

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

**Rafael Luís Sacco**

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE RESÍDUOS DE  
VIDRO MOÍDO NA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DE MISTURAS DE  
SOLO-VIDRO MOÍDO-CAL DE CARBURETO**

Porto Alegre  
setembro 2019

**RAFAEL LUIS SACCO**

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE RESÍDUOS DE  
VIDRO MOÍDO NA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DE MISTURAS DE  
SOLO-VIDRO MOÍDO-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  
setembro 2019

**RAFAEL LUIS SACCO**

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE RESÍDUOS DE VIDRO MOÍDO NA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DE MISTURAS DE SOLO-VIDRO MOÍDO-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 Professor Orientador e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, setembro de 2019

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Nilo César Consoli (UFRGS)**  
Ph.D Concórdia University, Canadá  
Orientador

**Hugo Carlos Scheuermann Filho (UFRGS)**  
MSc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Co-orientador

**Prof. Lucas Festugato (UFRGS)**  
Ph.D Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Eclesielter Batista Moreira (UFRGS)**  
MSc. Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dedico este trabalho a Eduardo e Claudia, meus pais, por me darem o suporte necessário para a realização da minha vida acadêmica.

## RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi obter um entendimento mais tangível do efeito da granulometria do pó de vidro moído na resistência e na rigidez de misturas solo-vidro moído-cal de carbureto. Além disso, avaliou-se o efeito de outros fatores controláveis nas variáveis respostas: teor de pó de vidro moído, teor de cal de carbureto, peso aparente seco e tempo de cura das misturas. Uma melhor compreensão das características desses materiais aplicados à Engenharia Civil tem sua justificativa baseada em alternativas possivelmente sustentáveis na construção de fundações, pavimentos e edificações, visto serem potenciais substitutos do cimento Portland, material altamente poluidor em seu processo de fabricação. Além disso, essa aplicação específica se apresenta como um estímulo para a reciclagem dos resíduos de vidro gerados pela indústria e pela população em geral. Essa pesquisa utiliza uma abordagem estatística de projeto e análise de experimentos as quais proporcionam maior assertividade na avaliação dos resultados obtidos em laboratório. Os resultados mostraram maiores valores de resistência e rigidez para as granulometrias com partículas mais finas. Além disso, verificou-se também uma forte influência do tempo de cura, do teor de pó de vidro moído e do peso aparente seco nas variáveis respostas (resistência à compressão simples e módulo cisalhante inicial)

Palavras-chave: Pó de vidro moído, Granulometria.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas granulométricas do pó de vidro moído – a, b e c .....	12
Figura 2 – Difratoograma do pó de vidro moído .....	13
Figura 3 – Curva granulométrica da cal de carbureto .....	14
Figura 4 – Curva granulométrica da Areia de Osório .....	15
Figura 5 – Relação de $RCS \times \eta / (Biv)^a$ para 7 e 28 dias, sendo $a = 1,00$ .....	18
Figura 6 – Relação de $G_0 \times \eta / (Biv)^a$ para 7 e 28 dias, sendo $a = 1,00$ .....	18
Figura 7 – Gráficos de Pareto dos Efeitos Padronizados das variáveis respostas .....	21

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores controláveis e fatores constantes, com seus respectivos níveis e valores .....	10
Tabela 2 – Propriedades físicas dos materiais utilizados nesta pesquisa .....	11
Tabela 3 – Característica de diferenciação das Granulometrias a, b e c .....	11
Tabela 4 – Tipos de misturas para os ensaios com 7 e 28 dias de cura .....	16
Tabela 5 – Equações de 1 a 12 referentes às curvas de tendência dos gráficos das Figuras 5 e 6 .....	19
Tabela 6 – Tabela ANOVA com os efeitos individuais dos fatores controláveis em relação ao RCS .....	20
Tabela 7 – Tabela ANOVA com os efeitos individuais dos fatores controláveis em relação ao G0 .....	20

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>09</b>
<b>2 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>10</b>
<b>3 MATERIAIS .....</b>	<b>11</b>
3.1 PÓ DE VIDRO MOÍDO .....	11
3.2 CAL DE CARBURETO .....	13
3.3 AREIA DE OSÓRIO .....	14
<b>4 MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>
4.1 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA .....	15
4.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES .....	16
4.3 ENSAIO DE PULSO ULTRASSÔNICO .....	16
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>17</b>
<b>6 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....</b>	<b>20</b>
<b>7 CONCLUSÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>8 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>23</b>

# Influência do tamanho das partículas de resíduos de vidro moído na resistência e rigidez de misturas de solo-vidro moído-cal de carbureto

Rafael Luís Sacco<sup>1</sup>; Hugo Carlos Scheuermann Filho<sup>2</sup>; Nilo César Consoli<sup>3</sup>

(1) Autor, graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Email: rafael.lsacco@gmail.com

(2) Coautor, mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

(3) Orientador, professor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

## Resumo:

O objetivo desta pesquisa foi obter um entendimento mais tangível do efeito da granulometria do pó de vidro moído na resistência e na rigidez de misturas solo-vidro moído-cal de carbureto. Além disso, avaliou-se o efeito de outros fatores controláveis nas variáveis respostas: teor de pó de vidro moído, teor de cal de carbureto, peso aparente seco e tempo de cura das misturas. Uma melhor compreensão das características desses materiais aplicados à Engenharia Civil tem sua justificativa baseada em alternativas possivelmente sustentáveis na construção de fundações, pavimentos e edificações, visto serem potenciais substitutos do cimento Portland, material altamente poluidor em seu processo de fabricação. Além disso, essa aplicação específica se apresenta como um estímulo para a reciclagem dos resíduos de vidro gerados pela indústria e pela população em geral. Essa pesquisa utiliza uma abordagem estatística de projeto e análise de experimentos as quais proporcionam maior assertividade na avaliação dos resultados obtidos em laboratório. Os resultados mostraram maiores valores de resistência e rigidez para as granulometrias com partículas mais finas. Além disso, verificou-se também uma forte influência do tempo de cura, do teor de pó de vidro moído e do peso aparente seco nas variáveis respostas (resistência à compressão simples e módulo cisalhante inicial).

