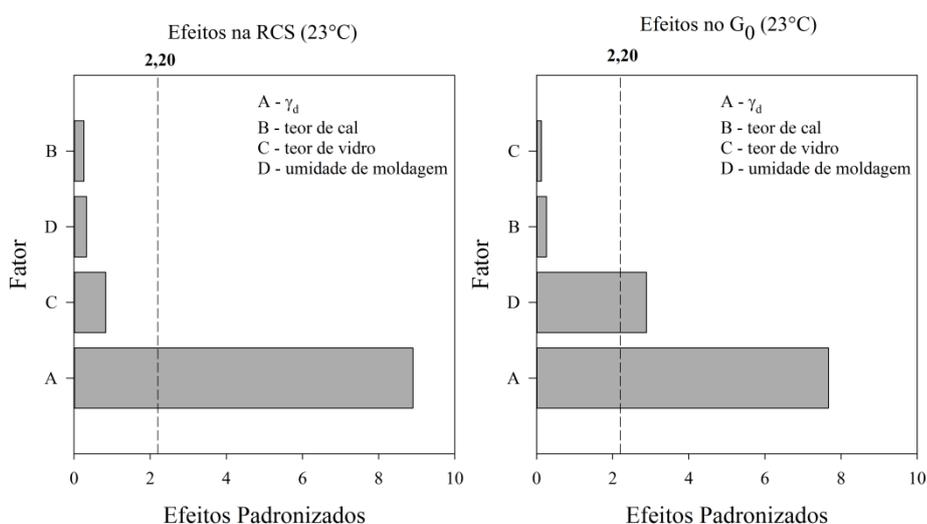


Figura 70: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cura submersa a 23°C  
(elaborado pelo autor)

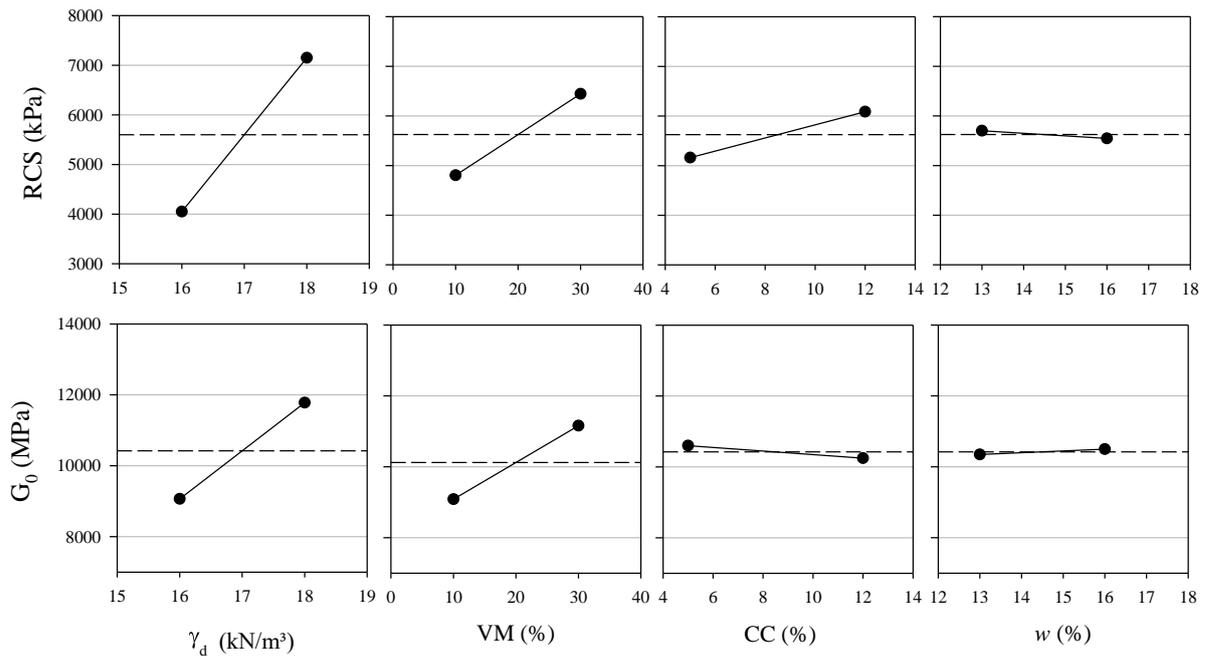


Figura 71: Gráfico de efeitos principais para a cura submersa a 40°C  
(elaborado pelo autor)

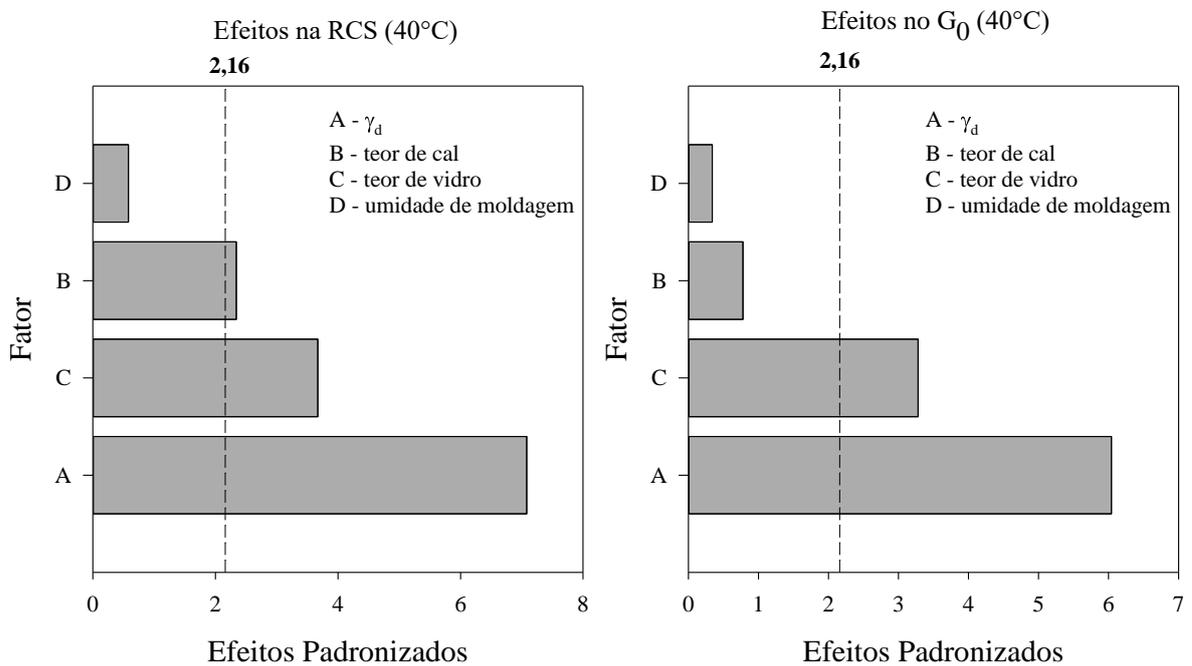


Figura 72: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cura submersa a 40°C  
(elaborado pelo autor)

De maneira geral, o comportamento dos espécimes sob a cura submersa foi bastante similar aos curados de maneira selada. Novamente, a compacidade, expressa em termos do peso específico aparente seco (A), foi bastante influente na resistência e rigidez das misturas. Só houve

evidências estatísticas significativas para atestar a influência do teor de cal (**B**) na cura a 40°C, sendo esse influente na resistência e na rigidez inicial. No entanto, observa-se uma tendência de proporcionalidade direta entre o aumento desse e a resistência e de proporcionalidade inversa entre o acréscimo no teor de cal e a rigidez. Da mesma forma, tais tendências foram observadas para a cura selada. Como visto anteriormente (item 7.1), o teor de vidro (**C**) só se mostrou significativo na cura a 40°C. Como esperado no caso da cura submersa, o efeito da umidade de moldagem foi irrisório, uma vez que há, supostamente, disponibilidade externa de água para o desenvolvimento das reações pozolânicas.

### 4.2.3 Comparação entre Cura Selada e Cura Imersa

De modo a se comparar e verificar a influência dos tipos de cura selado (S) e imerso (I) sobre a resistência e a rigidez, nas condições aqui ensaiadas, tratou-se esse como um fator controlável a dois níveis. Ou seja, os resultados de resistência à compressão simples e módulo cisalhante inicial foram analisados conforme os procedimentos expostos nos itens 7.1.1 e 7.1.2. Desse modo, tem-se nas figuras 73 e 74 o gráfico de efeitos principais e o diagrama de Pareto para essa avaliação comparativa. Um nível de significância de 5 % foi utilizado.

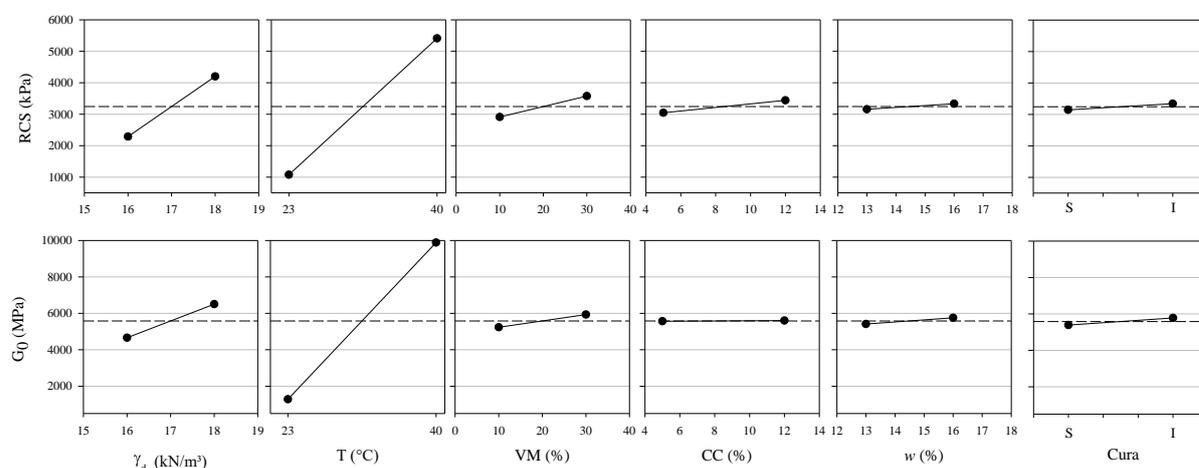


Figura 73: Gráfico de efeitos principais comparativo entre os dois tipos de cura  
(elaborado pelo autor)

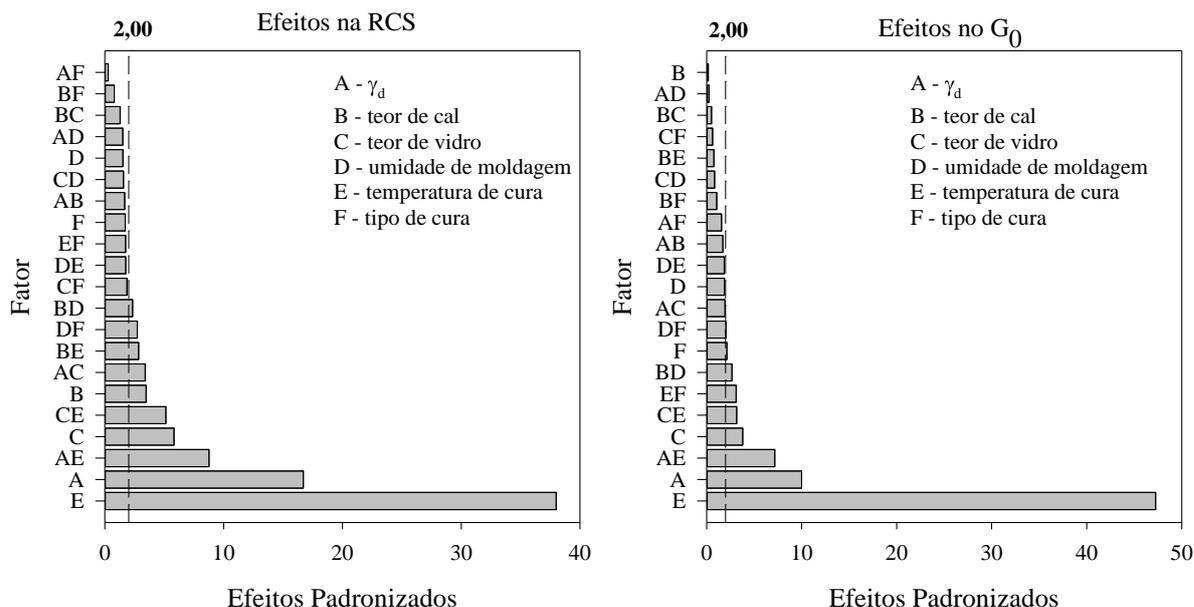


Figura 74: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados comparativo entre os dois tipos de cura (elaborado pelo autor)

A partir dos resultados expostos nos gráficos acima, nota-se que não há evidência estatística, a um nível de significância de 5%, para afirmar que o tipo de cura tem influência sobre as variáveis respostas avaliadas. Percebe-se pelos gráficos de efeitos principais que os valores para resistência e rigidez obtidos em cada um dos tipos de cura são semelhantes. A mesma tendência é observada para a umidade de moldagem, lembrando que essa já havia se mostrado não significativa para a cura submersa (item 4.2.1). A influência dos demais fatores segue a mesma linha e já foi comentada nos itens anteriores. Desse modo, considerando-se as limitações experimentais e o escopo do presente trabalho, pode-se concluir que o efeito do tipo de cura (selada ou imersa) praticamente não altera a resposta das misturas avaliadas com relação à resistência e à rigidez inicial.

De maneira análoga ao que foi realizado individualmente para os resultados verificados na cura selada e na cura submersa, expõe-se aqui os resultados de regressão linear para a análise conjunta desses dois tipos de cura. Logo, as equações 17 e 18 apresentam os resultados para os ensaios de resistência e as 19 e 20 para os de rigidez.

$$RCS (kPa) = -22310 + 967,6A + 57,6B + 29,68C + 254,6E \quad (\text{eq. 17})$$

$$RCS (kPa) = 12466 + 204B + 107,6D + 2168,8E - 1355,8AA + 4255CC + 19,7AE - 134,3BD + 175,1BE + 290,9CE \quad (\text{eq. 18})$$

$$G_0(MPa) = -27397 + 969,4A + 31,7C + 503,1E \quad (\text{eq. 19})$$

$$G_0(MPa) = 7863 - 1089,6A + 690B + 250C + 123D - 1059E - 183AC + 76,6AE - 4,7AE - 46,9BD + 3,28CE + 13,17DE \quad (\text{eq. 20})$$

Os coeficientes de determinação verificados em cada uma dessas equações foram de, respectivamente, 89,11 %, 95,54 %, 93,42 % e 96,63 %. Novamente, a adição da interação dos fatores e/ou de termos quadráticos à equação implicou o aumento nos valores do R<sup>2</sup>.

#### 4.2.4 Durabilidade por Ciclos de Molhagem – Secagem – Escovação

Os resultados relativos ao ensaio de durabilidade, executados em 9 tratamentos distintos, são apresentados em termos da perda de massa acumulada por ciclo (PMA) e perda de massa individual por ciclo (PMI) nas figuras 75 e 76, respectivamente. Na primeira, nota-se que 7 amostras alcançaram perda de massa inferior a 3 %, sendo que em somente duas a perda de massa superou essa marca. No segundo gráfico, evidencia-se certa regularidade no que diz respeito à perda de massa individual verificada em cada ciclo, uma vez que, com exceção das amostras D9 e D6, não são observadas grandes variações por ciclo.

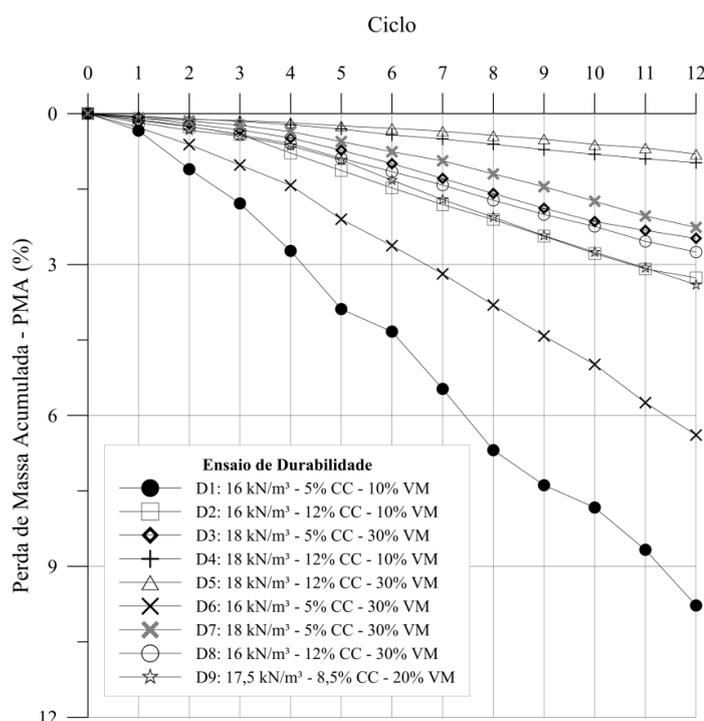


Figura 75: PMA por ciclo para o ensaio de durabilidade  
(elaborado pelo autor)

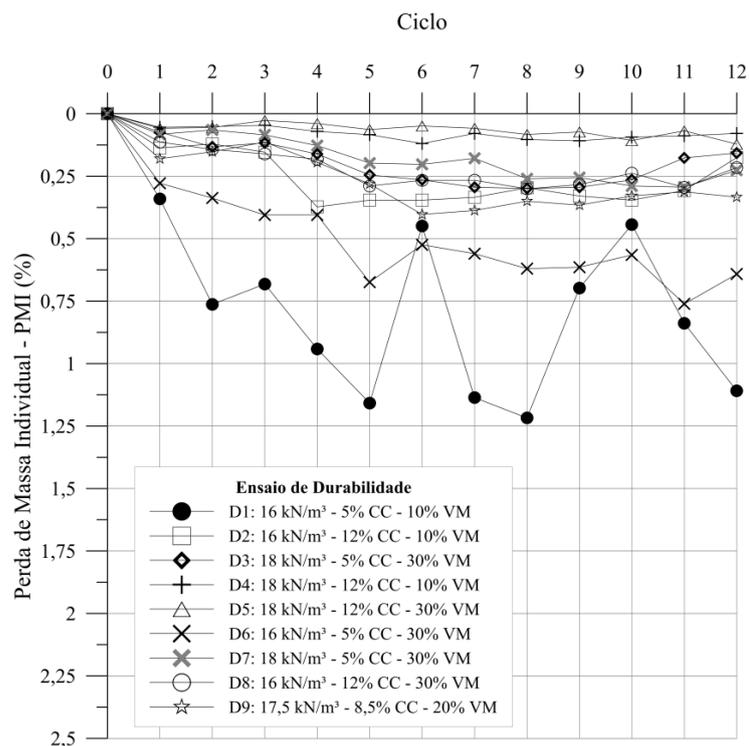


Figura 76: PMI por ciclo para o ensaio de durabilidade  
(elaborado pelo autor)

O gráfico de efeitos principais relativo aos resultados do ensaio de durabilidade é apresentado na figura 77, sendo o tratamento relativo ao ponto central destacado como um quadrado de cor cinza. O diagrama de Pareto com os efeitos principais é exposto na figura 78. Uma vez que os ensaios de durabilidade foram realizados com um número menor de amostras, o nível de significância escolhido ( $\alpha$ ) foi igual a 10% e não mais 5%. Logo, a probabilidade de se cometer um erro do tipo I nessa análise, isto é, rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ) quando essa é verdadeira, é aumentada. No entanto, a manutenção de um  $\alpha$  inferior a 10% poderia implicar na desconsideração da significância estatística de alguns efeitos importantes que, de aparentemente, são influentes. A tabela ANOVA encontra-se no anexo C. Ainda, não foi realizada uma regressão linear, pois o número de tratamentos avaliados (9) é considerado insuficiente para tal abordagem.

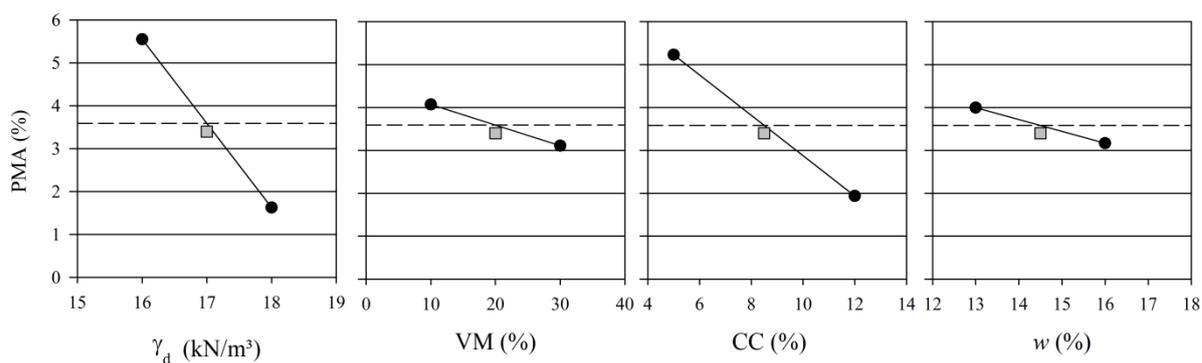


Figura 77: Gráfico de efeitos principais para o ensaio de durabilidade  
(elaborado pelo autor)

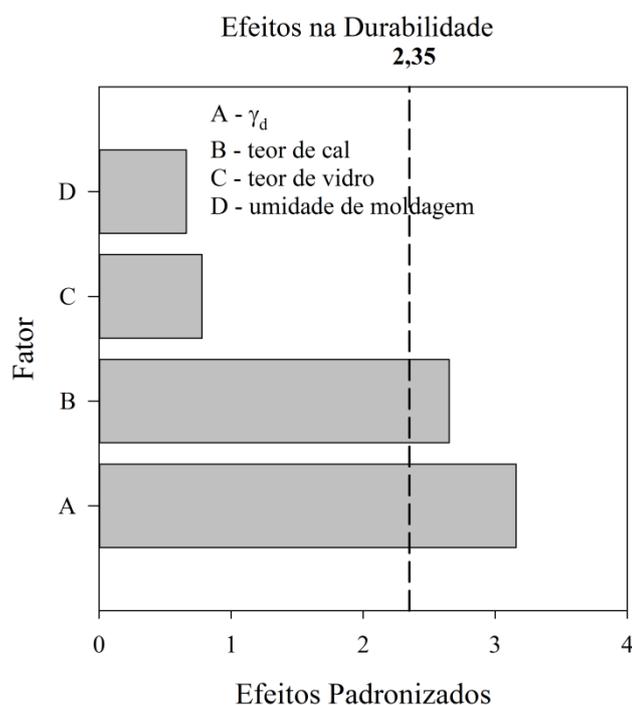


Figura 78: Gráfico de efeitos principais para o ensaio de durabilidade  
(elaborado pelo autor)

A partir da análise dos resultados apresentados, considerando-se os limites experimentais aqui existentes, nota-se a grande influência do peso específico aparente seco (A) e do teor de cal (B) sobre a perda de massa acumulada dos espécimes ensaiados. O efeito do primeiro fator já havia se mostrado extremamente influente em alterar a resposta das misturas no que diz respeito à resistência e à rigidez inicial para as duas temperaturas de cura. A influência do segundo, no entanto, demonstrou-se pequena em comparação com os demais fatores naqueles casos. No que concerne o efeito da porosidade no ensaio de durabilidade, o mesmo foi constatado por Consoli

et al. (2016; 2017) para misturas entre solos argilosos, materiais à base de cálcio e pozolanas. Novamente, a grande importância da compactação com relação à durabilidade se explica pelas mesmas razões apontadas em 4.2.1, já que uma maior proximidade entre as partículas implica em maior resistência mecânica contra a abrasão da escova, facilita o desenvolvimento das reações pozolânicas e minimiza a tendência à dispersão.

A influência do teor de cal pode, em parte, ser explicada pelas características do ensaio de durabilidade e pela natureza do solo estabilizado. Uma vez que esse consiste em 12 ciclos alternados de molhagem (5 h), exposição a temperaturas elevadas (71°C) ao longo de 42 h e de processos de escovação, espera-se, paralelamente, a degradação progressiva dos espécimes tratados e certa catálise nas reações pozolânicas devido à ação da temperatura. Logo, se por um lado há a deterioração das amostras devido aos processos de molhagem e escovação, ocorre, também, certa contribuição no desenvolvimento da matriz cimentícia devido à ação prolongada da temperatura e da disponibilidade de água após o período de imersão.

Entretanto, particularmente para o caso de solos sódicos, a etapa de imersão em água é bastante agressiva, pois há, além de uma tendência dispersiva entre os íons monovalentes, a hidratação dos cátions livres como o  $\text{Na}^+$ , o  $\text{Mg}^+$  e o  $\text{Ca}^{++}$ . Isso implica expansão desses na água e retração no período da estufa, o que prejudica a matriz de material ligante e a estrutura do espécime como um todo. Exemplificando, o diâmetro de um átomo de sódio aumenta 3,5 vezes quando hidratado, passando de 2,04 Å para 7,2 Å, o de um átomo de magnésio aumenta 6 vezes (de 1,44 Å para 8,6 Å) e o de cálcio 4 vezes (2,0 Å para 8,2 Å) (TIECHER, 2015). Esse fenômeno é, porém, mais grave para os dois primeiros (íons monovalentes), já que as forças eletrostáticas atrativas são muito inferiores às observadas nos íons de valência dupla ( $\text{Ca}^{++}$ ), o que implica em uma estrutura dispersa e expansiva na presença de água.

Nesse sentido, a disponibilidade de hidróxido de cálcio livre é fundamental para suprimir a dispersão das partículas do solo na presença de água pura e para garantir o desenvolvimento do material cimentante através das reações pozolânicas no sistema solo – cal – pó de vidro moído. Isso contribuirá para a melhoria do desempenho das misturas ao longo dos ciclos. Portanto, é esperado (como constatado) que o teor de cal influencie diretamente no desempenho quanto à durabilidade das misturas ensaiadas, especialmente devido às características desse ensaio em particular (tempo e número de ciclos) e da natureza do solo (quantidade de sais dissolvidos).

No que diz respeito ao teor de vidro moído (C), embora não haja evidências estatísticas suficientes para corroborar seu efeito decisivo no desempenho das misturas, nota-se no gráfico de efeitos principais (figura 77) que, na prática, seu incremento tende a implicar na diminuição da perda de massa acumulada. De fato, espera-se que a disponibilidade de uma pozolana reativa seja decisiva na melhoria do desempenho de solos dispersivos estabilizados, pois, como demonstrado por Consoli et al. (2016) e Martínez e Caballero (2017), a adição de hidróxido de cálcio, por si só, nesse mesmo solo dispersivo, é incapaz de proporcionar uma performance adequada (dado os elevados valores de PMA verificados). Os resultados dos ensaios dos últimos autores são expostos na figura 79, a seguir.

