

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Carlos Guilherme Martins

**AVALIAÇÃO DE UM SOLO DISPERSIVO
ESTABILIZADO COM VIDRO MOÍDO E CAL DE
CARBURETO**

Porto Alegre
Agosto de 2019

CARLOS GUILHERME MARTINS

**AVALIAÇÃO DE UM SOLO DISPERSIVO
ESTABILIZADO COM VIDRO MOÍDO E CAL DE
CARBURETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de
Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Civil

Orientador: Nilo Cesar Consoli
Coorientador: Hugo Carlos Scheuermann Filho

Porto Alegre
Agosto de 2019

CARLOS GUILHERME MARTINS

**AVALIAÇÃO DE UM SOLO DISPERSIVO
ESTABILIZADO COM VIDRO MOÍDO E CAL DE
CARBURETO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, agosto de 2019

Prof. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)
Ph.D. pela Concórdia University, Canadá
Orientador

Hugo Carlos Scheuermann Filho (UFRGS)
Me. pela UFRGS
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Prof.a Karla Salvagni Heineck (UFRGS)
Dra. pela UFRGS

Prof. Lucas Festugato (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Prof. Sérgio Filipe Veloso Marques (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Dedico este trabalho à minha mãe, Fátima, que me apoiou em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, que me deu todo o suporte durante a minha graduação. Agradeço, também, minha família e amigos que me auxiliaram durante minha trajetória.

Um enorme agradecimento ao meu orientador Nilo Consoli, por toda orientação e confiança durante o trabalho. Sou muito grato ao meu coorientador Hugo Scheuermann Filho, que me auxiliou durante os ensaios, e me passou muito dos seus conhecimentos.

Agradeço aos mestrandos Ricardo Menezes e Pedro Cunha, por todo aprendizado e ajuda durante a pesquisa. Sou muito grato também aos bolsistas de iniciação científica do LEGG Guilherme, Tales, Pablo, Renato e Felipe por todo auxílio prestado durante a pesquisa e por todo auxílio durante os ensaios.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Curva Granulométrica Solo Pelotas | 4 |
| Figura 2 - Curva de Compactação Solo Pelotas | 5 |
| Figura 3 - Granulometria pó de vidro | 6 |
| Figura 4 - Distribuição Granulométrica Cal de Carbureto | 7 |
| Figura 5 - Resultados RCS para tratamentos 07 e 28 dias | 11 |
| Figura 6 – Efeitos principais RCS em curas de 7 e 28 dias..... | 12 |
| Figura 7 – Gráfico de Pareto RCS para tratamentos de 7 e 28 dias | 13 |
| Figura 8 – Gráfico de Pareto e Efeitos principais considerando fator TC em ganho de RCS..... | 13 |
| Figura 9 – Resultados G_0 cura 7 e 28 dias..... | 14 |
| Figura 10 – Efeitos principais G_0 em curas de 7 e 28 dias | 15 |
| Figura 11 – Gráfico de Pareto G_0 para tratamentos de 7 e 28 dias..... | 15 |
| Figura 12 – Gráfico de Pareto e Efeitos principais considerando fator TC em G_0 | 16 |
| Figura 13 – Tratamentos 7 dias | 16 |
| Figura 14 – Tratamentos 28 dias | 17 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Propriedades físicas solo dispersivo de Pelotas..... | 4 |
| Tabela 2- Características Físicas Pó de Vidro | 6 |
| Tabela 3 – Propriedades Físicas Cal de Carbureto | 7 |
| Tabela 4 – Tratamentos aleatorizados | 8 |
| Tabela 5 - ANOVA RCS para tratamentos de 7 dias | 11 |
| Tabela 6 – ANOVA RCS para tratamentos de 28 dias..... | 12 |
| Tabela 7 – ANOVA para ensaios G ₀ cura 7 dias..... | 14 |
| Tabela 8 – ANOVA para ensaios G ₀ cura 28 dias..... | 14 |
| Tabela 9 – Tratamentos Pinhole Test | 17 |

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de Variância

ASTM – American Society for Testing and Materials

CC – Cal de Carbureto

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem

CP – Corpo de Prova

CRC – Cooperative Research Center for Sustainable Sugar Production

DCD – Dupla Camada Difusa

GL – Graus de Liberdade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

IP – Índice de Plasticidade

QM – Quadrado das Médias

RCS – Resistência a Compressão Simples

SSA – Superfície Específica

SUCS – Sistema Unificado De Classificação Dos Solos

SQ – Soma dos Quadrados

T – Temperatura de cura.

VM – Vidro Moído

LISTA DE SÍMBOLOS

γ_d – peso específico aparente seco (kN/m³)

η – porosidade (%)

B_{iv} – teor volumétrico de agente cimentante

L_{iv} – teor volumétrico de cal

q_u – resistência à compressão simples (kPa)

t_p – tempo da onda de compressão (μ s)

t_s – tempo da onda cisalhante (μ s)

w – teor de umidade (%)

V_s – velocidade da onda cisalhante (m/s)

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

G_0 – módulo cisalhante inicial (MPa)

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 2 |
| 2 | MATERIAIS | 3 |
| 2.1 | SOLO DISPERSIVO DE PELOTAS..... | 3 |
| 2.2 | VIDRO | 5 |
| 2.3 | CAL DE CARBURETO | 6 |
| 3 | ENSAIOS | 7 |
| 3.1 | MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA | 7 |
| 3.2 | ENSAIO COMPRESSÃO SIMPLES | 9 |
| 3.3 | ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO..... | 10 |
| 3.4 | PINHOLE TEST | 10 |
| 4 | RESULTADOS | 10 |
| 4.1 | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES | 11 |
| 4.2 | MÓDULO CISALHANTE INICIAL | 13 |
| 4.3 | RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE LIGANTE | 16 |
| 4.4 | PINHOLE TEST | 17 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 17 |
| 6 | AGRADECIMENTOS | 18 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 18 |

1 **AVALIAÇÃO DE UM SOLO DISPERSIVO ESTABILIZADO COM**
2 **VIDRO MOÍDO E CAL DE CARBURETO**

3 *EVALUATION OF A DISPERSIVE GROUND STABILIZED WITH GROUND*
4 *GLASS AND CARBURET LIME*

5 Carlos Guilherme Martins (1); Hugo C. Scheuermann Filho (2); Nilo Cesar Consoli (3)

6 (1) Autor, graduando em Engenharia Civil, UFRGS – e-mail: guirsmartins@gmail.com

7 (2) Coorientador, Departamento de Engenharia Civil – Escola de Engenharia

8 (3) Orientador, Departamento de Engenharia Civil – Escola de Engenharia

9

10 **RESUMO**

11 A dispersividade é um fenômeno deletério que pode ser observado em diversos solos e em
12 diferentes regiões do globo terrestre. Caracteriza-se pela defloculação das partículas do solo em
13 contato com água, devido à grande concentração de íons de Na⁺, gerando fenômenos erosivos.
14 A estabilização de solos com essas características pode ser dada pela incorporação de um cátion
15 de maior valência (Ca⁺²) e/ou através de reações pozolânicas, que propiciam estabilização entre
16 as camadas dos argilominerais. O presente estudo tem como objetivo avaliar o comportamento
17 de um solo dispersivo, proveniente de Pelotas-RS, após estabilização com vidro moído e cal de
18 carbureto, dois resíduos, que juntos criam uma alternativa para substituição do cimento Portland
19 no tratamento de solos. Neste trabalho foi empregado um experimento do tipo fatorial (2^k),
20 buscando verificar as influências estatísticas nos fatores controláveis como peso específico
21 aparente seco, teor de vidro moído, teor de cal e tempo de cura das misturas, através de uma
22 análise de perspectiva mecânica da resistência à compressão simples e módulo cisalhante
23 inicial. Os resultados mostraram que a compactidade e o teor de vidro são os mais relevantes
24 dos fatores controlados nas misturas, seguido do teor de cal. Além disso o tempo de cura é
25 bastante relevante, pois há mais tempo para formação de C-S-H. Outra motivação no estudo é
26 o potencial ganho na área da sustentabilidade, uma vez que os materiais utilizados no estudo
27 são resíduos e sua empregabilidade no tratamento pode trazer ganhos sociais, econômicos e ao
28 meio ambiente.

29

30 *Palavras –chaves: Melhoria de Solo, Solos Dispersivos, Vidro Moído, Cal de Carbureto*

31

32 **ABSTRACT**

33 The dispersivity is a deleterious phenomenon that can be observed in diverse soils and in
34 different regions of the globe. It is characterized by the deflocculation of the soil particles in

35 contact with water, due to the high concentration of Na^+ ions generating erosive phenomena.
36 The stabilization of soils with these characteristics can be given by the incorporation pozzolan
37 reactions, which provide stabilization between the layers of clay minerals. The present study
38 aims to study the behavior of a dispersive soil from Pelotas-RS, after stabilization with ground
39 glass and carbide lime, two residues, which together create an alternative for the substitution of
40 Portland cement in soil treatment. In this work, a factorial (2^k) experiment was used, looking
41 for statistical influences on controllable factors such as apparent dry weight, ground glass
42 content, lime content and curing time of the mixtures, through a mechanical perspective
43 analysis of simple compression strength, constrained and initial shear modulus. The results
44 showed the compactness and the glass content has greater relevance of the factors controlled in
45 the mixtures, followed by the lime content. In addition, the cure time is quite relevant, since
46 there is more time for C-S-H formation. Another motivation of the study is the potential benefit
47 in the area of sustainability, since the materials used in the study are waste and its employability
48 in the treatment can bring social, economic and environmental gains.