## 1. Introdução

A aplicação de materiais alternativos ao cimento Portland na construção civil pode ser uma maneira interessante de se contornar os problemas ambientais gerados pela utilização desse insumo. O alto consumo energético e a quantidade de gases de efeito estufa emitidos durante a fabricação do cimento Portland é lesivo do ponto de vista ambiental (GSCHÖSSER et al., 2012). Dados de 2006 apontam que foram consumidos mais de 2 bilhões de toneladas de cimento Portland em todo o mundo (M CALKINS, 2008). Nesse sentido, o emprego do pó de vidro moído como um material pozolânico, substituindo assim, o uso do cimento Portland na construção civil, tem ganhado espaço no âmbito acadêmico para que se comprove a conveniência de sua utilização como tal e que se reduza a quantidade de cimento consumido no mundo. Além disso, esse pó de vidro moído poderia ser proveniente da reciclagem e processamento de resíduos de vidro descartados pela indústria e pela população em geral. No Brasil, a produção média anual de embalagens de vidro é em torno de 980 mil toneladas, sendo reciclados aproximadamente 47% desse total (CEMPRE, 2011). Visto isso, é interessante, do ponto de vista técnico, que se tenha cada vez mais estudos com o objetivo de se definir a adequação da utilização desse material em obras de construção civil como um agente cimentante.

No que diz respeito à engenharia geotécnica, a academia já apresenta estudos relacionados ao uso de resíduos para o melhoramento de solos argilosos dispersivos, por exemplo (CONSOLI et al. 2017; CONSOLI et al. 2016). Pesquisas relacionadas com a interação entre o pó de vidro e cal de carbureto indicam um possível uso dessa mistura como uma alternativa ao cimento Portland devido ao seu caráter pozolânico (CONSOLI et al. 2019a). Outras pesquisas que avaliam o comportamento de misturas pó de vidro moído-cal de carbureto com

solos arenosos faz com que, aos poucos, o tema seja explorado de forma ampla dentro de um contexto geotécnico (CONSOLI et al. 2018).

Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo o entendimento do efeito da variação da granulometria do pó de vidro moído na resistência e na rigidez de solo-vidro moído-cal de carbureto, sendo testado sua interação quando variado, também, os seguintes fatores: teor de cal de carbureto, teor de pó de vidro moído, peso aparente seco e tempo de cura das misturas. Sabe-se que, quanto mais fino os grãos, maior serão suas áreas de contato disponíveis para reação, pois maior será a superfície específica dos mesmos. Portanto, espera-se que a granulometria mais fina utilizada neste estudo obtenha maiores valores de resistência e rigidez para as misturas. Sendo assim, será avaliado, por métodos estatísticos, a influência dos fatores controláveis já citados de forma quantitativa.

## 2. Programa Experimental

O programa experimental está embasado em métodos e conceitos estatísticos de projeto e análise de experimentos que proporcionam a avaliação dos efeitos individuais e interativos dos fatores controláveis nas variáveis respostas obtidas nesta pesquisa (MONTGOMERY, 2009). Foram variados, além da (1) granulometria do pó de vidro moído, mais quatro fatores: o (2) teor de vidro moído; o (3) teor de cal de carbureto; o (4) peso específico aparente seco; o (5) tempo de cura dos corpos de prova. Na **Tabela 1**, abaixo, estão listados os fatores controláveis e os fatores constantes, com seus respectivos níveis e valores.

Fatores Controláveis	Níveis	Valores	Unidades
Granulometria do vidro moído	3	a, b e c	-
Teor de vidro moído	2	10 e 30	%
Teor de cal de carbureto	2	4 e 7	%
Peso específico aparente seco	2	15,5 e 17,5	kN/m <sup>3</sup>
Tempo de cura dos corpos de prova	2	7 e 28	dias

Fatores Constantes		Valores	Unidades
Teor de umidade de moldagem	-	11	%
Condições de cura (umidade e temperatura)	-	23	°C
Tipo de vidro	-	-	-
Tipo de cal de carbureto	-	-	-
Procedimentos e ensaios de resistência e rigidez	-	-	-

Tab. 1: Fatores controláveis e fatores constantes, com seus respectivos níveis e valores. (Fonte: Elaborado pelo autor).

As variáveis respostas foram as obtidas após os ensaios de resistência à compressão simples e pulso ultrassônico. O teor de umidade utilizado para todas as misturas foi de 11%, sendo embasado no trabalho de CONSOLI et al. (2018), o qual também avaliou o comportamento mecânico de misturas areia-pó de vidro moído-cal de carbureto.

### 3. Materiais

Utilizou-se os materiais com as características físicas disponibilizadas na **Tabela 2**. Mais informações desses são contempladas nos subitens a seguir.

Propriedades Físicas	Resultados					Norma
	Pó de Vidro Moído			Cal de Carbureto **	Areia de Osório ***	
	Tipo a	Tipo b	Tipo c			
Índice de Platicidade (IP)	Não Plástico					-
Peso Específico Real dos Grãos (Gs)	2,47 g/cm <sup>3</sup>	2,47 g/cm <sup>3</sup>	2,47 g/cm <sup>3</sup>	2,19 g/cm <sup>3</sup>	2,65 g/cm <sup>3</sup>	NBR 6508
Superfície Específica (SSA)	2,48 m <sup>2</sup> /g	2,21 m <sup>2</sup> /g	1,50 m <sup>2</sup> /g	22,60 m <sup>2</sup> /g		BET
% de Areia Fina (0,06 < diâmetro < 0,2 mm)	5%	33%	62%	80%	40%	*
% Silte (0,002 < diâmetro < 0,06 mm)	86%	58%	30%	18%	5%	*
% Argila (diâmetro < 0,002 mm)	3%	3%	2%	2%	1%	*

\*Análise de Granulometria à Laser

\*\* (fonte: SALDANHA et al., 2018)

\*\*\* (fonte: FOPPA et al., 2018)

Tab. 2: Propriedades físicas dos materiais utilizados nesta pesquisa. (Fonte: Elaborado pelo autor).