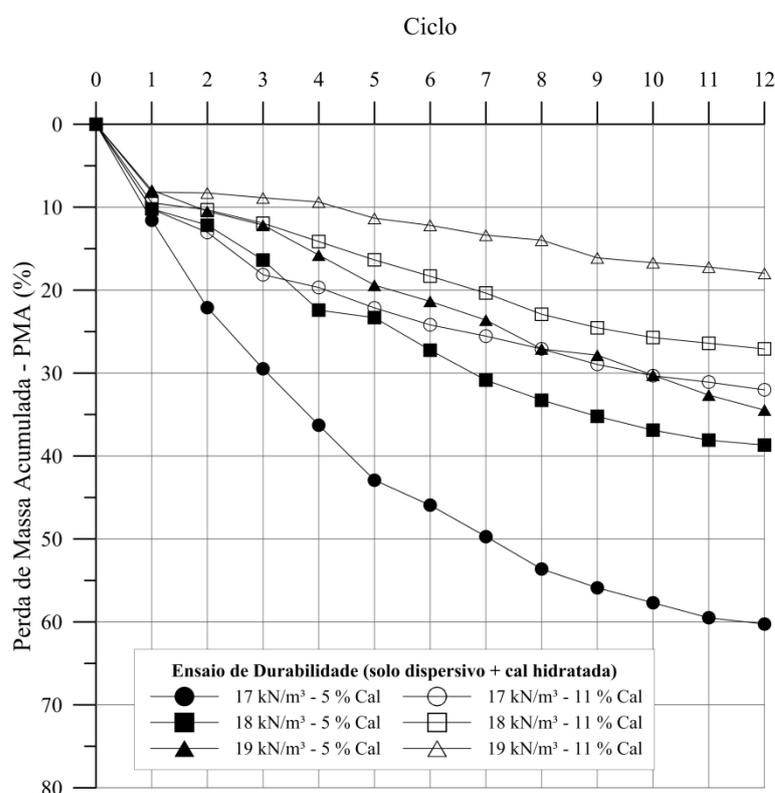


Figura 79: Resultados de durabilidade para o mesmo solo dispersivo estabilizado com uma cal hidratada (MARTÍNEZ e CABALLERO, 2017)

Entende-se, portanto, a necessidade de incorporação, além do hidróxido de cálcio, de uma pozolana a fim de que se atinja um desempenho minimamente satisfatório. Nesse contexto, espera-se que isso ocorra em decorrência do desenvolvimento de uma matriz cimentícia oriunda das reações pozolânicas entre a cal livre e os silicatos e aluminatos presentes no pó de vidro moído e, também, nos argilominerais do solo. Logo, considerando-se as limitações do presente estudo, pode-se inferir que 10 % de pó de vidro moído, combinado com 12 % de cal de

carbureto, já são quantidades suficientes para proporcionar uma melhoria considerável na performance do solo quanto à durabilidade. Ademais, os critérios de durabilidade para solos argilosos da USACE (1984) e da PCA (1992) são satisfeitos, já que esses requerem um máximo de 6 e 7%, respectivamente.

Por sua vez, o efeito umidade de moldagem (**D**) em alterar a resposta, no que diz respeito à durabilidade, é pequeno dentro dos limites aqui testados. Evidencia-se no diagrama de Pareto que não há evidências estatísticas que corroborem sua influência para o nível de significância adotado (10%), embora um maior teor de umidade de moldagem tenha implicado em menor perda de massa acumulada ao final de 12 ciclos. Mesmo que os sistemas solo – cal – pozolana aqui estudados sejam sensíveis à umidade de moldagem, o efeito dessa demonstrou-se pequeno na cura selada a 23°C (item 7.1). Logo, não há motivo para esse fator ter forte influência na durabilidade, principalmente quando se considera o fato de que há períodos de imersão em água ao longo desse ensaio.

A figura 80, a seguir, apresenta a imagem de três espécimes distintos (D1, D5 e D9) após o fim do ensaio de durabilidade, isto é, depois do término do 12º ciclo. Ficam evidentes as diferenças na degradação das amostras, uma vez que a amostra D5 está praticamente intacta, enquanto que a D1 mostra-se bastante degradada devido às condições extremas a que foi submetida. A amostra D9, correspondente ao ponto central, aparenta certo nível de desgaste, porém bastante inferior ao observado na amostra D1. Apesar das diferenças existentes entre cada espécime, ressalta-se o aparecimento gradual de pequenas trincas e fissuras em todas as amostras ensaiadas decorrentes dos sucessivos períodos de molhagem, secagem e abrasão pela escova metálica.



Figura 80: Algumas amostras após o fim do ensaio de durabilidade  
(foto do autor)

#### 4.2.5 Ensaio de Pulso Ultrassônico ao Longo dos Ciclos de Molhagem – Secagem

Ressalta-se que a medição das ondas ultrassônicas, quando realizada nas mesmas amostras do ensaio de durabilidade, isto é, em conjunto com tal ensaio, é inviável após o primeiro ciclo em decorrência do aparecimento de trincas e fissuras internas, oriundas do processo mecânico de escovação, que prejudicam o trânsito da onda no interior dos corpos de prova. Tal condição é ainda mais evidente para o caso de solos dispersivos, como o empregado no presente trabalho. Desse modo, com o intuito de se avaliar a degradação da rigidez das misturas ao longo de ciclos de molhagem – secagem, submeteram-se corpos de prova cilíndricos com 5,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura aos mesmos procedimentos descritos para o ensaio de durabilidade, sem, no entanto, submetê-los ao processo de escovação. A utilização de corpos de prova com essas características permite que sejam moldados em uma única camada, o que evita um foco de degradação correspondente ao ponto de encontro entre as camadas, aumentando sua vida útil ao longo do ensaio.

Uma vez que os corpos de prova tinham dimensão reduzida, e, assim, sua moldagem consumia pouco material, foi possível a realização da cura destes em duas temperaturas. Logo, os tratamentos apresentados na tabela 11 foram replicados para cura a 23°C e para cura a 40°C. As medições dos tempos relativos à passagem das ondas de compressão ( $t_p$ ) e de cisalhamento ( $t_s$ ) foram feitas no ciclo 0, isto é, após o término do período de cura e ao final dos ciclos 1, 3, 6, 9 e 12, ou seja, após o período que passavam na estufa. Não foram realizadas medidas durante todos os ciclos, pois o gel utilizado na aferição da onda cisalhante (*shear gel*) era escasso e economicamente custoso. Desse modo, os resultados relativos às amostras curadas a 23°C estão apresentados na figura 81 e os referentes à cura a 40°C são expostos na figura 82, na sequência.

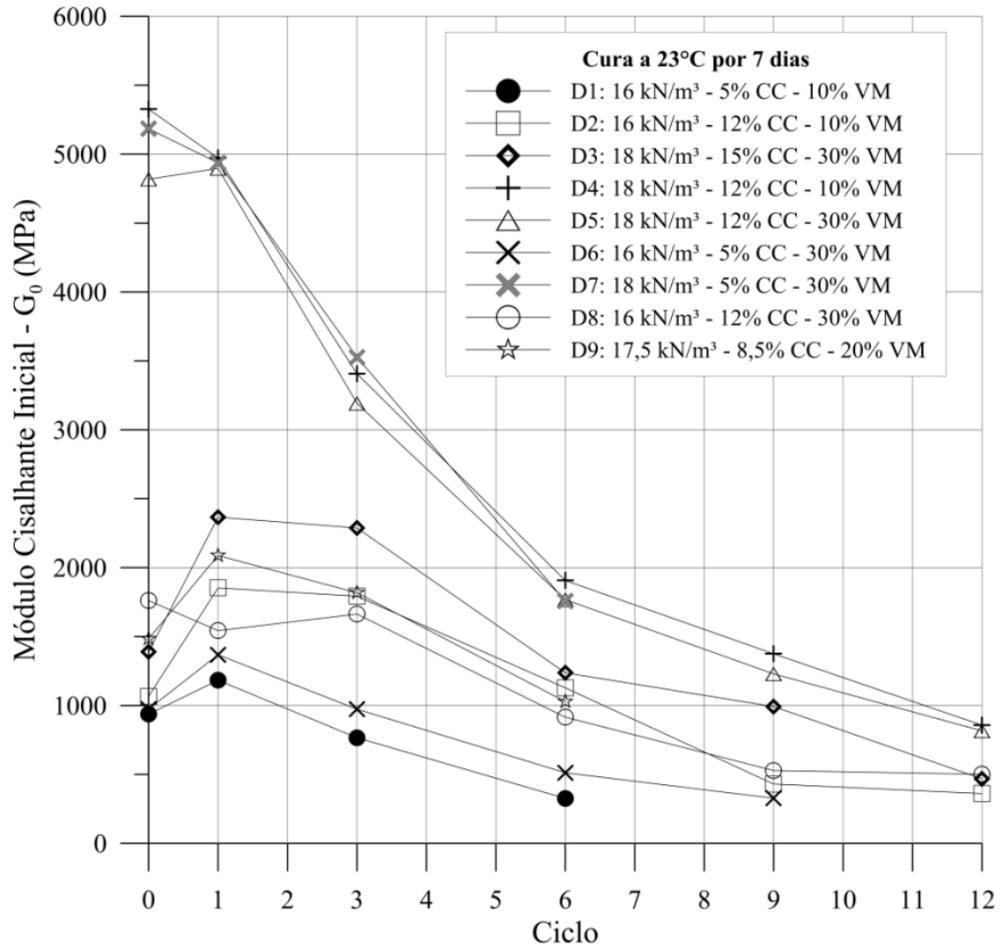


Figura 81:  $G_0$  ao longo dos ciclos de molhagem – secagem para cura a 23°C  
(elaborado pelo autor)

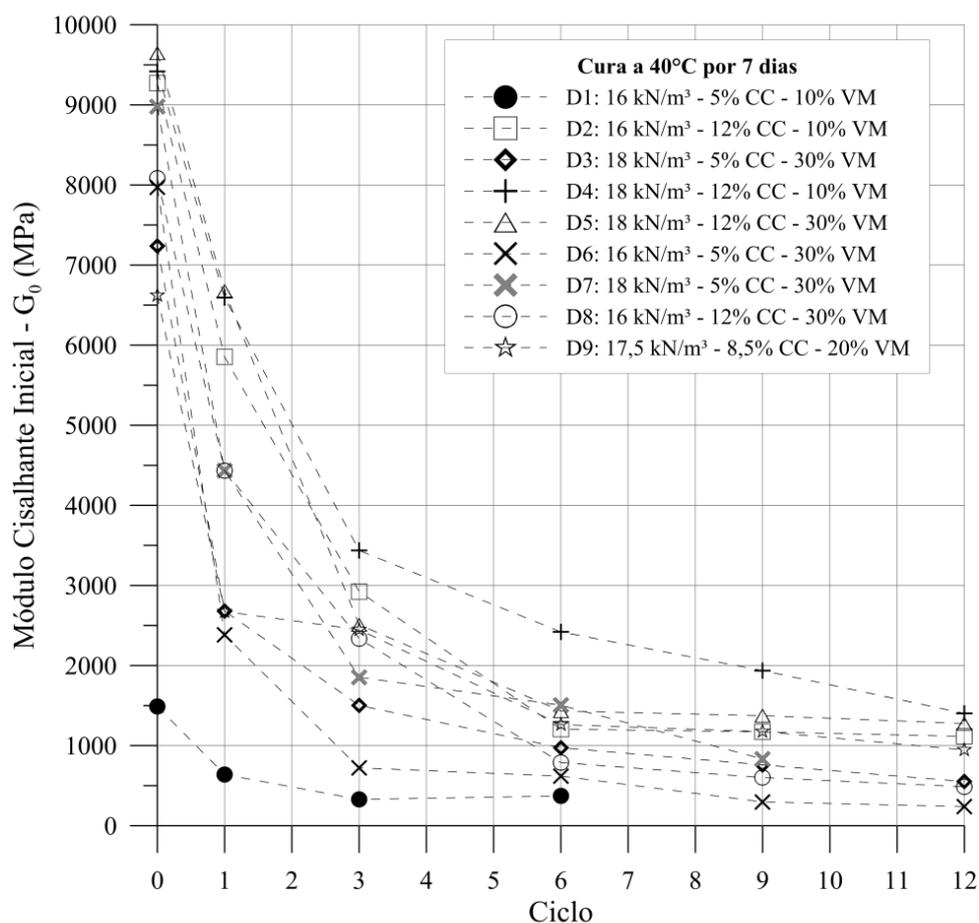


Figura 82:  $G_0$  ao longo dos ciclos de molhagem – secagem para cura a 40°C  
(elaborado pelo autor)

Particularmente, da figura 81, é possível dividir as amostras em dois grupos distintos quanto ao comportamento até o segundo ciclo. O  $G_0$  nas amostras D4, D5 e D7 mantêm-se praticamente inalterado entre os ciclos 0 e 1, tendo uma tendência acentuada de queda a partir do segundo ciclo. Para os demais corpos de prova, com exceção do D8, verifica-se um acréscimo na rigidez inicial entre os ciclos 0 e 1, a qual varia entre 70 % e 100 %, com posterior tendência de queda a partir do terceiro ciclo. Após o sexto ciclo é verificada uma queda na intensidade da degradação da rigidez em todas as amostras, porém essa se mantém praticamente constante até o final do ensaio, no qual todos os espécimes remanescentes apresentaram valores de  $G_0$  entre 860 e 360 MPa. Ressalta-se, ainda, que nos espécimes D1, D7 e D9 não foi possível avaliar a rigidez após o sexto ciclo. O mesmo ocorreu para a amostra D9 após o nono ciclo.

Quanto às amostras curadas a 40°C, fica evidente a diferença na magnitude do  $G_0$  em comparação com as submetidas à cura a 23°C. De maneira geral, findado o tempo de cura a

40°C, o  $G_0$  superava 6500 MPa. Por outro lado, o máximo registrado foi 5500 MPa após o mesmo período para a cura a 23°C. Também, para a temperatura de 40°C, registrou-se, sem exceção, uma queda acentuada na rigidez de todas as amostras após o início do ensaio (ciclo 0). Porém, a partir do terceiro ciclo esse declínio torna-se menos proeminente e praticamente cessa ao final do sexto ciclo, uma vez que o  $G_0$  se mantém aproximadamente inalterado até o ciclo 12, excetuando-se a amostra D4. A tendência é distinta para a temperatura de cura de 23°C, em que se observa uma degradação da rigidez entre os ciclos 6 e 12. Ao final do ensaio, os espécimes remanescentes apresentam valores para o módulo cisalhante inicial que variam de 490 a 1400 MPa, valores não tão superiores aos registrados para a menor temperatura de cura. A amostra D6 resistiu até o sexto ciclo e a amostra D7 até o nono ciclo, sendo impossível a realização de leitura das ondas devido à degradação física dessas.

Excetuando-se ação abrasiva do procedimento de escovação, os mecanismos responsáveis pela degradação da rigidez são os mesmos descritos para o ensaio convencional de durabilidade (item 3.6). Nesse sentido, pode-se afirmar que a rigidez inicial do solo estabilizado é severamente degradada devido à exposição a condições ambientais extremas, o que é um indicativo da queda de desempenho do material ao longo do tempo. Logo, aos fatores que influenciam a rigidez das misturas estudadas (descritos nos itens 4.2), soma-se a ação intempestiva representada pelos ciclos de molhagem e secagem.

#### 4.3 RELAÇÕES COM O ÍNDICE $\eta/L_{iv}$

Os resultados de resistência à compressão simples, rigidez inicial e durabilidade foram relacionados ao índice porosidade/teor volumétrico de cal na tentativa de se estabelecerem relações matemáticas entre esse e as variáveis respostas. Uma vez que se quantificou o efeito dos fatores controláveis, notou-se o grande impacto exercido pela compactação no desempenho das misturas analisadas. Em contrapartida, com exceção dos ensaios de durabilidade, o efeito da cal não teve grande influência. Desse modo, relações da forma da equação 3 foram propostas, no qual o  $k$  foi fixado como 0,08. Tal valor é justificado pela grande influência do peso específico aparente seco em comparação com o teor de cal e assemelha-se ao utilizado por Consoli et al. (2009a), que fixou esse em 0,06 para uma areia argilosa tratada com cal.

Uma vez que o planejamento experimental foi embasado em projetos fatoriais fracionados, tinha-se um número elevado de fatores controláveis e uma quantidade reduzida de ensaios, de

modo que o montante de dados experimentais disponíveis para a determinação dos ajustes matemáticos era reduzida. Nesse sentido, independentemente do teor de pó de vidro moído, umidade de moldagem e tipo de cura (selada ou submersa), procurou-se o estabelecimento de relações matemáticas únicas, no formato da equação 4, para cada temperatura de cura. Tal condição não é a ideal, pois quantidade de vidro adicionada influi, necessariamente, na granulometria da amostra e, portanto, afeta o comportamento mecânico. Além disso, uma fração considerável desse pode reagir e implicar na formação de compostos ligantes, especialmente para a maior temperatura de cura.

No entanto, dado que o teor de pó de vidro moído mostrou-se pouco importante no desenvolvimento de resistência e rigidez na temperatura de 23°C ao longo de sete dias (i. e. parece não ter reagido) e, considerando-se, também, a reatividade do solo com a cal, não foi possível o emprego do índice porosidade/teor volumétrico de ligante mesmo para as amostras curadas a 40°C. Ou seja, é provável que uma parcela considerável do solo reaja com o hidróxido de cálcio disponível, devendo seu volume ser, necessariamente, considerado no teor volumétrico de ligante a fim de que esse expresse o comportamento mecânico da mistura de maneira fidedigna.

### 4.3.1 Resistência à Compressão Simples

Os resultados de resistência à compressão simples (RCS) para os espécimes curados a 23°C são apresentados na figura 83, abaixo. Nessa, os dados experimentais são identificados quanto seu peso específico, teor de cal, teor de vidro e umidade de moldagem a fim de que as considerações feitas no item 4.2.1 sejam perceptíveis. Além desses tratamentos oriundos do planejamento fatorial fracionado (tabela 10), foram moldados espécimes adicionais com 30 % de pó de vidro moído, adição de 3, 5 e 7% de cal de carbureto e com pesos específicos de 15,5, 16,5 e 17,5 kN/m<sup>3</sup> e teor de umidade de 13%. Esses são indicados nos gráficos por símbolos em forma de X nos gráficos subsequentes. A relação entre os dados experimentais e o índice  $\eta/(L_{iv})^{0,08}$  teve um coeficiente de determinação igual a 82 %, sendo a seguinte:

$$RCS (kPa)_{23^{\circ}C} = 1.60 \times 10^{10} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,90} \quad (\text{eq. 21})$$

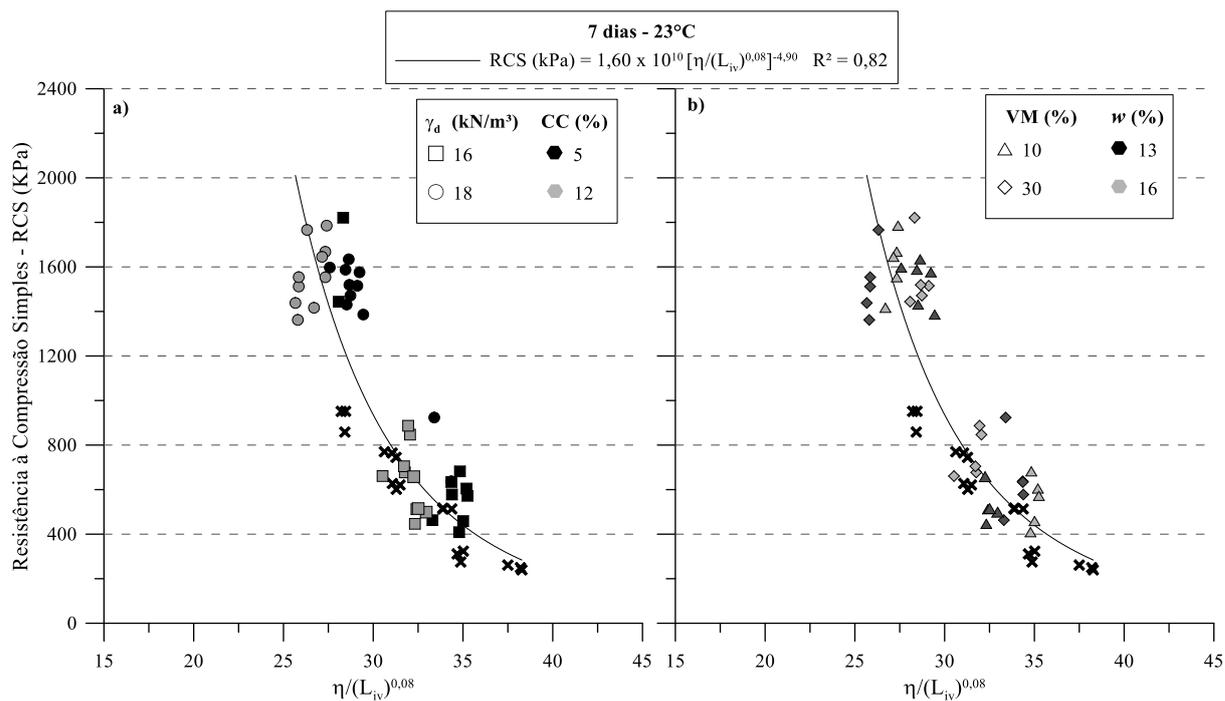


Figura 83: Relação entre RCS e o índice  $\eta/L_{iv}$  para cura a 23°C

(elaborado pelo autor)

De maneira análoga, apresenta-se a mesma relação para as amostras curadas na temperatura de 40°C na figura 84. Porém, como a umidade de moldagem tem um efeito bastante significativo para os espécimes curados de forma selada nessa temperatura, optou-se por não incluir aqueles cujo teor de umidade era de 16 % na cura selada. Dessa forma, obteve-se a seguinte relação, cujo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é de 81%:

$$RCS (kPa)_{40^\circ C} = 7.36 \times 10^{10} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,90} \quad (\text{eq. 22})$$

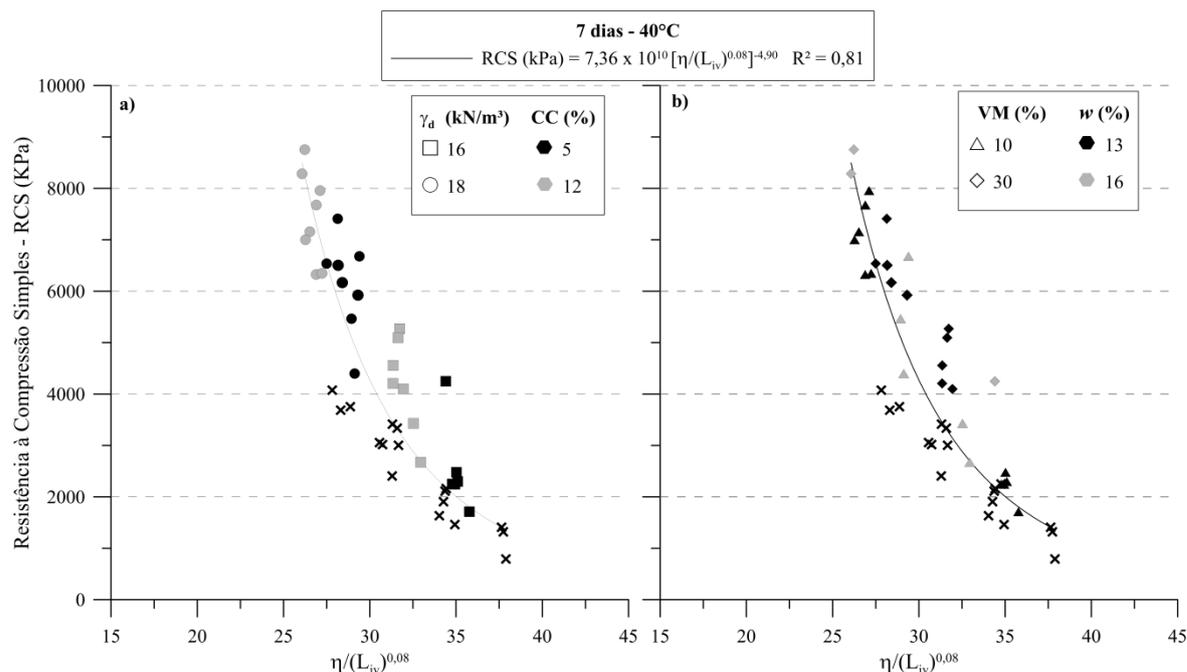


Figura 84: Relação entre RCS e o índice  $\eta/L_{iv}$  para cura a 40°C  
(elaborado pelo autor)

De modo a se comparar a magnitude das resistências alcançadas para cada temperatura de cura, apresentam-se na figura 85 os resultados de RCS para as duas temperaturas, anteriormente expostos nas figuras 83 e 84, em um único gráfico. Como já demonstrado anteriormente, nota-se que a temperatura de cura, nas condições aqui ensaiadas, é o fator de maior influência sobre a resistência dos espécimes. Nesse sentido, o quociente entre as equações 21 e 22 dá medida dessa diferença, sendo igual a 4,60.