49

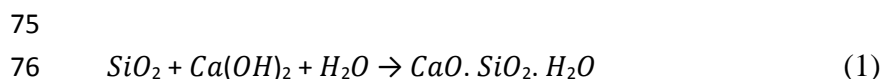
50 *Keywords: Soil Improvement, Dispersing Soils, Ground Glass, Carbide Lime*

51

52 **1 INTRODUÇÃO**

53 A estabilização de solos pode ser definida como um conjunto de ações controladas cuja
54 finalidade é alterar suas propriedades de modo a permitir ser empregado em diferentes projetos
55 de Engenharia com um desempenho adequado (MITCHELL E JARDINE 2002). Solos
56 dispersivos são estruturalmente instáveis, pois se tratam de solos com baixos níveis de forças
57 atrativas eletroquímicas entre suas camadas devido a grandes quantidades de Na^+ íons pouco
58 carregados e por isso, fracamente aderidos por argilominerais (CRC, 2001, p. 9). Por
59 apresentarem Dupla Camada Difusa (DCD) de maior espessura, tais solos em condições de
60 maior umidade e saturação, podem apresentar forças eletrostáticas de repulsão maiores que as
61 de atração (SCHEUERMANN FILHO, 2018), e conseqüentemente ocasionar processos de
62 erosão externa e interna (*piping*). Logo a substituição desses cátions monovalentes por
63 bivalente, ou até trivalentes, como cálcio (Ca^{+2}) e alumínio (Al^{+3}), são alternativas na
64 estabilização de solos dispersivos. Outra forma de tratamento para solos é focada em reações
65 pozolânicas, ligadas diretamente com a criação de compostos cimentícios em suas reações.
66 Neste contexto, o vidro pode ser uma alternativa eficaz para estabilização de solos, pois a sílica
67 que constitui esse resíduo pode ser uma excelente fonte para reações pozolânicas (SALES,
68 2014), pois partículas amorfas encontrada no vidro pode reagir em ambientes alcalinos,
69 proporcionado pela adição de cal de carbureto, um resíduo da produção do gás acetileno, que

70 dispõe de uma grande parcela de hidróxido de cálcio livre [Ca(OH)₂]. Nesse quadro, podemos
71 destacar uma excelente oportunidade para reutilização de dois resíduos, doméstico e industrial,
72 uma vez que difundidos podem desencadear reações base de cimentação, caracterizando
73 misturas mais estáveis. Em ambiente devidamente hidratado, Massazza (1998) descreve a
74 seguinte reação pozolânica entre esses compostos:



76
77 O produto dessa reação também é conhecido com Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H). Logo
78 podemos notar que a atividade pozolânica pode estar diretamente relacionada com a
79 disponibilidade de sílica, hidróxido de cálcio e teor de umidade, além de fatores externos como
80 temperatura e tempo de cura (MASSAZA, 2004).

81 Como demonstrado em estudos, o tratamento à base de vidro moído e cal de carbureto pode ser
82 muito bem empregado para solos dispersivos como uma alternativa a substituição do cimento
83 Portland. Nesse contexto, este estudo tem por objetivo a análise do comportamento mecânico,
84 em termos de resistência à compressão simples (RCS) e módulo cisalhante inicial (G_0), de um
85 solo dispersivo (proveniente de Pelotas-RS) estabilizado com pó de vidro moído e cal de
86 carbureto, dois resíduos. Para isso, utilizou-se um planejamento experimental do tipo fatorial
87 (2^k) no qual avaliaram-se os fatores controláveis em dois níveis extremos. Esses fatores
88 consistem em: peso específico aparente seco (γ_d), teor de vidro moído (VM) e teor de cal de
89 carbureto (CC). Dois períodos de cura correspondentes a 7 e 28 dias foram adotados. Ainda,
90 buscou-se relacionar os resultados de RCS e G_0 com os índices ajustados porosidade/teor
91 volumétrico de cal (η/L_{iv}) e porosidade teor volumétrico de ligante (η/B_{iv}), conforme proposto
92 por Consoli *et al.* (2016, 2018).

94

95 **2 MATERIAIS**

96 Este tópico tem como objetivo a apresentação e caracterização dos materiais usados durante
97 os experimentos.

98

99 **2.1 SOLO DISPERSIVO DE PELOTAS**

100 O solo utilizado em toda pesquisa é oriundo de Pelotas – RS, coletado *in situ* de uma região do
101 sul do Brasil às margens da BR-116, onde se encontram perfis de solos denominados de
102 Planossolo Háptico Eutrófico Solódico, que se estendem por ampla áreas de planícies litorânea,
103 que dentre suas inclusões, pode apresentar altos teores de sódio no seu horizonte B (Relatório
104 Técnico nº 30, 1973). Foi observado no local da coleta do solo uma paisagem com diversas

105 condições que indicavam ocorrências de fortes erosões, como voçorocas, ravinas e pequenos
 106 vales, a tais características, este solo pode apresentar indícios de dispersividade (WELTER;
 107 BASTOS, 2003). Para caracterização do solo, foram seguidas as diretrizes da NBR 6457
 108 (ABNT, 2016), onde dispõe procedimentos para “Amostra de solo - Preparação para ensaios de
 109 compactação e ensaios de caracterização”. Com isso, uma parte da massa do solo foi destinada
 110 para os ensaios de peso específico real dos grãos, ensaio de compactação, análise
 111 granulométrica e determinação dos limites de Atterberg. Nos ensaios foi comprovado a natureza
 112 dispersiva do solo. Demais ensaios relacionados e seus resultados, assim como as normas
 113 técnicas aplicadas, são observados na Tabela 1 abaixo.

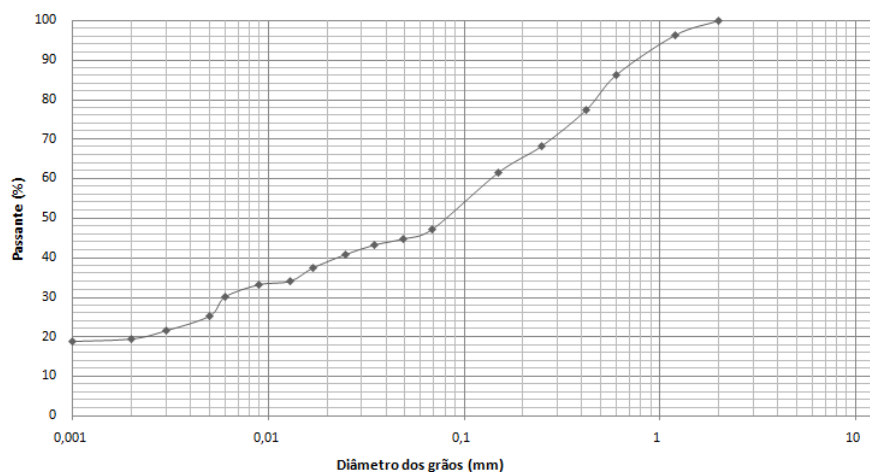
114
 115

Tabela 1 – Propriedades físicas solo dispersivo de Pelotas

| Descrição | Resultado | Norma |
|----------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Peso específica real dos grãos | 2,58 g/cm ³ | NBR 6458 (ABNT, 2016) |
| Limite de liquidez | 20% | NBR 6459 (ABNT, 2016) |
| Limite de plasticidade | 11% | NBR 7180 (ABNT, 2016) |
| Índice de plasticidade | 9% | - |
| % passante malha #200 | 45,69% | |
| % Areia fina (0,06 < d < 0,2 mm) | 18% | NBR 7181 (ABNT, 2016) |
| % Silte (0,002 < d < 0,06 mm) | 47% | |
| % Argila (d<0.002 mm) | 19% | |
| Crumb Test | Grau 4 | NBR 13601 (ABNT, 1996) |
| Pinholetest | ND4 | NBR 14114 (ABNT, 1998) |
| Superfície Específica (SSA) | 19,94 m ² /g | BET |

116 (fonte: elaborado pelo autor)

117
 118 Abaixo, a curva granulométrica obtida pelos ensaios seguindo as diretrizes NBR 7181
 119 (ABNT, 2016).