#### 3.1 Pó de Vidro Moído

O pó de vidro moído foi obtido por meio da moagem de vidros transparentes coletados pelo pesquisador durante o desenvolvimento da pesquisa. Entre os resíduos, estão, por exemplo: garrafas, copos e recipientes de vidro em geral. Após a moagem, seguindo um procedimento padronizado (tempo e quantidade de material), esse material era peneirado de forma a se obter três granulometrias diferentes: A primeira foi denominada de *granulometria a*, composta pelos grãos de vidro que passaram na peneira #200, ou seja, diâmetros menores que 0,074 mm. A segunda foi denominada de *granulometria c*, composta pelos grãos de vidro passantes na peneira #100 (diâmetro menor que 0,149 mm) mas retidos na peneira #200. Por fim, a terceira foi denominada de *granulometria b*, composta de 50% da *granulometria a* e 50% da *granulometria c*. A **Tabela 3** resume as granulometrias adotadas nesta pesquisa e a **Figura 1** contempla as suas respectivas curvas granulométricas obtidas por difração de raios laser.

Pó de vidro moído	
Granulometria	Peneira
A	100% passante #200
B	50% a e 50% c
C	100% passante #100 e retido na #200

Tab. 3: Característica de diferenciação das Granulometrias a, b e c. (Fonte: Elaborado pelo autor).

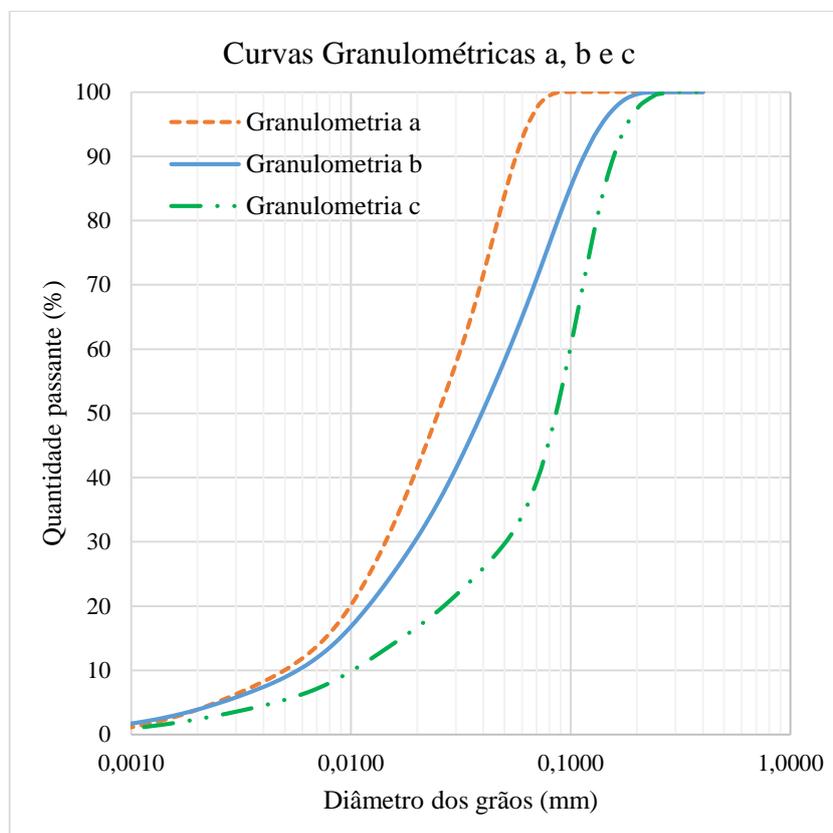


Fig. 1: Curvas granulométricas do pó de vidro moído - a, b e c. (Fonte: Elaborado pelo autor).

Após os ensaios, pelo método de BET, para se determinar as áreas superficiais específicas de cada uma das granulometrias estudadas nesta pesquisa, obtiveram-se os seguintes valores: 2,477 m<sup>2</sup>/g para a *granulometria a*, 2,213 m<sup>2</sup>/g para a *granulometria b* e 1,504 m<sup>2</sup>/g para a *granulometria c*. Além disso, o ensaio de difração de raio-X, executado conforme o método do pó em um intervalo angular de 5 a 75° de 2θ, apresentou um difratograma característico de estruturas não cristalinas, conforme mostrado na **Figura 2**, assim como apresentado por CONSOLI et al. (2019a). Ademais, o ensaio de fluorescência de raios-X (FRX) mostrou que o vidro é majoritariamente composto por 75,00% de Dióxido de Sílica (SiO<sub>2</sub>), 17,36% de Óxido de Cálcio (CaO) e 2,64% de Óxido de Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

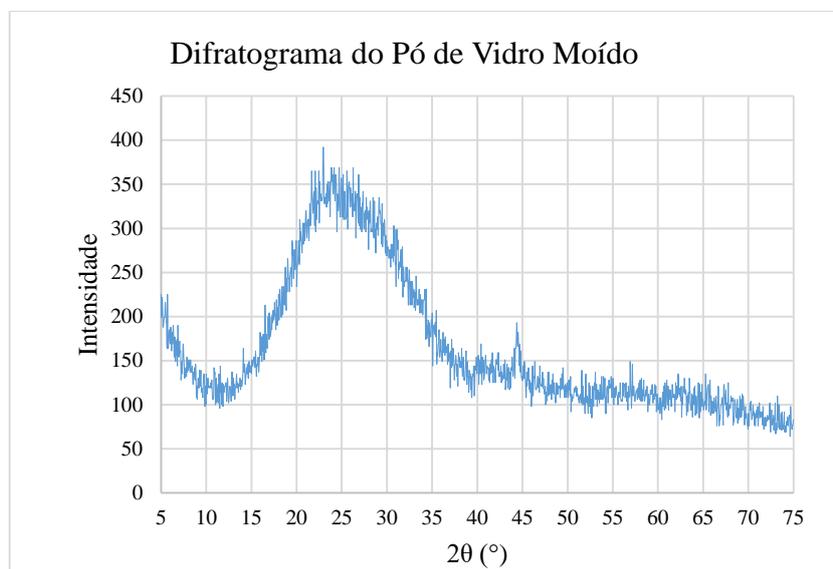


Fig. 2: Difratograma do pó de vidro moído. (Fonte: Elaborado pelo autor).

