

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

**Análise da resistência, rigidez e durabilidade de misturas de vidro  
moído e cal de carbureto**

**Brenda Rielli Spier Correa**

Porto Alegre  
2020

BRENDA RIELLI SPIER CORREA

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA, RIGIDEZ E DURABILIDADE  
DE MISTURAS 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.

Porto Alegre  
2020

### CIP - Catalogação na Publicação

Spier Correa, Brenda Rielli  
Análise da resistência, rigidez e durabilidade de  
misturas de vidro moído e cal de carbureto / Brenda  
Rielli Spier Correa. -- 2020.  
112 f.  
Orientadora: Nilo Cesar Consoli.

Coorientadora: João Rodrigo Guerreiro Mattos.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,  
BR-RS, 2020.

1. estabilização química. 2. vidro moído. 3. cal de  
carbureto. 4. granulometria. I. Consoli, Nilo Cesar,  
orient. II. Guerreiro Mattos, João Rodrigo, coorient.  
III. Título.

**BRENDA RIELLI SPIER CORREA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA, RIGIDEZ E DURABILIDADE  
DE MISTURAS DE VIDRO MOÍDO E CAL DE CARBURETO**

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

Porto Alegre, 20 de março de 2020

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

**Prof. João Rodrigo Guerreiro Mattos**  
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Co-orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Nuno Miguel Cordeiro Cristelo (UTAD)**  
Doutor pela Newcastle University

**Prof. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)**  
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Cesar Alberto Ruver (UFRGS)**  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

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

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço aos meus pais e a minha avó, pelo apoio, motivação e compreensão, durante a realização do mestrado. Agradeço também, ao meu namorado Guilherme pelo apoio na reta final da realização desse trabalho.

Agradeço imensamente o professor e orientador Nilo Consoli por toda orientação, apoio e transmissão de conhecimentos, possibilitando que esse trabalho acontecesse. Sou extremamente grata também ao professor João Rodrigo Guerreiro Mattos por toda transmissão de conhecimentos desde a graduação, pela orientação e pelo auxílio para a realização dos ensaios feitos na Univates.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS que através da transmissão de seus conhecimentos durante as aulas, contribuíram de forma significativa para minha formação.

Aos colegas que se transformaram em grandes amigos ao longo dos dois anos de mestrado, Laís V., Aziz, Guilherme, Lucas, Lívio e Lukas, pelas horas de estudos, desenvolvimento de pesquisas, mas que também participaram de momentos de descontração e fizeram esse período da minha vida mais especial. Agradeço também a Helena Leon, que desde o primeiro dia sempre me ajudou e se tornou, além de *roommate*, uma grande amiga. À Mariana Carretta, que me forneceu as informações sobre o mestrado, antes mesmo de tudo começar. E ao doutorando Hugo pela ajuda no final do mestrado.

Agradeço de forma geral a todos membros do LEGG que acabei não citando aqui, por toda a ajuda e momentos de descontração.

Aos colaboradores do LATEC da Univates que foram sempre muito solícitos e me prestaram total apoio durante a realização dos ensaios, em especial ao laboratorista Vianeí.

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

Ao CNPq pela bolsa de estudos, que permitiu a minha dedicação exclusiva ao mestrado nestes dois anos.

Por fim, agradeço a todos não citados acima que, de alguma forma, contribuíram para realização desta pesquisa.

## RESUMO

CORREA, B. R. S. **Análise da resistência, rigidez e durabilidade de misturas de vidro moído e cal de carbureto.** 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Ao longo dos anos, a preocupação com os problemas de caráter ambiental tem aumentado e a busca por soluções sustentáveis se faz cada vez mais necessária. Nesse sentido, a demanda por materiais virgens, em especial na construção civil, origina alguns problemas como o esgotamento de jazidas e erosão do solo em rios. A atividade de caráter essencialmente extrativo, a qual acarreta na modificação da área de forma irreversível. A reciclagem surge como uma forma de minimizar esses problemas. Nesse contexto, a presente pesquisa tem como proposta a utilização de dois resíduos, o vidro de garrafas proveniente do lixo doméstico e o rejeito da produção de gás acetileno, a cal de carbureto. Com o objetivo de compor um material que pode ser utilizado como substituto da areia nas mais diversas aplicações geotécnicas como melhoramento da camada superficial em estacas e sub-base de pavimentos. Para a realização do estudo, foram definidas três granulometrias – contínua, uniforme e descontínua – de uma areia siltosa (10, 20 e 30% de finos passante na peneira de abertura 0,075 mm) composta apenas por vidro moído e, posteriormente, estabilizada com três diferentes teores de cal de carbureto (5, 8 e 11%). A cal de carbureto juntamente com a fração fina de vidro moído, em um ambiente suficientemente hidratado, resulta em reações pozolânicas devido à grande quantidade de sílica presente na composição do vidro que reage com o hidróxido de cálcio da cal de carbureto. Tais reações, permitem que haja cimentação entre os grãos pela produção de géis de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminatos de cálcio hidratado (C-A-H), proporcionando melhoras nas propriedades mecânicas do material. A fim de se verificar o comportamento desse material, ensaios de compressão simples, rigidez e de durabilidade foram executados para realizar as análises. Os resultados mostram que o efeito das variáveis controladas estudadas é satisfatório para obtenção de melhoras significativas. Sendo o teor de finos passante na peneira nº200 bastante influente em todos os ensaios, podendo-se observar que ao adicionar maiores teores de pó de vidro, maior é a influência deste nos resultados. O índice ajustado  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  mostrou-se adequado para a previsão do comportamento da mistura nos ensaios aqui estudados.

**Palavras-chave:** *vidro moído; cal de carbureto; estabilização química; granulometria.*

## ABSTRACT

CORREA, B. R. S. **Análise da resistência, rigidez e durabilidade de misturas de vidro moído e cal de carbureto.** 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Over the years, concern about environmental problems has increased and the search for sustainable solutions is increasingly necessary. In this sense, the demand for virgin materials, especially in civil construction, causes some problems such as depletion of deposits and soil erosion in rivers. The activity of an essentially extractive nature, which causes the irreversible modification of the area. Recycling appears as a way to minimize these problems. In this context, the present research proposes the use of two residues, the bottle glass from domestic waste and the rejection of the production of acetylene gas, carbide lime. In order to compose a material that can be used as a substitute for sand in the most diverse geotechnical applications, such as, improving the surface layer in piles and pavement subbase. For carrying out the study, three granulometries were defined - continuous, uniform and discontinuous - of silty sand (10, 20 and 30% of fine through the 0.075 mm opening sieve) composed only of ground glass and, later, stabilized with three different levels of carbide lime (5, 8 and 11%). Carbide lime together with the fine fraction of ground glass, in a sufficiently hydrated environment, results in pozzolanic reactions due to the large amount of silica present in the glass composition that reacts with the calcium hydroxide in the carbide lime. Such reactions allow cementation between the grains by the production of hydrated calcium silicate gels (C-S-H) and hydrated calcium aluminates (C-A-H), providing improvements in the mechanical properties of the material. In order to verify the behavior of this material, unconfined compressive strength, stiffness and durability tests were performed to perform the analyzes. The results show that the effect of the controlled variables studied is satisfactory to obtain significant improvements. Since the content of fines passing through the No. 200 sieve is very influential in all tests, it can be seen that when adding higher levels of glass powder, the greater the influence of this in the results. The adjusted porosity/binder index  $\eta/(B_{iv})^{0.28}$  proved to be adequate to predict the behavior of the mixture in the tests studied here.