Na figura subsequente (figura 86), expõe-se a normalização dos dados exibidos na figura 86, a qual foi realizada, para cada temperatura de cura, através da razão entre os resultados de RCS por um valor fixo de RCS correspondente a um valor pré-estabelecido de  $\eta/(L_{iv})^{0,08} = 33$ . Com isso, obteve-se uma relação única entre a resistência normalizada e o parâmetro porosidade/teor volumétrico de cal, a qual independe da temperatura de cura, sendo igual a:

$$\frac{RCS}{RCS \text{ para } \left(\frac{\eta}{L_{iv}}\right)^{0,08}=33} = 2,17 \times 10^7 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}}\right]^{-4,84} \quad (\text{eq. 23})$$

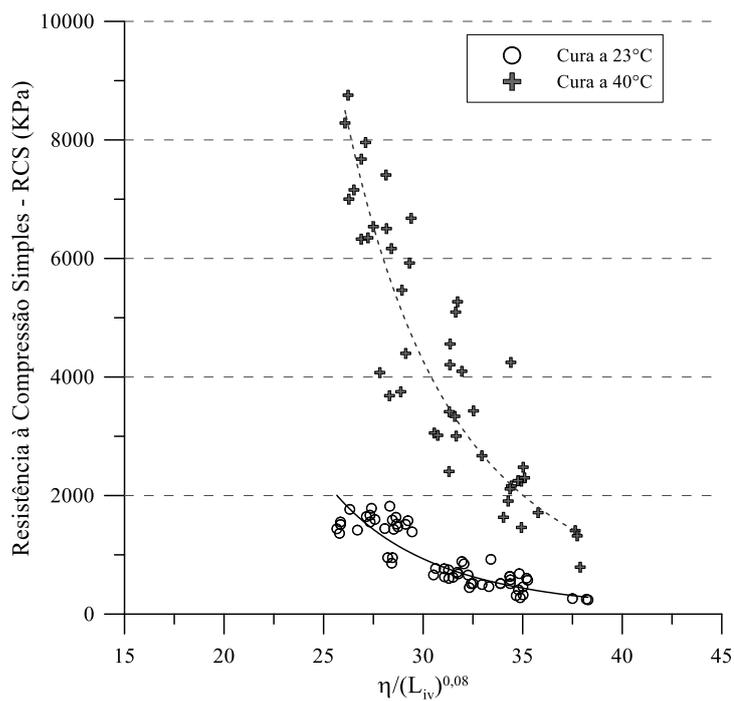


Figura 85: RCS e o parâmetro  $\eta/L_{iv}$  para as duas temperaturas de cura  
(elaborado pelo autor)

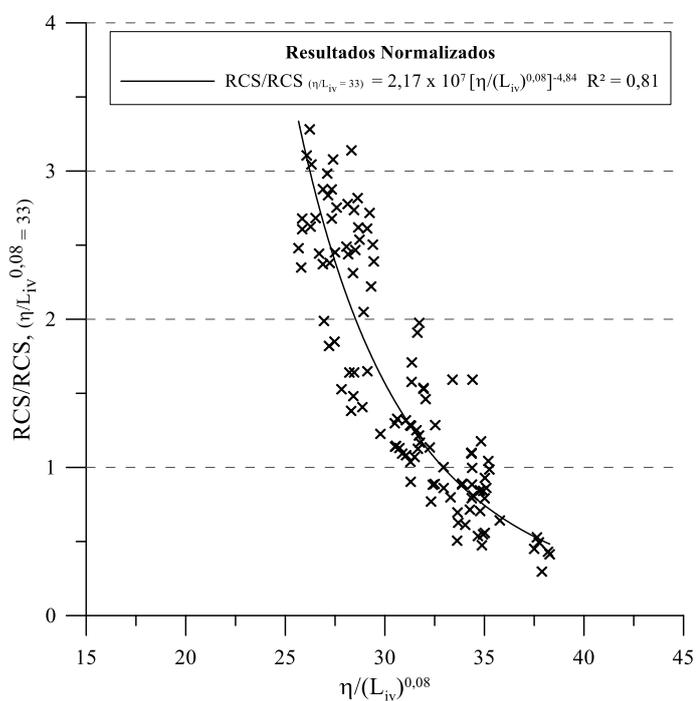


Figura 86: RCS normalizada e o parâmetro  $\eta/L_{iv}$  para as duas temperaturas de cura  
(elaborado pelo autor)

### 4.3.2 Módulo Cisalhante Inicial

Os resultados do módulo cisalhante ( $G_0$ ) inicial foram correlacionados com o parâmetro ajustado  $\eta/(L_{iv})^{0,08}$  de forma análoga ao exposto anteriormente para os resultados de resistência à compressão simples. Portanto, a figura 87 apresenta essa relação para os espécimes curados a 23°C. A seguinte relação foi obtida com um  $R^2$  de 71 %:

$$G_0 (MPa)_{23^\circ C} = 7.72 \times 10^5 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-1.87} \quad (\text{eq. 24})$$

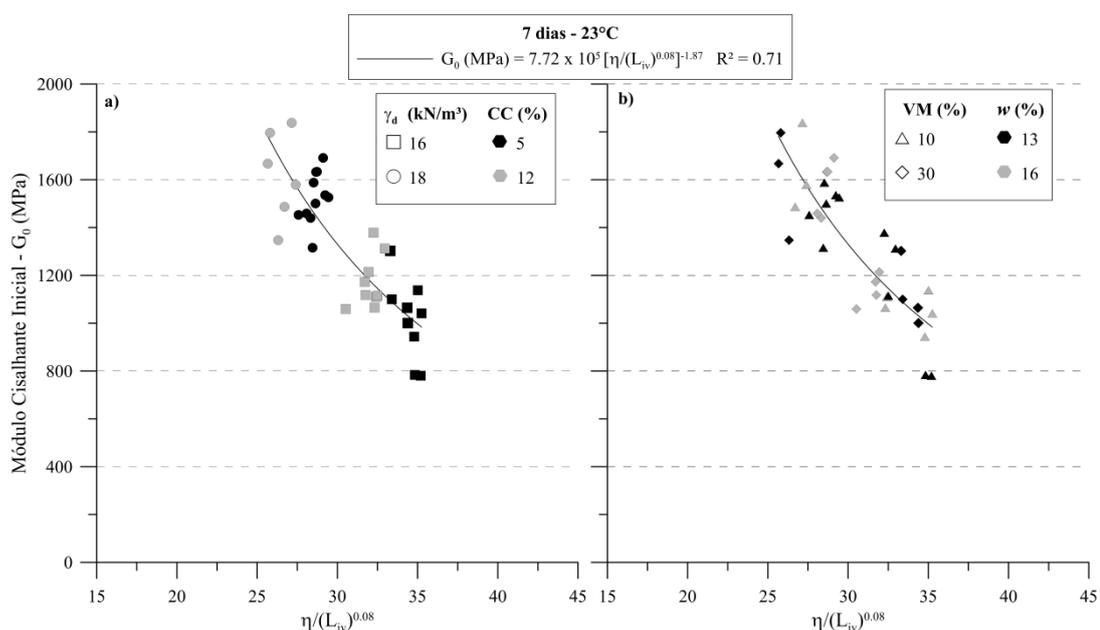


Figura 87: Relação entre  $G_0$  e o índice  $\eta/L_{iv}$  para cura a 23°C

(elaborado pelo autor)

Analogamente, o mesmo procedimento foi feito para as amostras curadas a 40°C, sendo os resultados expostos na figura 88. Esse resultou na equação 25, cujo coeficiente de determinação é de 71 %:

$$G_0 (MPa)_{40^\circ C} = 5,78 \times 10^6 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-1.87} \quad (\text{eq. 25})$$

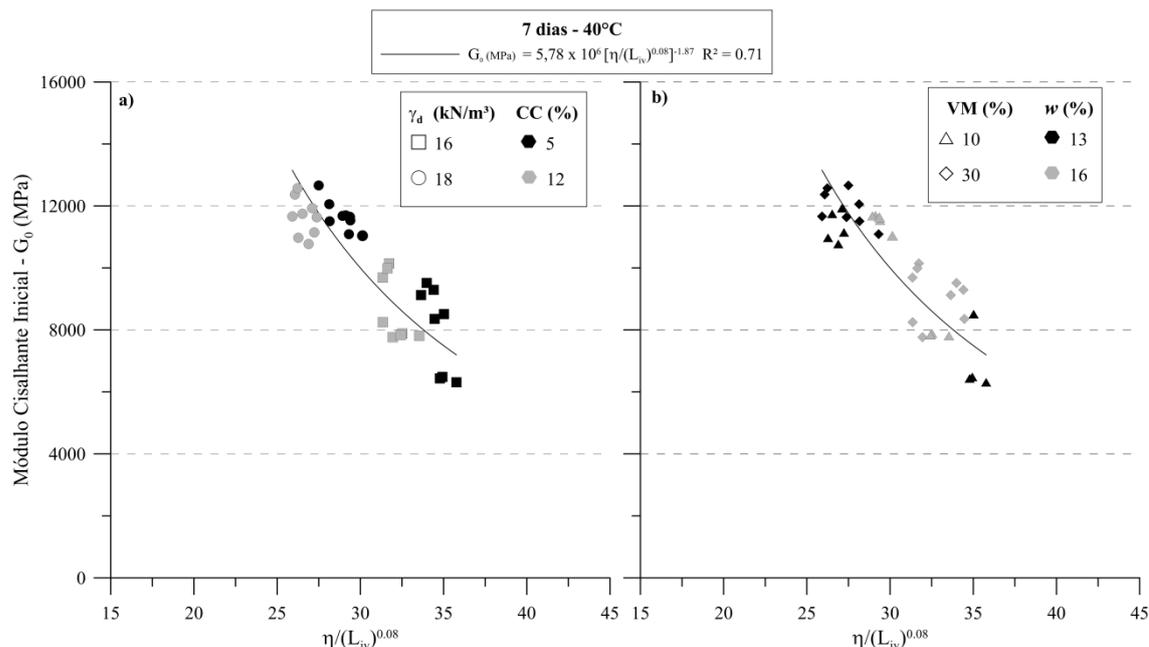


Figura 88: Relação entre  $G_0$  e o índice  $\eta/L_{iv}$  para cura a  $40^\circ\text{C}$

(elaborado pelo autor)

As relações obtidas entre o índice  $\eta/(L_{iv})^{0,08}$  e o módulo cisalhante inicial implicaram em equações matemáticas cujos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) são mais baixos se comparados aos obtidos nas relações com os resultados de resistência. Naturalmente, nota-se um maior dispersão dos dados com relação à equação de ajuste, o que se deve, provavelmente, aos mesmos fatores apontados anteriormente para os ensaios de resistência (item 4.2.1). Além disso, uma maior dispersão dos dados experimentais de rigidez, com relação a uma equação de ajuste similar, já foi anteriormente verificada por Consoli et al. (2018a).

A figura 89 expõe de forma comparativa os valores de  $G_0$  para as amostras curadas nas duas temperaturas de cura. Nessa, nota-se o grande efeito desse fator controlável sobre a variável resposta, do qual pode se ter medida a partir do quociente entre as relações 24 e 25, que resulta em 7,48. Isto é, o  $G_0$  para um espécime curado a  $40^\circ\text{C}$  pode ser quase 8 vezes superior ao da mesma amostra curada a  $23^\circ\text{C}$ . A normalização desses resultados, em procedimento análogo ao apresentado no item anterior, é exposta na figura subsequente (figura 90) e resulta na seguinte relação:

$$\frac{G_0}{G_0 \text{ para } \left(\frac{\eta}{L_{iv}}\right)^{0,08}=33} = 5.15 \times 10^2 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}}\right]^{-1,78} \quad (\text{eq. 26})$$

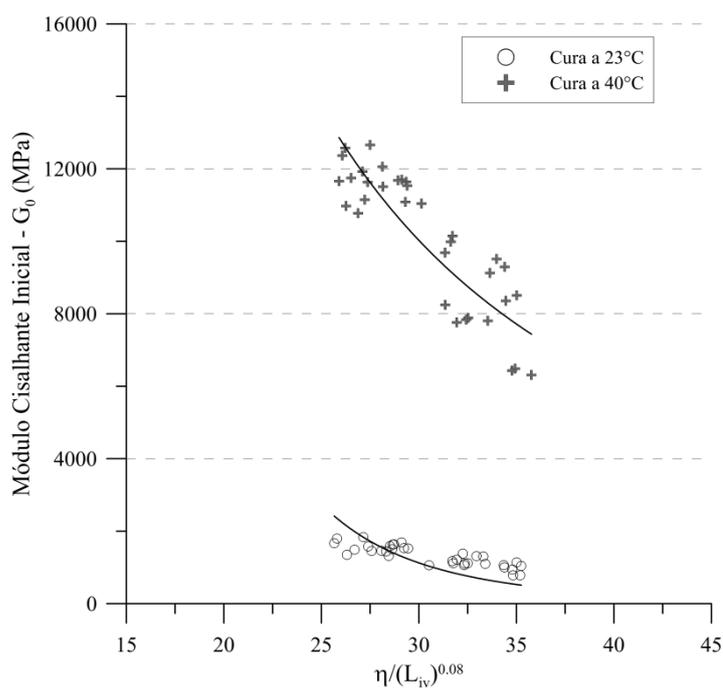


Figura 89:  $G_0$  e o parâmetro  $\eta/L_{iv}$  para as duas temperaturas de cura (elaborado pelo autor)

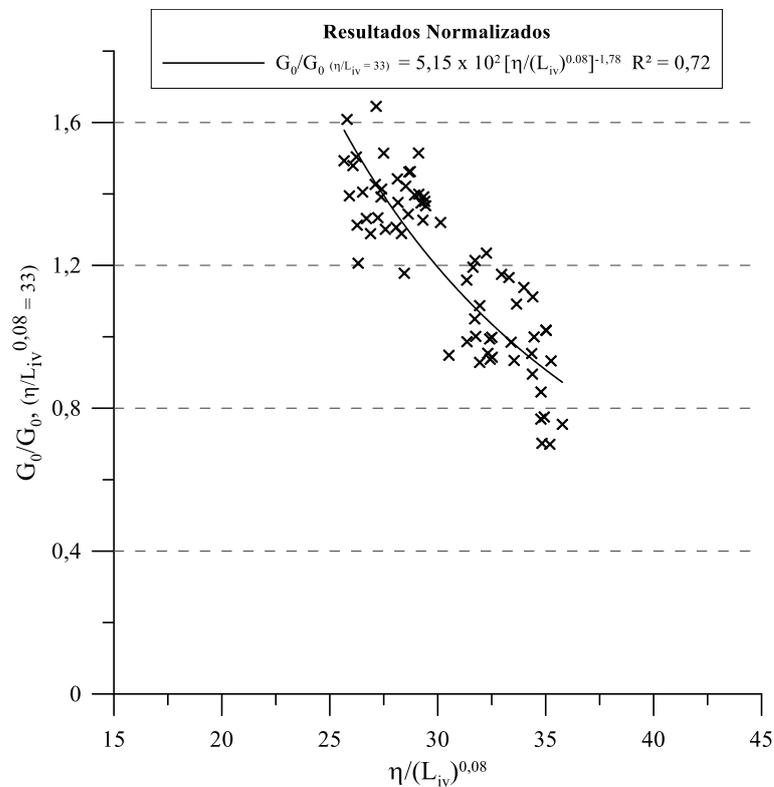


Figura 90: Rigidez normalizada e o parâmetro  $\eta/L_{iv}$  para as duas temperaturas de cura (elaborado pelo autor)

### 4.3.3 Durabilidade

Os resultados de durabilidade, em termos de perda de massa acumulada (PMA), foram relacionados ao índice porosidade/teor volumétrico de cal para os ciclos 1, 3, 6, 9 e 12. Dessa forma, cinco relações distintas foram obtidas (uma para cada ciclo), sendo essas:

$$PMA_1 = 2,95 \times 10^{-10} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{5,75} \quad (\text{eq. 27})$$

$$PMA_3 = 8,11 \times 10^{-12} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{7,14} \quad (\text{eq. 28})$$

$$PMA_6 = 1,11 \times 10^{-11} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{7,35} \quad (\text{eq. 29})$$

$$PMA_9 = 3,60 \times 10^{-11} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{7,17} \quad (\text{eq. 30})$$

$$PMA_{12} = 1,15 \times 10^{-10} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{6,93} \quad (\text{eq. 31})$$

De maneira geral, os coeficientes de determinação obtidos foram relativamente altos, sendo iguais a, 86 %, 85 %, 88%, 86 % e 87 % para, respectivamente, os ciclos 1, 3, 6, 9 e 12. Os resultados verificados ao longo do ensaio, bem como as equações de ajuste, são expostos na figura 91, a seguir. Nessa é possível notar a perda de massa mais elevada da amostra D1 em relação às demais, já que o ponto a essa correspondente mostra-se sempre um tanto afastado dos ajustes do tipo potência. Ainda, a despeito do primeiro ciclo, o expoente externo de ajuste das equações é bastante similar e da ordem de 7,0.

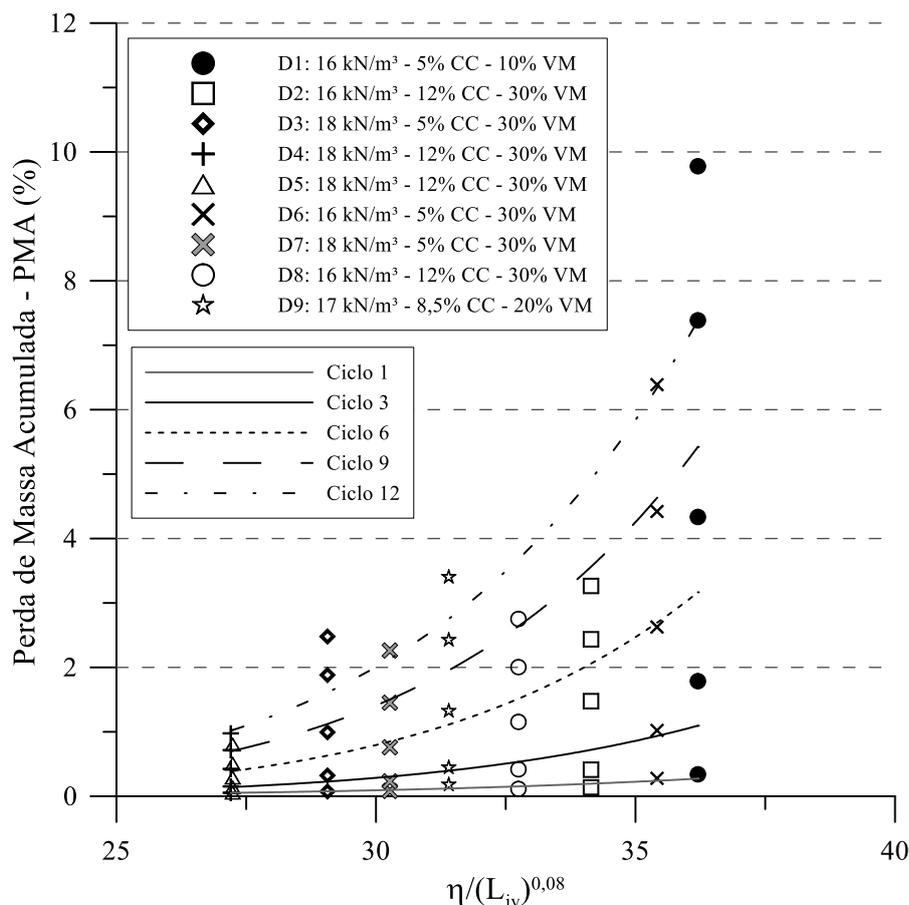


Figura 91: Relação entre PMA e o parâmetro  $\eta/L_{iv}$   
(elaborado pelo autor)

#### 4.3.4 Pulso Ultrassônico ao Longo dos Ciclos de Molhagem – Secagem

A mesma abordagem anteriormente empregada para os ensaios de durabilidade foi aplicada aos resultados do módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) ao longo dos ciclos de molhagem – secagem para os espécimes curados a 23°C e a 40°C. Dessa forma, pode-se representar a degradação da rigidez das amostras ensaiadas em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal. Logo, para os espécimes curados a 23°C durante 7 dias, as seguintes relações matemáticas foram obtidas:

$$G_{0,1} = 1,93 \times 10^{10} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,63} \quad (\text{eq. 32})$$

$$G_{0,3} = 6,73 \times 10^9 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,39} \quad (\text{eq. 33})$$

$$G_{0,6} = 1,11 \times 10^{10} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,73} \quad (\text{eq. 34})$$

$$G_{0,9} = 1,33 \times 10^{-10} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,89} \quad (\text{eq. 35})$$

$$G_{0,12} = 1,50 \times 10^{-7} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-3,00} \quad (\text{eq. 36})$$

De maneira geral, essas relações apresentaram coeficientes de determinação que podem ser considerados regulares, lembrando que nem todas as amostras resistiram até o final do ensaio. Para o primeiro ciclo o  $R^2$  foi de 86 %, para o terceiro 89 %, para o sexto 86 %, para o nono 97% e para o último (12°) 72 %. A figura 92, abaixo, expõe os dados experimentais em conjunto com as equações de ajuste. Nota-se, como já comentado, a degradação do  $G_0$  aos longos dos ciclos do ensaio.

Figura 92 – Relação entre  $G_0$  e o parâmetro  $\eta/L_{iv}$  ao longo dos ciclos para os espécimes curados a 23°C

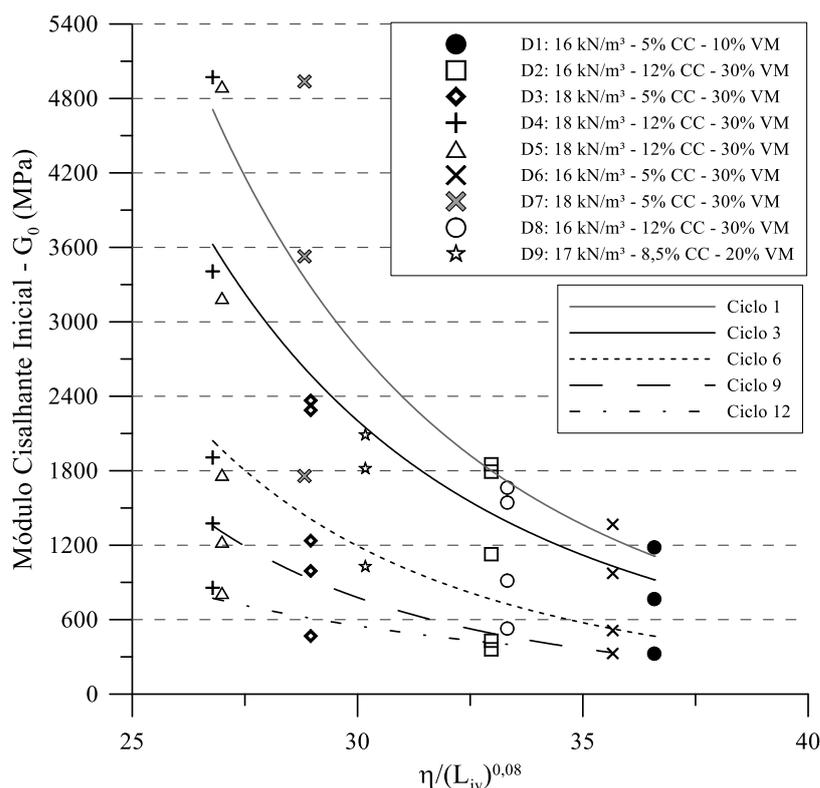


Figura 92: Relação entre  $G_0$  e o parâmetro  $\eta/L_{iv}$  ao longo dos ciclos para os espécimes curados a 23°C (elaborado pelo autor)

As relações matemáticas entre  $G_0$  e  $\eta/L_{iv}$  para as amostras curadas durante 7 dias a 40°C de temperatura são apresentadas abaixo:

$$G_{0,1} = 1,41 \times 10^{14} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-5,73} \quad (\text{eq. 37})$$

$$G_{0,3} = 2,64 \times 10^{12} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-6,11} \quad (\text{eq. 38})$$

$$G_{0,6} = 1,27 \times 10^{10} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,71} \quad (\text{eq. 39})$$

$$G_{0,9} = 9,50 \times 10^{-11} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-6,10} \quad (\text{eq. 40})$$

$$G_{0,12} = 1,50 \times 10^{-7} \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-5,83} \quad (\text{eq. 43})$$

Os coeficientes de determinação verificados nas relações acima foram, para os ciclos 1, 3, 6, 9 e 12, iguais a, respectivamente, 64 %, 70 %, 80 %, 74 % e 65 %. Diferentemente dos valores percebidos nas amostras curadas a 23°C, os R<sup>2</sup> aferidos para maior temperatura de cura foram sensivelmente inferiores, o que denota um maior distanciamento dos dados com relação às equações de ajuste, o que pode ser percebido na figura 93, a seguir. Essa apresenta os dados experimentais e as respectivas equações de ajuste para determinados ciclos.

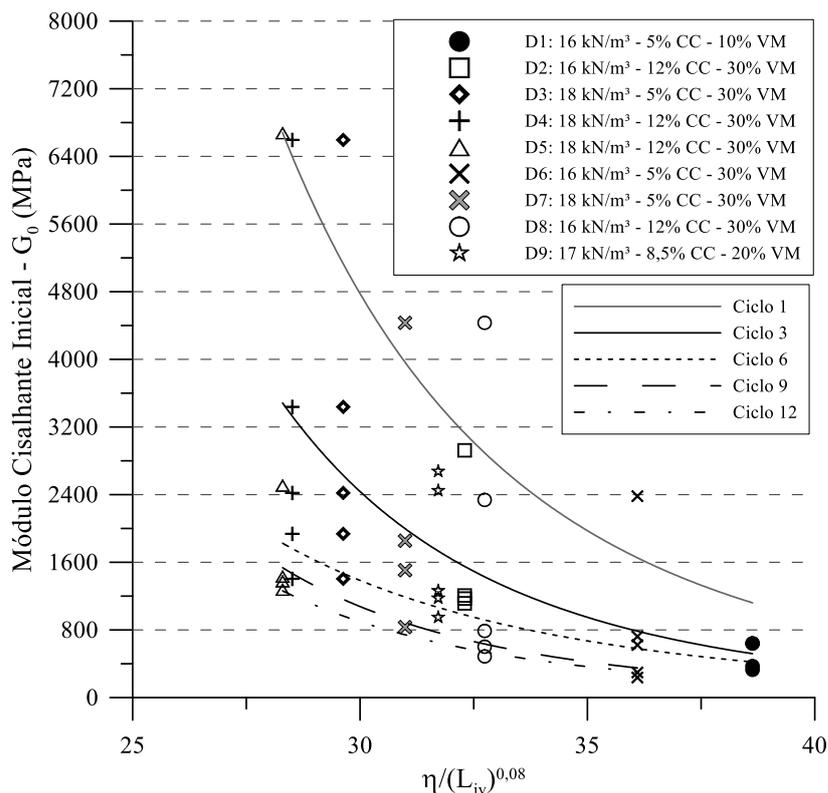


Figura 93: Relação entre  $G_0$  e o parâmetro  $\eta/L_{iv}$  ao longo dos ciclos para os espécimes curados a  $40^\circ\text{C}$  (elaborado pelo autor)

#### 4.4 RESULTADOS DO PINHOLE TEST

A fim de que se classificasse o solo estabilizado quanto a sua dispersibilidade, os tratamentos experimentais apresentados na tabela 11 foram submetidos ao *pinhole test*. Nesse contexto, empregou-se apenas a temperatura de cura igual a  $23^\circ\text{C}$ , pois, além de se buscar o caso mais desfavorável, isto é, com menor nível de cimentação, o encaixe na guia e a perfuração com a agulha das amostras curadas a  $40^\circ\text{C}$  era inviável. Desse modo, os resultados do ensaio são expostos no quadro 4 e na figura 94. Sendo que o primeiro apresenta a classificação final do ensaio (segundo o diagrama da figura 31) e a turbidez do efluente ao final de cada uma das cargas hidráulicas e a segunda expõe as vazões médias ( $Q_m$ ) registradas nas amostras ensaiadas para cada carga hidráulica (H) diferente. A vazão média era determinada pelo quociente entre o volume de água contido no béquer, após o fluxo induzido por cada carga hidráulica, pelo tempo correspondente a esse fluxo (5 minutos).