### 3.2 Cal de Carbureto

A cal de carbureto utilizada nesta pesquisa foi obtida de uma fábrica de gás acetileno localizada na região metropolitana de Porto Alegre, RS. O material é um resíduo da produção desse gás e, quando coletado, o mesmo possui uma consistência de lama. Após à chegada no laboratório, a cal de carbureto é depositada em uma estufa com 60°C durante 48 horas. Quando seca, esse material é destorroado e peneirado em malha #100 (diâmetro de 0,149 mm). Esse material foi usado em todas as misturas desta pesquisa. A granulometria da cal de carbureto está presente na **Figura 3** (SALDANHA et al, 2018). Ensaio de fluorescência de raios-X (FRX) mostrou que a cal de carbureto é composta quimicamente por 74,00% de Óxido de Cálcio (CaO), 3,10% de Dióxido de Sílica (SiO<sub>2</sub>) e 0,72% de Óxido de Magnésio (MgO). (SALDANHA et al., 2018).

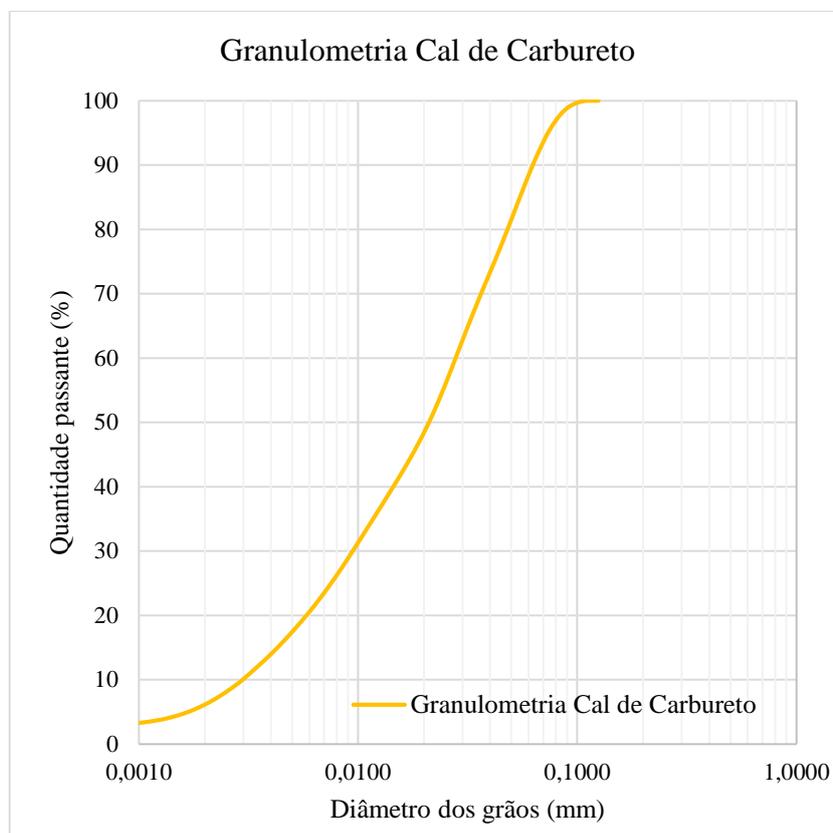


Fig. 3: Curva granulométrica da cal de carbureto. (Fonte: SALDANHA et al., 2018).

### 3.3 Areia de Osório

A areia utilizada nesta pesquisa, conhecida como areia de Osório, foi obtida na região de Porto Alegre, RS. A sua curva granulométrica é contemplada na **Figura 4** (CONSOLI et al., 2018). A areia de Osório é composta, em sua maior parte, por partículas de quartzo (FOPPA et. al, 2018).

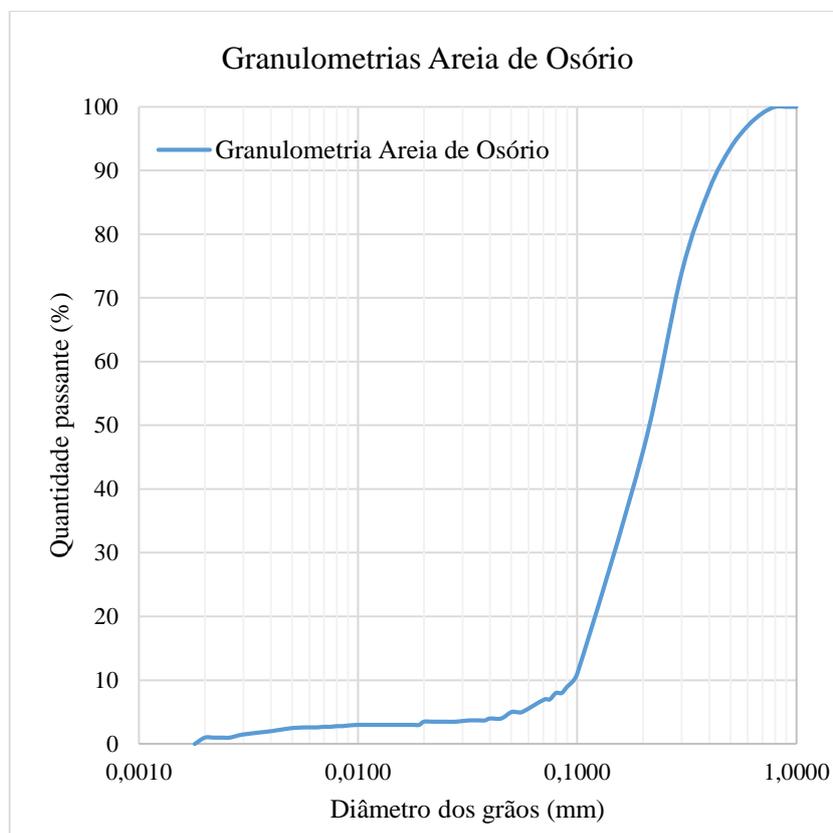


Fig. 4: Curva granulométrica da Areia de Osório. (Fonte: CONSOLI et al.,2018).