**Keywords:** *ground glass; carbide lime; chemical stabilization; granulometry.*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA .....	11
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	12
1.2.1	Objetivo geral.....	12
1.2.2	Objetivos específicos .....	12
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	15
2.1.1	Estabilização mecânica .....	16
2.1.2	Estabilização física.....	17
2.1.3	Estabilização química .....	17
2.1.3.1	Reações pozolânicas.....	17
2.1.3.2	Solo-cimento.....	19
2.1.3.3	Solo-cal.....	22
2.1.3.4	Solo-cal-pozolana .....	24
2.2	VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO SOLO-CAL-POZOLANA.....	25
2.2.1	Efeito da cal .....	25
2.2.2	Efeito da pozolana.....	25
2.2.3	Efeito da compactação da mistura .....	26
2.2.4	Efeito da umidade da mistura na moldagem.....	27
2.2.5	Efeito do tempo de cura .....	28
2.2.6	Efeito da relação entre porosidade e teores volumétricos de cal e ligante	29
2.3	UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	32
2.3.1	Vidro .....	32

2.3.1.1	Estrutura do vidro .....	32
2.3.1.2	Principais produtos de vidro consumidos e fabricados no Brasil .....	35
2.3.1.3	Reciclagem do vidro .....	35
2.3.2	Cal de carbureto .....	37
2.4	PROJETO DE EXPERIMENTOS.....	38
2.4.1	Projeto Fatorial 2 <sup>k</sup> .....	38
2.4.2	Projeto composto de segunda ordem (PCSO).....	39
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
3.1	MATERIAL .....	42
3.1.1	Vidro moído .....	42
3.1.2	Cal de carbureto .....	45
3.2	MÉTODOS .....	48
3.2.1	Abordagem experimental.....	48
3.2.1.1	Preparo e dosagem das misturas.....	49
3.2.1.2	Definição dos níveis dos fatores controláveis.....	52
3.2.1.3	Resumo da dosagem.....	54
3.2.2	Procedimento dos ensaios.....	55
3.2.2.1	Moldagem dos corpos de prova.....	55
3.2.2.2	Cura dos corpos de prova .....	56
3.2.2.3	Resistência à compressão não confinada .....	57
3.2.2.4	Durabilidade .....	58
3.2.2.5	Ensaio de Pulso Ultrassônico .....	58
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>60</b>
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	60
4.1.1	Efeito da cal .....	62
4.1.2	Efeito do teor de finos.....	63
4.1.3	Efeito da Porosidade .....	65

4.1.4	Projeto Composto de Segunda Ordem para o ensaio de resistência à compressão simples.....	65
4.1.5	Experimento Fatorial Completo para análise da influência da granulometria.....	67
4.1.6	Resistência à compressão simples em função do índice $\eta/(L_{iv})^k$ .....	69
4.1.7	Resistência à compressão simples em função do índice $\eta/(B_{iv})^k$ .....	72
4.2	RIGIDEZ INICIAL.....	74
4.2.1	Projeto Fatorial $2^k$ para o ensaio de rigidez .....	75
4.2.2	Rigidez em função do índice $\eta/(L_{iv})^k$ .....	76
4.2.3	Rigidez em função do índice $\eta/(B_{iv})^k$ .....	77
4.3	DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM .....	77
4.3.1	Projeto Fatorial $2^k$ para o ensaio de durabilidade.....	80
4.3.2	Durabilidade em função do índice $\eta/(B_{iv})^k$ .....	83
4.3.3	Relação PMA x $G_0$ .....	84
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>86</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	86
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>90</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>96</b>
	<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>99</b>
	<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Estado físico de misturas granulométricas (YODER; WITCZAK, 1975).....	17
Figura 2.2: Relação entre PMA e $G_0$ .....	22
Figura 2.3: Relação $\eta$ x $q_u$ para um solo estabilizado com cal (a) aos 28 dias e (b) aos 90 dias (CONSOLI et al., 2009a).....	27
Figura 2.4: Ensaio de compactação Proctor .....	28
Figura 2.5: Curva de dosagem para solo-cimento (FOPPA, 2005).....	30
Figura 2.6: Normalização de $q_u$ com $\eta/C_{iv}$ ajustado para todos os solos granulares estudados (CONSOLI et al., 2017). .....	31
Figura 2.7: Tetraedro sílica-oxigênio: unidade básica da rede de sílica (baseado em ISAIA, 2007).....	33
Figura 2.8: Representação bidimensional do cristal de sílica (a), e da sílica vítrea (b) (baseado em ISAIA, 2007) .....	34
Figura 2.9: Representação esquemática das posições dos íons de um vidro de carbonato de sódio (baseado em ISAIA, 2007) .....	35
Figura 2.10: Fatorial $2^k$ – Experimento de três fatores (RIBEIRO; CATEN, 2000).....	39
Figura 2.11: PSCO – Experimento de três fatores (RIBEIRO; CATEN, 2000). .....	40
Figura 3.1: Equipamentos utilizados na moagem do vidro .....	42
Figura 3.2: Distribuição granulométrica obtida em cada padrão de moagem.....	43
Figura 3.3: Distribuição granulométrica do VM <sub>200</sub> .....	44
Figura 3.4: Picnômetro com capacidade de 500 ml utilizado no ensaio de peso específico real dos grãos (Gs).....	44
Figura 3.5: Difratoograma do VM <sub>200</sub> .....	45
Figura 3.6: Distribuição granulométrica da cal de carbureto .....	47
Figura 3.7: MEV da cal de carbureto (SALDANHA <i>et al.</i> , 2018).....	48
Figura 3.8: Curvas granulométricas adotadas no estudo .....	50
Figura 3.9: pHmetro de bancada utilizado para aferição do pH das misturas.....	51
Figura 3.10: Ensaio de compactação para o vidro de granulometria contínua com 30% de finos passantes na peneira n° 200 (GC – 30% VM <sub>200</sub> ) .....	52
Figura 3.11: Resultado obtido para o método do pH de determinação do mínimo teor de cal	53
Figura 3.12: Molde tripartido de dimensões 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura .....	56
Figura 3.13: Corpos de prova acondicionados em câmara úmida.....	57

Figura 3.14: Execução do ensaio utilizando equipamento de ultrassom.....	59
Figura 4.1: Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal.....	62
Figura 4.2: Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de finos .....	64
Figura 4.3: Variação da resistência à compressão simples em relação a porosidade.....	65
Figura 4.4: Gráfico de efeitos principais referente ao ensaio de $q_u$ para a GC.....	66
Figura 4.5: Gráfico de efeitos principais referente ao ensaio de $q_u$ para a GU .....	66
Figura 4.6: Gráfico de efeitos principais referente ao ensaio de $q_u$ para a GD .....	66
Figura 4.7: Gráfico de efeitos principais referente ao ensaio de $q_u$ .....	68
Figura 4.8: Gráfico de interações .....	68
Figura 4.9: Relação entre $q_u$ e $\eta/(L_{iv})^{0,05}$ para a GU .....	69
Figura 4.10: Relação entre $q_u$ e $\eta/(L_{iv})^{0,05}$ para a GC .....	70
Figura 4.11: Relação entre $q_u$ e $\eta/(L_{iv})^{0,05}$ para a GD .....	71
Figura 4.12: Relação entre $q_u$ e $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ para a GU.....	73
Figura 4.13: Relação entre $q_u$ e $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ para a GC .....	73
Figura 4.14: Relação entre $q_u$ e $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ para a GD.....	74
Figura 4.15: Gráfico de efeitos principais referente ao ensaio de $G_0$ .....	75
Figura 4.16: Gráfico de Pareto referente ao ensaio de $G_0$ .....	75
Figura 4.17: Relação entre $G_0$ e $\eta/(L_{iv})^{0,05}$ para a GC .....	76
Figura 4.18: Relação entre $G_0$ e $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ para a GC .....	77
Figura 4.19: Perda de massa individual por ciclo para o ensaio de durabilidade.....	79
Figura 4.20: Perda de massa acumulada para o ensaio de durabilidade.....	80
Figura 4.21: Gráfico de efeitos principais referente ao ensaio de PMA.....	81
Figura 4.22: Gráfico de Pareto referente ao ensaio de PMA.....	81
Figura 4.23: Amostras antes do início do ensaio de durabilidade e após os 12 ciclos.....	82
Figura 4.24: Relação entre PMA e $\eta/(B_{iv})^k$ .....	83
Figura 4.25: Relação entre PMA e $G_0$ para os espécimes estudados .....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Resumo das características do pó de vidro.....	45
Tabela 3.2: Composição química das cales de carbureto .....	46
Tabela 3.3: Resumo das características da cal de carbureto.....	47
Tabela 3.4: Resumo das variáveis controladas e seus níveis.....	54
Tabela 3.5: Misturas de vidro moído-cal de carbureto para ensaio de compressão simples aos 28 dias.....	54
Tabela 3.6: Resumo das variáveis controladas nos ensaios de durabilidade e rigidez e seus níveis .....	55
Tabela 3.7: Misturas de vidro moído-cal de carbureto para os ensaios de durabilidade e rigidez aos 28 dias .....	55
Tabela 4.1: Resultados do ensaio de compressão simples .....	61
Tabela 4.2: Resultados para o ensaio de rigidez inicial.....	74
Tabela 4.3: Resultados para o ensaio de durabilidade.....	78