120
 121
 122

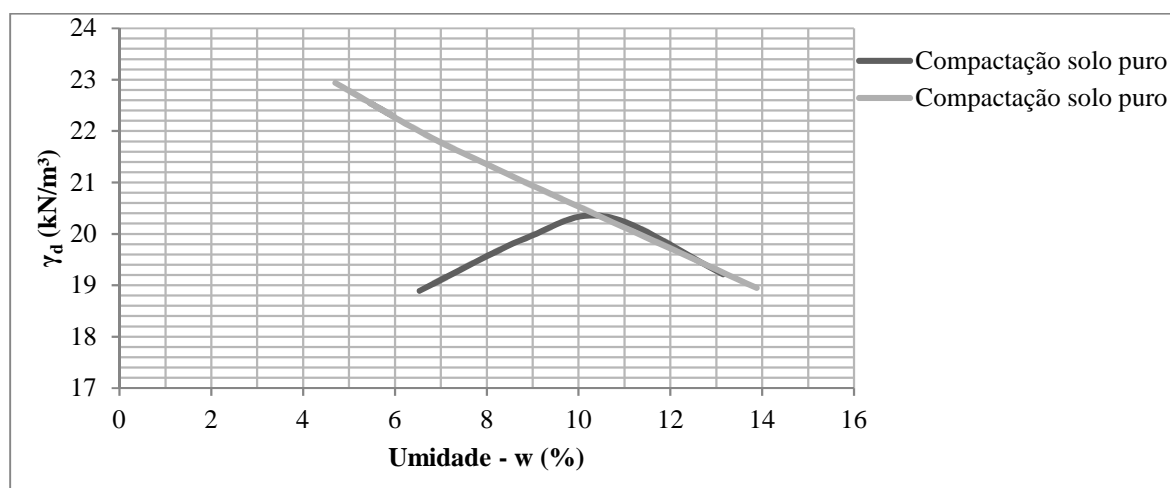
Figura 1 – Curva Granulométrica Solo Pelotas

(fonte: elaborado pelo autor)

123
 124 O solo foi classificado como Solo Siltoso A4, pelo sistema de classificação AASHTO. E pelo
 125 sistema SUCS (SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS), o solo poderia
 126 ser classificado como SC, ou seja, areia argilosa.

127 Para o ensaio de compactação, seguiu-se as diretrizes da NBR 7182 (ABNT, 2016), para o qual
 128 a curva de compactação pode ser observada na Figura 2.

129



130

131

Figura 2 - Curva de Compactação Solo Pelotas

132

(fonte: elaborado pelo autor)

133

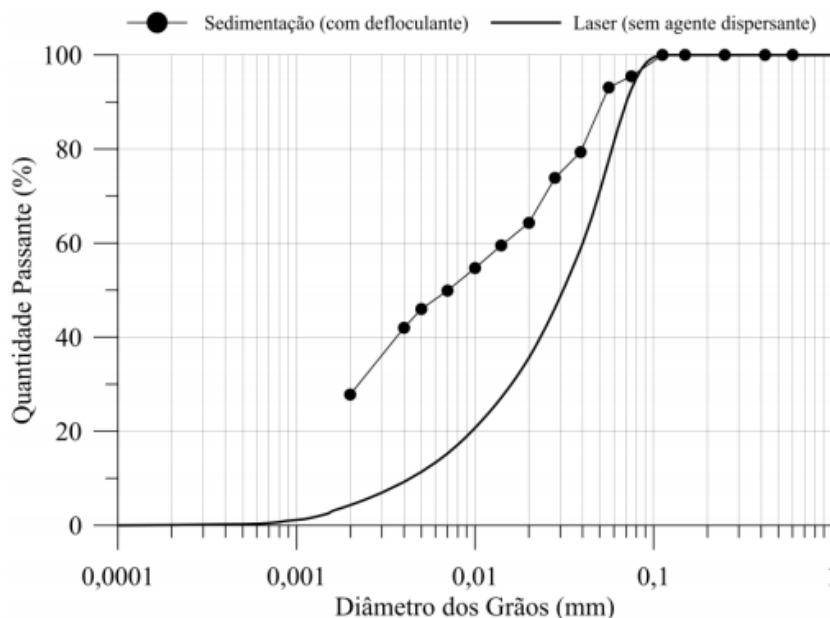
134 2.2 VIDRO

135 O vidro é um dos materiais mais passíveis de reciclagem, uma vez que conta com uma estrutura
 136 molecular amorfa. Sua composição química é constituída basicamente de sílica (SiO₂), óxido
 137 de cálcio (CaO) e óxido de sódio (Na₂O) (MOHAJERANI *et al.* 2017). Sua reciclagem é
 138 bastante difundida ao redor do mundo, sendo o segundo material mais reciclado do mundo,
 139 perdendo apenas para o papel (BASU E PUPPALA 2015). O Brasil é um grande fabricante de
 140 vidro, sendo que sua produção chega aproximadamente a 1 milhão de toneladas, com cerca
 141 45% advento de matéria-prima reciclada na forma de cacos (BICCA NETO, 2015). Porém, a
 142 reciclagem deste material no Brasil não chega nem a 50% do que é produzido, totalizando uma
 143 grande parcela desperdiçada em aterros sanitários (BICCA NETO, 2015). O vidro utilizado nos
 144 tratamentos foi obtido através da reciclagem de embalagens usadas. Foram utilizadas somente
 145 embalagens de vidro *float* (plano) de cor transparente. Os mesmos foram devidamente limpos
 146 e moídos em um moinho de esferas metálicas, onde o procedimento de moagem foi padronizado
 147 em uma proporção 3:1 de esferas metálicas e vidro, respectivamente. Para se evitar sobrecarga
 148 do moinho, se fixou um peso máximo de 1,5 kg de vidro. Após a moagem, o pó de vidro foi

149 peneirado na peneira de abertura de 75 micrón, ou mais comumente conhecida como peneira
150 de malha #200.

151 Por meio do ensaio de sedimentação com o uso de defloculante, foi obtido a curva de
152 distribuição granulométrica mostrada na Figura 3.

153



154 **Figura 3 - Granulometria pó de vidro**

155 (fonte: SCHEUERMANN FILHO, 2018)

156

157 No ensaio obtivemos um valor de peso específico real dos grãos (γ_s) de 2,47 g/cm³. Tabela 2
158 mostra as demais características físicas no vidro utilizado.

159

160

161 **Tabela 2- Características Físicas Pó de Vidro**

| Descrição | Resultado | Norma |
|----------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Peso específica real dos grãos | 2,47 g/cm ³ | NBR 6458 (ABNT, 2016) |
| % passante malha #200 | 100% | |
| % Areia fina (0,06 < d < 0,2 mm) | 4,5% | NBR 7181 (ABNT, 2016) |
| % Silte (0,002 < d < 0,06 mm) | 57,70% | |
| % Argila (d<0.002 mm) | 27,80% | |
| Superfície Específica (SSA) | 5,45 m ² /g | BET |

162

(fonte: elaborado pelo autor)

163

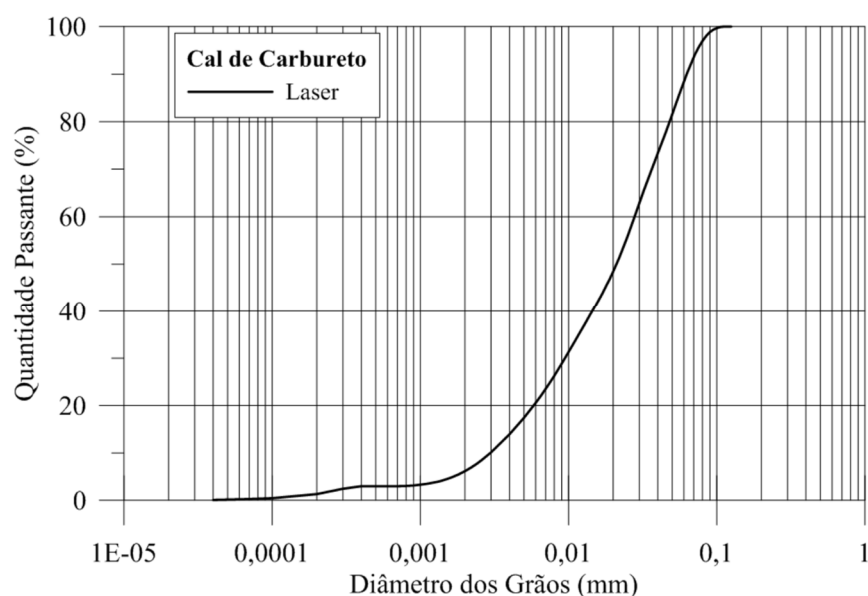
164 2.3 CAL DE CARBURETO

165 A cal de carbureto utilizada durante o projeto é um resíduo proveniente da fabricação do gás
166 acetileno, oriunda de uma fábrica situada na região metropolitana de Porto Alegre - RS. Ela é
167 disposta com alto teor de umidade, podendo-se observar certos torrões brancos devido à sua
168 aglutinação. Portanto, antes de utilizá-la nas misturas, deve-se levá-la para estufas de até 70 °C,

169 permanecendo de dois a três dias. Após seca, a cal é destorroada e passada na peneira de
 170 abertura 300 micrões (malha #50). Para evitar as reações de carbonatação, devido à presença
 171 de dióxido de carbono presente no ar, o material é devidamente ensacado e guardado em
 172 embalagens apropriadas.