Amostra	Cor do Efluente (turbidez)				Classificação
	H = 50 mm	H = 180 mm	H = 380 mm	H = 1020 mm	
D1	claro	claro	claro	claro	ND1
D2	claro	claro	claro	claro	ND1
D3	claro	claro	claro	claro	ND1
D4	claro	claro	claro	claro	ND1
D5	claro	claro	claro	claro	ND1
D6	claro	claro	claro	claro	ND1
D7	claro	claro	claro	claro	ND1
D8	claro	claro	claro	claro	ND1
D9	claro	claro	claro	claro	ND1

Quadro 4: Resumo de resultados do *pinhole test*

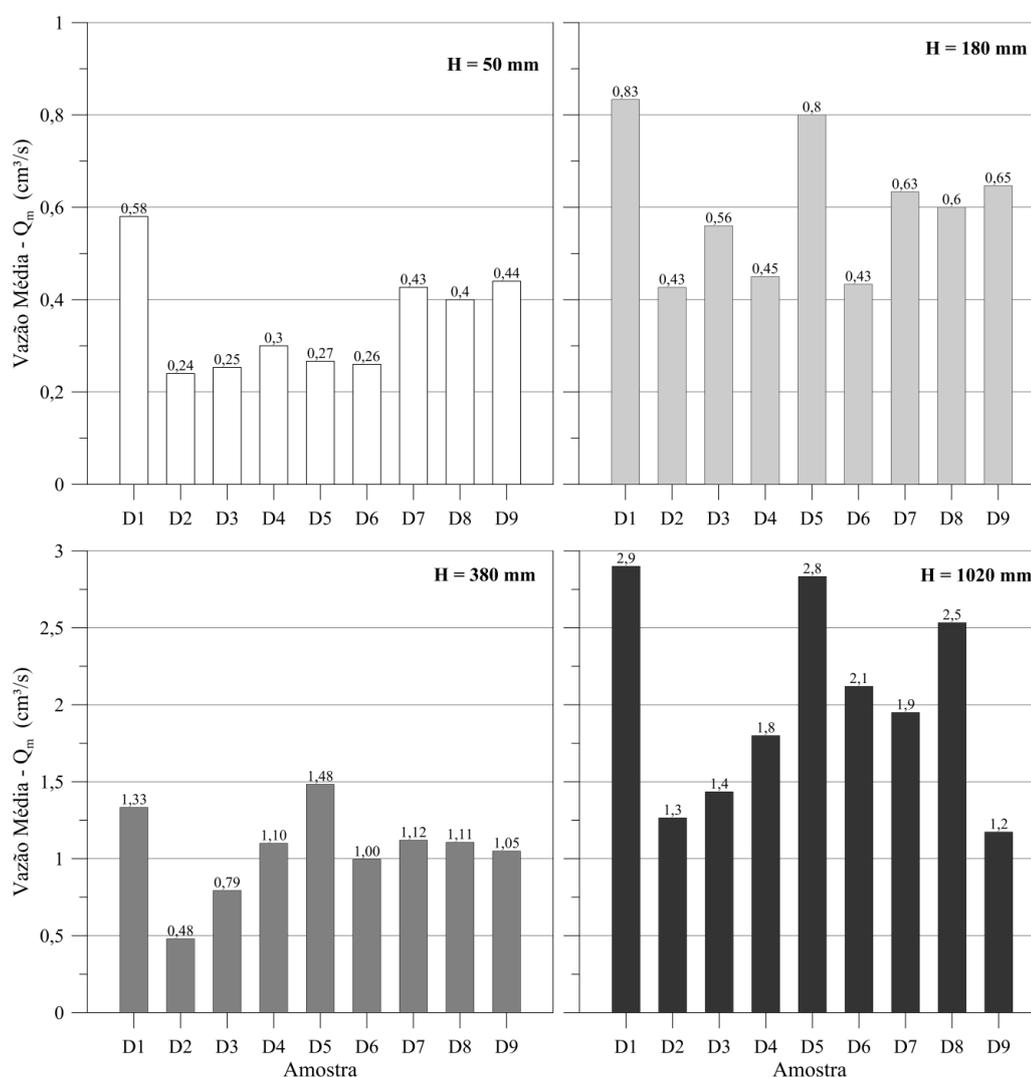


Figura 94: Vazões médias registradas no *pinhole test*

(elaborado pelo autor)

A partir dos resultados apresentados na figura 94, em conjunto com o diagrama contido na norma NBR 14114 (ABNT, 1998), foi possível classificar as amostras ensaiadas quanto à dispersibilidade e expor o resultado final no quadro 4. Nota-se que, independente da carga hidráulica aplicada, a cor do efluente era clara. Isso indica que não houve desprendimento suficiente, com conseqüente carreamento, de partículas finas do solo com potencial para influenciar na turbidez do efluente. Portanto, o tamanho do furo mantinha-se praticamente inalterado ao longo do ensaio, resultando em vazões médias relativamente baixas para todas as cargas hidráulicas impostas. Sob essa perspectiva, pois, pode-se considerar que as dosagens propostas para estabilização tiveram efetividade, uma vez que modificaram a dispersibilidade do solo de moderadamente dispersivo (ND4) para não dispersivo (ND1).

Nesse contexto, Samaniego (2015) já havia constatado que a adição de 2% de cal hidratada era suficiente para suprimir o potencial dispersivo desse mesmo solo, tornando-o não dispersivo, independente do peso específico aparente seco adotado ( $16 \text{ kN/m}^3$  a  $19 \text{ kN/m}^3$ ). O mesmo autor verificou, no entanto, que 1 % de cal não era uma quantidade capaz de eliminar a dispersibilidade desse solo, uma vez que a classificação com esse teor correspondia a levemente dispersivo (ND3).

#### 4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MICROESTRUTURA

De modo a avaliar a modificação na microestrutura do solo devido à adição do pó de vidro (VM) moído e da cal de carbureto (CC), além da interação entre esses componentes, realizaram-se ensaios de difratometria de raios-X (DRX), termogravimetria (TGA e DTG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS). Os três experimentos foram executados em duas misturas distintas correspondentes a (i) solo – 10% VM – 5 % CC e (ii) solo – 30% VM – 12% CC. Para os três testes foram escolhidas duas temperaturas de cura ( $23^\circ\text{C}$  e  $40^\circ\text{C}$ ) em um tempo fixo de 7 dias.

Além disso, ensaios adicionais de DRX foram realizados com um tempo de cura de 30 dias a uma temperatura de  $40^\circ\text{C}$  de modo a se avaliar a mineralogia da mistura decorrente dos efeitos prolongados de interação entre os componentes dessa. As amostras para os três ensaios correspondiam ao menor peso específico aparente seco ( $16 \text{ kN/m}^3$ ), sendo moldadas com teor de umidade de 16%. Após o tempo de cura, essas eram manualmente fragmentadas em forma de pó, o qual era seco a temperatura ambiente, separado através de quarteamento e levado ao

ensaio. Seguindo o mesmo procedimento empregado nos ensaios de resistência, as amostras eram imersas em água (em contato com a água) no sexto dia de cura.

#### **4.5.1 Difração de Raios-X**

O intuito desses ensaios consistia em avaliar a transformação na mineralogia do solo decorrente das adições empregadas, bem como verificar a formação de algum composto ligante de natureza cristalina. Desse modo, as figuras 95 e 96 apresentam, respectivamente, os difratogramas correspondentes às misturas elaboradas com 10 % de pó de vidro moído e 5 % de cal de carbureto (mistura i) e 30 % de pó de vidro moído e 12 % de cal de carbureto (mistura ii) para as diferentes temperaturas e tempos de cura avaliados. Ainda, como forma de comparação, apresenta-se, também, o difratograma original do solo dispersivo. Os valores relativos à intensidade (eixo y) foram elevados na 1/2 de modo a permitir melhor visualização dos picos de interesse. Os ensaios foram todos executados em um difratômetro de raios-X da marca Philips, modelo X'Pert MDP, com tubo de raios-X com radiação  $\text{Cu K}\alpha$ , seguindo condições de análise com inclinação 2 theta de 5 a 75°, fendas de 0,5° e janela de 20 mm. Os resultados desses de raios-X foram analisados no software *X'Pert Highscore*.

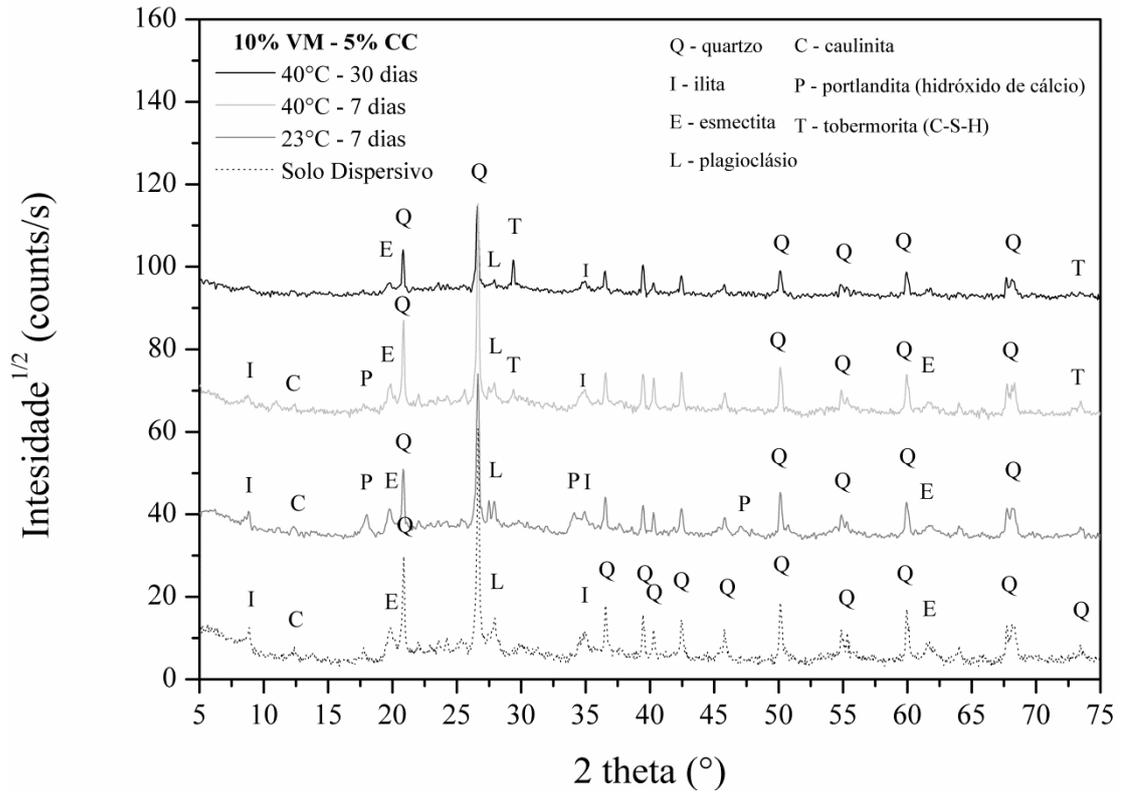


Figura 95: DRX para a mistura (i): 10% VM\_5% cal

(elaborado pelo autor)

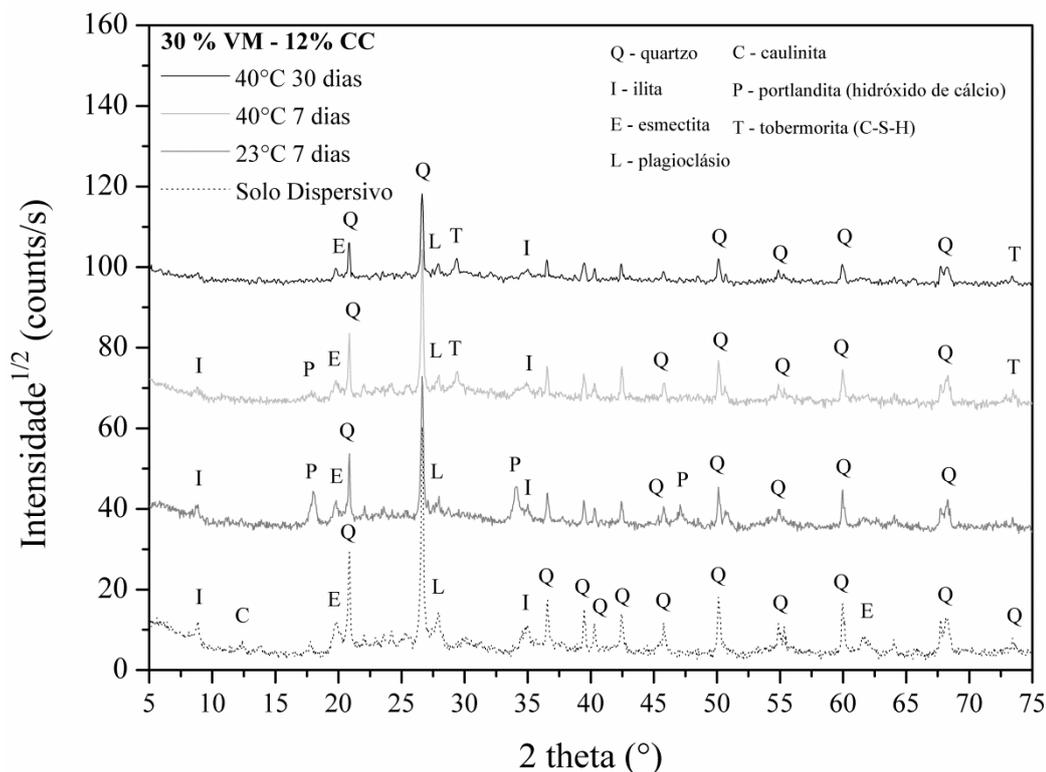


Figura 96: DRX para a mistura (ii): 30% VM\_12% cal  
(elaborado pelo autor)

Essencialmente, por se tratar de um ensaio de natureza qualitativa, não foram notadas diferenças entre os difratogramas das duas misturas. Em outras palavras, não foi possível detectar a formação de fases cristalinas diferentes entre essas. No entanto, para ambas as misturas, nota-se uma diminuição na intensidade do pico de hidróxido de cálcio (portlandita) entre as temperaturas de 23°C e 40°C (7 dias) e o completo desaparecimento desse pico aos 30 dias de cura. Isso pode ser um indício do consumo de hidróxido de cálcio para formação de compostos ligantes hidratados em reações com os silicatos e aluminatos presentes nos argilominerais e no pó de vidro moído, o que é corroborado pelo aumento da resistência e rigidez verificados nos itens 4.1.1 e 4.1.2 para a cura na maior temperatura (DIAMOND et al., 1964; EADES; GRIM, 1960). O consumo do hidróxido de cálcio pode ser verificado, também, no item 8.2, o qual apresenta os resultados dos ensaios térmicos.

Paralelamente, evidencia-se a diminuição (ou desaparecimento) na intensidade dos picos relativos aos argilominerais do solo quando se comparam os difratogramas desse com o das duas misturas. Percebe-se, nesse contexto, o desaparecimento do pico relativo à caulinita (C) a 12,5°, bem como a diminuição de intensidade dos picos da ilita (8° e 36°) e plagioclásio (27°). Da mesma forma, isso é detectado com o pico referente à esmectita em 61°, o qual desaparece

para a cura por 30 dias. Fenômenos análogos foram observados por Diamond et al. (1964), Herzog e Mitchell (1963), Sabry et al. (1980), Rao e Rajesekaran (1996), dentre outros e podem estar relacionados à dissolução alcalina desses argilominerais com posterior precipitação de silicatos e/ou aluminatos de cálcio hidratado.

Porém, a detecção de fases minerais relativas aos compostos ligantes, especialmente aos silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), é dificultada pelo fato desses apresentarem estruturas complexas e variadas, sendo muitas vezes fracamente cristalinos e estruturados em forma de géis de natureza amorfa (DIAMOND et al., 1964; HOU et al., 2013). Além disso, os sistemas que compõe o C-S-H tendem a apresentar uma série de produtos intermediários, os quais coexistem até que haja a reação completa de todos os silicatos disponíveis, dificultando, assim, a identificação de certos compostos (EADES; GRIM, 1960).

Há, porém, certo consenso na literatura de que alguns tipos de C-S-H podem apresentar estrutura similar aos do grupo da tobermorita, o qual corresponde a minerais compostos por silicatos de cálcio hidratados identificáveis por picos situados na região compreendida entre 27,5° a 30° (DIAMOND et al., 1964; PUERTAS et al., 2011). Entretanto, nesse local situa-se, também, um dos picos referentes ao carbonato de cálcio, o qual pode ser um indicativo de carbonatação, isto é, reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono presente na atmosfera, com conseqüente formação do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). Por outro lado, Diamond et al. (1964) afirma que aluminatos de cálcio hidratado (C-A-H) tendem a apresentar estruturas com maiores níveis de cristalização, sendo, teoricamente, de identificação mais fácil através das técnicas de difração de raios-X.

Nesse sentido, em ambas as amostras (i e ii), quando curadas a 40°C (7 e 30 dias), observou-se o aparecimento de um pico localizado próximo a 28°, que pode ser indicativo da formação de C-S-H. Embora esse encontre, também, identificação com a calcita (CaCO<sub>3</sub>), é mais provável que seja referente a um mineral do grupo tobermorita (T) em decorrência do aumento de resistência mecânica verificado entre as temperaturas de 23°C e 40°C (SALDANHA, 2018). Ainda, o fato de a cura ser realizada dentro da água para manutenção da temperatura controlada, dificulta o contato das amostras com CO<sub>2</sub> atmosférico e, portanto, as reações de carbonatação são minimizadas. Não se pode afirmar, contudo, a origem exata do possível C-S-H identificado, ou seja, se esse é produto da reação da cal com o pó de vidro moído ou com os argilominerais do solo.

Ainda, em ambas as misturas, foi possível encontrar reconhecimento para sílico-aluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H) como os minerais *gibbsite*, *ettringite* e *laumontite*. Porém, não se pode ter certeza de sua efetiva formação, pois seus picos correspondem a outros já existentes originalmente no solo. Da mesma forma, aluminatos de cálcio hidratado (C-A-H) foram reconhecidos, todavia não puderam ser diferenciados de minerais já existentes no solo. Por esses motivos, tais fases minerais não foram identificadas nos difratogramas anteriormente apresentados.

Ao se comparar os difratogramas resultantes de cada uma das misturas, nota-se que, apesar de pequenos detalhes, não há grandes diferenças entre eles. Obviamente, os picos relativos à portlandita são levemente mais acentuados na mistura (ii), uma vez que essa contém 12 % de cal de carbureto e, portanto, mais óxido de cálcio disponível. Da mesma forma, os picos que podem ser relativos ao C-S-H têm maior proeminência aos 7 dias (40°C) na mistura (ii) se comparado à mistura (i). Em ambas as dosagens, quando se comparam os resultados de DRX para 7 dias de cura a 23°C com a difratometria original do solo, nota-se a grande similaridade entre ambos. Isto é, há a manutenção na posição original dos picos no solo tratado, sendo a única diferença acentuada a presença dos picos correspondentes à adição de cal (P). Nesse sentido, pode-se intuir que a supressão da dispersibilidade, verificada no *Pinhole Test*, deu-se em razão da substituição iônica dos íons  $\text{Na}^+$  pelos íons  $\text{Ca}^+$ , além do balanceamento das cargas superficiais negativas dos argilominerais (VAKILI et al., 2018).

#### 4.5.2 Termogravimetria

Os resultados dos ensaios termogravimetria (TGA), em termos de porcentagem de perda de massa por temperatura, e de sua derivada primeira (DTG), são expostos na figura 97 para a mistura (i) (10% VM – 5 % CC) e na figura 98 para a mistura (ii) (30% VM – 12% CC). Apresenta-se também, em cada uma dessas, os resultados relativos ao solo dispersivo como objeto de comparação. Os ensaios partiram da temperatura ambiente (~20°C), alcançando os 1000°C a uma taxa de aquecimento igual a 10°C/min, sendo a temperatura e a massa dos espécimes registrada a cada centésimo de minuto. Essencialmente, a partir desses resultados, a identificação de determinados componentes das misturas é possível a partir dos picos proeminentes no DTG, os quais resultam da degradação de determinadas substâncias em certas faixas de temperatura.

Dessa forma, aspectos como consumo de hidróxido de cálcio e a possível formação de compostos ligantes (C-S-H, C-A-H e C-A-S-H) é viável e pode até ser quantificada. De maneira geral, entre 30 e 350°C ocorre, além da evaporação da umidade higroscópica, a decomposição de ligantes hidratados e a liberação da água adsorvida pelos argilominerais (SOUSA et al., 2005; PAIVA et al., 2008; ROJAS e CABRERA, 2008). Entre 350°C e 450°C acontece a desidratação do hidróxido de cálcio e a partir de 600°C dá-se a volatilização do anidrido carbônico CO<sub>2</sub>, o qual pode corresponder à degradação do carbonato de cálcio (HOPPE FILHO, 2008). Consequentemente, pode-se notar a distinção nas dinâmicas de consumo do hidróxido de cálcio para cada temperatura de cura, bem como a diferença entre o comportamento observado nos ensaios para as misturas (i) e (ii).

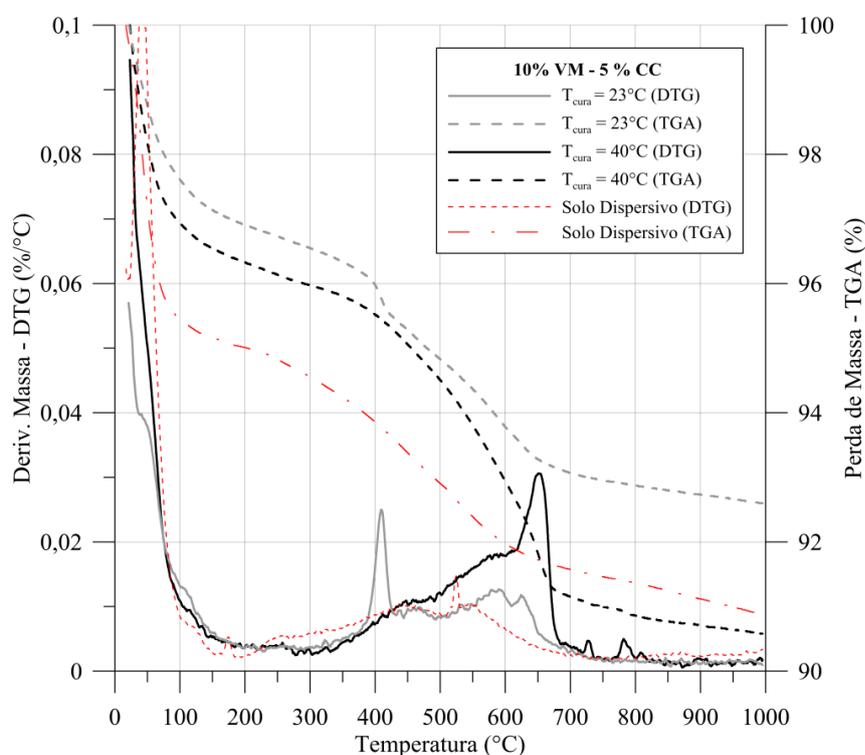


Figura 97: TGA e DTG para a mistura (i): 10%VM\_5% cal  
(elaborado pelo autor)

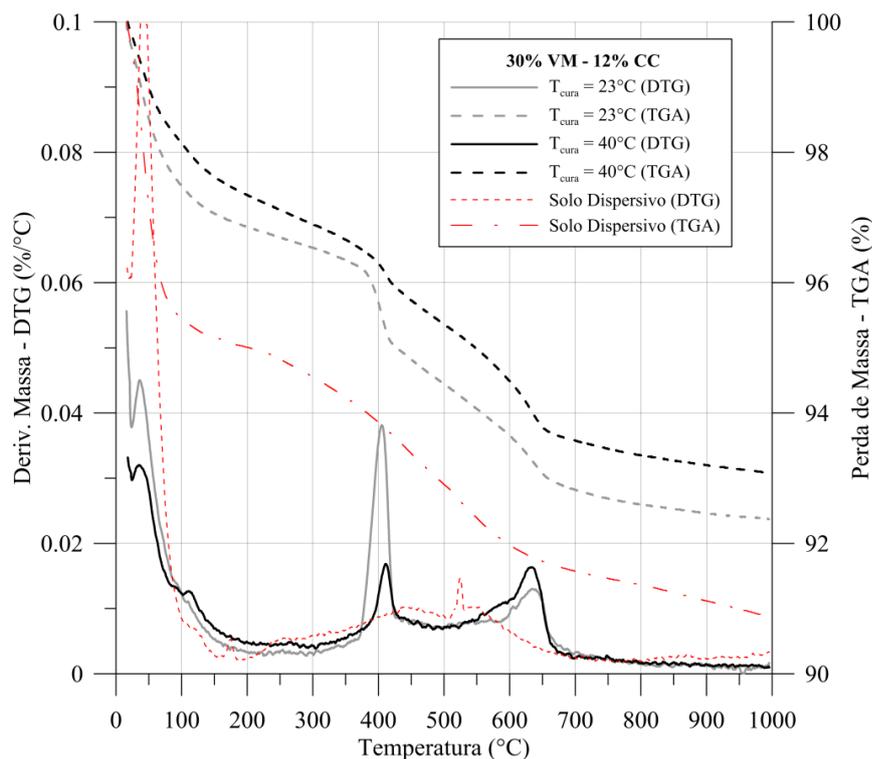


Figura 98: TGA e DTG para a mistura (ii): 30% VM\_12% cal  
(elaborado pelo autor)

Em geral, evidencia-se a distinção no consumo de hidróxido de cálcio entre as temperaturas de 23°C e 40°C em ambas as misturas, dada a diferença no tamanho do pico correspondente a esse composto, cuja localização está em torno de 400°C. Tais resultados vão de encontro com o que é expresso pelos difratogramas apresentados no item 4.5.1 e podem servir para corroborar o acréscimo de rigidez e resistência observado devido à elevação da temperatura de cura. Ainda, nota-se que para a mistura (i), contendo 12 % de cal de carbureto, parece não ter ocorrido o consumo completo de hidróxido de cálcio para a temperatura de cura de 40°C aos 7 dias de cura, já que o pico a ele relativo ainda é proeminente. Na mistura (ii), por outro lado, não há qualquer pico nessa faixa de 400°C para a amostra curada a 40°C, o que é indício do consumo da cal em sua totalidade.

Uma perda de massa substancial foi verificada no intervalo de temperatura correspondente a 30-350°C para todas as misturas, porém picos proeminentes não foram detectados no intervalo compreendido entre 100°C e 350°C. No entanto, a perda de massa nessa faixa, verificada na TGA, pode ser relativa à desidratação de compostos ligantes hidratados, o que estaria de acordo com os resultados observados na difração de raios-X (item 4.5.1), bem como o constatado por Saldanha (2018) e Hoppe Filho (2008) em sistemas cinza volante – hidróxido de cálcio. De

fato, possíveis compostos ligantes hidratados foram identificados através dos ensaios de difração de raios-X e de microscopia eletrônica de varredura para as amostras curadas a 40°C.

#### 4.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS

Como já referido, os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS) foram realizados nas misturas (i) solo – 10% VM – 5 % CC e (ii) solo – 30% VM – 12% CC curadas de forma selada a 23°C e 40°C de temperatura ao longo de 7 dias. Findado o tempo de cura, as amostras eram secas a temperatura ambiente durante um dia e prosseguiam para os procedimentos que envolviam os ensaios, os quais foram realizados em um microscópio de varredura por emissão de campo modelo Inspect F50. De modo a aumentar a nitidez das imagens, as amostras eram metalizadas com íons de carbono antes de prosseguirem ao microscópio, motivo pelo qual esse elemento pode aparecer nos espectros de EDS.

Através dos resultados de MEV estimava-se avaliar de forma visual eventuais transformações na morfologia da microestrutura do solo em decorrência das adições de pó de vidro moído e cal de carbureto, em um ambiente hidratado. Os resultados verificados com o EDS possibilitaram a avaliação da composição química geral das misturas e em determinados pontos de interesse. Logo, comparações com o solo em seu estado natural foram possíveis. A apresentação dos resultados inicia com as imagens de MEV para cada mistura e condição de cura, seguida de conclusões parciais e apresentação dos resultados de EDS para alguns pontos. Um EDS geral comparando a composição química do solo com a das misturas (i) e (ii) é apresentado ao final deste item.

As figuras 99, 100, 101 e 102, expostas na sequência, apresentam os resultados dos ensaios de MEV para a mistura (i), composta por 10 % de VM e 5 % de CC, curada a 23°C durante 7 dias. Ampliações de 400, 1000, 2500 e 10000 vezes foram empregadas.