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Fases do estudo.....	41
----------------------------------	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $A_{cp}$  – Área da seção transversal do corpo de prova
- $B_{iv}$  – Teor volumétrico de pozolana + cal
- $C_{iv}$  – Teor volumétrico de Cimento
- $F$  – Carga de Ruptura
- $G_0$  – Módulo cisalhante inicial / Rigidez inicial
- $G_s$  – Densidade real dos grãos
- $L_{iv}$  – Teor volumétrico de cal
- $q_u$  – Resistência à Compressão Simples
- $V_c$  - Volume de cimento
- $V_{total}$  - Volume total
- $V_v$  - Volume de vazios
- $w$  – Teor de umidade
- $\gamma_d$ – Peso específico aparente seco
- $\gamma_s$ – Peso específico real dos grãos
- $\eta$  – Porosidade
- $t_s$  – Tempo de deslocamento da onda cisalhante
- $t_p$  – Tempo de deslocamento da onda de compressão
- $\bar{X}$  – Média
- $\sigma$  – Desvio padrão

## LISTA DE SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ASTM – American Society For Testing And Materials  
C-A-H – Aluminato de Cálcio Hidratado  
CC – Cal de carbureto  
CP – Corpo de prova  
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado  
CV – Coeficiente de variação  
DRX – Difração de Raios-X  
GC – Granulometria Contínua  
GD – Granulometria Descontínua  
GU – Granulometria Uniforme  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
NBR – Norma Brasileira  
PCA – Portland Cement Association  
PCSO – Projeto composto de segunda ordem  
PMA – Perda de Massa Acumulada  
PMI – Perda de Massa Acumulada  
TRB – Transportation Research Board  
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
UNIVATES – Universidade do Vale do Taquari  
VM – Vidro Moído  
VM<sub>200</sub> – Vidro Moído passante na peneira nº 200

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A crescente necessidade de materiais virgens para suprir a demanda da indústria e da atividade humana torna cada vez maior a produção de subprodutos e resíduos. Em torno dessa questão, surge a preocupação de se obter um desenvolvimento sustentável. No qual a reciclagem é uma forma de dar um novo destino aos resíduos, com o objetivo de diminuir a utilização de materiais não renováveis, o impacto ambiental e o custo de descarte em aterros de resíduos.

O vidro soda-cal é o principal constituinte dos recipientes de vidro e corresponde a cerca de 85% da quantidade total de vidro produzido anualmente em todo o mundo (SCHMITZ et al., 2011; MOHAJERANI et al., 2017). No entanto, as taxas de reciclagem desse material variam em todo o mundo, sendo cerca de 90% na União Europeia, 95% na Suíça, 40% nos Estados Unidos e 45% no Brasil (USEPA, 2015; BICCA NETO, 2015).

O vidro moído vem se mostrando um material promissor em misturas de concreto e existem alguns estudos para aplicações rodoviárias. Suas características foram avaliadas por diversos autores (SHAO et al., 2000; OOI et al., 2008; YOUNUS ALI et al., 2011; DISFANI et al., 2011; 2012; IMTEAZ et al., 2012; CHEN et al., 2020) que comprovam o seu potencial de utilização em atividades de engenharia geotécnica sendo uma alternativa ao agregado natural.

A produção de cimento Portland emite 5% a 7% do CO<sub>2</sub> responsável pelo aquecimento global (SINGH; MIDDENDORF, 2020). Nesse sentido, novos materiais cimentícios com um viés mais sustentável se fazem necessários, sendo menos nocivos ao meio ambiente. Desse modo, materiais cimentícios a base de pozolanas juntamente com o hidróxido de cálcio minimizam a emissão dos gases responsáveis pelo efeito estufa e podem ser uma alternativa parcial ao cimento Portland na indústria da construção. Visto que são agentes cimentantes produzidos principalmente pelo uso de matérias-primas secundárias, como cinzas volantes, metacaulim e argilas calcinadas.

Consoli et al. (2018, 2019) avaliaram a possibilidade de utilizar o vidro residual fino como material pozolânico, uso este que é possível devido às características físico-químicas do vidro finamente moído, com estrutura amorfa, alta superfície específica e elevado teor de sílica. Juntamente com a cal de carbureto, resíduo da produção de gás acetileno, cujas características como alta alcalinidade e quantidade de hidróxido de cálcio tornam o material viável para reagir com materiais pozolânicos (SALDANHA *et al.*, 2018).

Nesse sentido, o pó de vidro tem sido estudado como pozolana artificial em misturas com hidróxido de cálcio para compor um tipo de agente cimentante. Visto que o pó de vidro é uma fonte de sílica em estado amorfo que quando combinado com a cal, em um meio hidratado, pode se tornar um material cimentante eficiente gerando ganhos de resistência, rigidez e durabilidade.

Desse modo, o presente trabalho propõe uma análise das propriedades mecânicas de diferentes granulometrias de vidro moído com presença de finos (passante na peneira nº 200), juntamente com a cal de carbureto, a fim de obter melhores resultados mecânicos do material por meio das reações de cimentação que ocorrem entre os dois materiais. E com isso, viabilizar a utilização desses resíduos em obras geotécnicas.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Foram definidos previamente os objetivos gerais da pesquisa a serem atingidos e, para tal, nos objetivos específicos são apresentados os tópicos essenciais.

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliação do comportamento mecânico, em termos de resistência, rigidez inicial e durabilidade de misturas de vidro moído em diferentes granulometrias com diversos teores de cal de carbureto.

### 1.2.2 Objetivos específicos

A fim de alcançar o objetivo principal, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Efetuar uma análise sobre os efeitos, do tipo de granulometria, do peso específico aparente seco, do teor de cal e do teor de finos no

comportamento das misturas em termos de resistência à compressão simples;

- b) avaliar os efeitos do peso específico aparente seco, do teor de cal e do teor de finos no comportamento das misturas em termos de rigidez inicial e durabilidade;
- c) quantificar estatisticamente a influência das variáveis controladas de interesse (tipo de granulometria, peso específico aparente seco, teor de cal e teor de finos) em relação as variáveis resposta (resistência à compressão simples, rigidez e durabilidade).
- d) verificar a possibilidade de correlação entre as variáveis resposta – resistência à compressão simples, rigidez e durabilidade – e a relação entre porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/Liv^k$ ) e relação entre porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/Biv^k$ ).

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos de acordo com as etapas realizadas na pesquisa:

- a) Capítulo 1 – apresenta uma breve introdução, na qual são expostos o problema e a relevância da pesquisa e, ainda, são definidos os objetivos gerais e específicos da mesma;
- b) Capítulo 2 - constitui-se em uma revisão bibliográfica acerca dos principais aspectos abordados no estudo. Este capítulo contém uma visão geral sobre solos estabilizados, as variáveis determinantes em suas características, a utilização de resíduos na construção e o projeto de experimentos;
- c) Capítulo 3 – apresenta os materiais empregados na pesquisa, bem como suas caracterizações e a descrição do programa experimental utilizado para o desenvolvimento da pesquisa;
- d) Capítulo 4 – expõe os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais das misturas de vidro-cal de carbureto e, ainda, é realizada a análise dos resultados;

- e) Capítulo 5 – destaca os principais resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve revisão acerca de estabilização de solos, visto que é o material que mais se assemelha ao aqui estudado, e também sobre as variáveis determinantes no comportamento solo-cal-pozolana, utilização de resíduos na construção civil e projeto de experimentos.

### 2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O solo é o material da construção civil mais abundante e comum. Em obras de terraplenagem e pavimentação, faz parte do subleito, sub-base, em alguns casos da base e até mesmo do revestimento primário. Quando as características dos solos locais não apresentam os requisitos exigidos para executar obras com segurança, o engenheiro pode adotar algumas medidas (MEDINA, 1987 *apud* VIZCARRA, 2010):

- a) evitar ou contornar o terreno ruim;
- b) remover o solo ruim e substituí-lo por outro de qualidade melhor;
- c) projetar a obra para o solo com pouco suporte de fundação;
- d) estabilizar o solo existente.