173 A distribuição granulométrica da cal de carbureto é representada na Figura 4 abaixo. Também
 174 é exposta na Tabela 3 suas principais propriedades físicas e, como destacado por Scheuermann
 175 Filho (2018), sua alta superfície de contato pode pré-dispor uma maior reatividade do material.

176



177 **Figura 4 - Distribuição Granulométrica Cal de Carbureto**

178 (fonte: SALDANHA et al., 2018)

179

180

181

Tabela 3 – Propriedades Físicas Cal de Carbureto

| Descrição | Resultado | Norma |
|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Peso específica real dos grãos | 2,19 g/cm ³ | NBR 6458 (ABNT, 2016) |
| % passante malha #200 | 100% | Análise da granulometria a laser |
| % Areia fina (0,06 < d < 0,2 mm) | 80% | |
| % Silte (0,002 < d < 0,06 mm) | 18% | |
| % Argila (d<0.002 mm) | 2% | |
| Superfície Específica (SSA) | 22,60 m ² /g | BET |

182

(fonte: SALDANHA et al., 2018)

183

184 3 ENSAIOS

185 Neste tópico serão discutidos os principais ensaios contemplados no projeto.

186

187 3.1 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

188 Para os ensaios de resistência à compressão simples e módulo cisalhante inicial foram moldados
 189 corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, sendo que para cada
 190 tratamento experimental uma duplicata foi moldada. Cada tratamento era individualmente
 191 moldado em uma ordem completamente aleatória a fim de garantir total independência entre os
 192 possíveis erros/ruídos experimentais, como mostra a Tabela 4. O processo de moldagem
 193 iniciava com a pesagem dos materiais secos, os quais eram imediatamente misturados até
 194 atingirem uma homogeneização visual. Posteriormente, adicionava-se água destilada e a
 195 mistura prosseguia até a formação de uma pasta de consistência homogênea. Nessa etapa,
 196 cápsulas do material úmido eram retiradas para que se estimasse a umidade real de moldagem.
 197 Logo após isso, o corpo de prova era estaticamente compactado em três camadas, sendo feita a
 198 escarificação entre cada camada para garantir aderência entre elas. Após término de moldagem,
 199 o corpo de prova (CP) era pesado, medido, ensacado e identificado conforme número de seu
 200 tratamento. O mesmo era curado em câmara úmida a uma temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ com
 201 umidade relativa do ar superior a 95% (ASTM C511, 2013). A fim de minimizar possíveis
 202 efeitos da sucção, os espécimes eram imersos em água 24 horas antes de serem ensaiados, isto
 203 é, no penúltimo dia de cura.

204 O teor de umidade de moldagem e o peso específico aparente seco foram determinados com
 205 base em um ensaio Proctor executado na energia modificada segundo a norma NBR 7182
 206 (ABNT, 2016), Figura 2. Logo, estabeleceram-se os valores de $16,50\text{ kN/m}^3$ e $18,5\text{ kN/m}^3$
 207 moldados com, respectivamente, 16% e 11 % de umidade. Os teores de vidro foram fixados em
 208 10% e 30% com relação à massa de solo, sendo essas quantidades estabelecidas com base em
 209 experiências anteriores (CONSOLI *et al.*, 2001; CONSOLI *et al.*, 2017; CONSOLI *et al.*, 2018;
 210 JHA; SIVAPULLAIAH, 2018; LIU *et al.*, 2018). Os teores de cal utilizados foram de 5% e
 211 12%, sendo o mínimo estabelecido a partir do método do pH segundo as diretrizes da ASTM
 212 D6276 (ASTM, 2014) e a quantidade era determinada em função da soma das massas secas de
 213 solo e vidro. Ainda, um tratamento intermediário, contemplando o valor médio de todos os
 214 fatores, foi estabelecido a fim de que se verificasse a linearidade entre as variáveis resposta e
 215 os fatores controláveis. A tabela abaixo mostra a aleatorização dos CPs moldados com os
 216 resultados médios obtidos em cada ensaio.

217
 218

Tabela 4 – Tratamentos aleatorizados

| CP Ensaio | γ_d (g/cm^3) | cal | vidro | w | RCS 7 dias | RCS 28 dias | G0 7 dias | G0 28 dias |
|----------------------|-----------------------------------|------------|--------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 1,65 | 12% | 30% | 16% | 803,98 | 3363,33 | 935,15 | 3884,24 |
| 2 | 1,85 | 5% | 30% | 11% | 1318,60 | 6820,93 | 1821,10 | 5050,69 |

219

continua

| CP Ensaiado | γ_d (g/cm ³) | cal | vidro | w | RCS 7 dias | RCS 28 dias | G ₀ 7 dias | G ₀ 28 dias |
|----------------|------------------------------------|------|-------|-----|---------------|----------------|--------------------------|---------------------------|
| 3 | 1,65 | 12% | 10% | 16% | 551,80 | 1969,97 | 761,79 | 2473,43 |
| 4 | 1,85 | 5% | 30% | 11% | 1610,36 | 5131,23 | 1807,33 | 5181,55 |
| 5 | 1,65 | 12% | 30% | 16% | 861,51 | 3849,26 | 1037,18 | 3709,47 |
| 6 | 1,85 | 5% | 10% | 11% | 984,09 | 1629,12 | 1403,78 | 9847,84 |
| 7 | 1,85 | 12% | 10% | 11% | 1041,94 | 3437,15 | 1375,77 | 9556,20 |
| 8 | 1,85 | 12% | 10% | 11% | 1006,91 | 1716,84 | 1339,85 | 9109,32 |
| 9 | 1,75 | 8,5% | 20% | 14% | 1113,97 | 3754,56 | 1235,53 | 9698,74 |
| 10 | 1,85 | 12% | 30% | 11% | 1754,69 | 4321,08 | 1690,32 | 10546,04 |
| 11 | 1,85 | 12% | 30% | 11% | 1690,44 | 5890,30 | 1724,42 | 10539,40 |
| 12 | 1,65 | 5% | 10% | 16% | 433,35 | 1893,56 | 697,05 | 2294,22 |
| 13 | 1,65 | 5% | 30% | 16% | 830,36 | 4158,49 | 1095,60 | 3475,46 |
| 14 | 1,85 | 5% | 10% | 11% | 1007,56 | 3262,54 | 1467,69 | 8487,86 |
| 15 | 1,65 | 5% | 30% | 16% | 857,01 | 4292,90 | 1087,61 | 3584,31 |
| 16 | 1,65 | 5% | 10% | 16% | 457,65 | 1614,79 | 717,01 | 2415,97 |
| 17 | 1,65 | 12% | 10% | 16% | 451,63 | 2360,40 | 756,59 | 2651,71 |
| 18 | 1,75 | 8,5% | 20% | 14% | 1058,58 | 3137,28 | 1255,45 | 3596,64 |

(fonte: elaborado pelo autor)

220

221

222 3.2 ENSAIO COMPRESSÃO SIMPLES

223 Os ensaios de compressão simples seguiram as diretrizes da norma norte-americana ASTM
 224 D5102 (ASTM, 2014). Como já mencionado, os CPs foram imersos 24 horas antes da
 225 realização desse ensaio, a fim de reduzir os efeitos de sucção (Consoli *et al.* 2011). Logo após
 226 retirada da água, os mesmos foram devidamente pesados e foram feitas as leituras de suas
 227 dimensões com um paquímetro, lendo-se diâmetro e altura em pelo menos três trechos distintos.
 228 O ensaio é feito em uma prensa com deslocamento constante de 1,14 mm/min. O CP é colocado
 229 em uma base metálica que é comprimido contra um anel dinamométrico devidamente fixado,
 230 onde se fez a leitura dos valores indicados pelo anel para posteriormente conversão em carga
 231 (Q), através de uma equação de calibração do anel. Para os presentes ensaios foram utilizados
 232 dois anéis de capacidades máximas distintas, para os tratamentos com tempo de cura de 28 dias
 233 e com um γ_d mais elevado (1,85 g/cm³), foi utilizado o anel com 50 kN de capacidade máxima.
 234 Para os demais, fez-se o uso do anel com 10 kN de capacidade de carga, uma vez que sua leitura
 235 é mais precisa.