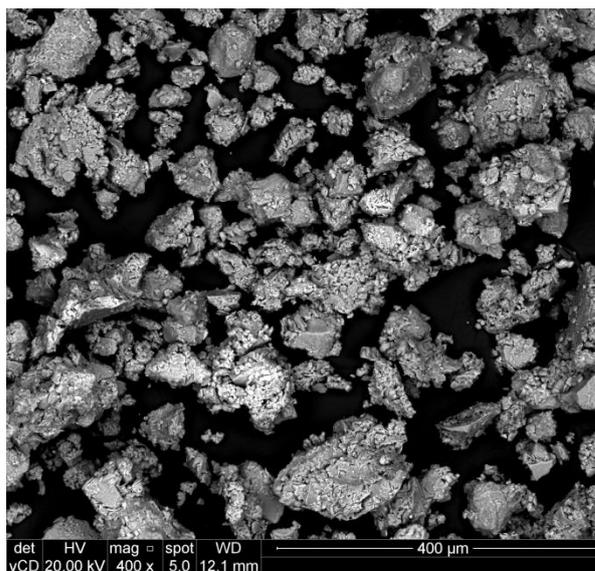


Figura 99: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 23°C e ampliada 400 x  
(foto do autor)

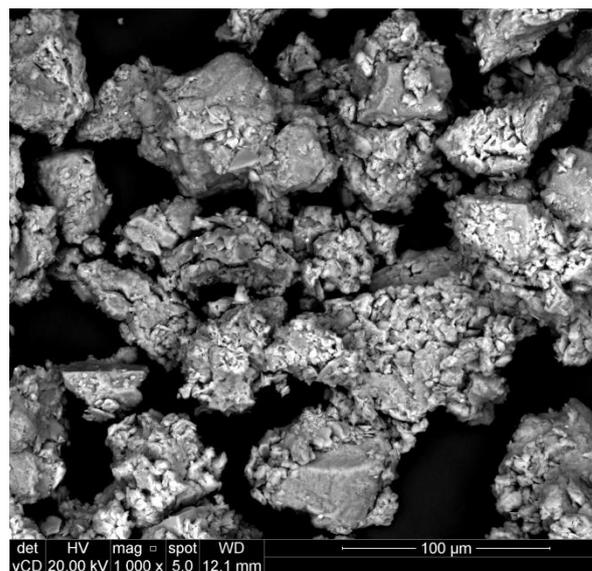


Figura 100: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 23°C e ampliada 1000 x  
(foto do autor)

Figura 101 – Imagem de MEV da mistura (i) curada a 23°C e ampliada 2500 x

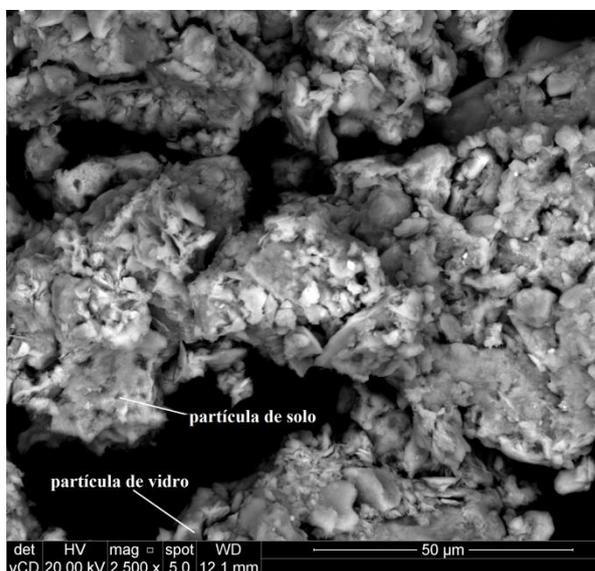


Figura 101: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 23°C e ampliada 2500 x  
(foto do autor)

Figura 102 – Imagem de MEV da mistura (i) curada a 23°C e ampliada 10000 x

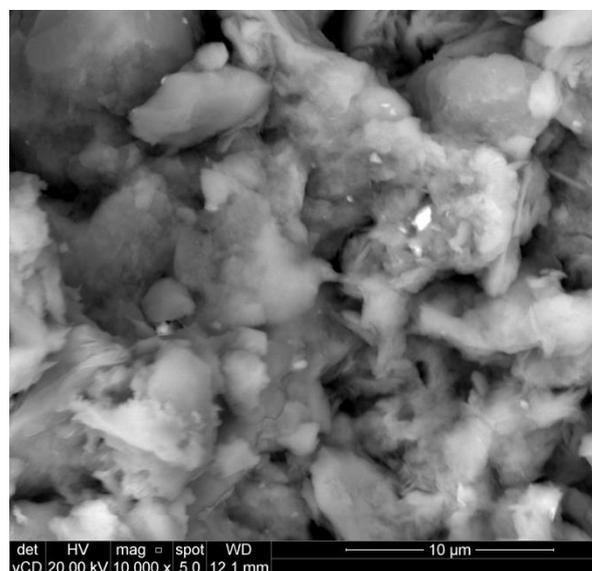


Figura 102: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 23°C e ampliada 10000  
(foto do autor)

Das imagens acima, quando comparadas às do solo apresentadas no item 4.1.1, percebe-se que as partículas na mistura (i) se encontram em um estado de maior agregação, havendo mais pontos de ligação aparente entre essas. Tal fenômeno deve-se, provavelmente, à adição de cal

que promove a floculação em sistemas dessa natureza. A mesma tendência foi observada por Consoli et al. (2016) na estabilização do mesmo solo com cal hidratada. Além disso, nota-se uma mudança considerável na textura da superfície das partículas, a qual passa a ser mais irregular, possivelmente em decorrência da presença do hidróxido de cálcio e partículas de pó de vidro moído. Não foi possível a confirmação através de identificação visual de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), pois até então não havia estrutura formada que se assemelhasse a tal composto ligante.

De maneira análoga ao apresentado para a mistura curada a 23°C, as figuras 103, 104, 105 e 106 expõem os resultados dos ensaios de MEV para a mesma mistura (10 % de VM e 5 % de CC) curada a 40°C durante 7 dias. As mesmas ampliações de imagem foram empregadas (400, 100, 2500 e 10000 x).

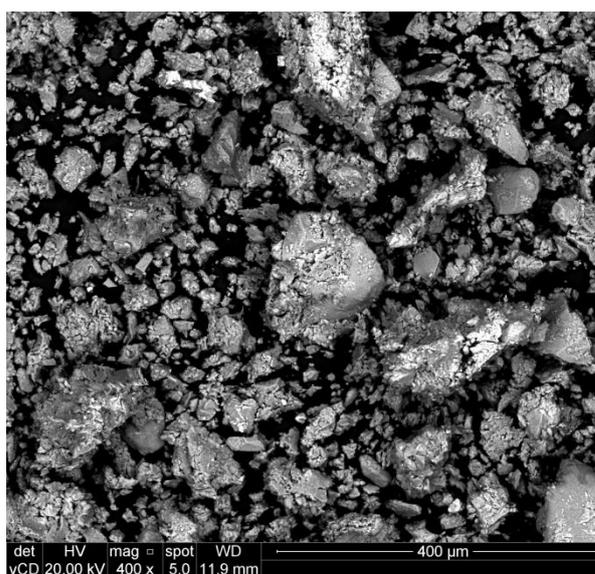


Figura 103: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 40°C e ampliada 400 x  
(foto do autor)

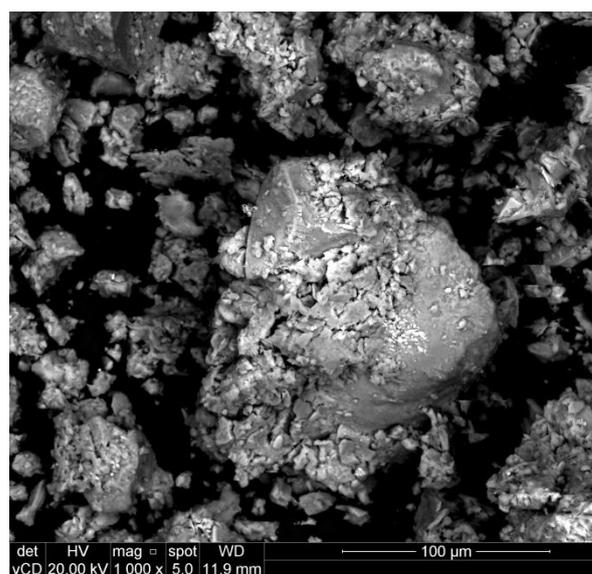


Figura 104: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 40°C e ampliada 1000 x  
(foto do autor)

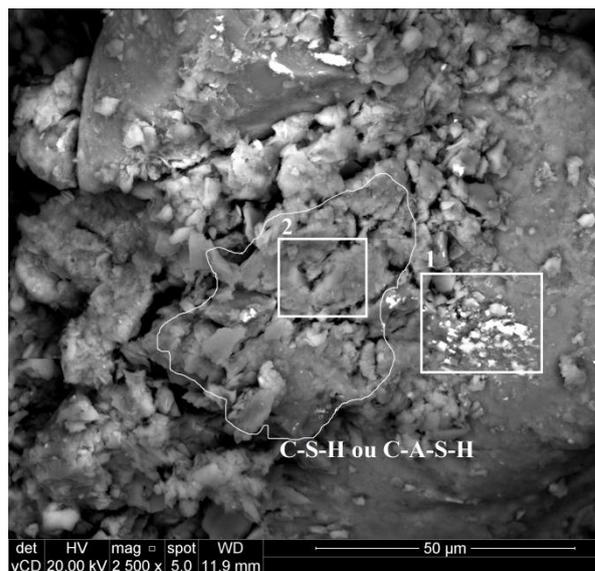


Figura 105: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 40°C e ampliada 2500 x  
(foto do autor)

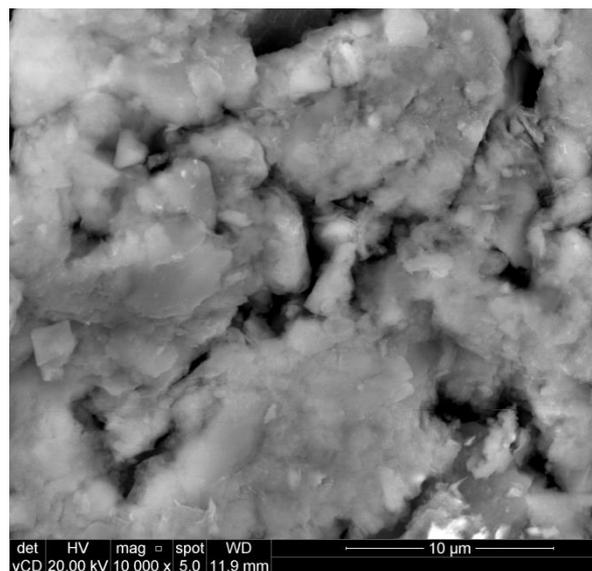


Figura 106: Imagem de MEV da mistura (i) curada a 40°C e ampliada 10000 x  
(foto do autor)

As imagens de MEV feitas na mistura (i) com cura a 40°C revelaram uma estrutura distinta em comparação com a do solo original e com a mesma mistura curada a 23°C. Apesar da mesma estrutura floculada quando comparada ao solo em si, a cura a 40°C implicou uma transformação mais evidente na textura superficial dos grãos do solo. Foi possível a identificação visual do que parece ser C-S-H, C-A-S-H, ou algum composto ligante correlato, ligando duas partículas de solo na imagem da figura 105 e em outras partículas. Tal reconhecimento está de acordo com o observado por Saldanha (2018), Dash e Hussain (2012), Yoobanpot e Jamsawang (2014), dentre outros, e é corroborado pelos resultados anteriormente apresentados de difração de raios-X.

Os resultados de EDS das regiões 1 e 2, destacadas na figura 105 (2500 x), são apresentados a seguir na figura 107. Nota-se que a primeira é relativa a uma partícula do solo na qual há a presença de elementos com maior massa atômica (pontos mais claros da imagem), os quais devem corresponder ao ferro (Fe) e ao cromo (Cr). A segunda, por sua vez, situa-se no local identificado como C-S-H ou C-A-S-H e, de fato, pela composição química verificada, pode ser referente a um composto ligante hidratado dessa natureza.

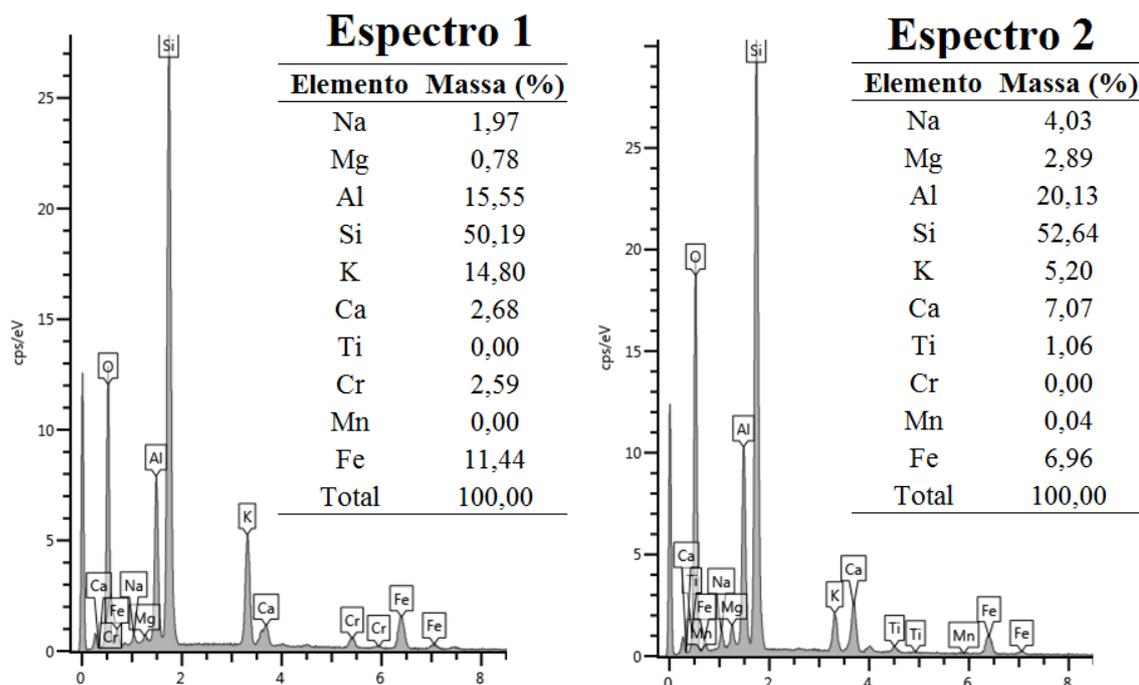


Figura 107: EDS dos pontos 1 e 2 para a mistura (i) curada a 40°C

(elaborado pelo autor)

As imagens de MEV para a mistura composta por 30% de VM e 12% de CC (ii) curada a 23°C ao longo de 7 dias são expostas nas figuras 108, 109, 110 e 111, a seguir. O padrão de apresentação é o mesmo utilizado anteriormente, sendo empregadas as ampliações de 400, 1000, 2500 e 10000 vezes.

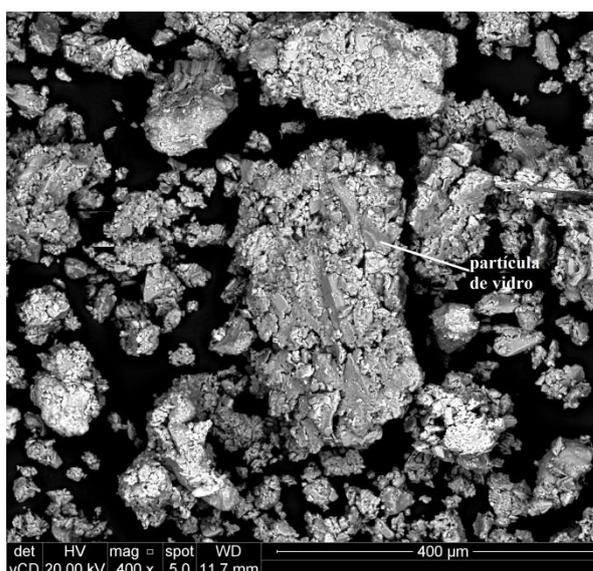


Figura 108: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 23°C e ampliada 400 x

(foto do autor)

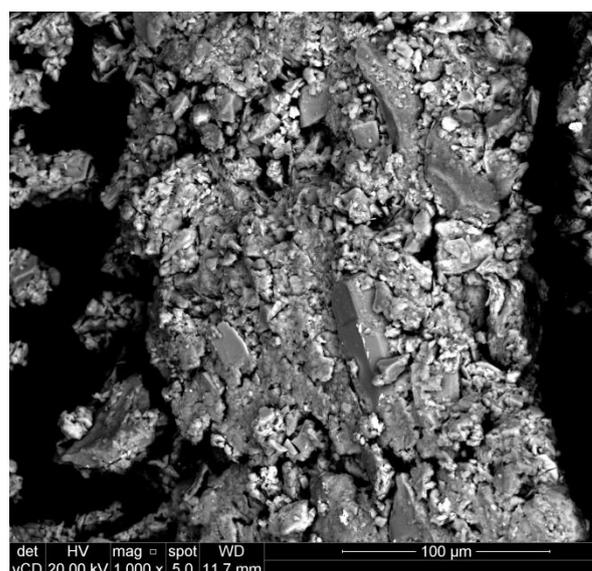


Figura 109: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 23°C e ampliada 1000 x

(foto do autor)

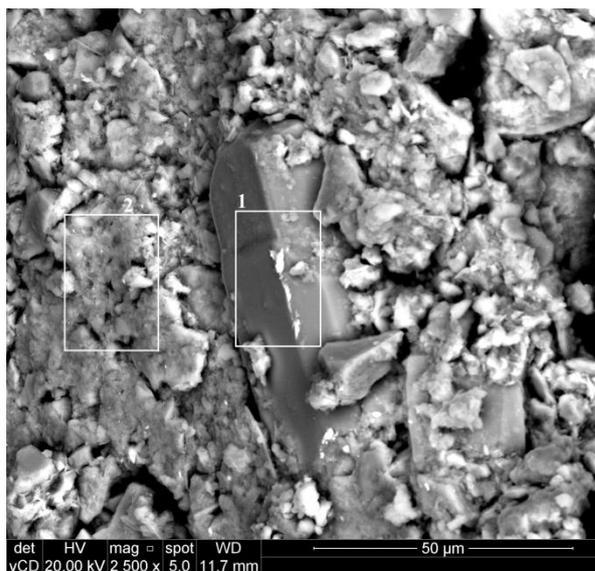


Figura 110: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 23°C e ampliada 2500 x  
(foto do autor)

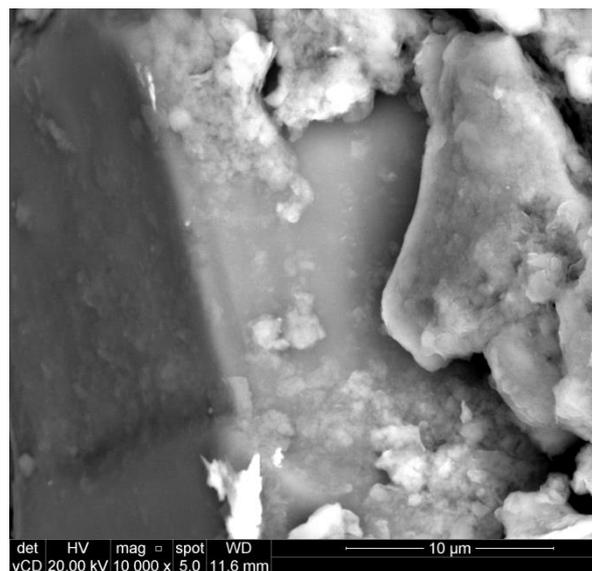


Figura 111: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 23°C e ampliada 10000 x  
(foto do autor)

Para a mistura (ii), as distinções com relação ao solo e à mistura (i) são muito mais evidentes. Nota-se uma estrutura bastante floculada, mesmo na imagem com ampliação de 400 x. Há uma agregação muito mais notável das partículas que compõem o solo em decorrência da incorporação de 12 % de cal de carbureto. Além disso, partículas de vidro moído, dada sua adição de 30 %, são facilmente identificadas em todas as imagens. Na figura 109 (ampliação de 1000 x), por exemplo, nota-se uma aglomeração de partículas de solo, vidro e cal que formam um único grande grão da mistura. Outro aspecto importante é a sensível mudança na textura superficial das partículas com relação ao solo e à mistura (i).

Ainda, nas figuras 110 e 111, nota-se a presença de uma estrutura com formato prismático, de aspecto bastante distinto se comparado às demais que compõem o material analisado. Trata-se, provavelmente, de algum mineral presente no solo, talvez um cristal de quartzo. No entanto, a despeito dessas características, não foi possível a identificação visual de compostos ligantes como o C-S-H para a cura a 23°C, o que está de acordo com o anteriormente verificado nos ensaios de DRX. Os resultados de EDS para duas regiões destacadas na figura 110 são apresentados a seguir (figura 112) e exibem a composição química das partes destacadas. Nota-se a grande concentração de cálcio e silício na região 2 e de ferro, correspondente às partículas mais claras na imagem, no espectro 1. Nesse sentido, é possível que a região 2 corresponde a um silicato de cálcio hidratado com estrutura amorfa e/ou fracamente cristalina.

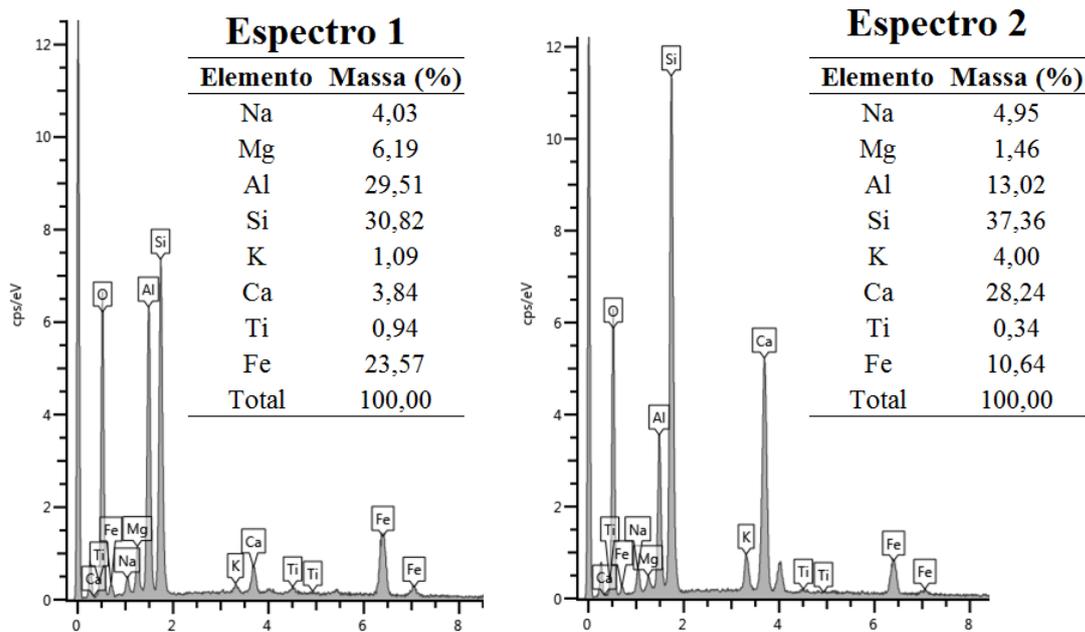


Figura 112: EDS dos pontos 1 e 2 para a mistura (ii) curada a 23°C  
(elaborado pelo autor)

Por sua vez, as mesmas imagens para a mistura (ii), porém com cura a 40°C durante 7 dias, são expostas na sequência (figuras 113, 114, 115 e 116). As mesmas condições de ampliação de imagem foram empregadas nesse caso.

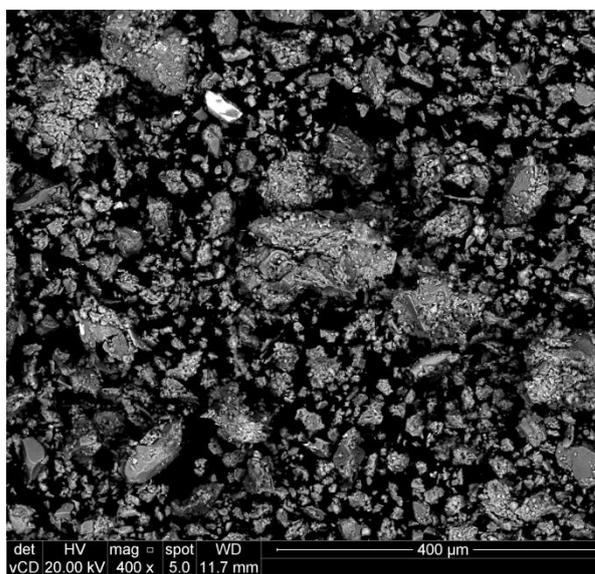


Figura 113: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 40°C e ampliada 400 x

(foto do autor)

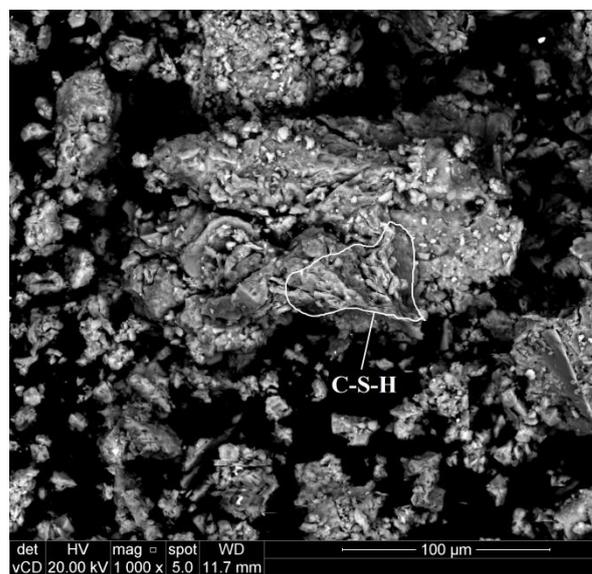


Figura 114: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 40°C e ampliada 1000 x

(foto do autor)

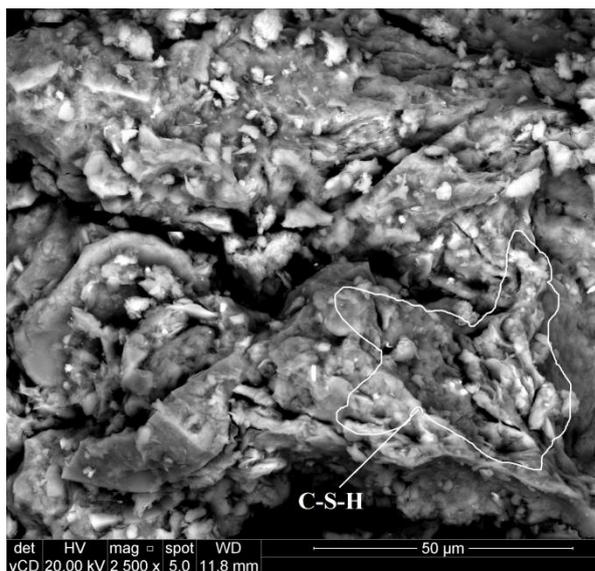


Figura 115: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 40°C e ampliada 2500 x  
(foto do autor)

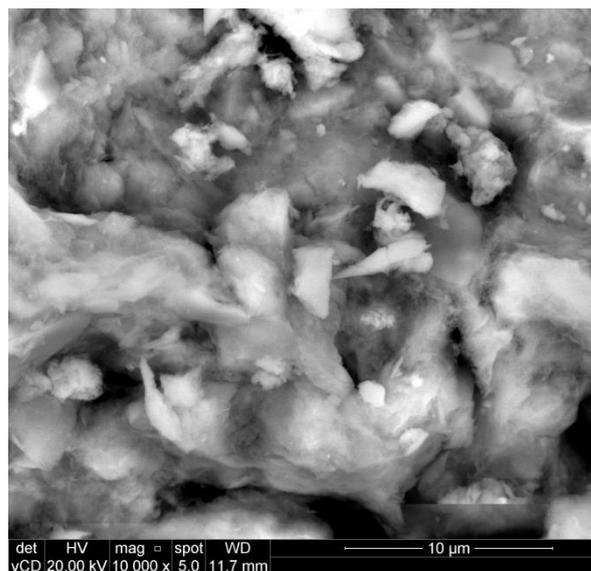


Figura 116: Imagem de MEV da mistura (ii) curada a 40°C e ampliada 10000 x  
(foto do autor)

Nota-se que a estrutura da mistura (ii) para a cura a 40°C é bastante distinta com relação ao solo original e à mesma mistura curada a 23°C. Também, a despeito dessa apresentar estrutura floculada, a textura superficial dos grãos difere sensivelmente da observada na mesma mistura curada à menor temperatura. A imagem ampliada 2500 vezes (figura 115) expõe a aglomeração de grãos de solo, vidro moído e cal ligados pelo que parece ser silicato de cálcio hidratado (C-S-H) ou algum outro composto correlato. Essa região, provavelmente formada por C-S-H, é destacada na mesma imagem e tem aspectos semelhantes aos observados na mistura (i) quando curada a 40°C, estando de acordo com o que foi constatado por Saldanha (2018), Dash e Hussain (2012), Yoobanpot e Jamsawang (2014), dentre outros. No entanto, não há como identificar as causas das distinções observadas entre as misturas (i) e (ii), já que em ambos os teores de cal de carbureto e pó de vidro moído são diferentes. Mais provável é que a variação nos teores de ambos os materiais tenha acarretado nas distinções observadas.