## 4 Métodos

### 4.1 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples e pulso ultrassônico, foram moldados 24 tipos diferentes de corpos de prova (por tempo de cura) com dimensões de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Os fatores que foram variados nas misturas estão explicitados na **Tabela 1** deste documento, em: “Fatores Controláveis”. Os materiais, após a preparação e a secagem dos mesmos, eram misturados e moldados em três camadas para que se obtivesse uma melhor distribuição do material no corpo de prova. Após a moldagem, os corpos de prova eram pesados, medidos e armazenados para 7 ou 28 dias de cura antes da realização dos ensaios. Mostrou-se interessante a avaliação dos resultados com diferentes tempos de cura, pois tempos de cura maiores permitem a combinação de maiores quantidades de cal com a pozolana, melhorando as propriedades mecânicas dos corpos de prova (MASSAZA, 2004, p488).

A **Tabela 4** contempla as 24 misturas diferentes de corpos de prova que foram submetidas aos ensaios de compressão simples e aos ensaios de pulso ultrassônico. Foram moldadas duplicatas de cada um dos tipos de corpos de prova, totalizando 96 para esta pesquisa. Os mesmos eram moldados de maneira individual e aleatória, tentando, desse modo, minimizar a influência de possíveis ruídos nos resultados.

Tipo de Corpo de Prova	gD [kN/m <sup>3</sup> ]	CC [%]	VM [%]	Granulometria	Tempo Cura [dias]
1	15,5	4	10	A	7; 28
2	15,5	4	10	B	7; 28
3	15,5	4	10	C	7; 28
4	15,5	4	30	A	7; 28
5	15,5	4	30	B	7; 28
6	15,5	4	30	C	7; 28
7	17,5	4	10	A	7; 28
8	17,5	4	10	B	7; 28
9	17,5	4	10	C	7; 28
10	17,5	4	30	A	7; 28
11	17,5	4	30	B	7; 28
12	17,5	4	30	C	7; 28
13	15,5	7	10	A	7; 28
14	15,5	7	10	B	7; 28
15	15,5	7	10	C	7; 28
16	15,5	7	30	A	7; 28
17	15,5	7	30	B	7; 28
18	15,5	7	30	C	7; 28
19	17,5	7	10	A	7; 28
20	17,5	7	10	B	7; 28
21	17,5	7	10	C	7; 28
22	17,5	7	30	A	7; 28
23	17,5	7	30	B	7; 28
24	17,5	7	30	C	7; 28

Tab. 4: Tipos de misturas para os ensaios com 7 e 28 dias de cura. (Fonte: Elaborado pelo autor).

#### ***4.2 Ensaio de Compressão Axial Simples***

Os ensaios de compressão simples seguiram os padrões determinados pela ASTM D5102 (ASTM 2004) com deformação controlada a uma taxa de 1,14 mm/min. A fim de se reduzir o efeito da sucção, os corpos de prova eram submersos em água 24 horas antes dos ensaios (CONSOLI et al. 2011). A **Tabela 4** contempla as misturas dos corpos de prova que foram submetidas aos ensaios de compressão simples nesta pesquisa.

#### ***4.3 Ensaio de Pulso Ultrassônico***

Os ensaios de pulso ultrassônico seguiram os padrões determinados pela ASTM D2845 (ASTM 2008) para a aquisição dos parâmetros elásticos dos corpos de prova e, desse forma, obter uma estimativa do módulo cisalhante a micro deformações ( $G_0$ ) dos mesmos (SANTAMARINA et al., 2001, p. 217). Os ensaios foram realizados por um instrumento PundiLab<sub>(+)</sub> que, por meio de uma vibração induzida de dois transdutores (250 kHz), um em cada extremidade dos corpos de prova, permitia a medição dos tempos de propagação de ondas de cisalhamento. Os dados obtidos eram inseridos na **Equação 1**, à qual é válida para meios elásticos, isotrópicos e homogêneos, para obtenção do  $G_0$ .

Os corpos de prova utilizados para os ensaios de pulso ultrassônico foram os mesmos utilizados nos ensaios de compressão axial simples, visto que o ensaio de pulso ultrassônico os mantinha intactos.

$$G_0 = \rho \cdot v^2 \quad \text{Eq. (1)}$$

Sendo:

- $G_0$ : Rigidez do Corpo de Prova;
- $\rho$ : Massa específica do Corpo de Prova;
- $v$ : Velocidade da onda cisalhante.

## 5 Resultados

Com os valores obtidos após os ensaios de Resistência a Compressão Simples (RCS) e de Módulo Cisalhante Inicial ( $G_0$ ), é possível, conforme CONSOLI et al. (2018, 2019b), obter uma relação dessas variáveis resposta com o quociente entre porosidade e teor volumétrico de material ligante. A **Equação 2** abaixo mostra essa relação.

$$\eta/(Biv)^a = \frac{\left(\frac{V_{vazio}}{V_{total}}\right)}{\left(\frac{V_{cal} + V_{vidro}}{V_{total}}\right)^a} \quad \text{Eq. (2)}$$

Sendo:

- $V_{vazios}$ : Volume de vazios do Corpo de Prova;
- $V_{total}$ : Volume total do Corpo de Prova;
- $V_{cal}$ : Volume de cal utilizado na moldagem do Corpo de Prova;
- $V_{vidro}$ : Volume de vidro utilizado na moldagem do Corpo de Prova;
- $a$ : Expoente que melhor se ajusta a curva de RCS x  $\eta/(Biv)^a$  e  $G_0$  x  $\eta/(Biv)^a$ .

Diferentemente do proposto por CONSOLI et al. (2018), verificou-se que, por meio de análises gráficas, o melhor valor de “ $a$ ” para o ajuste da **Equação 2** foi de 1,00, e não de 0,28. Nesse sentido, os gráficos das **Figuras 5 e 6** apresentam, respectivamente, os resultados de resistência à compressão simples e módulo cisalhante inicial com relação ao parâmetro  $\eta/B_{iv}$ . Desses, é possível notar uma boa correlação entre RCS e o índice  $\eta/B_{iv}$  para os dois tempos de cura avaliados e considerando-se as três granulometrias de pó de vidro moído empregadas. Observa-se que quanto menor a porosidade e/ou maior o teor volumétrico de material ligante, maior é a resistência mecânica alcançada. As mesmas tendências são observadas para a correlação entre  $G_0$  e o parâmetro porosidade/teor volumétrico de ligante. Ademais, nota-se grande influência do tempo de cura sobre a resistência e a rigidez das misturas estudadas.