Sem pormenorizar, a estabilização do solo consiste na alteração de alguma ou algumas das propriedades originais do mesmo, objetivando o melhoramento do seu comportamento geotécnico. Para isso, podem ser realizados tratamentos artificiais por meios mecânicos, físicos, químicos ou a combinação destes, fazendo o solo resistir a agentes exteriores como carregamentos e ações climáticas. Para Ingles e Metcalf (1972), estabilização de solos é, basicamente, alterar as propriedades do solo para satisfazer as necessidades específicas de engenharia. As principais propriedades, as quais devem-se ter maior preocupação, são: estabilidade de volume, permeabilidade, resistência e durabilidade.

### 2.1.1 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica é um método que busca melhorar a qualidade do solo através de um rearranjo dos grãos como, por exemplo, por meio de compactação ou corrigindo a composição granulométrica (CRISTELO, 2001).

Via de regra, a solução mais simples é a compactação dos solos, porém em solos mal graduados a remoção dos vazios por meio de compactação é muito reduzida. Tais limitações podem ser resolvidas através da correção granulométrica do solo. Que consiste na obtenção de um material de maior estabilidade em relação ao solo de origem, com uma mistura homogênea de dois ou mais solos. Ou seja, alteram-se as propriedades do solo adicionando ou retirando partículas do mesmo, com o objetivo de obter um material adequado para cada caso particular e sua posterior aplicação (VIZCARRA, 2010; CRISTELLO, 2001).

Atentando-se a isso, alguns fatores influenciam o comportamento da composição granulométrica, dentre eles a natureza da partícula, visto que a mesma deve apresentar resistência para não sofrer alterações indesejáveis e a estabilização da mistura deve tender a densificação máxima, sendo essa, resultado do melhor arranjo de partículas e, assim, obtendo uma melhor distribuição dos esforços (ARRIVABENI, 2017).

Para Yoder e Witczak (1975), os fatores importantes para a estabilidade granulométrica dependem, principalmente, da própria distribuição granulométrica, da densidade relativa, do formato das partículas e do atrito interno. A Figura 2.1 ilustra diferentes misturas granulométricas sendo: (a) tem pouca ou nenhuma quantidade de finos, possuindo baixa densidade, alta permeabilidade e dependendo apenas do contato grão a grão para compor sua resistência; (b) a composição que possui, em relação as demais, maior densidade, menor permeabilidade e conseqüentemente maior resistência, conteúdo finos suficientes para preencher os vazios entre os agregados maiores; (c) possui grande quantidade de finos e por isso perde o contato grão a grão, se tornando menos estável em comparação as anteriores.

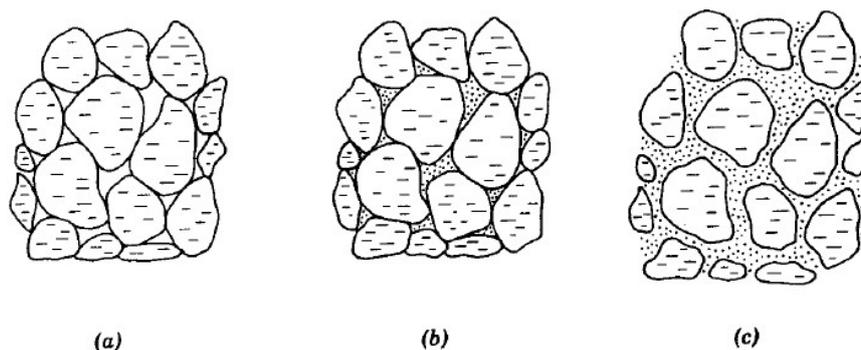


Figura 2.1: Estado físico de misturas granulométricas (YODER; WITCZAK, 1975)

Em consequência disso, quando é necessária a correção de solos argilosos através de material granular, esse deve ser inserido em quantidades que garantam o contato grão a grão de modo a aumentar a estabilidade da mistura. Sendo a fração fina da mistura também importante devido à estabilização com cal ou cimento, não só por serem materiais finos (pulverulentos), mas pelas reações químicas entre esses materiais e o solo fino (CRISTELO, 2001).

### 2.1.2 Estabilização física

A estabilização física consiste em alterar as características do solo por meio da ação do calor, da eletricidade, etc. Como, por exemplo, se um aterro for construído sobre uma camada de solo mole compressível, sua taxa de consolidação é particularmente lenta por conta de sua baixa permeabilidade. Logo, pode-se acelerar os recalques por meio de diversas técnicas, tais como: drenos verticais, sobrecargas temporárias, eletro-osmose, entre outras. Em geral, as soluções como estabilização térmica e eletro-osmose (estabilização física) dependem de um despendimento alto de recursos financeiros, sendo pouco aplicadas na prática (CRISTELO, 2001).

### 2.1.3 Estabilização química

É um método que modifica as propriedades do solo permanentemente através da incorporação de aditivos. Nos itens a seguir serão descritos, primeiramente, o processo de reações pozolânicas e, posteriormente, alguns tipos de estabilização química, sendo eles: solo-cimento, solo-cal e solo-cal-pozolana.

#### 2.1.3.1 Reações pozolânicas

Segundo Massazza (2004), a atividade pozolânica compreende todas as reações que ocorrem entre os componentes ativos das pozolanas, cal e água. As pozolanas são materiais inorgânicos sílico-aluminosos, de origem natural ou artificial que, quando combinadas com óxido de cálcio e água, endurecem como consequência da produção de compostos cimentícios.

As pozolanas naturais são os materiais que, para sua utilização, não necessitam de moagem ou qualquer tipo de processamento que as modifique quimicamente e/ou estruturalmente, por exemplo, os materiais de origem vulcânica, geralmente ácidos, ou de origem sedimentar. Enquanto que as pozolanas artificiais são aquelas que sofrem algum tipo de processamento, enquadram-se nesse conjunto os materiais oriundos de tratamento térmico ou subprodutos da indústria como as cinzas volantes e as argilas calcinadas (ZAMPIERI, 1989; MASSAZZA, 2004).

Um material pozolânico, em linhas gerais, precisa ter três características básicas: conter um alto teor de sílica, ser amorfo e possuir uma grande área de superfície específica. Em comparação com cinzas volantes e sílica ativa o vidro tem conteúdo suficiente de sílica e, quando finamente moído, pode satisfazer os requisitos básicos de uma pozolana para ativar o comportamento pozolânico (SHAO et al., 2000).

A solubilidade dos silicatos e aluminatos presente no solo e sua probabilidade de reagir com a cal para formar ligações cimentícias dependem intimamente do pH do solo (SARGENT, 2015). Segundo Davidson et al. (1965), as reações pozolânicas só podem ocorrer quando o pH é maior ou igual a 10,5, pois é quando o  $\text{SiO}_2$  e o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se encontram solúveis. O incremento da cal aumenta o pH do solo, o que resulta em um aumento da solubilidade da sílica e alumina. Quando adicionada uma quantidade significativa de cal ao solo, o pH pode ultrapassar 12,4 (pH da água saturada de cal) (VIZCARRA, 2010).

Mesmo as pozolanas podendo ter distintas composições químicas, basicamente, os produtos cimentantes provenientes das reações das mesmas com a cal, tendem a ser parecidas e compostas por silicato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio hidratado. Em suma, quaisquer íons de  $\text{Ca}^{+2}$  dissolvidos dentro do solo reagem com quaisquer  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dissolvidos e podem produzir géis de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminatos de cálcio hidratado (C-A-H), essas reações podem ser observadas nas Equações 2.1 a 2.3 (MASSAZZA, 2004; SARGENT, 2015; VIZCARRA, 2010).



Onde,

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

As reações pozolânicas ocorrem em escalas de tempo longas, de meses a anos. A curto prazo, a superfície específica tem maior influência. A longo prazo, a quantidade de alumina e sílica são importantes, pois o principal mecanismo consiste no transporte do hidróxido de cálcio através da água no solo para então combinar com os minerais aluminatos e/ou silicatos presentes na argila (SARGENT, 2015). Do mesmo modo, a temperatura gera influência nas reações. Broms (1984) e Palomo et al. (1999) *apud* Sargent (2015) sugerem que, se os corpos de prova curarem a temperaturas mais elevadas nas primeiras 5 horas após a mistura, as taxas de reação aumentam, desenvolvendo melhor os compostos ligantes C-S-H e C-A-H e, conseqüentemente, resultando em resistências adicionais.