236 Para a obtenção da resistência a compressão simples, utilizou-se a seguinte relação:

237

$$238 \quad q_u = \frac{Q}{\left(\frac{\pi D_m^2}{4}\right)} \quad (2)$$

239

240 Onde D_m é o diâmetro médio obtido das três leituras e Q a carga dada pela equação do anel.

241 3.3 ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO

242 Para a realização do ensaio de propagação da velocidade de pulso ultrassônico seguiram-se as
243 diretrizes propostas pela norma norte-americana ASTM D2845 (ASTM 2017). Os ensaios
244 foram executados com o uso do equipamento PunditLab(+), o qual permite a emissão (e leitura)
245 de ondas de compressão (tipo p com 54 kHz) e cisalhantes (tipo s com 250 kHz) com o uso de
246 transdutores específicos. Portanto, é possível medir os tempos de propagação das respectivas
247 ondas (t_s e t_p) através do corpo de prova e relacioná-los com propriedades de comportamento
248 do material. Nesse sentido, para meios contínuos, isotrópicos e elásticos, há uma relação entre
249 o módulo cisalhante inicial (G_0) a densidade aparente (ρ) e a velocidade de propagação de uma
250 onda cisalhante por esse meio (V_s) através da relação:

251

$$252 \quad G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad (3)$$

253 Onde V_s é a velocidade de propagação da onda cisalhante, encontrada pela aproximação de um
254 movimento retilíneo uniforme, sabido o tempo t_s e tendo a leitura da altura do CP, e ρ é a massa
255 específica da amostra, calculada com a massa do tratamento úmido e o volume, com as
256 dimensões médias lidas no paquímetro.

257

258 3.4 PINHOLE TEST

259 O *Pinhole Test*, ou ensaio de furo de agulha, é um ensaio de análise de dispersividade de um
260 determinado corpo de prova. Para a realização do ensaio, seguiu-se as diretrizes conforme a
261 NBR 14114 (ABNT, 1998). Conforme Elges (1985), este ensaio pode ser um bom indicativo
262 na análise de solo dispersivo por simular o fenômeno de *piping*, característico de solos dessa
263 natureza. Sua avaliação consiste em usar cargas hidráulicas distintas, pré-estabelecidas na
264 norma, afim de provocar uma vazão e turbidez na água que passa pelo furo de 1 mm de
265 diâmetro, feito por uma agulha em um corpo de prova cilíndrico padronizado. Utiliza-se água
266 destilada no ensaio, ela é lançada de cargas hidráulicas constantes de 50, 180, 380 e 1020 mm.
267 Avalia-se a vazão e turbidez para cada carga hidráulica que passa pelo CP, uma vez que a
268 norma estabelece uma resposta qualitativa. Desta forma, foram feitos três CPs, sendo dois deles
269 corpos de prova com solo-vidro-cal, curados por 7 dias, e um deles apenas com solo natural.

270

271 4 RESULTADOS

272 O presente trabalho utilizou ferramentas estatísticas em sua computação de resultados, mais
273 precisamente a análise fatorial 2^k . O projeto foi reduzido a analisar 3 fatores de entrada em dois
274 níveis, com duplicatas de cada tratamento. O experimento fatorial 2^k se mostrou o mais

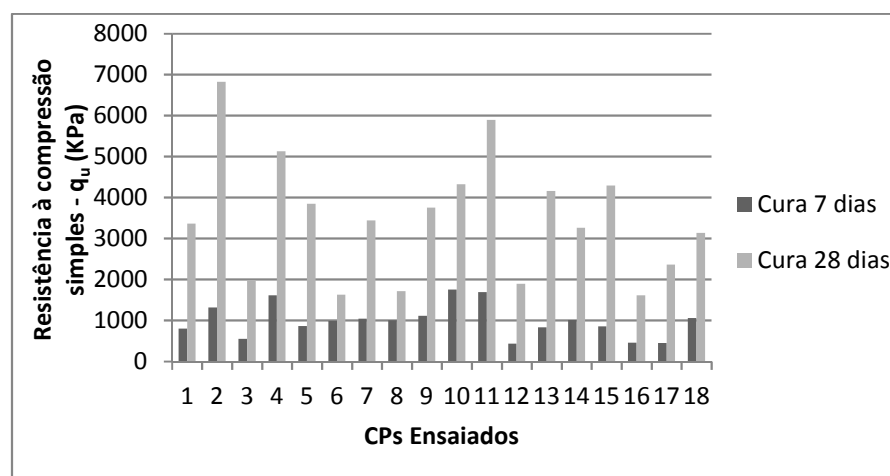
275 adequado, pois permite avaliar os efeitos de cada um dos k fatores sobre uma variável de
 276 resposta, assim como as suas interações de forma independente, com um menor número de
 277 tratamentos. Por se tratar de um experimento, há a necessidade de aleatorizados testes, para fins
 278 de não correlacionar os possíveis resíduos (erros) durante o processo (MONTGOMERY, 2009).
 279 Neste tópico será apresentado os resultados obtidos nos ensaios de resistência a compressão
 280 simples (RCS) e no módulo cisalhante inicial (G_0) assim como as análises de variância
 281 (ANOVA), gráficos de efeitos principais e gráfico de Pareto obtidos pelo experimento fatorial
 282 2^k . As tabelas ANOVAs apresentadas tem por objetivo avaliar a significância dos fatores e suas
 283 interações, adotando um intervalo de confiança de geralmente 95% e um nível de significância
 284 (α) igual a 5%.

285

286 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

287 Os valores obtidos de resistência à compressão podem ser contemplados na Figura 5, onde
 288 mostra o resultado de cada tratamento para 7 e 28 dias. Também serão apresentadas as tabelas
 289 ANOVAs para 7 e 28 dias, respectivamente e separadamente.

290



291 **Figura 5 - Resultados RCS para tratamentos 07 e 28 dias**

292 (fonte: elaborado pelo autor)

293

294

295

296

297

Tabela 5 - ANOVA RCS para tratamentos de 7 dias

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 8 | 2231358 | 278920 | 212,56 | 0 |
| Linear | 3 | 1879822 | 626607 | 477,53 | 0 |
| γ_d | 1 | 1187838 | 1187838 | 905,24 | 0 |
| cal | 1 | 135368 | 135368 | 103,16 | 0 |
| vidro | 1 | 556615 | 556615 | 424,19 | 0 |
| Interações de 2 fatores | 3 | 184535 | 61512 | 46,88 | 0 |

298

continua

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| γ_d *cal | 1 | 104101 | 104101 | 79,33 | 0 |
| γ_d *vidro | 1 | 284 | 284 | 0,22 | 0,653 |
| cal*vidro | 1 | 80149 | 80149 | 61,08 | 0 |
| Erro | 9 | 11810 | 1312 | | |
| Total | 17 | 2243168 | | | |

297 (fonte: elaborado pelo autor)

298

299

Tabela 6 – ANOVA RCS para tratamentos de 28 dias

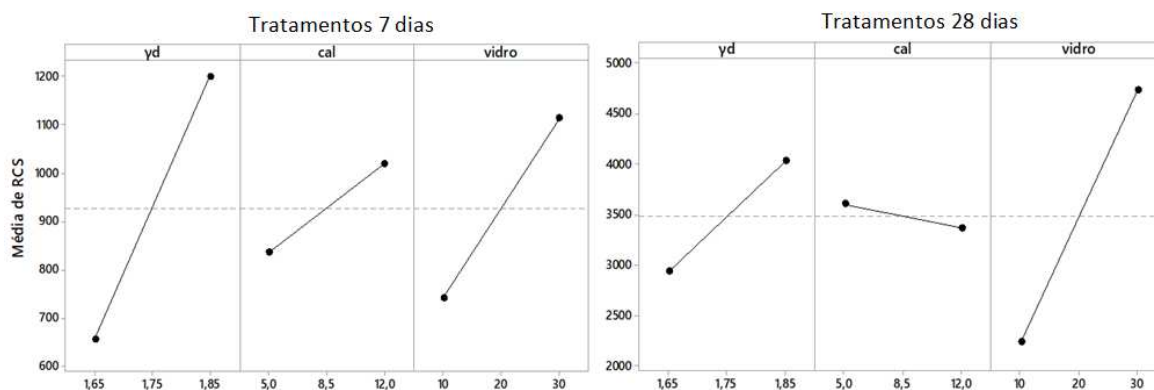
| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 8 | 32077100 | 4009637 | 6,11 | 0,007 |
| Linear | 3 | 29820243 | 9940081 | 15,15 | 0,001 |
| γ_d | 1 | 4737668 | 4737668 | 7,22 | 0,025 |
| cal | 1 | 224488 | 224488 | 0,34 | 0,573 |
| vidro | 1 | 24858086 | 24858086 | 37,89 | 0,000 |
| Interações de 2 fatores | 3 | 2254336 | 751445 | 1,15 | 0,382 |
| γ_d *cal | 1 | 70444 | 70444 | 0,11 | 0,751 |
| γ_d *vidro | 1 | 1151671 | 1151671 | 1,76 | 0,218 |
| cal*vidro | 1 | 1032221 | 1032221 | 1,57 | 0,241 |
| Erro | 9 | 5905206 | 656134 | | |
| Total | 17 | 37982306 | | | |

300 (fonte: elaborado pelo autor)

301

302 Abaixo podemos destacar os efeitos principais no que se refere ao ganho de resistência a
 303 compressão simples, a esquerda os tratamentos de 7 dias de cura e a direita os de 28 dias.