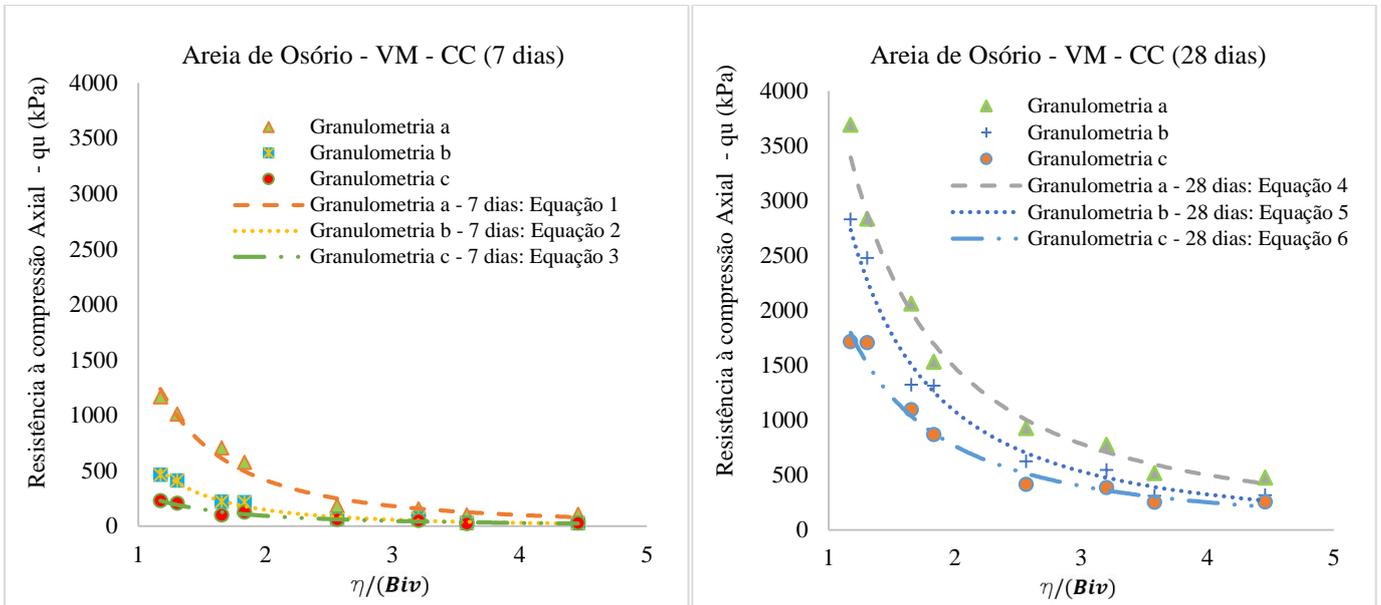


Fig. 5: Relação de RCS x  $\eta/(Biv)^a$  para 7 e 28 dias, sendo  $a = 1,00$ . (Fonte: Elaborado pelo autor).

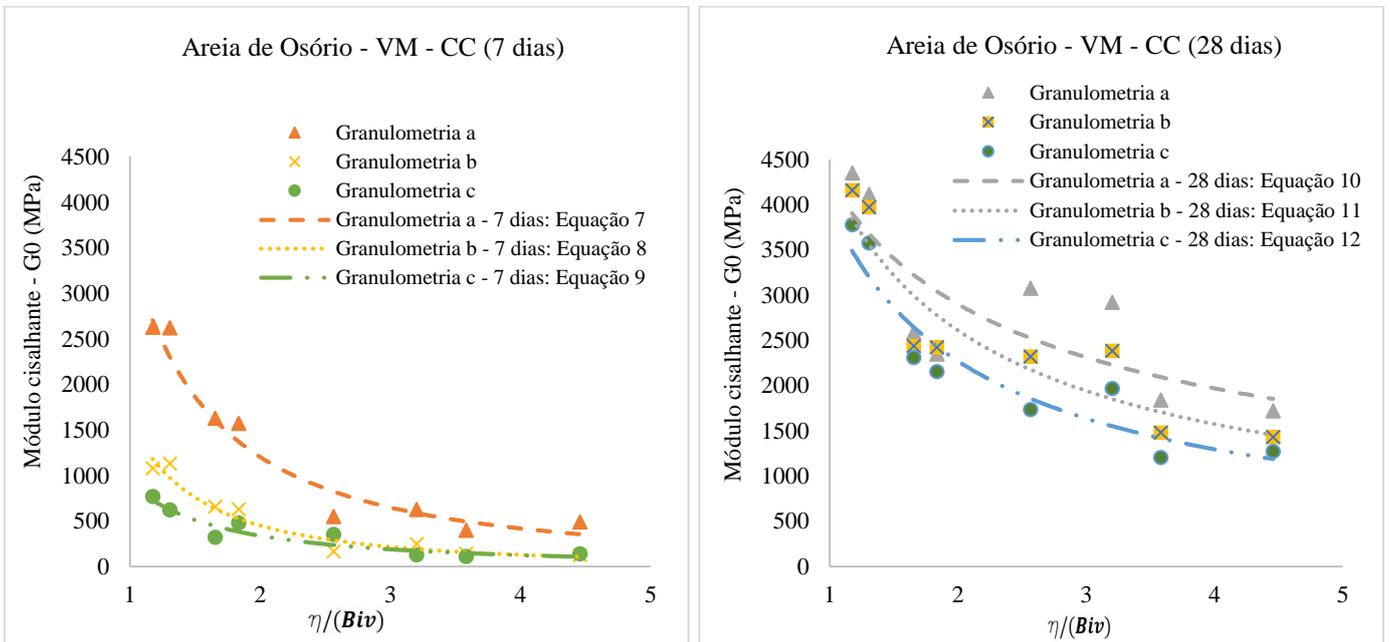


Fig. 6: Relação de  $G_0$  x  $\eta/(Biv)^a$  para 7 e 28 dias, sendo  $a = 1,00$ . (Fonte: Elaborado pelo autor).