### 2.1.3.2 Solo-cimento

O produto resultante da mistura de solo com cimento Portland e água é o solo-cimento, após compactado na umidade ótima o material ganha resistência por meio das reações de hidratação do cimento e, conseqüentemente, melhora as propriedades do solo (BAUER, 1994; ISAIA, 2007; ABCP, 2004). Melhorar as características mecânicas e obter maior estabilidade são os principais objetivos da incorporação de cimento para estabilização de solos (CRISTELO, 2001).

Durante a execução da camada de solo-cimento alguns fatores devem ter um cuidado especial para que seja garantida a qualidade da mistura, tais como: a quantidade de cimento, a quantidade de água, a massa específica aparente seca a ser alcançada após a compactação, além do tipo de solo, homogeneidade da mistura e tempo de cura (ISAIA, 2007; ABCP, 2004). Diferentemente do concreto, as partículas de solo/agregados são

“coladas” pela pasta de cimento, mas não são totalmente revestidas pela pasta, como acontece no concreto (ACI, 2009).

No Brasil, o interesse pelo estudo sobre solo-cimento iniciou em 1936, através da ABCP, que regulamentou e fomentou a pesquisa no assunto, levando-o, em 1941, à pavimentação do aeroporto de Petrolina em Pernambuco. A partir da década de 60, o material teve grande aceitação passando a fazer parte dos mais diversos tipo de obras, tais como: pavimentação de vias urbanas, pátios industriais, fabricação de blocos e tijolos para alvenaria de vedação, revestimentos de barragens de terra, entre outros (ISAIA, 2007). De modo geral, a utilização de solo-cimento é frequente na execução de bases de pavimentos rodoviários, pois a possibilidade de tratar o solo local é vantajosa em relação aos aspectos ambientais, evitando bota fora e o esgotamento de jazidas e, conseqüentemente, reduzindo custos com transporte.

Nos Estados Unidos é uma prática bastante difundida e vem sendo aplicada desde 1915. No ano de 2009, o país possuía mais de 200.000 km de pavimentos com base de solo-cimento de estradas, ruas, indústrias e aeroportos (ACI, 2009).

O solo é o componente principal da mistura, pois encontra-se em maior quantidade e deve ser selecionado em função da economia no consumo de cimento. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2004), os requisitos para o solo adequado são os seguintes:

- a) diâmetro máximo de 75 mm;
- b) mais de 50% dos grãos passando na peneira de abertura 4,8 mm (nº 4);
- c) de 15 a 100% passando na peneira de abertura 0,42 mm (nº 40);
- d) menos de 50% dos grãos passando na peneira de abertura 0,075 mm (nº 200)
- e) limite de liquidez  $\leq 40\%$ ;
- f) índice de plasticidade  $\leq 18\%$ .

Com base nos dados acima, pode-se concluir que os solos arenosos são considerados os mais adequados quanto à granulometria. Pois a presença dos grãos de areia grossa e de pedregulho (materiais inertes) tem função de enchimento, o que favorece a liberação de maiores quantidades de cimento para envolver os grãos menores. A fração fina deve existir, visto que a resistência inicial do solo-cimento é proveniente da coesão dos grãos

finos após a compactação. Sabe-se que teores de finos, tamanho silte e argila, inferiores a 20%, não permitem compactação adequada (ISAIA, 2007).

A dosagem do solo-cimento compactado se baseia na fixação de três variáveis:

- a) quantidade de cimento;
- b) quantidade de água;
- c) massa específica aparente seca máxima.

Esses variam conforme o tipo de aplicação, para o emprego na pavimentação busca-se a garantia da coesão do solo-cimento. Pois quando sofre variações de temperatura e umidade, assim como as solicitações do tráfego, o material deve manter suas propriedades. A partir disso, os pesquisadores da *Portland Cement Association* (PCA) criaram o ensaio de durabilidade, onde os corpos de prova são submetidos a ciclos de molhagem/secagem ou de congelamento/degelo, verificando assim a perda de massa acumulada do material ao longo dos ciclos.

Recentemente, Consoli et al. (2020) propuseram uma relação entre a perda de massa acumulada e a rigidez inicial ( $G_0$ ), tal estudo busca a substituição do operoso ensaio de durabilidade pelo ensaio de pulso ultrassônico. O estudo foi realizado utilizando resultados de perda de massa acumulada e rigidez inicial de diversos tipos de solo cimentados. No qual, a partir da relação desses resultados se obteve uma curva ajustada como pode-se observar na Figura 2.2, considerando que o mesmo tem perdas de massa satisfatórias quanto a durabilidade a partir de  $G_0 = 2500$  MPa. Logo, busca-se avaliar o desempenho de solos artificialmente cimentados utilizando-se apenas de amostras intactas.

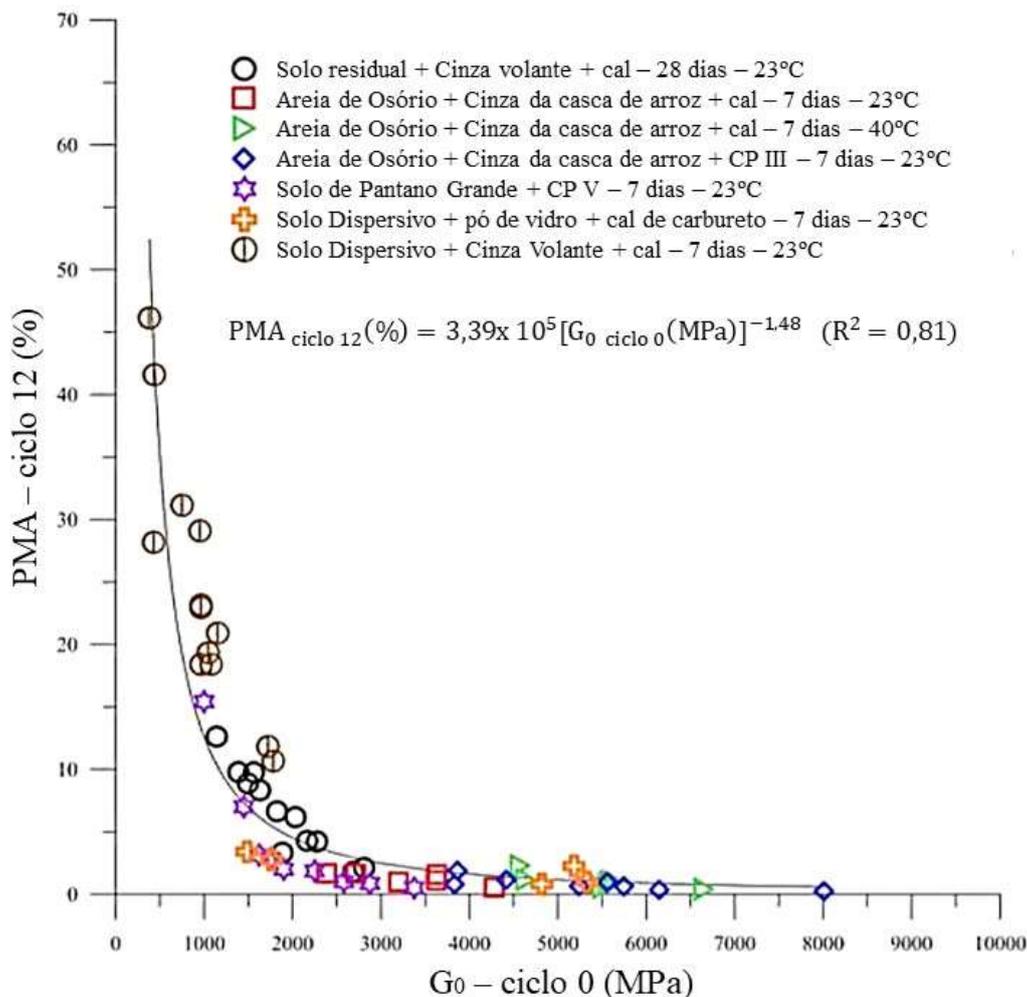


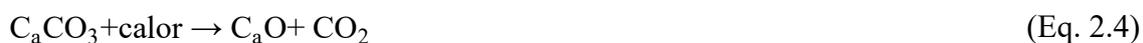
Figura 2.2: Relação entre PMA e  $G_0$  (CONSOLI et al., 2020)

### 2.1.3.3 Solo-cal

Certamente a cal é o aglomerante mais antigo utilizado pela humanidade. A utilização da cal como aditivo para estabilizar solos com certa quantidade de argila tem sido empregada há mais de dois mil anos. Até a invenção do cimento Portland era o único aglomerante utilizado em combinação ou não com pozolanas, porém por ser um aglomerante aéreo possui baixa resistência à ação da água, diferentemente dos cimentos que são aglomerantes hidráulicos e fornecem adequabilidade ao uso em obras hidráulicas. (HERRIN; MITCHELL, 1961; ISAIA, 2007).