O ponto mais claro na figura 113, e destacado como (1) na figura 117, é composto majoritariamente pelo elemento zircônio, como atestam os resultados de EDS expostos a seguir nas figuras 117 e 118. Esse metal pode ser encontrado como elemento traço em solos distintos (PARAHYBA et al., 2009). Além disso, foi feita a verificação da composição química de uma partícula próxima (2), na qual foi detectada a presença de cálcio em uma estrutura que pode ser um composto ligante hidratado, como o C-S-H, envolvendo uma partícula do solo. Lembrando que não foi encontrada a presença de cálcio no solo natural, conforme exposto no item 4.1.1, e

não se nota a existência de grãos de cal de carbureto e pó de vidro moído desprendidos na região (2) em que se realizou o espectro, o que reforça a possibilidade da região marcada ser um ligante.

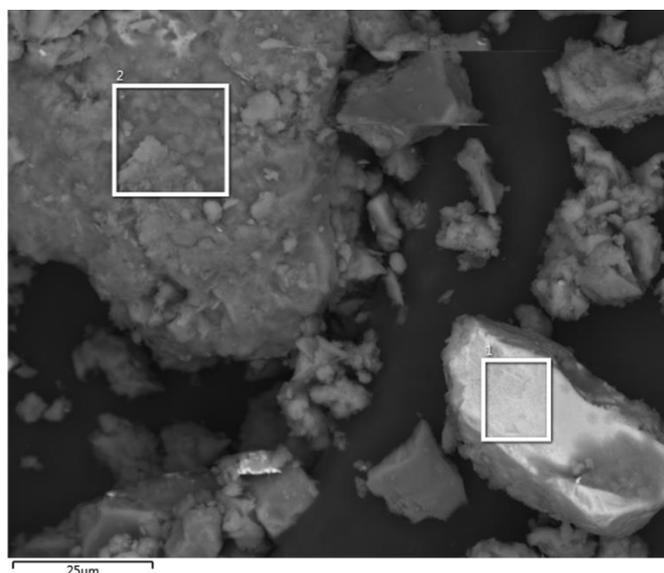


Figura 117: Imagem ampliada da mistura (ii) curada a 40°C  
(foto do autor)

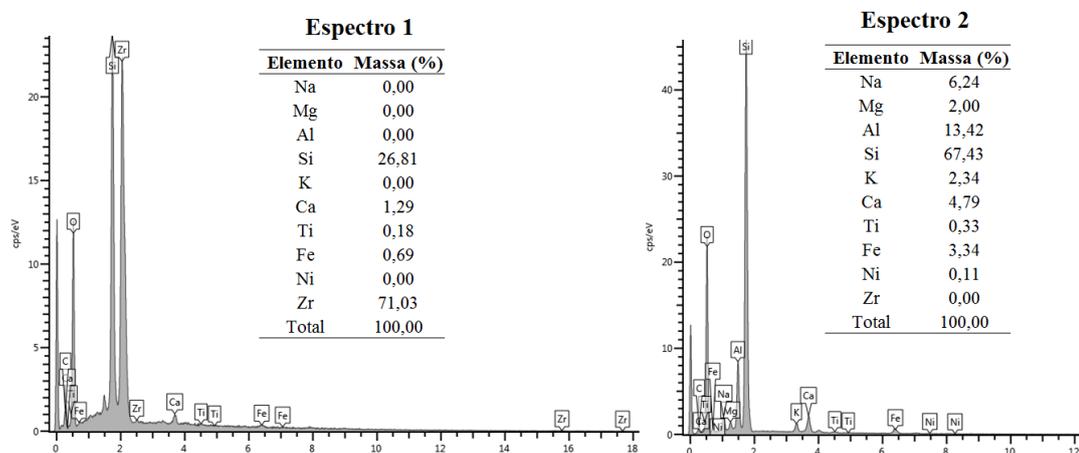


Figura 118: EDS dos pontos 1 e 2 para a mistura (ii) curada a 40°C  
(elaborado pelo autor)

As figuras 119, 120 e 121, a seguir, apresentam os resultados de EDS para o solo, para a mistura (i) e para a mistura (ii). Nessas, apresenta-se a composição química elementar, sendo excluídos da análise o carbono, por ser o material utilizado na metalização, e o oxigênio, por ser considerado irrelevante na análise.

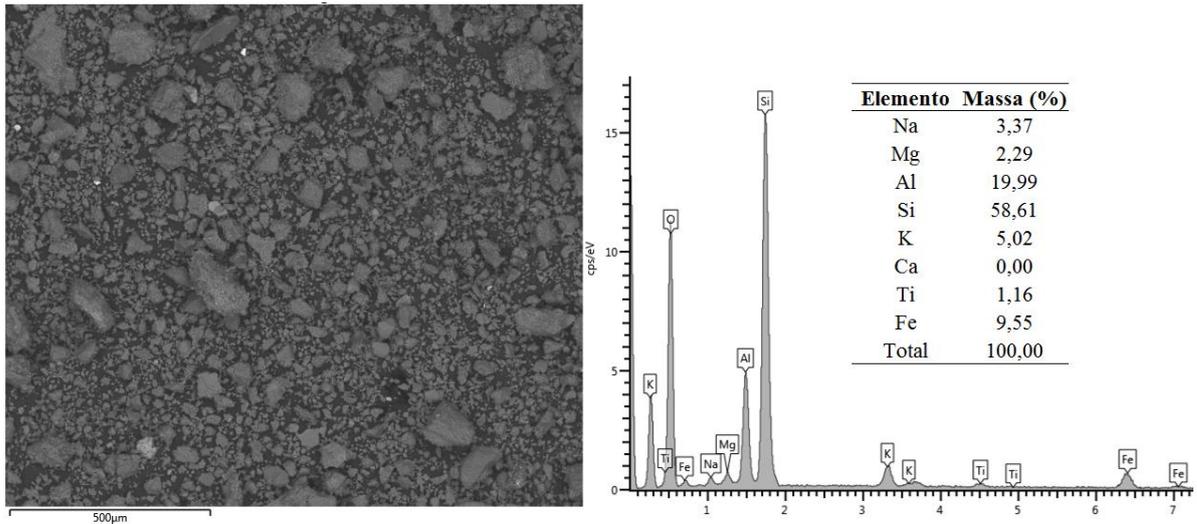


Figura 119: EDS do solo desconsiderando a presença de carbono e oxigênio  
(elaborado pelo autor)

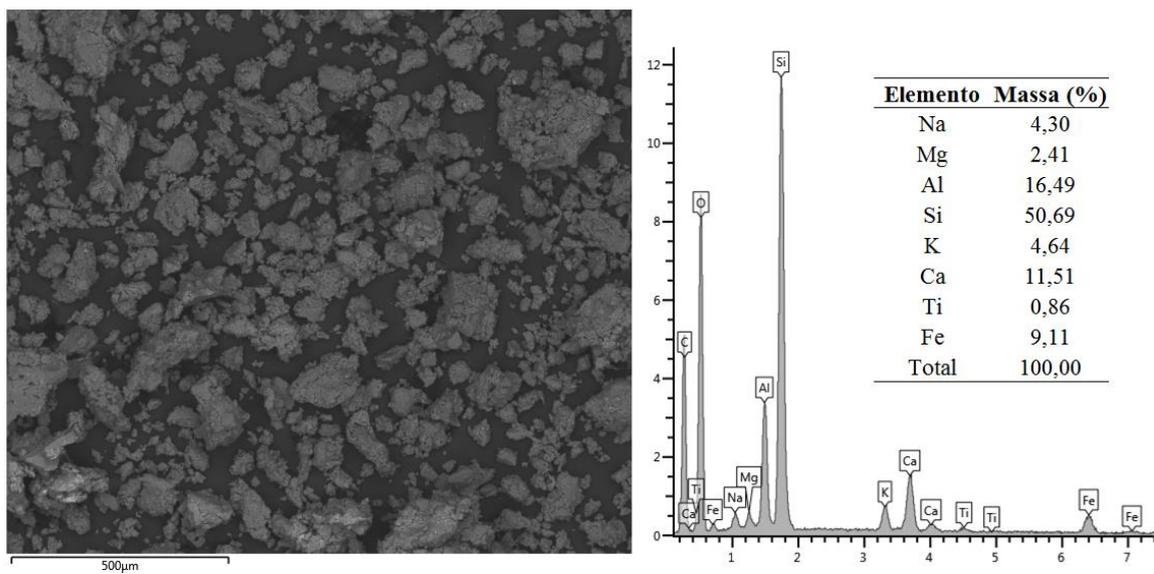


Figura 120: EDS geral da mistura (i)  
(elaborado pelo autor)

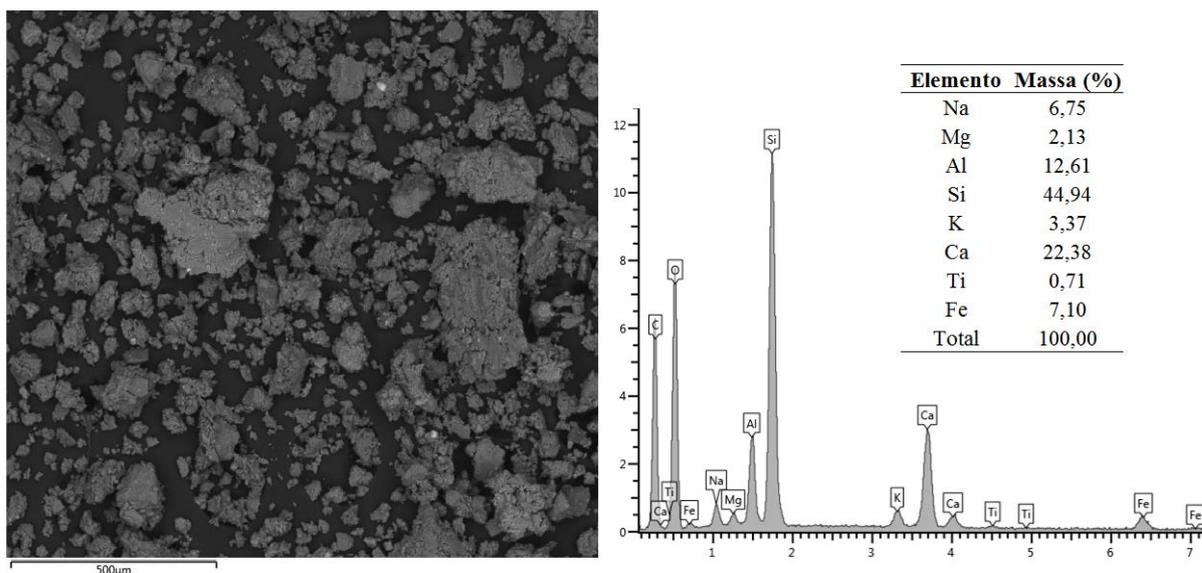


Figura 121: DS geral da mistura (ii)  
(elaborado pelo autor)

Dos resultados apresentados acima, nota-se a mudança na composição química das três amostras avaliadas em decorrência das adições de cal de carbureto e pó de vidro moído. A participação do alumínio (Al) na composição geral dos espécimes cai de 20 % para 16,50 e 12,60 % nas amostras (i) e (ii), respectivamente, já que o pó de vidro moído (VM) contém pouco alumínio em sua composição quando comparado ao solo dispersivo. A mesma tendência de queda é observada para o silício (Si), de 58,60 % para 50,70 % (mistura i) e 44,94 % (mistura ii). Por outro lado, nota-se o incremento na quantidade de sódio (Na), pois o mesmo material (VM) apresenta quantidades significativas desse elemento em sua composição. O cálcio (Ca), por sua vez, inexistente no solo original e sua quantidade cresce ao passo que aumentam as quantidades adicionadas de vidro moído e cal, materiais ricos em cálcio. Nesse sentido, a variação na quantidade dos outros elementos pode ser explicada pela substituição do solo pelo pó de vidro moído e pela cal de carbureto. Logo, verificou-se uma queda nas quantidades de magnésio (Mg), potássio (K), titânio (Ti) e ferro (Fe).

## 5 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no que foi exposto e comentado ao longo do presente trabalho, apresentam-se conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES

Da análise dos resultados verificados na resistência à compressão simples, módulo cisalhante inicial, durabilidade por sucessivos ciclos de molhagem – secagem – escovação, avaliação da rigidez inicial ao longo de ciclos de molhagem – secagem, *pinhole test* e ensaios de microestrutura, estabeleceram-se, considerando as limitações experimentais do presente estudo, os seguintes comentários:

#### **Resistência à Compressão Simples (RCS):**

- a) Quanto à influência do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ): considerando-se o nível de significância adotado igual a 5 %, o  $\gamma_d$  mostrou-se significativo e foi o segundo fator controlável mais influente em alterar a resistência à compressão simples das misturas estudadas. Dentro das limitações consideradas, verificou-se uma proporcionalidade linear entre a resistência e à compactação das misturas expressa em termos do peso específico aparente seco. Ao passo que há um incremento no  $\gamma_d$ , maior é o intertravamento entre as partículas e maior é a capacidade de cimentação proporcionada pelo aumento da área de contato entre essas partículas que formam o sistema solo – cal – pó de vidro moído;
- b) Quanto à influência da temperatura de cura (T): a temperatura foi o fator controlável com maior efeito sobre a RCS das misturas avaliadas, sendo significativo do ponto de vista estatístico. O aumento dessa variável implica a transformação na dinâmica das reações pozolânicas, acelerando-as. Desse modo, para um mesmo período de cura, maiores temperaturas incrementam a taxa de fixação do hidróxido de cálcio e, conseqüentemente, a precipitação de compostos ligantes hidratados. Isso explica o aumento na resistência verificado de 23° a 40°C;

- c) Quanto à influência do teor de pó de vidro moído (VM): embora de efeito menos pronunciado se comparado ao do  $\gamma_d$  e da temperatura de cura, houve evidências estatísticas suficientes, a um nível de significância de 5 %, para corroborar sua efetividade em alterar a RCS. Todavia, ao se isolar o efeito da temperatura, verificou-se que o VM só é, de fato, significativo, para a maior das temperaturas de cura. Logo, atesta-se que a condição de 7 dias (23°C) é insuficiente para o pleno desenvolvimento das reações desse com a cal de carbureto, necessitando, assim, mais tempo e/ou aumento da temperatura de cura;
- d) Quanto à influência da umidade de moldagem ( $w$ ): a umidade de moldagem mostrou-se significativa e teve efeito em alterar a resposta dos espécimes para a cura selada. Por outro lado, para cura imersa, não houve evidências significativas para corroborar sua significância estatística. De fato, uma maior umidade de moldagem propicia maior disponibilidade inicial de água para o desenvolvimento das reações pozolânicas, com conseqüente precipitação de compostos ligantes e incremento na RCS. Naturalmente, esse efeito tende a ser mais notável quando a dinâmica dessas reações é acelerada, isto é, para a temperatura de 40°C;
- e) Quanto à influência do teor de cal (CC): ainda que discreto, o teor de cal se mostrou significativo em alterar a resposta das misturas estudadas quanto à RCS. Naturalmente, tal efeito é mais pronunciado para a maior temperatura de cura, visto que sua fixação ocorre a taxas mais elevadas a 40°C. Logo, um maior teor implica em maior resistência. Seu efeito foi semelhante nos dois tipos de cura;
- f) Quanto à influência do tipo de cura: muito embora o comportamento mecânico não tenha sido idêntico, não houve evidências estatísticas suficientes para afirmar que o tipo de cura influenciou a RCS das misturas aqui estudadas. Logo, para o referido período de cura, o tipo de cura (selada ou imersa) parece não influenciar a resistência mecânica dos espécimes ensaiados;
- g) Quanto à relação ajustada entre porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico de cal ( $L_{iv}$ ): de fato, foi possível o estabelecimento de uma relação entre a RCS e o parâmetro  $\eta/L_{iv}$ , utilizando um expoente igual a 0,08 para o teor volumétrico de cal. Todavia, os coeficientes de determinação verificados podem ser considerados apenas regulares, devido à insuficiência de dados experimentais mais abrangentes. Isto é, tinham-se

muitos fatores controláveis e poucos níveis em cada fator, uma vez que se trabalhou com um projeto fatorial fracionado de resolução V. Logo, as relações foram estabelecidas com espécimes apresentando distintos teores de vidro, umidade de moldagem e condições de cura, o que contribuiu para a obtenção de ajustes com coeficientes de determinação pouco satisfatórios.

#### **Módulo Cisalhante Inicial ( $G_0$ ):**

- a) Quanto à influência do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ): foi o segundo fator mais influente em alterar a resposta das misturas estudadas quanto à rigidez. Nesse sentido, uma maior compactação facilita a propagação das ondas cisalhantes, implicando maiores velocidades de onda transversal e maiores pesos específicos por espécime;
- b) Quanto à influência da temperatura de cura (T): assim como no ensaio de resistência, foi o fator controlável que exerceu maior efeito sobre a rigidez inicial das misturas ensaiadas. Como já referido, a temperatura atua como um catalisador no desenvolvimento das reações pozolânicas, logo uma maior temperatura de cura acelera o desenvolvimento de compostos ligantes hidratados. Esses formam uma matriz cimentícia rígida no solo estabilizado, o que é verificado com o aumento no  $G_0$ ;
- c) Quanto à influência do teor de pó de vidro moído (VM): assim como nos resultados de RCS, o teor de vidro mostrou-se significativo em alterar a resposta das misturas quanto à rigidez inicial. Conquanto menos pronunciado que a temperatura e a compactação, um aumento no teor de vidro contribuiu para o aumento no  $G_0$  dos espécimes, o que pode ser explicado pela formação de compostos ligantes. Como já referido, tal efeito é mais evidente para a cura na maior temperatura, pois o vidro parece não reagir suficientemente na cura a 23°C ao longo de 7 dias;
- d) Quanto à influência da umidade de moldagem ( $w$ ): não houve evidências estatísticas suficientes que corroborassem a influência da umidade de moldagem no desempenho das misturas ensaiadas quanto sua rigidez inicial. Logo, seu efeito foi praticamente irrisório para todas as temperaturas e condições de cura, com exceção da cura submersa a 23°C, na qual o  $G_0$  parece decrescer ao passo que  $w$  aumenta. Todavia, tal resultado parece insignificante sob uma perspectiva global e pode ser resultado de ruídos experimentais;

- e) Quanto à influência do teor de cal (CC): como constatado com a umidade de moldagem, o teor de cal não foi estatisticamente significativo. Logo, seu efeito em alterar a resposta das misturas quanto à rigidez inicial foi irrisório para as condições aqui empregadas. Nesse sentido, tal resultado é similar ao observado para os resultados de RCS, nos quais, embora significativo, o teor de cal teve influência discreta.
- f) Quanto à influência do tipo de cura: como já constatado para os ensaios de resistência, o tipo de cura não teve influência estatisticamente comprovada em alterar a resposta dos espécimes ensaiados no que diz respeito ao  $G_0$ ;
- g) Quanto à relação ajustada entre porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico de cal ( $L_{iv}$ ): foi possível o estabelecimento de relações entre o  $G_0$  com o parâmetro  $\eta/(L_{iv})^{0,08}$ . Pelos mesmos motivos já referidos anteriormente, os coeficientes de determinação obtidos dessas foram apenas regulares.

#### **Durabilidade por molhagem – secagem – escovação:**

- a) Quanto à influência do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ): estatisticamente, foi o fator controlável com maior efeito sobre a variável resposta. Nesse sentido, uma maior compactação da mistura implicou melhor desempenho, reduzindo a perda de massa acumulada ao final do ensaio. As razões para tal comportamento são as mesmas já apontadas na resistência à compressão simples;
- b) Quanto à influência do teor de cal (CC): diferente do verificado para os ensaios de resistência e rigidez, anteriormente comentados, o aumento no teor de cal foi extremamente influente no desempenho das misturas frente à durabilidade. Ou seja, o emprego de teores mais elevados de CC propiciou melhoria de performance (menor PMA). Em parte, a grande influência do teor de cal advém da combinação entre as características do ensaio (sucessivos ciclos de molhagem – secagem – escovação) e da natureza dispersiva do solo estabilizado. Se por um há a degradação progressiva dos espécimes devido à interação do solo com a água nos períodos de imersão (hidratação com consequente expansão dos cátions livres de  $Na^+$  e  $Mg^+$ ), ocorre, também, uma catálise nas reações pozolânicas devido à exposição a temperaturas elevadas, com consequente desenvolvimento da matriz cimentícia no solo. Logo, é fundamental que haja quantidades abundantes de hidróxido de cálcio livre para suprimir o potencial

- dispersivo do solo e, ao mesmo tempo, para garantir o desenvolvimento de uma matriz cimentícia, a qual lhe conferirá resistência mecânica;
- c) Quanto à influência do teor de vidro moído (VM): embora não haja evidências estatísticas suficientes que corroborem, de fato, sua significância, nota-se que seu efeito existe. Na prática, o aumento no teor de VM implicou em menores valores para a PMA, o que se deve, em parte, pela substituição de um material dispersivo por outro não dispersivo e pela inclusão de um material pozolânico rico em silicatos. Essa última característica facilita a formação de compostos ligantes hidratados que contribuem para melhoria do desempenho do material estabilizado. De fato, o emprego da cal, por si só, já foi comprovado como ineficiente para propiciar um desempenho adequado nesse mesmo solo frente à durabilidade por molhagem – secagem – escovação;
- d) Quanto à influência da umidade de moldagem ( $w$ ): de forma análoga ao constatado com o teor de pó de vidro moído, não há evidências estatísticas que corroborem a significância da umidade de moldagem em alterar o desempenho das misturas nos ensaios de durabilidade. Isso pode ser explicado pela disponibilidade de água durante o período de imersão e pelas características de tempo e temperatura do ensaio.
- e) Quanto ao desempenho geral das misturas: de maneira geral, a proposta de estabilização com pó de vidro moído e cal de carbureto pode ser tida como favorável quando se considera o desempenho dos materiais estabilizados frente ao ensaio de durabilidade e, também, quando se compara com a performance do mesmo solo estabilizado somente com cal. Ainda, a maior parte das misturas testadas atende aos requerimentos da USACE (1984) e da PCA (1992) os quais estabelecem como PMA limite ao final do ensaio 6 % e 7 %, respectivamente, para solos argilosos estabilizados com cimento;
- f) Quanto à relação ajustada entre porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico de cal ( $L_{iv}$ ): De fato, foi possível relacionar a PMA ao final dos ciclos 1, 3, 6, 9 e 12 com o parâmetro  $\eta/(L_{iv})^{0,08}$ , sendo obtida uma equação para cada ciclo. Coeficientes de correlação relativamente bons foram obtidos, o que indica que tal abordagem pode ser adequada para a previsão da durabilidade nesse tipo de material para essas condições experimentais.

## Ensaio de Pulso Ultrassônico ao Longo dos Ciclos de Molhagem – Secagem

Como alguns espécimes foram perdidos em cada ciclo, não foi possível fazer uma avaliação estatística acerca dos fatores que controlam o desempenho do  $G_0$  ao longo dos ciclos. Porém, comentários acerca do que foi observado, de forma empírica, são feitos.

- a) Generalidades: os mesmos fatores referidos para a durabilidade parecem influenciar o desempenho quanto ao  $G_0$  de modo mais ou menos análogo. Isto é, compacidade e teor de cal são fundamentais para minimizar as perdas na rigidez decorrentes das condições extremas às quais as amostras são submetidas;
- b) Quanto ao efeito da temperatura de cura: de maneira geral as amostras curadas a 40°C apresentam, naturalmente, uma rigidez inicial muito superior. Todavia, a partir do primeiro ciclo já se nota uma tendência de queda acentuada em todas as amostras curadas a 40°C.
- c) Quanto ao efeito dos ciclos: é visível a degradação da rigidez das amostras, curadas em ambas as temperaturas, devido à ação dos sucessivos ciclos de molhagem-secagem. Os mecanismos de degradação, com exceção da ação abrasiva da escova, são os mesmos já mencionados para a durabilidade. Ou seja, a ação combinada da água com a temperatura, embora implique a catálise das reações pozolânicas, acarreta na severa degradação da rigidez das misturas devido à interação do solo com a água, com efeitos dispersivos, e a formação de microfissuras internas decorrentes dos processos de hidratação e desidratação do solo ao longo dos ciclos;
- d) Quanto à relação ajustada entre porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico de cal ( $L_{iv}$ ): De modo análogo ao apresentado anteriormente para os ensaios de durabilidade, relacionou-se o  $G_0$  ao parâmetro  $\eta/(L_{iv})^{0,08}$  medido após os ciclos 1, 3, 6, 9 e 12. Isso foi feito para as duas temperaturas de cura. Coeficientes de correlação relativamente bons foram obtidos, o que indica que tal comportamento pode ser expresso, nessas condições específicas, através da relação vazios/teor volumétrico de cal.