A **Tabela 5**, abaixo, apresenta as equações das curvas ajustadas e exibidas nos gráficos das **Figuras 5 e 6**.

Equação		$R^2$	Unidade
1	$RCS = 1723,10. (\eta/Biv)^{-2,053}$	$R^2 = 0,965$	kPa
2	$RCS = 731,63. (\eta/Biv)^{-2,319}$	$R^2 = 0,964$	kPa
3	$RCS = 302,16. (\eta/Biv)^{-1,706}$	$R^2 = 0,939$	kPa
4	$RCS = 4364,70. (\eta/Biv)^{-1,561}$	$R^2 = 0,984$	kPa
5	$RCS = 3617,80. (\eta/Biv)^{-1,742}$	$R^2 = 0,974$	kPa
6	$RCS = 2324,00. (\eta/Biv)^{-1,601}$	$R^2 = 0,970$	kPa
7	$G_0 = 3458,90. (\eta/Biv)^{-1,524}$	$R^2 = 0,916$	MPa
8	$G_0 = 1580,10. (\eta/Biv)^{-1,810}$	$R^2 = 0,922$	MPa
9	$G_0 = 916,82. (\eta/Biv)^{-1,439}$	$R^2 = 0,863$	MPa
10	$G_0 = 4271,50. (\eta/Biv)^{-0,559}$	$R^2 = 0,656$	MPa
11	$G_0 = 4322,60. (\eta/Biv)^{-0,729}$	$R^2 = 0,841$	MPa
12	$G_0 = 3973,60. (\eta/Biv)^{-0,808}$	$R^2 = 0,885$	MPa

Tab. 5: Equações de 1 a 12 referentes às curvas de tendência dos gráficos das Figuras 5 e 6. (Fonte: Elaborado pelo autor).

## 6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com o objetivo de se analisar o efeito das variáveis controláveis na Resistência e na Rigidez dos Corpos de Prova, utilizou-se a abordagem estatística de análise fatorial do tipo  $2^k$ . Tal análise permite compreender os efeitos, individuais ou interativos, que mais influenciam no comportamento das variáveis resposta por meio de um programa experimental no qual os fatores controláveis são avaliados em dois níveis extremos para tratamentos executados de forma cruzada. Cabe ressaltar que a granulometria do vidro moído foi avaliada em três níveis. Ademais, os ensaios seguiram uma sequência de ensaios aleatórios e uma padronização da metodologia de preparação dos materiais, dos Corpos de Prova e dos ensaios (MONTGOMERY, 2009, p.162).

As **Tabelas 6 e 7** contemplam os resultados resumidos das análises de variância dos fatores controláveis sobre as variáveis respostas, a um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%. A primeira apresenta os resultados para resistência à compressão simples (RCS) e a segunda para o módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ).

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
CC (%)	1	145082	145082	0,59	0,449
VM (%)	1	10248047	10248047	41,34	0,000
Granulometria	2	2736458	1368229	5,52	0,007
Tempo Cura (dias)	1	10953665	10953665	44,19	0,000
Erro	42	10411777	247899		
Total	47	34495029			

Tab. 6: Tabela ANOVA com os efeitos individuais dos fatores controláveis em relação ao RCS. (Fonte: Elaborado pelo autor).

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
CC (%)	1	20429	20429	0,06	0,811
VM (%)	1	13557360	13557360	38,35	0,000
Granulometria	2	5156210	2578105	7,29	0,002
Tempo Cura (dias)	1	40214690	40214690	113,76	0,000
Erro	42	14846800	353495		
Total	47	73795489			

Tab. 7: Tabela ANOVA com os efeitos individuais dos fatores controláveis em relação ao  $G_0$ . (Fonte: Elaborado pelo autor).

A **Figura 7** apresenta os gráficos de Pareto dos efeitos padronizados, nos quais é possível identificar os fatores e interações significativos do ponto de vista estatístico, sendo esses os que cruzam a linha de referência. Conforme mostrado nos gráficos, o Tempo de Cura (dias), seguido pelo Teor de Vidro Moído (VM), bem como a interação entre essas duas variáveis, foram os que mais influenciaram no valor das variáveis respostas. O tempo de cura favorece o desenvolvimento das reações pozolânicas e, com isso, a precipitação de compostos ligantes hidratados. Isso implica maior resistência e rigidez das misturas. Além disso, quanto maior a quantidade de material pozolânico dentro da mistura, maior será a disponibilidade desse para reação e, portanto, a tendência é que haja maior formação de ligante, o que contribuiu para o ganho de resistência e rigidez. Tal tendência explica o notável efeito da interação entre teor de vidro moído e tempo de cura (BE) sobre a resistência e a rigidez das misturas.

A variação da granulometria também se mostrou como significativa para as variáveis respostas, de acordo com o esperado. Granulometrias de pó de vidro moído mais finas possuem uma maior superfície específica e, por consequência disso, permitem uma quantidade maior de reações com a cal de carbureto. No entanto, se o objetivo for simplesmente atingir maiores valores de resistência e/ou de rigidez, pode-se pensar como

alternativa em, ao invés de se executar moagens mais finas, simplesmente aumentar o teor de vidro dentro da mistura, visto que esta variável se mostrou muito mais significativa do que a granulometria.

O Peso Aparente Seco foi o terceiro fator que mais influenciou nos valores de resistência e rigidez obtidos após os ensaios. Nesse sentido, uma maior compactação dos Corpos de Prova aumenta o intertravamento entre as partículas e, conseqüentemente, o atrito entre os grãos da mistura, o que favorece o incremento na resistência e a rigidez dos espécimes ensaiados. Além disso, uma maior proximidade entre as partículas da mistura proporciona um ambiente mais favorável para o desenlace das reações pozolânicas, o que explica o grande efeito das interações entre peso aparente seco com teor de pó de vidro moído (AB) e com o tempo de cura (AE).