Cal é o nome dado, de maneira genérica, a um aglomerante resultante da calcinação de rochas calcárias. Durante o processo de calcinação do calcário natural, o carbonato de

cálcio sob a ação do calor se decompõe em óxidos de cálcio e anidridos carbônicos, processo representado na Equação 2.4 (BAUER,1987; ISAIA, 2007):



Obtém-se então a cal viva, em geral sob a forma de grãos de diferentes tamanhos. A cal viva ainda não é o aglomerante utilizado na construção civil, pois o óxido de cálcio deve ser hidratado, transformando-se em hidróxido de cálcio (constituente básico da aglomerante cal), tornando-se assim, a cal hidratada (BAUER, 1987). A reação química da cal viva com água é a seguinte:



Após o processo de extinção da cal viva, a cal hidrata é separada da não hidratada e das impurezas por meio de peneiramento (por ar). A cal hidratada é um produto seco e pulverulento, por isso oferece maior facilidade de mistura na elaboração de argamassas e outras misturas em relação a pasta de cal resultante da extinção da cal viva.

Ao adicionar cal ao solo para estabilizá-lo ocorrem certas reações que modificam sua estrutura, algumas manifestam-se imediatamente após a mistura e outras com o decorrer do tempo, são elas (THOMÉ, 1994):

- a) Floculação: ocorre basicamente devido a três fatores: troca catiônica, aumento da capacidade de troca catiônica depende do pH e aumento da concentração de eletrólitos na água dos poros. Consiste em unir as partículas do solo, é responsável por mudanças nas características granulométricas, de plasticidade e de trabalhabilidade do solo;
- b) Carbonatação: reação da cal com o dióxido de carbono do ar, geram cristais de  $\text{CaCO}_3$  e ocorrem instantaneamente após a exposição da cal ao ar;
- c) Adsorção química: das moléculas da cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ );
- d) Reações Pozolânicas: ocorrem a longo prazo e são as principais responsáveis pela cimentação.

Assim como na composição do solo-cimento, o solo-cal tem como principal componente o solo. Logo, suas características como acidez, granulometria e mineralogia são de grande

importância e geram influências nos mecanismos de estabilização química do solo (ISAIA, 2007).

Entre as reações de longo prazo, as mais importantes são as pozolânicas (ver item 2.1.3.1), que ocorrem entre os elementos minerais solubilizados dos solos e a cal. Esse processo é viável porque, em níveis de alcalinidade, promovidos pela cal, cujos valores de pH se elevam a valores próximos a 12,4, os elementos Sílica e Alumina estarão mais facilmente disponibilizados para a solução do solo. O processo de reações pozolânicas entre os elementos minerais do solo e da cal é então realizado lentamente e conduz normalmente ao aumento da capacidade de resistência mecânica dos solos, quando existe eficácia. Esse processo pode ser favorecido pela temperatura e pela difusão iônica da cal no solo (ISAIA, 2007, p.833).

Em geral, a estabilização química do solo através da incorporação da cal se dá em solos argilosos que possuem as características adequadas para que ocorram as reações. Mas misturas de solo-cal também podem incluir solos granulares, porém deve-se realizar a mistura juntamente com outro material, a pozolana, para que possa ocorrer a cimentação (HERRIN; MITCHELL, 1961).

Segundo Isaia (2007), o processo de cura do solo-cal sofre especial influência da temperatura, da umidade e do tempo de cura. Em geral, o aumento de temperatura favorece a ocorrência das reações entre a cal e o solo. Tendo em vista que o processo de reações pozolânicas é lento, quanto maior o tempo de cura, maior também será o aproveitamento da cal.

#### 2.1.3.4 Solo-cal-pozolana

Até o século XIX, as misturas cal-pozolana eram as únicas argamassas hidráulicas capazes de endurecer em água e, ao mesmo tempo, resistir ao ataque de águas agressivas, inclusive a água do mar. Porém, devido à sua lenta taxa de endurecimento, as misturas de cal-pozolana foram gradualmente substituídas por cimentos pozolânicos (MASSAZZA, 2004).

Já em um sistema solo-cal-pozolana, uma parte da cal pode reagir com o solo, outra fração com o dióxido de carbono presente no ar e na água intersticial e o restante com a pozolana. Em comparação ao sistema solo-cal, tem-se maior complexidade, visto que pode ocorrer certa competição entre o solo e a pozolana pelo uso da cal e, ainda, a quantidade de água pode não ser suficiente para o completo desenvolvimento das reações pozolânicas do material (MATEOS, 1961; SCHEUERMANN FILHO, 2019).

## 2.2 VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO SOLO-CAL-POZOLANA

### 2.2.1 Efeito da cal

Como já mencionado anteriormente, os primeiros efeitos da mistura com a adição da cal serão a redução do índice de plasticidade, melhor trabalhabilidade, mudanças nas características granulometrias, floculação das partículas e, posteriormente, acontecerá o ganho de resistência a partir da cimentação das partículas (INGLES; METCALF, 1972; TRB, 1987).

A TRB (1987) faz um compilado de procedimentos de dosagem para melhoramento de solo com cal, onde cada procedimento estabelece requisitos mínimos para aceitabilidade das proporções de cal necessárias a fim de se obter a estabilização e garantir que as reações pozolânicas aconteçam. Os aspectos em geral considerados são: a estagnação do índice de plasticidade; diminuição da expansividade do solo; estabelecimento de parâmetros aceitáveis quando ao desempenho mecânico; e, a estabilização do pH da mistura até valores próximos ou superiores a 12,40 visto que garantem alcalinidade suficiente para que os elementos sílica e alumina estejam disponíveis para solução no solo (*Initial Consumption of Lime Method*).

Thomé (1994) observou que a resistência e rigidez do material estudado por ele (argila mole tratada com cal) obteve um ganho imediato de 163% com a adição de 9% de cal ao solo. De modo geral, as quantidades usuais de cal empregada em relação a massa dos materiais secos da mistura variam de 3 a 10% (SCHEUERMANN FILHO, 2019).

### 2.2.2 Efeito da pozolana

Em solos estabilizados com cal e pozolana, quanto maior o acréscimo de pozolana, maior será também a disponibilidade de sílica e alumina na mistura para reagir com a cal e formar os compostos cimentantes. Para o caso de solos não argilosos com adição de cal e pozolanas, onde somente a pozolana tem capacidade de reagir com a cal, as quantidades usuais de pozolana empregadas em relação à massa de solo seco variam em geral de 10% a 30%.

Quando finamente dividido, o vidro pode ter comportamento pozolânico, podendo ser empregado juntamente com a cal, visando a obtenção de uma matriz cimentícia proveniente das reações obtidas através da mistura (CONSOLI et al., 2018). Reações estas que resultam num produto final que pode ser comparado ao das reações de hidratação do cimento Portland. (MASSAZZA, 2004).

### 2.2.3 Efeito da compactidade da mistura

O aumento da densidade em solos estabilizados resulta, conseqüentemente, no decréscimo dos vazios e no aumento do contato grão a grão, o que gera melhor intertravamento entre os mesmos, a permeabilidade diminui até um valor mínimo, próximo da umidade ótima. Nesse contexto, melhoram-se as propriedades mecânicas (INGLES; METCALF, 1972; SCHEUERMANN FILHO, 2019). Segundo Mallmann (1996), o aumento da energia de moldagem resulta em maiores resistências em misturas de solo-cinza-cal. Em decorrência, provavelmente, do aumento do contato entre as partículas que desenvolvem melhor as reações pozolânicas.