### Pinhole Test

Todas as amostras submetidas ao *pinhole test*, segundo as diretrizes da norma NBR 14114 (ABNT 1998), atestaram a eficiência das adições em suprimir o potencial dispersivo original

do solo, o qual era classificado como ND4 conforme a mesma norma. Sob essa perspectiva, pode-se considerar satisfatória a proposta de estabilização. No entanto, a classificação segundo a dispersibilidade é apenas um parâmetro que descreve uma característica específica do solo. Nesse sentido, não é diretamente relacionável à resistência, rigidez e nem, tampouco, ao desempenho frente à durabilidade das amostras.

A mera estabilização desse solo com 3 % de cal hidratada já é suficiente para que a dispersibilidade, segundo os critérios do *pinhole test*, seja extinta. Porém, o desempenho de uma mistura com essas características frente ao ensaio de durabilidade não é satisfatório, dado a elevada PMA verificada. Logo, é fundamental o emprego de ensaios adicionais a fim de que uma caracterização mais abrangente do desempenho de solos dispersivos estabilizados seja realizada.

### **Microestrutura**

- a) Quanto às transformações na mineralogia do solo: de maneira geral, pela análise dos difratogramas das misturas, nota-se a diminuição na intensidade dos picos relativos aos argilominerais originalmente presentes no solo. Isso pode indicar a dissolução parcial (ou total) desses devido ao ataque alcalino com consequente formação de compostos ligantes hidratados. Nesse sentido, nota-se, paralelamente, a diminuição da intensidade nos picos de hidróxido de cálcio, o que pode indicar seu consumo nas reações pozolânicas. De certa forma isso é corroborado pelos ensaios térmicos;
- b) Quanto à detecção de compostos ligantes hidratados via DRX: dos resultados de DRX, percebe-se o aparecimento, nas duas misturas avaliadas, de picos que podem ser relativos a silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). Não foi possível a detecção de picos particulares referentes a aluminatos de cálcio hidratado (C-A-H) ou sílico-aluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H), pois esses, quando detectados, encontravam-se na mesma posição de picos originalmente existente no solo. Logo, através dos dados de DRX, não é possível atestar com 100 % de certeza a formação de C-A-H e/ou C-A-S-H.
- c) Quanto à detecção de compostos ligantes hidratados via TGA/DTG: embora atestem o maior consumo do hidróxido de cálcio para maior temperatura de cura, os ensaios térmicos não permitiram a detecção de compostos ligantes hidratados, muito

provavelmente devido à presença de água intersticial que evapora completamente até os 100°C e se confunde com a degradação de ligantes nessa mesma faixa de temperatura;

- d) Quanto à detecção de compostos ligantes via MEV/EDS: de fato, para as amostras curadas a 40°C, foi possível a identificação visual de estruturas que podem ser compostos ligantes como o C-S-H. Isso explicaria o acréscimo de resistência e rigidez inicial decorrentes do aumento da temperatura de cura. A composição química elementar desses foi verificada através dos espectros resultantes do EDS.
- e) Quanto às transformações na estrutura do solo: através das imagens de microscopia eletrônica de varredura foi possível atestar visualmente modificações na morfologia das partículas do solo devido às adições de pó de vidro moído e cal de carbureto. De maneira geral, as partículas do solo estabilizado apresentavam-se em um estado mais floculado devido às trocas catiônicas promovidas pela presença dos íons de cálcio. Também, a textura superficial das partículas foi modificada e foi possível notar a presença das adições empregadas.

## 5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados da presente pesquisa e das discussões realizadas, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- a) Quanto à RCS e ao  $G_0$ : sofreram grande efeito da temperatura e do peso específico aparente seco, o que indica, respectivamente, a formação acelerada de compostos ligantes hidratados e o intertravamento entre os grãos;
- b) Quanto à durabilidade: desempenho satisfatório em decorrência das misturas empregadas, já que as perdas de massa verificadas foram relativamente baixas;
- c) Quanto à degradação da rigidez inicial: observou-se severa degradação da rigidez em função dos sucessivos ciclos de molhagem – secagem;
- d) Quanto ao *Pinhole Test*: as misturas testadas mostraram-se satisfatórias em suprimir o potencial de dispersão do solo segundo os critérios da norma NBR 14114;

- e) Quanto à microestrutura: verificou-se a formação de compostos ligantes hidratados, além de substanciais mudanças na microestrutura do solo em decorrência das adições empregadas.
- f) Desempenho geral: satisfatório frente à resistência e a durabilidade ao se considerar as limitações experimentais aqui encontradas.

### 5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de que os conhecimentos obtidos no presente trabalho sejam ampliados e, também, que os resultados aqui relatados sejam verificados e comparados, o autor sugere os seguintes tópicos que julga interessante:

- a) Verificar o desempenho das misturas aqui estudadas para tempos de cura mais longo, como 28, 60, 90, 180 e 360 dias;
- b) Avaliar o impacto de temperaturas de cura diferentes das aqui empregadas (23°C e 40°C) no comportamento do material estabilizado;
- c) Execução de um projeto fatorial completo, incluindo, assim, mais níveis em cada um dos fatores controláveis, com posterior comparação dos resultados obtidos com os verificados no presente trabalho;
- d) Realização de ensaios cíclicos a fim de que se avalie a degradação da rigidez das misturas em decorrência da ação de solicitações dessa natureza;
- e) Análise de ciclo de vida (ACV) nas misturas aqui propostas de modo a efetivamente avaliar o desempenho ambiental dessas;
- f) Emprego de pozolanas alternativas ao pó de vidro moído;
- g) Estudo da microestrutura das misturas com uma variedade maior de ensaios de DRX, TGA/DTG, MEV com EDS, dentre outros.

## REFERÊNCIAS

ABDALLAH, S.; FAN, M. Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement. **International Journal of Web Engineering and Technology**, v. 2(6), p. 11 – 17, 2014.

ALI, M. M. Y.; ARULRAJAH, A. Potential use of recycled crushed concrete-recycled crushed glass blends in pavement subbase applications. In:GEOCONGRESS, 2012, Oakland. **Proceedings...** Reston: ASCE, 2012, p. 3662 – 3671.

AL – SWAIDANI, A.; HAMMOUD, I. MEZIAB, A. Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 8(5), n. p., 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 6276**: standard test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization. Philadelphia, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 5102**: standard test method for unconfined compressive strength of compacted soil-lime mixtures. Philadelphia, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 593**: standard specification for fly ash and other pozzolans for use with lime for soil stabilization. Philadelphia, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 6572**: standard test methods for determining dispersive characteristics of clayey soils by the crumb test. Philadelphia, 2013a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 4667**: standard test methods for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test. Philadelphia, 2013b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 4546**: standard test methods for one-dimensional swell or collapse of soils. Philadelphia, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 559**: standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures. Philadelphia, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 7928**: standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis. Philadelphia, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 4221**: standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer. Philadelphia, 2018a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 7503**: standard test method for measuring the exchange complex and cation exchange capacity of inorganic fine-grained soils. Philadelphia, 2018b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 4972**: standard test methods for pH of soils. Philadelphia, 2018c.

ARULRAJAH, A.; DISFANI, M. M.; ALI, M. M. Y. Suitability of using recycled glass-crushed rock blends for pavement subbase applications. In: GEO-FRONTIERS CONGRESS, 2011, Dallas. **Proceedings...** Reston: ASCE, 2012, p. 1325 – 1334.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO). **Guia Reciclagem do Vidro**. São Paulo: 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6508**: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459**: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180**: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181**: análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13600**: Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 graus Celsius. Rio de Janeiro, 1996a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13601**: avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test). Rio de Janeiro, 1996b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13602**: avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - ensaio de dispersão SCS. Rio de Janeiro, 1996c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13603**: Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos, por meio de ensaios químicos em amostra de água intersticial. Rio de Janeiro, 1996d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14114**: solos argilosos dispersivos - identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (pinhole test). Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: resíduos sólidos – classificação . Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10005**: procedimento para obtenção de extrato de lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10006**:procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

BALDOVINO, J. A.; MOREIRA, E. B.; TEIXEIRA, W.; IZZO, R.; ROSE, J. L. Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 10, p. 188 – 194, 2017.

BASU, D.; PUPPALA, A. J. Principles of sustainability and their applications in geotechnical engineering. In: **GEOTECHICAL SYNERGY**, 2015, Buenos Aires. **Proceedings...** Amsterdam: IOS Press, 2015, p. 162 – 183.

BELL, F. G.; MAUD, R. R. Dispersive soils: a review from a South African perspective. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, n. 27, p. 195-210, 1994

BOURDEAUX, G.; IMAIZUMI, H. Dispersive clay at Sobradinho Dam. In: **THE SYMPOSIUM ON DISPERSIVE CLAYS, RELATED PIPING, AND EROSION IN GEOTECHNICAL PROJECTS**, n. 3, 1976, Chicago. **Proceedings...** Philadelphia: ASTM, 1977, p. 13 – 24.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2005.

BUCHANAN, R. **Wicked Problems in Design Thinking**. Cambridge: MIT Press, 1992.

BUSH, D. C.; JENKINS, R. E.; McCALEB, S. B. Separation of swelling clay minerals by centrifugal method. In: **FOURTEENTH NATIONAL CONFERENCE ON CLAYS AND CLAY MINERALS**, n. 14, 1966, Berkley. **Proceedings...** New York: Elsevier, 2013, p. 407 – 417.

CARPENTER, A.; CRAMER, S. Mitigation of alkali-silica reaction in pavement patch concrete that incorporates highly reactive fine aggregate. **Journal of the Transportation Research Board**, v. 1668, p.60 – 67, 1999.

CHARLES, J. A. Ground improvement: the interaction of engineering science and experience-based technology. **Géotechnique**, v. 52(7), p. 527 – 532, 2002.

CHEN, C.h. et al. Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. **Cement And Concrete Research**, v. 36(3), p.449 – 456, 2006.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM (CEMPRE). Associação sem Disponível em: [www.cempre.org.br](http://www.cempre.org.br). Acesso em: junho de 2018.

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**, v. 127 (9), p. 774 – 782, 2001.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key parameters for the strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133(2), p. 197 – 205, 2007.

CONSOLI, N. C.; LOPES Jr., L. da S.; HEINECK, K. S. Key parameters for the strength control of lime stabilized soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21(5), p. 210 – 216, 2009a.

CONSOLI, N. C.; LOPES Jr., L. da S.; FOPPA, D.; HEINECK, K. S. Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils. **Geotechnical Engineering**, v. 162 (GE2), p. 111 – 118, 2009b.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA, R. B. Variables governing strength of compacted soil–fly ash–lime mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23(4), p. 432 – 440, 2011.

CONSOLI, N. C.; ROCHA, C. G.; SALDANHA, R. B. Coal fly ash–carbide lime bricks: an environment friendly building product. **Construction and Building Materials**, v. 69, p. 301 – 309, 2014.

CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; VILLALBA, N. M. K. Durability, strength, and stiffness of dispersive clay-lime blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28(11), p. 1 – 11, 2016.

CONSOLI, N. C.; DA SILVA, J. K.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; RIVOIRE, A. B. Compacted clay-industrial wastes blends: long term performance under extreme freeze-thaw and wet-dry conditions. **Applied Clay Science**, v. 146, p. 404 – 410, 2017a.

CONSOLI, N. C.; DA SILVA, A. P.; NIERWINSKI, H. P.; SOSNOSKI, J. Durability, strength and stiffness of compacted gold tailings-cement mixes. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 55(10), p. 486 – 494, 2017b.

CONSOLI, N. C.; TOMASI, L. F. The impact of dry unit weight and cement content on the durability of sand–cement blends. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Ground Improvement**, v. 171(2), p. 96 – 102, 2018.

CONSOLI, N. C.; WINTER, D.; LEON, H. N.; SCHEUERMANN FILHO, H. C. Durability, strength and stiffness of green stabilized sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 144(9), p. 1 – 10, 2018a.

CONSOLI, N. C.; MARIN, J. E. B.; SAMANIEGO, J. A. Q.; HEINECK, K. S.; JOHANN, A. D. R. Use of sustainable binders in soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31(2), p. 1 – 7, 2018b.

Container Recycling Institute. Glass Recycling Rates by Country, 2010. Disponível em: <http://www.container-recycling.org/index.php/glass-containers>. Acesso em 5 jun. 2018.

COOPERATIVE RESEARCH CENTER FOR SUSTAINABLE SUGAR PRODUCTION (CRC). **Diagnosis and management of sodic soils under sugarcane**. Townsville: CRC Sugar, 2001. Technical Publication.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DASH, S. K.; HUSSAIN, M. Lime stabilization of soils: reappraisal. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24(6), p. 707 – 714, 2012.

DAY, D. E.; MALISH, W. R.; WIXSOM, B. G. Improved bonding of waste glass aggregate with bituminous binders. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 49, p. 1038 – 1041, 1970.

DEMPSEY, B. J.; THOMPSON, M. R. Durability properties of soil-lime mixtures. **Highway Research Board**, n. 235, p. 61 – 75, 1968.

DIRECCIÓN GENERAL DE ESTADÍSTICA, ENCUESTAS Y CENSOS (DGEEC). **Compendio Estadístico Ambiental del Paraguay: 2000 – 2009**. Asunción: dgeec, 2013.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E.; CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L. Theoretical derivation of artificially cemented granular soil strength. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 143(5), p. 1 – 9, 2017.

DIAMOND, S.; WHITE, J. L.; DOLCH, W. L. Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack. In: TWELFTH NATIONAL CONFERENCE ON CLAYS AND CLAY MINERALS, 12, 1963, Atlanta. **Proceedings...** Oxford: Pergamon, 1964, p. 359 – 378.

DISFANI, M. M.; ARULRAJAH, A.; BO, M. W.; HANKOUR, R. Recycled crushed glass in road work applications. **Waste Management**, v. 31(11), p. 2341 – 2351, 2011.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. Reactions of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. **Highway Research Board**, n. 262, p. 51 – 63, 1960.

ELGES, H. F. W. K. Problems in South Africa- state of the art: dispersive soils. **The Civil Engineer in South Africa**, s. 1., v. 27, p. 347 – 353, 1985.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - 2005, 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GALVÃO, A. C. P.; de FARIAS, A. C. M.; MENDES, J. U. L. Caracterização do rejeito de vidro sodo-cálcico proveniente do processo de lapidação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2014, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: CBECIMAT, 2015, p. 2421 – 2429.

GIANI, M. I.; DOTELLI, G.; BRANDINI, I.; ZAMPORI, L. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. **Resources, conservation and recycling**, v. 104, p. 244 – 238, 2015.

GILLOT, J. E. **Clay in Engineering Geology**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1968.

GREEN, P. P. Dispersive and erodible soils – fundamental differences. IN: PROBLEMS IN SOILS IN SOUTH AFRICA, n. 1, 2008, Midrand. **Proceedings...** Midrand: Geotechnical Division of the South African Institution of Civil Engineering, 2008, p. 59 – 65.

GSCHÖSSER, F.; WALLBAUM, H.; BOESCH, M. E. Life-cycle assessment of the production of swiss road materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, p. 168 – 176, 2012.

HARMSE, VON M. H. J.; GERBER, F. A. A proposed procedure for the identification of dispersive soils. In: SECOND CONFERENCE ON CASE HISTORIES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, n. 2, 1988, St. Louis. . **Proceedings...** St. Louis: Missouri University of Science and Technology: 1988, p. 411 – 416.

HE, C.; MAKOVICKY, E.; OSBAECK, B. Thermal stability and pozzolanic activity of raw and calcined mixed-layer mica/smectite. **Applied Clay Science**, v. 17, p. 141 – 161, 2000.

HERRIN, M. MITCHELL, J. K. Lime – soil mixtures. **Highway Research Board Bulletin**, v. 304, p. 99 – 138, 1961.

HERZOG, A.; MITCHELL, J. K. Reactions Accompanying stabilization of clay with cement. **Highway Research Board**, v. 36, p. 146 – 170, 1963.

HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. Lime fixation in clayey soils. **Highway Research Board**, v. 262, p. 20 – 32, 1960.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto**. 2008. 318 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia e Construção, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HORPIBULSUJ, S.; SUKSIRIPATTANAPONG, C.; SAMINGTHONG, W.; RACHAN, R.; ARULJARAH, A. Durability against wetting-drying cycles of water treatment sludge-fly ash geopolymer and water treatment sludge-cement and silty-cement systems. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28(1), p. 1 – 9, 2018.

HOU, D.; LI, Z.; MA, H. Morphology of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel: amolecular dynamic study. **Advances in Cement Research**, v. 10, p. 1 – 12, 2013.

HUGHES, C. S. Feasibility using recycled glass in asphalt. **Virginia Transportation Research Council**, VTRC90-R3, p. 687 – 718, 1990.

IEA – International Energy Agency. Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions. **International Energy Agency**, v. 34(2), p. 1 – 12, 2007.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: principles and practice**. 1 ed. New York: John Wiley and Sons, 1973.

IPSWICH PLANNING SCHEME. **Dispersive soil management**. Ipswich. Implementation Guideline No. 28, 2016.

JHA, A. K.; SIVAPULLAIAH, P. V. Potential of fly ash to suppress the susceptible behavior of lime-treated gypseous soil. **Soils and Foundations**, article in press, 2018.

JIANG, N. J.; DU, Y. J.; LIU, S. Y.; WEI, M.; HORPIBULSUK, S.; ARULJARAH, A. Multi-scale laboratory evaluation of the physical, mechanical and microstructural properties of soft

highway subgrade soil stabilized with calcium carbide residue. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 53(1), p. 373 – 383, 2016.

JONY, H. H.; AL-RUBAIE, M. F.; JAHAD, I. Y. The effect of using glass powder filler on hot asphalt concrete mixture properties. **Engineering and Technology Journal**, v. 29(1), p. 44 – 57, 2010.

KHATTAB, S. A. A.; AL-MUKHTAR, M.; FLEUREAU, J. M. Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 19, p. 358 – 366.

KNODEL, P. C. **Characteristics and problems of dispersive clay soils**. Denver: U.S Department of Interior, 1991. Technical Report R 91-09.

LAMB, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. Chichester: John Wiley and Sons, 1969.

LEON, H. B. **O índice porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}$ ) com um parâmetro de estado para areias cimentadas**. 2018, 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

LEONARD, R. J. **The pozzolanic activity of certain fly ashes and soil minerals**. Tese (Doctor of Philosophy) – Iowa State University, Ames, 1958.

LIMA JUNIOR, L. G.; FREDERICO, C. W.; FERNANDES, M. V. S.; LOIOLA, A. R.; ANDRADE, J. C. R. de A.; MOURA, C. P.; MATTOS, I. C.; NOGUEIRA NETO, J. A.; DA SILVA, L. R. D. Caracterização geoquímica, mineralógica, termogravimétrica, e por espectrometria de infravermelho de argilominerais representativos da porção central da Província Borborema. **Geochimica Brasiliensis**, v. 25(1), p. 7 – 16, 2011.

LIU, S.; LI, Z.; LI, Y.; CAO, W. Strength properties of Bayer red mud stabilized by lime-fly ash using orthogonal experiments. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 544 – 563, 2018.

MARCHUK, A. **Effect of cations on structural stability of salt-affected soils**. 2013. Tese (Doctor of Philosophy) – The University of Adelaide, Adelaide, 2013.

MALIK, M. I.; BASHIR, M.; AMAD, S.; TARIQ, T.; CHOWHARY, U. Study of concrete involving use of waste glass as partial replacement of fine aggregates. **Journal of Engineering**. v. 3(7), p. 8 – 13, 2013.

MARIN, E. J. M. **Estudo de campo e laboratório do comportamento mecânico de um solo sulfatado estabilizado com cal**. 2017, 189f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MARKET RESEARCH STORE (MRS). **Acetylene gas market for chemical production, welding & cutting and other applications: global industry perspective, comprehensive analysis and forecast, 2014 – 2020**. Deerfield Beach: 2015, technical report.

MARSHALL, A. F.; WORKMAN, J. P. Identification of dispersive clays the Texas Gulf Coast Area. In: THE SYMPOSIUM ON DISPERSIVE CLAYS, RELATED PIPING, AND EROSION IN GEOTECHNICAL PROJECTS, n. 3, 1976, Chicago. **Proceedings...** Philadelphia: ASTM, 1977, p. 274 – 286.

MASSAZA, F. Microstructure of hydrated pozzolanic cements. In: INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON HYDRATION AND SETTING OF CEMENTS, 1991. **Proceedings...** New York: E and FN Spon, 1992, p. 393 – 412.

MASSAZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. (Org.). **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4 ed. Amsterdam: Butterworth Heinemann, 2004, p. 471 – 602.

MARTÍNEZ, J. M. G.; CABALLERO, C. M. K. **Estudio del comportamiento mecánico de um solo del bajo Chaco estabilizado com adiciones de cal**. 2017, 203f. Trabajo Final de Grado (Ingeniería Civil) – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Asunción, 2017.

MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash**. 1961. 253 f. Tese (Doctor of Philosophy) – Iowa State University of Science and Technology, Ames, 1961.

MEHENNI, A.; CUISINIER, O.; MASROURI, F. Impact of lime, cement, and clay treatments on the internal erosion of compacted soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28(9), p. 1 – 12, 2016.

METWALLY, I. M. Investigations on the performance of concrete made with blended finely milled waste glass. **Advances In Structural Engineering**, v.10(1), p. 47 – 53 , 2007.

MOHAJERANI, A.; VAJNA, J.; CHEUNG, T. H. H.; KURMUS, H.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: a review. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 443 – 447, 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Perfil da Cal**. Brasília: J Mendo Consultoria, 2009a. Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Perfil do Cimento**. Brasília: J Mendo Consultoria, 2009b. Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia.

MITCHELL, J. K.; DERMATAS, D. Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions. **American Society for Testing and Materials**, p. 41 – 64, 1992.

MITCHELL, J. K.; JARDINE F. M. **A guide to ground treatment**. London: CIRIA, 2002. Technical Report C573.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3 ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2005.

MOH, Z. Reactions of soil minerals with cement and chemicals. **Highway Research Board**. v. 86, p. 39 – 60, 1965.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2009.

MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. **X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals**. New York: Oxford University Press, 1997.

MÜLLER, C. J. **Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics**. 2005. 111 f. Tese (Doctor of Technical Science) – Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2005.

NAGY, G.; NAGY, L.; KOPECSKÓ, K. Examination of the physico-chemical composition of dispersive soils. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 60(2), p. 269 – 279, 2016.

NAIR, S.; LITTLE, D. Mechanism of distress associated with sulfate-induced heaving in lime-treated soils. **Journal of the Transportation Research Board**, n. 2212, p. 82 – 90, 2011.

NORLING, L. T. Standard laboratory test for soil-cement: development, purpose and history of use. **Highway Research Board**, v. 36, p. 1 – 10, 1963.

NOVAES, J. F. **Misturas cinza volante - cal de carbureto: durabilidade, resistência à tração e compressão**. 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

NUÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

OSINUBI, K. J. Influence of compactive efforts and compaction delays on lime-treated soil. **Journal of Transportation Engineering**, v. 127, p. 149 – 155, 1998.

PAIVA, L. B.; MORALES, A. R.; DIAZ, F. R. V. Argilas organofílicas: características, metodologias de preparação, compostos de intercalação e técnicas de caracterização. **Cerâmica**, v. 54, p. 213 – 226, 2008.

PARAHYBA, R. da B. V.; dos SANTOS; M. C.; ROLIM NETO, F. C. Evolução quantitativa de planossolos do agreste do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, v. 33, p. 991 – 999, 2009.

PATTENGIL, M.; SHUTT, T. Use of ground glass as pozzolan. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF WASTE GLASS IN SECONDARY PRODUCTS, 1973, Albuquerque. **Proceedings...** Rexton: ASTM, 1973.

PARK, Seung-bum; LEE, Bong-chun. Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers. **Cement And Concrete Research**, v. 34(7), p.114 – 1152, 2004.

PUERTAS, F.; PALACIOS, M.; MANZANO, H.; DOLADO, J. S.; RICO, A.; RODRÍGUEZ, J. A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, p. 2043 – 2056, 2011.

PUPPALA, A. J.; INTHARASOMBAT, N. VEMPATI, R. K. Experimental studies on ettringite-induced heaving in soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, V. 131(3), p. 325 – 337, 2005.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **Soil-cement laboratory handbook**. Skokie: PCA, 1992.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **Soil-cement inspector's manual**. Skokie: PCA, 2001. Technical Report.

RAO, S. N.; RAJESKARAN, G. Reaction products formed in lime-stabilized marine clays. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122(5), p. 329 – 336, 1996.

REDIEX, U. G. **Atlas Geografico del Chaco Paraguayo**. Assucion: REDIEX, 2009.

ROCHA, C. G.; PASSUELLO, A.; CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; KANAZAWA, N. M. Life cycle assessment for soil stabilization dosages: a study for the Paraguayan Chaco. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 309 – 318, 2016.

ROGERS, C. D. G.; GLENDINNING, S. Modification of clay soils using lime. In: LIME STABILISATION, 1976, London. **Proceedings...** London: Thomas Telford, 1976, p. 99 – 114.

ROJAS, M. F.; CABRERA, J. The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin–lime–water systems. **Cement and Concrete Research**, v. 32(1), p. 133 – 138, 2002.

RYKER, N. L. Encountering dispersive clays on soil conservation service projects in Oklahoma. In: THE SYMPOSIUM ON DISPERSIVE CLAYS, RELATED PIPING, AND EROSION IN GEOTECHNICAL PROJECTS, n. 3, 1976, Chicago. **Proceedings...** Philadelphia: ASTM, 1977, p. 370 – 389.

SABRY, M. A.; LESTER, W.; PARCHER, J. V. Mineralogy of compacted clay-lime mixtures. **Soil Science Society American Journal**, v. 45, p. 144 – 150, 1980.

SALDANHA, R. B. **Misturas cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples para cura acelerada**. 2014. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia na área de Meio Ambiente) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SALDANHA, R. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MALLMANN, J. E. C.; CONSOLI, N. C.; REDDY, K. R. Physical-mineralogical-chemical characterization of carbide lime: an environment-friendly chemical additive for soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30(6), p. 1 – 7, 2018.

SALDANHA, R. B. **Misturas cinza volante, cal de carbureto e cloreto de sódio: comportamento da resistência à compressão simples, durabilidade e lixiviação em coluna**. 2018. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia, Geotecnia e Meio Ambiente) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland.** 2014. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SAMANIEGO, R. A. Q. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal.** 2015. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SANTAMARINA, J. C.; KLEIN, K.; FAM, M. A. **Soils and Waves.** Chichester: John Wiley and Sons, 2001.

SANTHANAM, G. R.; GOPALAKRISHNAN, K. Pavement life cycle sustainability assessment and interpretation using a novel qualitative decision procedure. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 27, p. 544 – 554, 2013.

SAYAGH, S.; VENTURA, A.; HOANG, T.; FRANÇOIS, D.; JULLIEN, A. Sensitivity of the LCA allocation procedure for BFS recycled into pavement structures. **Resources, conservation and recycling**, v. 54, p. 348 – 358, 2010.

SCHMITZ, A.; KAMÍNSKI, J.; SCALET, B. M.; SORIA, A. Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions of the European glass industry. **Energy Policy**, v. 39, 2011, p. 142 – 155.

SHARMA, H. D.; REDDY, K. R. **Geoenvironmental Engineering.** Hoboken: John Wiley and Sons, 2004.

SHERARD, J. K.; DECKER, R. S.; DUNNINGAN, L. P. Identification and nature of dispersive soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 102(4), p. 287 – 301, 1976.