A Cal de Carbureto (CC) não teve uma influência relevante para a Resistência, embora significativa do ponto de vista estatístico, seu efeito foi ínfimo se comparado ao dos outros fatores controláveis. Já em relação à Rigidez, mostrou-se como um fator não significativo considerando-se o nível de significância de 5%. Tanto para a RCS, quanto para o  $G_0$ , esse fenômeno pode ser justificado pela falta de tempo e/ou temperatura suficiente para a reação pozolânica consumir toda a cal presente na mistura. Outra explicação pode ser o fato de que o solo utilizado para esta pesquisa foi de natureza arenosa, um material inerte considerando-se as condições do estudo. Logo, o solo não reagiu com a cal de carbureto como um solo argiloso reagiria, por exemplo.

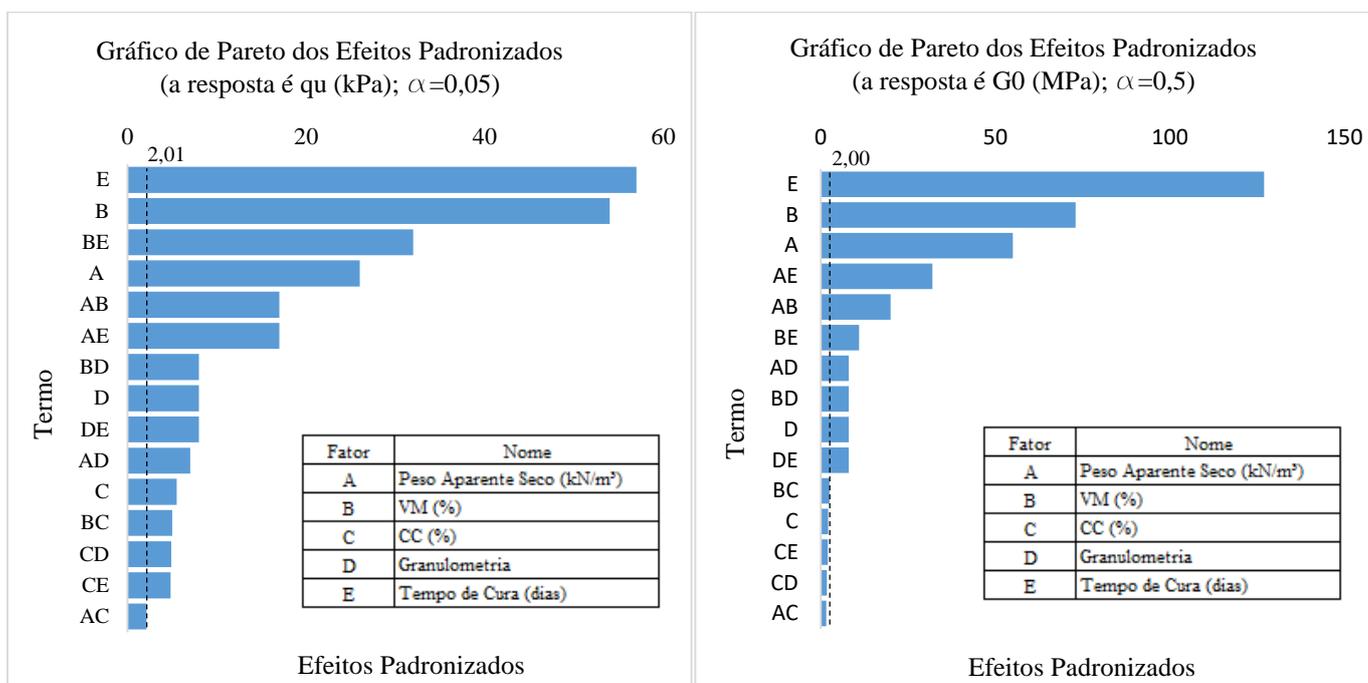


Fig. 7: Gráficos de Pareto dos Efeitos Padronizados das variáveis respostas. (Fonte: Elaborado pelo autor).

## 7 Conclusão

As análises dos resultados dos ensaios de resistência e de rigidez possibilitaram as seguintes afirmações:

- As diferentes granulometrias de pó de vidro moído influenciaram de forma significativa os resultados obtidos nos ensaios, sendo a mais fina responsável pelos maiores valores de resistência e rigidez obtidos em laboratório. Este resultado é compatível de acordo com o esperado, onde maiores valores de Superfície Específica (SSA) faz com que as partículas possuem maiores áreas de contato para o desenvolvimento das reações pozolânicas.
- No entanto, os resultados mostraram que a granulometria não foi o fator mais significativo na variação da resistência e da rigidez dos corpos de prova, mas sim, o tempo de cura dos mesmos. O segundo fator mais significativo na variação das variáveis respostas foi o teor de vidro moído (VM).
- O teor de cal de carbureto (CC) foi considerado como o fator menos significativo, sendo que para as respostas de rigidez, este fator foi considerado como não significativo.
- Com exceção do teor de cal de carbureto (CC), a granulometria, objetivo principal dessa pesquisa, mostrou-se com significância muito menor que os outros três fatores controláveis: Tempo de cura, teor de vidro moído e peso aparente seco.
- Por fim, dentro dos limites experimentais, obtiveram-se boas correlações entre a resistência e a rigidez das misturas estudadas e o índice  $\eta/(Biv)$ .

## 8 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D2845**: standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. Philadelphia, 2017.

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

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM (CEMPRE). Associação sem Disponível em: [www.cempre.org.br](http://www.cempre.org.br). Acesso em: julho de 2019.

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.; 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), 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, 2017.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; SACCO R. L. **Bearing capacity of footings on an artificially cemented layer above weak foundation soil**. ICE Publishing, p. 2, 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, 2018.

CONSOLI, N. C.; BITTAR, E. J. M.; SAMANIEGO, R. 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, 2019a.

CONSOLI, N.C.; CARRETTA M. S.; LEON, H. N.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; TOMASI L. F. **Strength and Stiffness of Ground Waste Glass-Carbide Lime Blends**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 31, 2019b.

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.

M CALKINS. **Materials for Sustainable Sites: A Complete Guide to the Evaluation, Selection and Use of Sustainable Construction Materials**, p. 104, 2008.

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

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.

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