Consoli et al. (2009a) apresenta uma relação entre a porosidade ( $\eta$ ) e a resistência à compressão simples ( $q_u$ ), na qual a relação tende a ter comportamento linear. Pode-se observar na Figura 2.3 que ocorre um aumento da resistência conforme diminui a porosidade da mistura. E ainda, o ganho de resistência é mais evidente aos 90 dias de cura nas misturas mais densas, o que indica a eficácia da cal em misturas mais compactadas em períodos de cura mais longos.

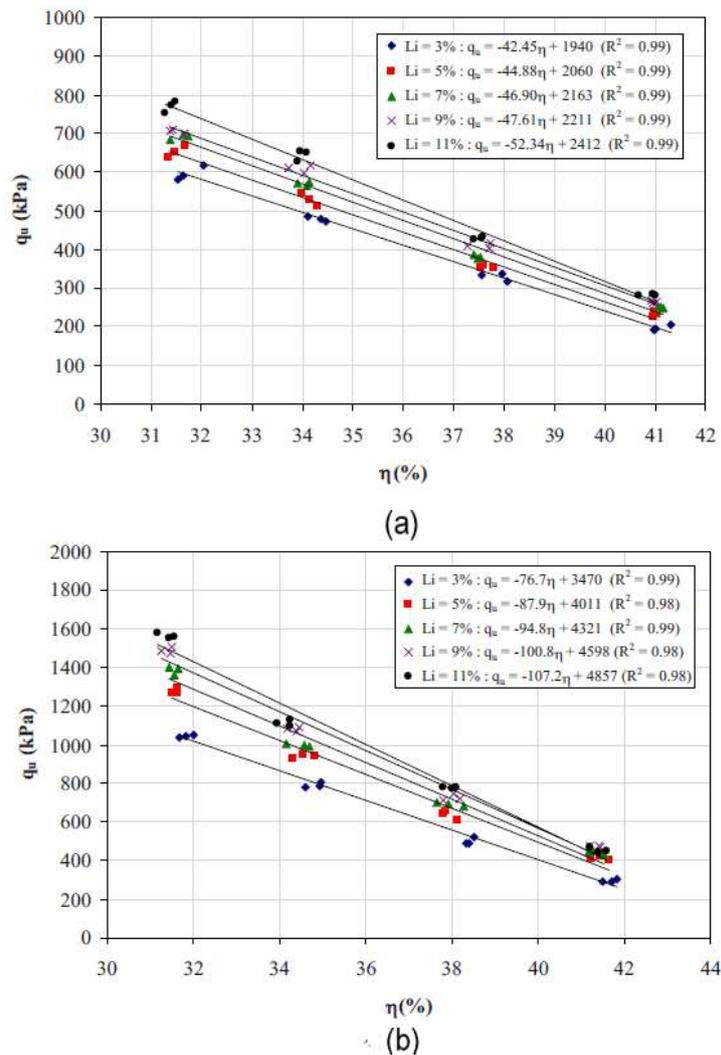


Figura 2.3: Relação  $\eta$  x  $q_u$  para um solo estabilizado com cal (a) aos 28 dias e (b) aos 90 dias (CONSOLI et al., 2009a)

#### 2.2.4 Efeito da umidade da mistura na moldagem

O teor de umidade da mistura tem influência sobre o nível de compactidade da mesma. Nesse sentido, quando a mistura possui umidade abaixo da umidade ótima, o atrito entre as partículas é elevado dificultando a compactação máxima (ramo seco). Do mesmo modo, quando com excesso de umidade, o ar fica ocluído entre os grãos impedindo sua expulsão (ramo úmido). Portanto, a umidade ótima obtida através do ensaio de compactação atua como um agente lubrificante facilitando o alcance da máxima compactidade da mistura (Figura 2.4).

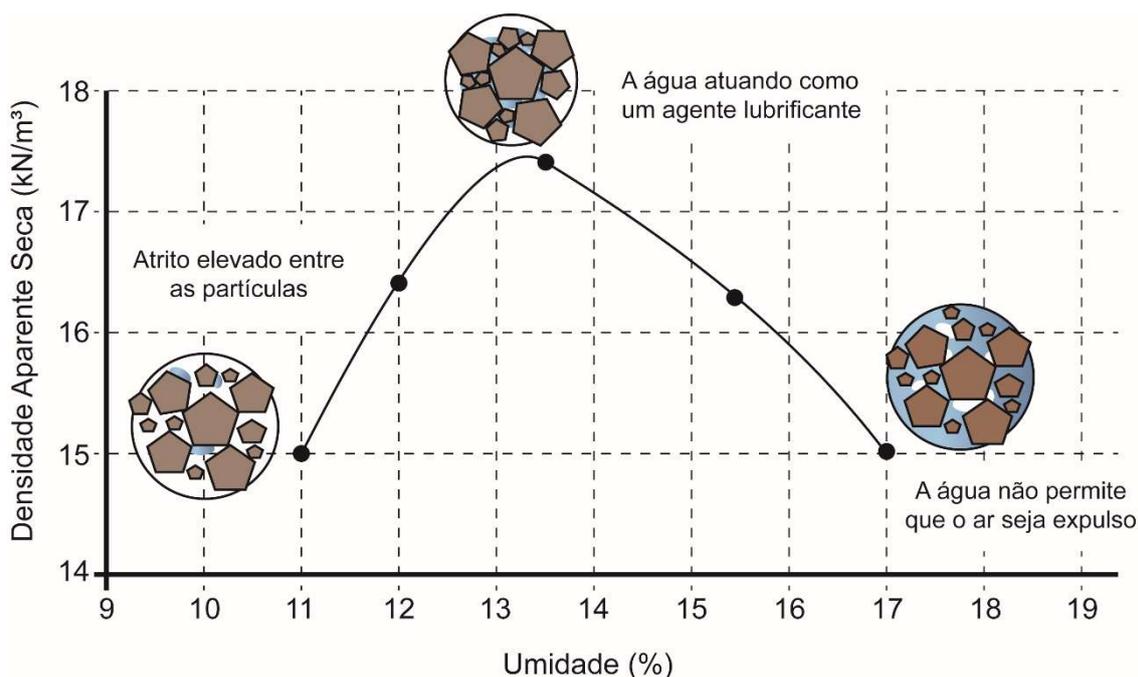


Figura 2.4: Ensaio de compactação Proctor

Assim como para a compactação, a umidade é importante para a obtenção plena das reações pozolânicas, visto que é necessário um ambiente suficientemente hidratado. Para Inglês e Metcalf (1972), em solos melhorados com cal a umidade ótima é suficiente para transportar os íons de cálcio e hidroxila até a superfície da argila para que ocorram as reações. Porém, quando os argilominerais presentes no solo possuem maior afeição por água, a umidade ótima pode não ser suficiente para a ocorrência das reações de cimentação (MATEOS, 1961).

### 2.2.5 Efeito do tempo de cura

Conforme citado anteriormente, as reações pozolânicas ocorrem a longo prazo, conseqüentemente, quanto maior o tempo de cura e com quantidades suficientes de cal, maiores serão os ganhos de resistência provenientes da cimentação.

Nesse contexto, Thomé (1994) mencionou a falta de cal nas misturas estudadas por ele como o fator causador do baixo ganho de resistência entre as idades de 7, 28 e 90 dias, dessa maneira as reações pozolânicas não puderam acontecer como o esperado.

Em contrapartida, estudos realizados por Mallmann (1996) por meio de análise de variância demonstraram que o tempo de cura é o principal fator influenciador da

resistência à compressão simples de espécimes curados à temperatura ambiente ( $\pm 21$  °C). Assim como Consoli et al. (2009a) e Dalla Rosa (2009) observaram acréscimos consideráveis nas resistências com o aumento do tempo de cura.

### 2.2.6 Efeito da relação entre porosidade e teores volumétricos de cal e ligante

Foppa (2005) e Consoli et al. (2007) apresentaram um método racional de dosagem que se baseia na relação entre o volume absoluto de vazios ( $V_v$ ) e o volume absoluto de cimento ( $V_c$ ). Do mesmo modo, essa relação pode ser representada como o quociente entre a porosidade ( $\eta$ ) e o teor de cimento ( $C_{iv}$ ), como pode ser observado na Equação 2.6:

$$\frac{V_v}{V_c} = \frac{\frac{V_v}{V_{total}}}{\frac{V_{cimento}}{V_{total}}} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Onde,  $V_{total}$  corresponde ao volume total da amostra.