304



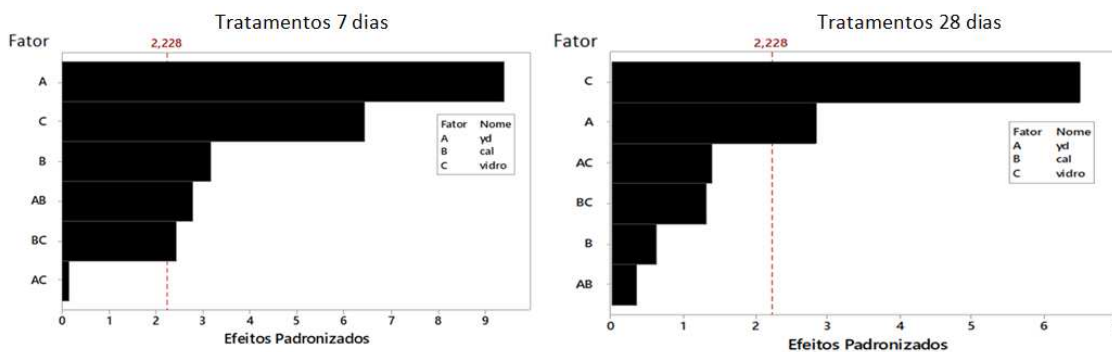
305

306

307

Figura 6 – Efeitos principais RCS em curas de 7 e 28 dias

(fonte: elaborado pelo autor)

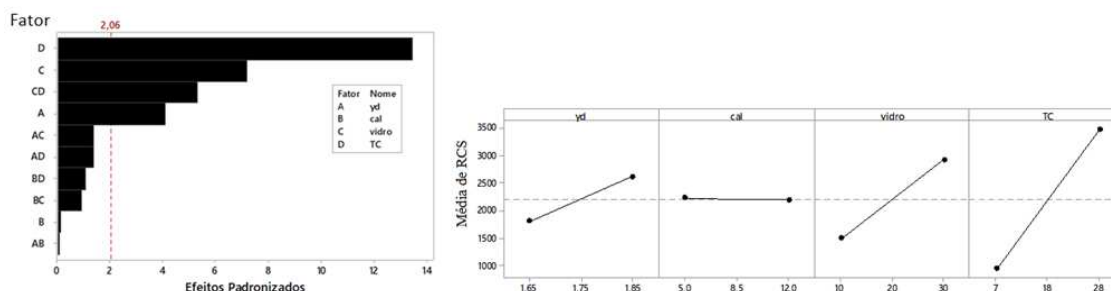


308
309 **Figura 7 – Gráfico de Pareto RCS para tratamentos de 7 e 28 dias**

310 (fonte: elaborado pelo autor)

311
312 Observa-se na Figura 6 a compacidade como principal efeito significativo no ganho de RCS
313 nos tratamentos de 7 dias, seguidos por teor de vidro moído e cal. Nesse contexto o γ_d pode
314 favorecer o intertravamento entre as partículas da mistura, favorecendo a ocorrência das reações
315 pozolânicas. Pode-se interpretar que não houve tempo suficiente para o pleno desenvolvimento
316 das reações pozolânicas nas misturas de 7 dias, uma vez que nos tratamentos de 28 dias o vidro
317 se apresentou como principal fator, superando até o peso específico aparente seco. No entanto,
318 nos tratamentos de 28 dias o teor de cal não foi significativo, sugerindo que parte da cal pode
319 não ter reagido com a pozolana. Também se pode observar que o tempo de cura influencia
320 bastante no quesito ganho de resistência à compressão simples, isso se deve ao fato de um maior
321 tempo de cura resultar em mais tempo para o desenvolvimento reações pozolânicas com
322 consequente formação de C-S-H (MASSAZA, 2004). Considerando o tempo como um quarto
323 fator, pode-se observar na Figura 8 através do gráfico de Pareto e efeitos principais, onde ilustra
324 a influência do tempo de cura (TC) em 7 e 28 dias.

325



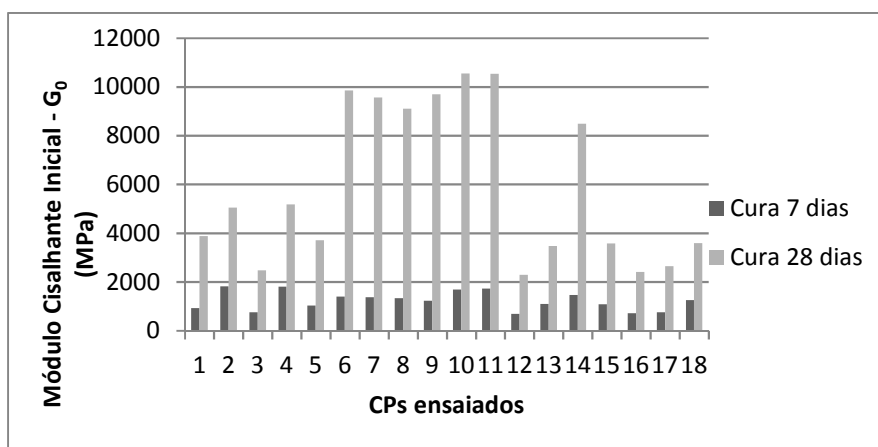
326
327 **Figura 8 – Gráfico de Pareto e Efeitos principais considerando fator TC em ganho de RCS**

328 (fonte: elaborado pelo autor)

329

330 4.2 MÓDULO CISALHANTE INICIAL

331 Os valores obtidos de módulo cisalhante inicial podem ser contemplados na Figura 9, onde está
 332 exposto o resultado de cada tratamento para 7 e 28 dias. Novamente serão apresentadas as
 333 tabelas ANOVA para 7 e 28 dias, respectivamente e separadamente.



334 **Figura 9 – Resultados G_0 cura 7 e 28 dias**

(fonte: elaborado pelo autor)

334
 335
 336
 337

Tabela 7 – ANOVA para ensaios G_0 cura 7 dias

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 8 | 2403448 | 300431 | 300,06 | 0,000 |
| Linear | 3 | 2382592 | 794197 | 793,21 | 0,000 |
| γ_d | 1 | 1919803 | 1919803 | 1917,41 | 0,000 |
| cal | 1 | 14167 | 14167 | 14,15 | 0,004 |
| vidro | 1 | 448622 | 448622 | 448,06 | 0,000 |
| Interações de 2 fatores | 3 | 16411 | 5470 | 5,46 | 0,020 |
| γ_d *cal | 1 | 4321 | 4321 | 4,32 | 0,068 |
| γ_d *vidro | 1 | 3393 | 3393 | 3,39 | 0,099 |
| cal*vidro | 1 | 8697 | 8697 | 8,69 | 0,016 |
| Erro | 9 | 9011 | 1001 | | |
| Total | 17 | 2412459 | | | |

(fonte: elaborado pelo autor)

338
 339
 340

Tabela 8 – ANOVA para ensaios G_0 cura 28 dias

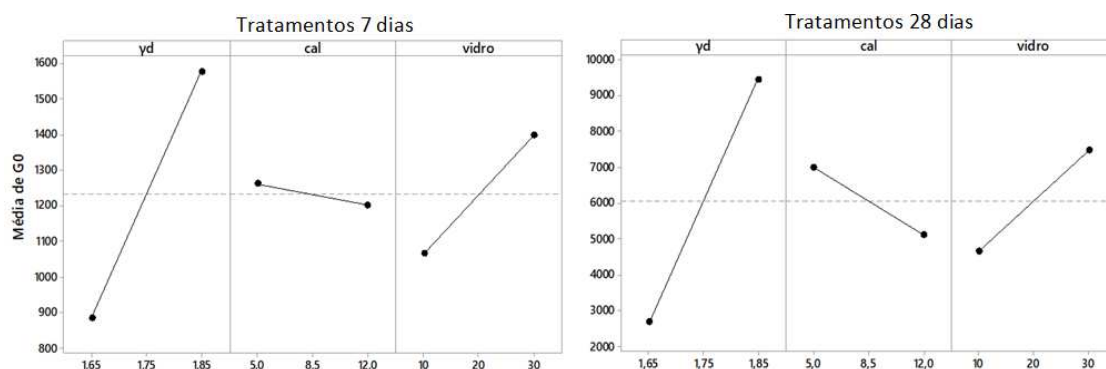
| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 8 | 2768669 | 346084 | 317,28 | 0,000 |
| Linear | 3 | 2280634 | 760211 | 696,94 | 0,000 |
| γ_d | 1 | 1824673 | 1824673 | 1672,82 | 0,000 |
| cal | 1 | 139609 | 139609 | 127,99 | 0,000 |
| vidro | 1 | 316352 | 316356 | 290,02 | 0,000 |
| Interações de 2 fatores | 3 | 37207 | 1240 | 113,70 | 0,000 |
| γ_d *cal | 1 | 1470 | 1470 | 134,75 | 0,000 |
| γ_d *vidro | 1 | 2205 | 2205 | 202,12 | 0,000 |
| cal*vidro | 1 | 4625 | 4625 | 4,24 | 0,070 |
| Erro | 9 | 9817 | 1091 | | |
| Total | 17 | 2778486 | | | |

(fonte: elaborado pelo autor)

341

342 Também podemos destacar, figuras abaixo, os efeitos principais e gráfico de Pareto em relação
 343 ao módulo cisalhante inicial.