SHERARD, J. K.; DUNNINGAN, L. P.; DECKER, R. S. Some engineering problems with dispersive clays. In: THE SYMPOSIUM ON DISPERSIVE CLAYS, RELATED PIPING, AND EROSION IN GEOTECHNICAL PROJECTS, n. 3, 1976, Chicago. **Proceedings...** Philadelphia: ASTM, 1977, p. 3 – 12.

SILVANI, C. **Influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas areia-cinza volante-cal.** 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SILVANI, C.; BRAUN, E.; MASUSERO, G. B.; CONSOLI, N. C. Behavior of soil–fly ash–lime blends under different curing temperatures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION GEOTECHNICS, n. 3, 2016, Guimarães. **Proceedings...** New York Elsevier, 2016, p. 220 – 228.

SOUSA, G. P.; SOUSA, S. J. G.; TERRONES, L. A. H.; HOLANDA, J. N. F. Mineralogical analysis of Brazilian ceramic sedimentary clays used in red ceramic. **Cerâmica**, v. 51, p. 381 – 386, 2005.

STAPLEDON, D. H.; CASINADER, R. J. Dispersive soils at Sugarloaf Dam site, near Melbourne, Australia. In: THE SYMPOSIUM ON DISPERSIVE CLAYS, RELATED

PIPING, AND EROSION IN GEOTECHNICAL PROJECTS, n. 3, 1976, Chicago. **Proceedings...** Philadelphia: ASTM, 1977, p. 432 – 466.

SU, Nan; CHEN, J.S. Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 35(4), p. 259 – 274, 2002.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2 ed. London: Thomas Telford, 1997.

THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo mole com cal, visando seu uso em fundações superficiais**. 1994. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

TIECHER, T, **A Química Antes da Química do Solo**. 1 ed. Frederico Westphalen: Editora URI, 2015.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). **Lime stabilization, reactions, properties, design and construction**. Washington: TRB, 1987. State of the Art Report 5.

UMESH, T. S.; DINESH, S. V.; SIVAPULLAIAH, P. V. Characterization of dispersive soils. **Materials Sciences and Applications**, v. 2, p. 629 – 633, 2011.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERING (USACE). **Soil stabilization for pavements mobilization construction**. Washington: USACE, 1984. Engineer Manual – EM 1110 – 3 - 137.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **In situ treatment of soil and groundwater contaminated with chromium**. Washington DC: Office of Research and Development, 2000. Technical Resource Guide 625 R.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Advancing sustainable materials management 2013 fact sheet**. Washington DC: Office of Research and Development, 2015. Technical Report EPA530 – R – 15 – 003.

VAKILI, A. H.; GHASEMI, J.; bin SELEMAT, M. R.; SALIMI, M.; FERHADI, M. S. Internal erosional behaviour of dispersive clay stabilized with lignosulfonate and reinforced with polypropylene fiber. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 405 – 415, 2018.

VELDE, B. **Introduction to Clay Minerals**. Hong Kong: Excel Typesetter Company, 1992.

VIANA DA FONSECA, A.; CRUZ, C. R.; CONSOLI, N. C. Strength properties of sandy soil–cement admixtures. **Journal of Geotechnical and Geological Engineering**, v. 27, p. 682 – 686, 2009.

VICHAN, S. RACHAN, R. Chemical stabilization of soft Bangkok clay using blend of calcium carbide residue and biomass ash. **Soils and Foundations**, v. 53(2), p. 272 – 281, 2013.

VILLALBA, N. M. K. **Durabilidade, rigidez e avaliação do ciclo de vida de um solo dispersivo estabilizado com cal**. 2015. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

WEST, G. **Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Road and Bridges**. London: Thomas Telford, 1996.

WINTER, D. **Resistência, rigidez e durabilidade de solos arenosos estabilizados com materiais mais sustentáveis**. 2018. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). **Our common future**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

YOOBANPOT, N.; JAMSAWANG, P. Effect of cement replacement by rice husk ash on soft soil stabilization. **Journal of Nature and Science**, v. 48, p. 323 – 332, 2014.

YU, R.; van Onna, D. V.; SPIESZ, P.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Development of ultra-lightweight fibre reinforced concrete applying expanded waste glass. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 690 – 701, 2016.

YU, B.; LU, Q. Life cycle assessment of pavement: methodology and case study. **Transportation Research part D**, v. 17, p. 380 – 388, 2012.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas ativadas**. 1989. 212 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1989.

ZHANG, Y.; WEI, Y. An overview of current research on EU ETS: evidence from its operating mechanism and economic effect. **APPLIED ENERGY**, v. 87, p. 1804 – 1814, 2010.

## **ANEXO A – Tratamentos para Resistência e Rigidez (Cura Selada)**

<b>yd</b> (kN/m <sup>3</sup> )	<b>cal</b> (%)	<b>vidro</b> (%)	<b>w</b> (%)	<b>T</b> (°C)	<b>RCS</b> (kPa)	<b>Go</b> (MPa)	<b>η</b> (%)	<b>Liv</b> (%)
18	5	10	13	23	1633,80	1500,34	31,97	3,96
18	5	10	13	23	1597,16	1452,70	30,83	4,03
18	5	10	13	23	1385,60	1526,41	32,84	3,91
16	5	10	16	23	408,96	944,12	38,52	3,58
16	5	10	16	23	572,04	1041,43	39,01	3,55
16	5	10	16	23	458,67	1137,80	38,76	3,57
16	12	10	13	23	657,86	795,14	38,09	8,00
16	12	10	13	23	499,33	1312,00	38,88	7,90
16	12	10	13	23	515,00	1114,95	38,37	7,96
16	5	30	13	23	462,52	631,03	36,89	3,60
16	5	30	13	23	634,18	1064,45	38,00	3,53
16	5	30	13	23	578,15	1000,20	38,04	3,53
18	12	10	16	23	1667,91	1297,79	32,50	8,72
18	12	10	16	23	1644,60	1837,58	32,29	8,75
18	12	10	16	23	1784,68	1578,92	32,58	8,71
18	5	30	16	23	1515,10	1691,38	32,43	3,85
18	5	30	16	23	1519,11	3494,09	31,95	3,88
18	5	30	16	23	1471,07	1633,43	32,02	3,87
18	12	30	13	23	1512,00	1389,00	30,68	8,79
18	12	30	13	23	1553,95	1288,81	30,75	8,77
18	12	30	13	23	1362,30	1796,43	30,70	8,78
16	12	30	16	23	704,85	1172,70	37,43	7,92
16	12	30	16	23	847,31	971,13	37,80	7,88
16	12	30	16	23	886,67	1214,15	37,69	7,89
16	5	10	13	40	1712,21	2241,59	39,56	3,52
16	5	10	13	40	2244,28	6484,65	38,68	3,57
16	5	10	13	40	2250,27	6435,00	38,52	3,58
18	5	10	16	40	5696,03	11640,80	32,74	3,92
18	5	10	16	40	6927,44	12555,82	33,50	3,87
18	5	10	16	40	7143,02	11038,88	33,58	3,87
18	12	10	13	40	6326,25	10776,99	32,00	8,79
18	12	10	13	40	7002,47	10974,59	31,28	8,88
18	12	10	13	40	6347,89	11147,03	32,39	8,74
16	12	10	16	40	3216,99	7806,84	39,54	7,81
16	12	10	16	40	3793,91	7884,38	38,40	7,96
16	12	10	16	40	4616,01	7836,75	38,29	7,97
18	5	30	13	40	6166,97	9498,95	31,67	3,89
18	5	30	13	40	5924,38	11089,30	32,64	3,84
18	5	30	13	40	6504,17	11507,30	31,41	3,91
16	5	30	16	40	5530,87	9514,04	37,62	3,55
16	5	30	16	40	4601,77	8357,83	38,12	3,53
16	5	30	16	40	4935,98	9126,43	37,26	3,57
16	12	30	13	40	4206,37	9688,23	37,01	7,98
16	12	30	13	40	4096,73	7762,56	37,68	7,89
16	12	30	13	40	4556,58	8246,82	37,02	7,97
18	12	30	16	40	7731,98	11662,60	30,82	8,76
18	12	30	16	40	7015,58	11635,26	32,51	8,55
18	12	30	16	40	6670,32	10858,19	31,48	8,68
17	8,5	20	14,5	31,5	2880,15	6316,28	35,38	6,08
17	8,5	20	14,5	31,5	2808,16	6145,00	35,42	6,08
17	8,5	20	14,5	31,5	2944,33	6010,74	35,14	6,10

## **ANEXO B – Tratamentos para Resistência e Rigidez (Cura Submersa)**

<b>yd</b> <b>(kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>cal</b> <b>(%)</b>	<b>vidro</b> <b>(%)</b>	<b>w</b> <b>(%)</b>	<b>T</b> <b>(°C)</b>	<b>RCS</b>		<b>η</b> <b>(%)</b>	<b>Liv</b> <b>(%)</b>
					<b>(kPa)</b>	<b>G<sub>0</sub> (MPa)</b>		
18	5	10	13	23	1587,29	1315,33	31,77	3,97
18	5	10	13	23	1430,63	1587,92	31,84	3,96
18	5	10	13	23	1575,77	1535,38	32,61	3,92
16	5	10	16	23	604,98	780,60	38,95	3,55
16	5	10	16	23	681,93	783,77	38,56	3,57
16	12	10	13	23	512,00	1110,00	38,05	8,01
16	12	10	13	23	446,31	1065,00	38,16	7,98
16	5	30	13	23	923,41	1271,97	36,99	3,59
16	5	30	13	23	637,28	845,62	38,00	3,53
18	12	10	16	23	1553,44	1243,91	32,50	8,71
18	12	10	16	23	1416,48	1486,75	31,77	8,81
18	5	30	16	23	1820,80	1439,85	31,58	3,89
18	5	30	16	23	1023,89	1459,00	31,31	3,91
18	12	30	13	23	1437,94	1667,38	30,54	8,79
18	12	30	13	23	1765,91	1346,93	31,28	8,69
16	12	30	16	23	677,19	758,54	37,48	7,91
16	12	30	16	23	660,71	879,42	36,07	8,09
16	5	10	13	40	3817,43	8509,98	38,77	3,56
16	5	10	13	40	2297,85	8450,00	38,84	3,56
18	5	10	16	40	4398,74	11698,78	32,49	3,93
18	5	10	16	40	5464,87	11679,30	32,29	3,94
18	5	10	16	40	6678,94	11532,39	32,79	3,91
18	12	10	13	40	7156,15	11747,34	31,57	8,83
18	12	10	13	40	7957,03	11928,80	32,25	8,74
18	12	10	13	40	7675,93	8086,32	32,00	8,78
16	12	10	16	40	3428,29	8141,42	38,40	7,95
16	12	10	16	40	2670,88	7800,00	38,87	7,89
18	5	30	13	40	6537,12	12660,04	30,69	3,94
18	5	30	13	40	7408,98	12058,16	31,37	3,91
16	5	30	16	40	5974,40	10192,00	38,00	3,53
16	5	30	16	40	4246,51	9297,18	38,05	3,53
16	12	30	13	40	5269,72	10145,96	37,44	7,92
16	12	30	13	40	5094,66	9989,84	37,34	7,93
18	12	30	16	40	8285,38	12368,54	31,01	8,73
18	12	30	16	40	8754,92	12572,62	31,19	8,71

## **ANEXO C – Tabelas ANOVA**

RCS - Cura Selada					
Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	16	274400264	17150016	140,530	0,000
Fatores	5	254432355	50886471	416,980	0,000
Peso Específico - A	1	42405811	42405811	347,480	0,000
Teor de Cal - B	1	1123558	1123558	9,210	0,005
Teor de Vidro - C	1	2469080	2469080	20,230	0,000
Teor de Umidade - D	1	2818069	2818069	23,090	0,000
Temperatura - E	1	205615837	205615837	1684,870	0,000
<b>Interações de 2ª Ordem</b>	10	19761784	1976178	16,190	0,000
A*B	1	23926	23926	0,200	0,661
A*C	1	2663204	2663204	21,820	0,000
A*D	1	458374	458374	3,760	0,061
A*E	1	10334931	10334931	84,690	0,000
B*C	1	468667	468667	3,840	0,058
B*D	1	1248818	1248818	10,230	0,003
B*E	1	430088	430088	3,520	0,069
C*D	1	272	272	0,000	0,963
C*E	1	2272163	2272163	18,620	0,000
D*E	1	1861340	1861340	15,250	0,000
Curvatura	1	206125	206125	1,690	0,202
Erro Experimental	34	4149245	122037		
Total	50	278549509			
<b>Resumo do Modelo</b>					
Desvio Padrão		349,34	R <sup>2</sup>	98,51%	
R <sup>2</sup> ajustado		97,81%	R <sup>2</sup> de previsão	96,65%	

Go - Cura Selada					
Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	16	888118465	55507404	88,43	0
Fatores	5	840300166	168060033	267,75	0
Peso Específico - A	1	54375443	54375443	86,63	0
Teor de Cal - B	1	616725	616725	0,98	0,329
Teor de Vidro - C	1	4043660	4043660	6,44	0,016
Teor de Umidade - D	1	6168979	6168979	9,83	0,004
Temperatura - E	1	775095360	775095360	1234,86	0
<b>Interações de 2ª Ordem</b>	10	46150075	4615008	7,35	0
A*B	1	2173152	2173152	3,46	0,071
A*C	1	3795755	3795755	6,05	0,019
A*D	1	220611	220611	0,35	0,557
A*E	1	25393823	25393823	40,46	0
B*C	1	1105944	1105944	1,76	0,193
B*D	1	6961927	6961927	11,09	0,002
B*E	1	1379879	1379879	2,2	0,147
C*D	1	416556	416556	0,66	0,421
C*E	1	2217325	2217325	3,53	0,069
D*E	1	2485102	2485102	3,96	0,055
Curvatura	1	1668224	1668224	2,66	0,112
Erro Experimental	34	21341026	627677		
Total	50	909459492			
<b>Resumo do Modelo</b>					
Desvio Padrão		792,261	R <sup>2</sup>		97,65%
R <sup>2</sup> ajustado		96,55%	R <sup>2</sup> de previsão		94,72%

## RCS - Cura Selada (23°C)

Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	4	3349076	837269	4,440	0,011
Fatores	4	3349076	837269	4,440	0,011
Peso Específico - A	1	2725511	2725511	14,460	0,001
Teor de Cal - B	1	75802	75802	0,400	0,533
Teor de Vidro - C	1	136146	136146	0,720	0,406
Teor de Umidade - D	1	411617	411617	2,180	0,156
Erro Experimental	19	3580578	188451		
Falta de Ajuste	3	750985	250328	1,420	0,275
Erro Puro	16	2829593	176850		
Total	23	6929654			
<b>Resumo do Modelo</b>					
Desvio Padrão		121,123	R <sup>2</sup>		95,23%
R <sup>2</sup> ajustado		94,23%	R <sup>2</sup> de previsão		92,39%

## Go - Cura Selada (23°C)

Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	4	5568829	1392207	94,900	0,000
Fatores	4	5568829	1392207	94,900	0,000
Peso Específico - A	1	5435684	5435684	370,510	0,000
Teor de Cal - B	1	81676	81676	5,570	0,029
Teor de Vidro - C	1	2045	2045	0,140	0,713
Teor de Umidade - D	1	49424	49424	3,370	0,082
Erro Experimental	19	278747	14671		
Falta de Ajuste	3	146995	48998	5,950	0,006
Erro Puro	16	131752	8235		
Total	23	5847576			
<b>Resumo do Modelo</b>					
Desvio Padrão		434,11	R <sup>2</sup>		48,33%
R <sup>2</sup> ajustado		37,45%	R <sup>2</sup> de previsão		92,39%

## RCS - Cura Selada (40°C)

Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	4	58146212	14536553	31,660	0,000
Fatores	4	58146212	14536553	31,660	0,000
Peso Específico - A	1	47305058	47305058	103,020	0,000
Teor de Cal - B	1	1471970	1471970	3,210	0,089
Teor de Vidro - C	1	4739198	4739198	10,320	0,005
Teor de Umidade - D	1	4629985	4629985	10,080	0,005
Erro Experimental	19	8724478	459183		
Falta de Ajuste	3	4716266	1572089	6,280	0,005
Erro Puro	16	4008212	250513		
Total	23	66870689			
<b>Resumo do Modelo</b>					
Desvio Padrão		677,3	R <sup>2</sup>		89,95%
R <sup>2</sup> ajustado		84,21%	R <sup>2</sup> de previsão		79,18%

## Go - Cura Selada (40°C)

Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	4	93331860	23332965	13,690	0,000
Fatores	4	93331860	23332965	13,690	0,000
Peso Específico - A	1	77043755	77043755	45,200	0,000
Teor de Cal - B	1	1920802	1920802	1,130	0,302
Teor de Vidro - C	1	6124839	6124839	3,590	0,073
Teor de Umidade - D	1	8242464	8242464	4,840	0,040
Erro Experimental	19	32387490	1704605		
Falta de Ajuste	3	13922961	4640987	4,020	0,026
Erro Puro	16	18464528	1154033		
Total	23	125719350			
<b>Resumo do Modelo</b>					
Desvio Padrão		1305,51	R <sup>2</sup>		74,24%
R <sup>2</sup> ajustado		68,81%	R <sup>2</sup> de previsão		58,90%

RCS - Cura Submersa					
Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	15	249653094	16643540	46,400	0,000
Fatores	5	218419823	43683965	121,780	0,000
Peso Específico - A	1	32750037	32750037	91,300	0,000
Teor de Cal - B	1	1680887	1680887	4,690	0,043
Teor de Vidro - C	1	6353204	6353204	17,710	0,000
Teor de Umidade - D	1	82753	82753	0,230	0,636
Temperatura - E	1	176576432	176576432	492,260	0,000
<b>Interações de 2ª Ordem</b>	10	21675982	2167598	6,040	0,000
A*B	1	2106334	2106334	5,870	0,026
A*C	1	600032	600032	1,670	0,211
A*D	1	71847	71847	0,200	0,660
A*E	1	10174144	10174144	28,360	0,000
B*C	1	4156	4156	0,010	0,915
B*D	1	293699	293699	0,820	0,377
B*E	1	1961334	1961334	5,470	0,030
C*D	1	1328556	1328556	3,700	0,069
C*E	1	5180543	5180543	14,440	0,001
D*E	1	26041	26041	0,070	0,790
Erro Experimental	19	6815475	358709		
Total	34	256468569			
<b>Resumo do Modelo</b>					
Desvio Padrão		598,93	R <sup>2</sup>		97,34%
R <sup>2</sup> ajustado		95,24%	R <sup>2</sup> de previsão		91,38%

Go - Cura Submersa					
Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	15	795552037	53036802	97,710	0,000
Fatores	5	755318483	151063697	278,300	0,000
Peso Específico - A	1	21998515	21998515	40,530	0,000
Teor de Cal - B	1	165706	165706	0,310	0,587
Teor de Vidro - C	1	4940133	4940133	9,100	0,007
Teor de Umidade - D	1	20160	20160	0,040	0,849
Temperatura - E	1	725567463	725567463	1336,680	0,000
<b>Interações de 2ª Ordem</b>	10	16017268	1601727	2,950	0,020
A*B	1	101821	101821	0,190	0,670
A*C	1	56818	56818	0,100	0,750
A*D	1	746770	746770	1,380	0,255
A*E	1	10177561	10177561	18,750	0,000
B*C	1	350021	350021	0,640	0,432
B*D	1	98622	98622	0,180	0,675
B*E	1	171108	171108	0,320	0,581
C*D	1	52901	52901	0,100	0,758
C*E	1	4558881	4558881	8,400	0,009
D*E	1	145687	145687	0,270	0,610
Erro Experimental	19	10313418	542811		
Total	34	805865455			
Resumo do Modelo					
Desvio Padrão		736,102	R <sup>2</sup>		98,72%
R <sup>2</sup> ajustado		97,70%	R <sup>2</sup> de previsão		96,93%

RCS - Cura Submersa (23°C)					
Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	4	3000722	750181	15,810	0,000
Fatores	4	3000722	750181	15,810	0,000
Peso Específico - A	1	2959299	2959299	62,360	0,000
Teor de Cal - B	1	3270	3270	0,070	0,798
Teor de Vidro - C	1	32904	32904	0,690	0,423
Teor de Umidade - D	1	5250	5250	0,110	0,746
Erro Experimental	11	521993	47454		
Falta de Ajuste	3	84574	28191	0,520	0,683
Erro Puro	8	437420	54677		
Total	15	3522716			
Resumo do Modelo					
Desvio Padrão		217,839	R <sup>2</sup>		85,18%
R <sup>2</sup> ajustado		79,79%	R <sup>2</sup> de previsão		68,65%

G<sub>0</sub> - Cura Submersa (23°C)

Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	4	1302098	325525	16,790	0,000
Fatores	4	1302098	325525	16,790	0,000
Peso Específico - A	1	1140735	1140735	58,820	0,000
Teor de Cal - B	1	1336	1336	0,070	0,798
Teor de Vidro - C	1	355	355	0,020	0,895
Teor de Umidade - D	1	159672	159672	8,230	0,015
Erro Experimental	11	213316	19392		
Falta de Ajuste	3	31711	10570	0,470	0,714
Erro Puro	8	181605	22701		
Total	15	1515414			
<b>Resumo do Modelo</b>					
Desvio Padrão		139,256	R <sup>2</sup>		85,92%
R <sup>2</sup> ajustado		80,80%	R <sup>2</sup> de previsão		70,22%

## RCS - Cura Submersa (40°C)

Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	4	54749329	13687332	16,330	0,000
Fatores	4	54749329	13687332	16,330	0,000
Peso Específico - A	1	42064505	42064505	50,200	0,000
Teor de Cal - B	1	4658211	4658211	5,560	0,035
Teor de Vidro - C	1	11278709	11278709	13,460	0,003
Teor de Umidade - D	1	287282	287282	0,340	0,568
Erro Experimental	13	10894109	838008		
Falta de Ajuste	3	4520768	1506923	2,360	0,132
Erro Puro	10	6373342	637334		
Total	17	65643439			
<b>Resumo do Modelo</b>					
Desvio Padrão		914,428	R <sup>2</sup>		83,40%
R <sup>2</sup> ajustado		78,30%	R <sup>2</sup> de previsão		69,42%

G<sub>0</sub> - Cura Submersa (40°C)

Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	4	54749329	13687332	16,330	0,000
Fatores	4	54749329	13687332	16,330	0,000
Peso Específico - A	1	42064505	42064505	50,200	0,000
Teor de Cal - B	1	4658211	4658211	5,560	0,035
Teor de Vidro - C	1	11278709	11278709	13,460	0,003
Teor de Umidade - D	1	287282	287282	0,340	0,568
Erro Experimental	13	10894109	838008		
Falta de Ajuste	3	4520768	1506923	2,360	0,132
Erro Puro	10	6373342	637334		
Total	17	65643439			
<b>Resumo do Modelo</b>					
Desvio Padrão		1722,33	R <sup>2</sup>		83,40%
R <sup>2</sup> ajustado		78,30%	R <sup>2</sup> de previsão		68,42%

## RCS - Comparação: cura selada x cura submersa

Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	21	521100816	24814325	94,810	0,000
Fatores	6	467913299	77985550	297,970	0,000
Peso Específico - A	1	73119270	73119270	279,380	0,000
Teor de Cal - B	1	3149636	3149636	12,030	0,001
Teor de Vidro - C	1	8880372	8880372	33,930	0,000
Teor de Umidade - D	1	603046	603046	2,300	0,134
Temperatura - E	1	377764924	377764924	1443,400	0,000
Cura - F	1	763534	763534	2,92	0,093
<b>Interações de 2ª Ordem</b>	15	40645219	2709681	10,350	0,000
A*B	1	734856	734856	2,810	0,099
A*C	1	3005571	3005571	11,480	0,001
A*D	1	593766	593766	2,270	0,137
A*E	1	20123981	20123981	76,890	0,000
A*F	1	20076	20076	0,080	0,783
B*C	1	429150	429150	1,640	0,205
B*D	1	1420014	1420014	5,430	0,023
B*E	1	2124836	2124836	8,120	0,006
B*G	1	162920	162920	0,620	0,433
C*D	1	641674	641674	2,450	0,123
C*E	1	6881499	6881499	26,290	0,000
C*F	1	904106	904106	3,450	0,068
D*E	1	801739	801739	3,060	0,085
D*F	1	1945626	1945626	7,430	0,008
E*F	1	788955	788955	3,01	0,088
Erro Experimental	61	15964897	261720		
Falta de Ajuste	10	5009459	500946	2,33	0,024
Erro Puro	51	10955438	214813		
Total	82	537065713			
<b>Resumo do Modelo</b>					
Desvio Padrão		511,585	R <sup>2</sup>	97,03%	
R <sup>2</sup> ajustado		96,00%	R <sup>2</sup> de previsão	94,43%	

## Go - Comparação: cura selada x cura submersa

Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	21	1680175193	80008343	120,190	0,000
Fatores	6	1579406813	263234469	395,450	0,000
Peso Específico - A	1	67908171	67908171	102,020	0,000
Teor de Cal - B	1	22992	22992	0,030	0,853
Teor de Vidro - C	1	9684789	9684789	14,550	0,000
Teor de Umidade - D	1	2376785	2376785	3,570	0,064
Temperatura - E	1	1486331506	1486331506	2232,870	0,000
Cura - F	1	3050745	3050745	4,58	0,036
<b>Interações de 2ª Ordem</b>	15	65015660	4334377	6,510	0,000
A*B	1	1940239	1940239	2,910	0,093
A*C	1	2519388	2519388	3,780	0,056
A*D	1	41476	41476	0,060	0,804
A*E	1	34264623	34264623	51,470	0,000
A*F	1	1642998	1642998	2,470	0,121
B*C	1	179204	179204	0,270	0,606
B*D	1	4747126	4747126	7,130	0,010
B*E	1	397593	397593	0,600	0,443
B*F	1	746811	746811	1,120	0,294
C*D	1	470813	470813	0,710	0,404
C*E	1	6699046	6699046	10,060	0,002
C*F	1	265499	265499	0,400	0,530
D*E	1	2286803	2286803	3,440	0,069
D*F	1	2792397	2792397	4,190	0,045
E*F	1	6457446	6457446	9,7	0,003
Erro Experimental	61	40605313	665661		
Falta de Ajuste	10	8997773	899777	1,45	0,185
Erro Puro	51	31607539	619756		
Total	82	1720780506			
<b>Resumo do Modelo</b>					
Desvio Padrão		1051,05	R <sup>2</sup>	97,64%	
R <sup>2</sup> ajustado		97,64%	R <sup>2</sup> de previsão	95,77%	

Ensaio de Durabilidade					
Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-Valor	P-Valor
Modelo	4	0,005563	0,001113	3,640	0,159
Fatores	4	0,005535	0,001384	4,520	0,123
Peso Específico - A	1	0,003066	0,003066	10,020	0,051
Teor de Cal - B	1	0,002149	0,002149	7,020	0,077
Teor de Vidro - C	1	0,000186	0,000186	0,610	0,492
Teor de Umidade - D	1	0,000134	0,000134	0,440	0,556
Curvatura	0	0,000028	0,09	0,783	
Erro	0	0,000306			0,003
Total	0				
Resumo do Modelo					
Desvio Padrão		0,01749	R <sup>2</sup>	85,84%	
R <sup>2</sup> ajustado		62,23%	R <sup>2</sup> de previsão	-	