344

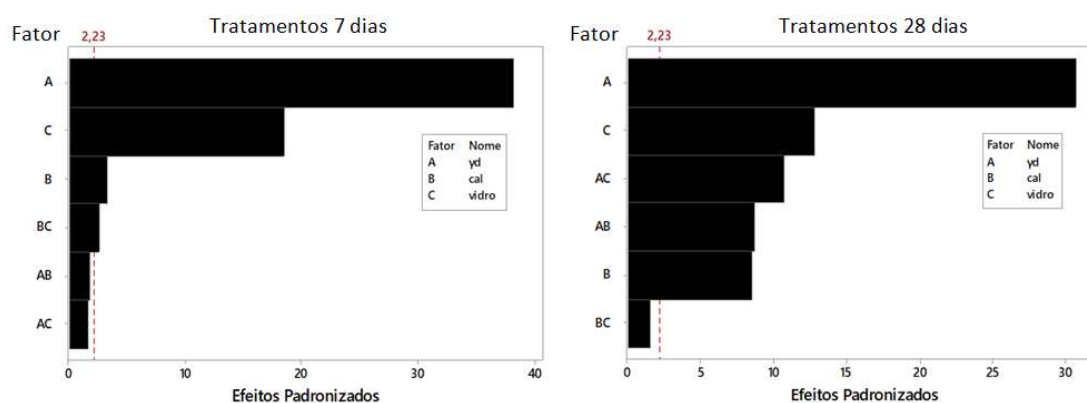


345 **Figura 10 – Efeitos principais G₀ em curas de 7 e 28 dias**

346 (fonte: elaborado pelo autor)

347

348



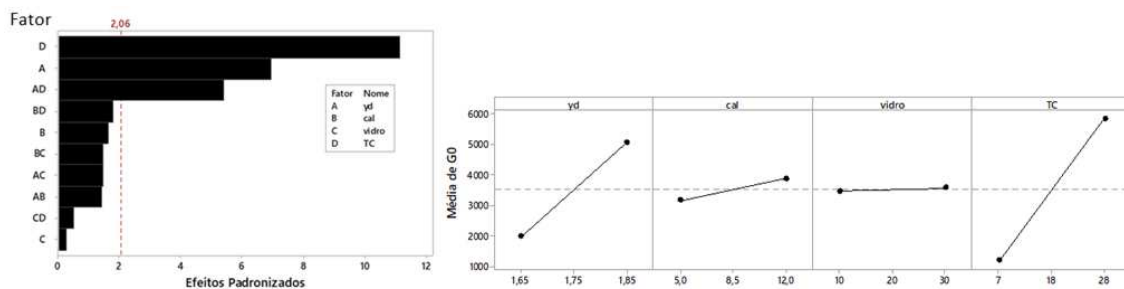
349 **Figura 11 – Gráfico de Pareto G₀ para tratamentos de 7 e 28 dias**

350 (fonte: elaborado pelo autor)

351

352

353 No ganho a rigidez inicial os fatores foram semelhantes tanto para os tratamentos de 7 e 28
 354 dias, sendo o peso específico aparente seco o principal fator de influência, no quesito físico,
 355 pode-se dizer que quanto mais compacto um CP mais rígido ele se apresenta. Sendo assim, o
 356 vidro sendo o segundo principal fator de influência pode se dar ao fato dele formar matrizes
 357 cimentícias juntamente com a cal, justificando a melhor resposta a rigidez dos compostos. No
 358 entanto, embora a cal tenha sido um fator significativo, teve um efeito inverso, contrariando a
 359 tendência esperada. A possível justificativa é que a cal esteja reagindo com algum elemento na
 360 mistura que não contribua no aumento da rigidez. Mais uma vez podemos observar uma forte
 361 influência do fator tempo de cura, agora na resposta ao módulo cisalhante inicial. A Figura 12
 362 abaixo, ilustra o ganho de rigidez pelo gráfico de Pareto e gráfico de efeitos principais na
 363 influência do TC em 7 e 28 dias.



364
365 **Figura 12 – Gráfico de Pareto e Efeitos principais considerando fator TC em G₀**

366 (fonte: elaborado pelo autor)

367

368 4.3 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE LIGANTE

369 Conforme foi proposto por Consoli *et al.* (2018), podemos relacionar a porosidade/volume de
370 ligantes com os ganhos em resistência a compressão simples e módulo cisalhante inicial (G₀),
371 conforme equação abaixo:

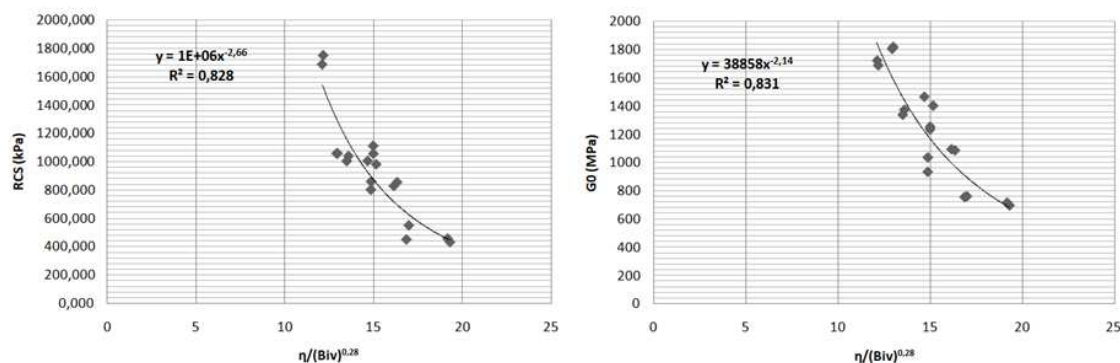
$$372 \quad \eta / (B_{iv})^a = \frac{\left(\frac{V_{vazio}}{V_{total}}\right)}{\left(\frac{V_{cal} + V_{vidro}}{V_{total}}\right)^a} \quad (4)$$

373 Sendo, V_{vazio} = volume de vazios; V_{total} = volume total da amostra; V_{cal} = volume de cal usado
374 no tratamento; V_{vidro} = volume de vidro usado no tratamento.

375

376 O expoente “a” que melhor ajusta a curva foi de 0,28 também proposto por Consoli *et al.*
377 (2018). O mesmo expoente proposto para correlacionar cimento Portland como ligante
378 (CONSOLI *et al.* 2017). Nas figuras 13 e 14 são apresentadas relações RCS e G₀ para como
379 $\eta / (B_{iv})^{0,28}$ com as tendências na relação para 7 e 28 dias de cura.

380



381
382 **Figura 13 – Tratamentos 7 dias**

383 (fonte: elaborado pelo autor)

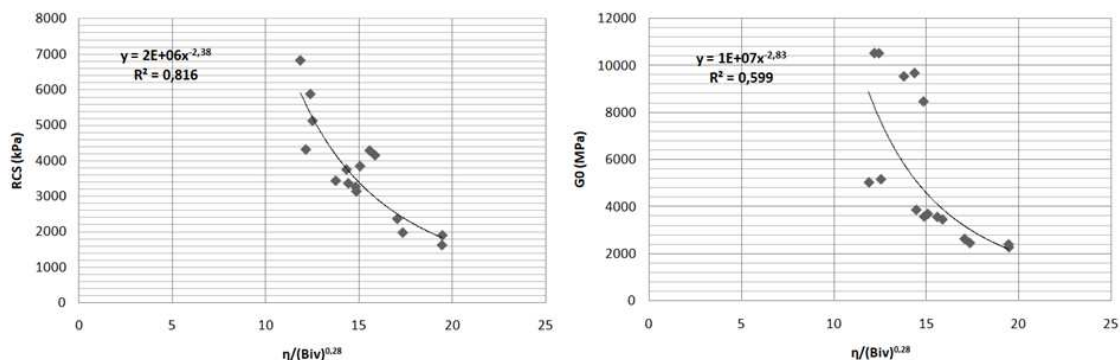


Figura 14 – Tratamentos 28 dias

(fonte: elaborado pelo autor)

384
385
386

387 As equações das relações RCS e G_0 para como $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ ficaram as seguintes:

388 Tratamentos 7 dias:

$$389 \quad RCS = 1 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(B_{iv})^{0,28}} \right]^{-2,66} e (R^2 = 0,83) \quad (5)$$

390

$$391 \quad G_0 = 38.858 \left[\frac{\eta}{(B_{iv})^{0,28}} \right]^{-2,14} e (R^2 = 0,83) \quad (6)$$

392

393 Tratamentos 28 dias:

$$394 \quad RCS = 1 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(B_{iv})^{0,28}} \right]^{-2,38} e (R^2 = 0,82) \quad (7)$$

395

$$396 \quad G_0 = 1 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(B_{iv})^{0,28}} \right]^{-2,83} e (R^2 = 0,60) \quad (8)$$

397

398 4.4 PINHOLE TEST

399 Para os CPs com tratamento vidro-cal não foi observado turbidez na água, sendo assim foram
400 classificados como ND1 (não dispersivo). Para o solo natural, foi observado maior turbidez na
401 água, e conforme a norma, foi classificado como ND4 (moderadamente dispersivo). Os
402 percentuais de materiais para os CPs utilizados no *pinhole test* podem ser observados na Tabela
403 9. Ambos os resultados apresentaram as mesmas características em turbidez e vazão e foram
404 classificados igualmente.

405
406

Tabela 9 – Tratamentos Pinhole Test

| Tratamento | γ_d (g/cm ³) | cal (%) | vidro (%) | w (%) | Resultado Observado |
|------------|---------------------------------|---------|-----------|-------|----------------------|
| 1 | 1.65 | 12 | 10 | 16 | ND1 (não dispersivo) |
| 2 | 1.65 | 5 | 10 | 16 | ND1 (não dispersivo) |

407
408

(fonte: elaborado pelo autor)

409 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

410 Com os resultados, pode-se fazer as seguintes constatações:

- 411 • As misturas de vidro moído e cal de carbureto podem ser uma alternativa no
412 tratamento de solos dispersivos, uma vez que tal mistura resulta em compostos
413 cimentícios, e seus ganhos variam de acordo com a dosagem desses compostos;
- 414 • Novamente se pôde relacionar o índice de porosidade/aglutinantes (vidro e cal) com
415 termos de ganho de resistência à compressão simples e módulo cisalhante inicial. O
416 índice se mostrou compatível quando comparado com estudos anteriores, onde foi
417 considerado o expoente 0,28 para misturas de solos compactados e cimento Portland.
418 Concluindo que o uso de materiais recicláveis com propriedades químicas adequadas,
419 pode futuramente ser uma alternativa para soluções geoambientais;
- 420 • Pôde-se observar também que o principal fator para ganho de resistência em
421 tratamentos de 7 dias é a compactidade, já para tratamentos de 28 dias o fator
422 predominante é a disposição de vidro (pozolana) sendo o principal fator para ganho
423 de resistência. Pode-se concluir que as reações pozolânicas entre vidro moído e cal,
424 em solos com tais propriedades, aumenta em grande escala à medida que o tempo
425 passa;
- 426 • Mais estudos devem ser realizados com solos dispersivos oriundos da região de
427 Pelotas para adequar os tratamentos propostos, seja com outro tipo de vidro, seja com
428 uma outra fonte de pozolana (como por exemplo: cinza volante, escória de alto forno,
429 resíduos cerâmicos, cinzas de cascas de arroz, entre outros).

430

431 6 AGRADECIMENTOS

432 Deixo um forte agradecimento aos pesquisadores e bolsistas do LEGG (Laboratório de Ensaios
433 Geotécnicos e Geoambientais), por todo auxílio que me deram durante os ensaios, em especial
434 ao meu coorientador, Hugo Scheuermann Filho, que me auxiliou durante toda a pesquisa e ao
435 Ricardo Menezes, que me ajudou no processo de caracterização do solos de Pelotas. Ao
436 professor Nilo Consoli, por confiar a mim um projeto que considero muito importante dentro
437 da área geoambiental.

438

439 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

440 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D5102: Standard test**
441 **method for unconfined compressive strength of compacted soil-lime mixtures**. Philadelphia, 2004.

442

443 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D6276: Standard Test**
444 **Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization**.
445 Philadelphia, 2016.

446

- 447 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D2845: Standard Test**
448 **Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of**
449 **Rock**. Philadelphia, 2017.
- 450
451 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457: Amostras de solo —**
452 **Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.
- 453
454 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6458: Grãos de pedregulho**
455 **retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica**
456 **aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2016.
- 457
458 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459: determinação do**
459 **limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.
- 460
461 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180: determinação do**
462 **limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.
- 463
464 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181: análise**
465 **granulométrica de solos**. Rio de Janeiro, 2016.
- 466
467 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182: Solo - Ensaio de**
468 **compactação**. Rio de Janeiro, 2016.
- 469
470 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13601: avaliação da**
471 **dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumbtest)**. Rio de Janeiro, 1996b.
- 472
473 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14114: solos argilosos**
474 **dispersivos - identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (pinholetest)**. Rio
475 de Janeiro, 1998.
- 476
477
478 BASU, D.; PUPPALA, A. J. Principles of sustainability and their applications in geotechnical
479 engineering. In: GEOTECHNICAL SYNERGY, 2015, Buenos Aires. **Proceedings...** Amsterdam: IOS
480 Press, 2015.
- 481
482 Bicca Neto, V. Commitment business for recycling - Review. **CEMPRE Editor**, 35 páginas (em
483 Portuguese). 2015
- 484
485 Boteltim técnico nº 30, 1973 – Disponível em:<[http://w3.ufsm.br/msrs/index.php/explore/solos/136-](http://w3.ufsm.br/msrs/index.php/explore/solos/136-um-pelotas)
486 [um-pelotas](http://w3.ufsm.br/msrs/index.php/explore/solos/136-um-pelotas)>. Acesso em: 02 de maio de 2018
- 487
488 CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; CARRARO, J. A. H.; HEINECK, K. S.
489 Behavior of compacted soil-flyash-carbide lime mixtures. **Journal of Geotechnical and**
490 **Geoenvironmental Engineering**, v. 127 (9), 2001.
- 491
492 CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; VILLALBA, N. M. K. Durability, strength, and stiffness
493 of dispersive clay-lime blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28(11), 2016.
- 494

- 495 CONSOLI, N. C.; DA SILVA, J. K.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; RIVOIRE, A. B. Compacted
496 clay-industrial wastes blends: long term performance under extreme freeze-thaw and wet-dry
497 conditions. **Applied Clay Science**, v. 146, 2017.
- 498
499 CONSOLI, N. C.; WINTER, D.; LEON, H. N.; SCHEUERMANN FILHO, H. C. Durability, strength
500 and stiffness of green stabilized sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**,
501 v. 144(9), 2018.
- 502
503 COOPERATIVE RESEARCH CENTER FOR SUSTAINABLE SUGAR PRODUCTION (CRC).
504 **Diagnosis and management of sodic soils under sugarcane**. Townsville: CRC Sugar, 2001. Technical
505 Publication.
- 506
507 ELGES, H. F. W. K. Problems in South Africa- state of the art: dispersive soils. **The Civil Engineer in**
508 **South Africa**, s. 1., v. 27, 1985.
- 509
510 MOHAJERANI, A.; VAJNA, J.; CHEUNG, T. H. H.; KURMUS, H.; ARULRAJAH, A.;
511 HORPIBULSUK, S. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: a
512 review. *Construction and Building Materials*. v. 156, 2017.
- 513
514 MASSAZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: Peter C. Hewlett. **Lea-s chemistry of cement**
515 **and concrete**. 4th Ed., Arnold, London, U.K, 1998.
- 516
517 MASSAZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. (Org.). **Lea´s Chemistry of**
518 **Cement and Concrete**. 4 ed. Amsterdam: Butterworth Heinemann, 2004.
- 519
520 MITCHELL, J. K.; JARDINE F. M. A guide to ground treatment. London: CIRIA, 2002. Technical
521 Report C573.
- 522
523 MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2009.
- 524
525 JHA, A. K.; SIVAPULLAIAH, P. V. Potential of fly ash to suppress the susceptible behavior of lime-
526 treated gypseous soil. **Soils and Foundations**, article in press, 2018.
- 527
528 LIU, S.; LI, Z.; LI, Y.; CAO, W. Strength properties of Bayer red mud stabilized by lime-fly ash using
529 orthogonal experiments. **Construction and Building Materials**, v. 166, 2018.
- 530
531 SALDANHA, R. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MALLMANN, J. E. C.; CONSOLI, N. C.;
532 REDDY, K. R. Physical-mineralogical-chemical characterization of carbide lime: an environment-
533 friendly chemical additive for soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 30(6), p.
534 1 – 7, 2018.
- 535
536 SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e**
537 **âmbar e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**. 2014. 139 f. Tese
538 (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas,
539 Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- 540
541 SCHEUERMANN FILHO, H. C. **Estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal**
542 **de carbureto**. 2018. 119 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em
543 Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

544
545 WELTER, C.; BASTOS, C. A. **Avaliação de dispersibilidade de planossolosólicos encontrados**
546 **na planície costeira sul do RS.** 2003. Departamento de Materiais e Construção, Fundação Universidade
547 Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2003.