Os autores ainda apresentaram uma relação do tipo potência entre a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) e a relação ajustada entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}^k$ ), como expresso na Equação 2.7. Nesse sentido, o ajuste foi feito por meio do expoente  $k$  que compatibiliza os efeitos da porosidade e do teor de cimento sobre a variável resposta, onde:

- a) Se  $k < 1$ : significa que a influência da porosidade possui maior domínio em termos de resistência à compressão simples em relação ao teor volumétrico de cimento;
- b) Se  $k > 1$ : o teor volumétrico de cimento exerce maior influência na resistência à compressão simples em relação a porosidade;
- c) Se  $k = 1$ : ambos os parâmetros têm a mesma influência sobre a resistência à compressão simples, o que significa que, variações proporcionais dos parâmetros mantêm o valor da resistência à compressão simples constante.

E ainda,  $A$  e  $B$  são constantes de ajuste que variam conforme cada material, considerando o máximo coeficiente de correlação ( $R^2$ ).

$$q_u = A \left( \frac{\eta}{C_{iv}^k} \right)^B \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Obtida a curva de dosagem (Figura 2.5), é possível determinar qual a relação entre  $\eta$  e  $C_{iv}$  satisfaz a resistência demandada em projeto. Deste modo, pode-se definir, de maneira racional, a quantidade de cimento e a energia de compactação necessária para atender a demanda da forma menos onerosa possível.

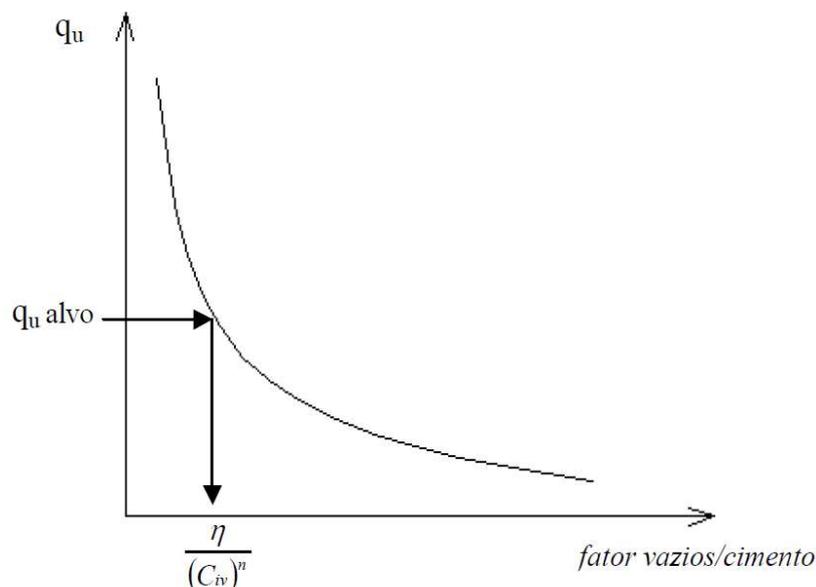


Figura 2.5: Curva de dosagem para solo-cimento (FOPPA, 2005)

Posteriormente, Consoli et al. (2009a, 2009b) apresentaram uma relação similar à presente na Equação 2.7, porém em termos de teor volumétrico de cal ( $L_{iv}$ ), como demonstrada na Equação 2.8. A formulação desse índice foi possível devido a existência de uma relação do tipo potência, assim como no índice  $\eta/(C_{iv})^k$ , o  $\eta/(L_{iv})^k$  deve ser ajustado com um expoente  $k$  para compatibilizar os efeitos de densidade e do teor de cal.

$$q_u = A \left( \frac{\eta}{L_{iv}^k} \right)^B \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Consoli et al. (2009a, 2009b, 2011, 2014) e Saldanha (2014) verificaram essa relação de maneira satisfatória em misturas de solo-cal-pozolana, solo-cal e pozolana-cal quanto a parâmetros de resistência, durabilidade e rigidez.

Em um estudo de Diambra et al. (2017) demonstrou-se que os valores de  $k$  e  $B$  dependem predominantemente das características do solo em questão, e ainda que o valor de  $B$  é

próximo ao inverso do valor de  $k$ , e ainda que a grandeza do valor de  $A$  é dependente das propriedades conjuntas do solo e da matriz cimentícia, chegando na Equação 2.9:

$$q_u = A \left( \frac{\eta}{c_{iv}^k} \right)^{-\frac{1}{k}} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Mais recentemente, Consoli et al. (2018) e Winter (2018) propuseram um novo índice análogo aos anteriores, o  $\eta/(B_{iv})^k$  que faz relação do tipo potência entre a porosidade e o teor volumétrico de ligante (soma dos teores volumétricos da cal e da pozolana).

As relações expressas nas Equações 2.7 e 2.8 podem ser normalizadas, como mostram Consoli et al. (2016, 2017), quando divididas por um valor particular de  $q_u$ , este que corresponde a um valor de  $\eta/(C_{iv})^k = \Delta$ . Obtendo-se então um valor de  $q_u(X)$  para um determinado  $\Delta$ . Que resulta na expressão generalizada presente na Equação 2.10. Essa equação permite, teoricamente, a avaliação do comportamento mecânico de amostras cimentadas de solo, dentro um *range* de porosidade e agente cimentante, com um único valor de resistência à compressão simples.

$$\frac{X}{X \text{ (para um } \Delta \text{ particular)}} = \frac{A \left( \frac{\eta}{c_{iv}^k} \right)^{-B}}{A(\Delta)^{-B}} = \frac{\left( \frac{\eta}{c_{iv}^k} \right)^{-B}}{(\Delta)^{-B}} = (\Delta)^B \cdot \left( \frac{\eta}{c_{iv}^k} \right)^{-B} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

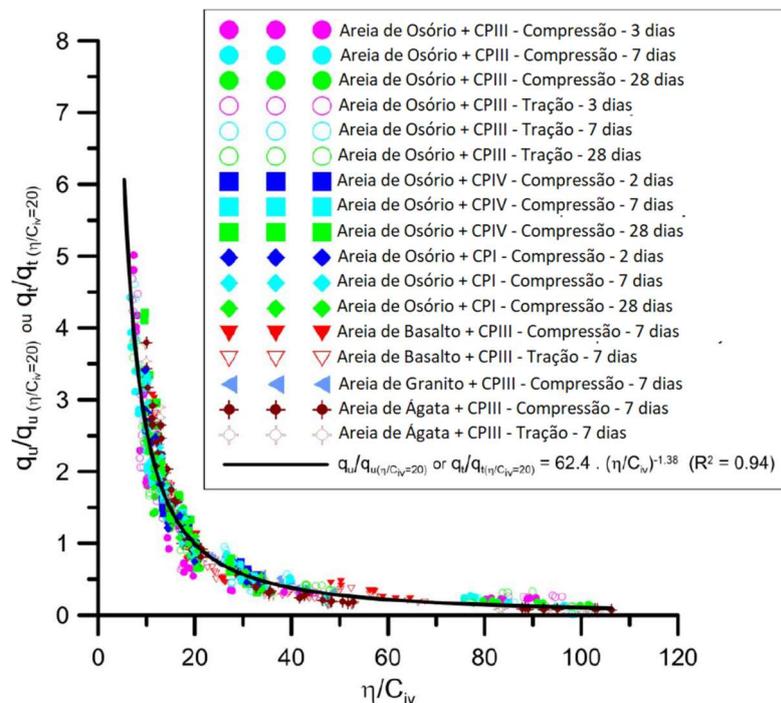


Figura 2.6: Normalização de  $q_u$  com  $\eta/C_{iv}$  ajustado para todos os solos granulares estudados (CONSOLI et al., 2017).

A Figura 2.6 mostra uma equação única característica de resistência à compressão simples obtida por Consoli et al. (2017) através da normalização dos valores de  $\eta/C_{iv}$  para solos arenosos, artificialmente cimentados com diferentes tipos de cimento Portland e tempos de cura.

## 2.3 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A demanda crescente de materiais virgens para os mais diversos segmentos, traz consigo um acréscimo na produção de resíduos. Com isso, aumenta a preocupação em relação ao desenvolvimento sustentável, sendo a reciclagem uma forma de minimizar a disposição de resíduos em aterros sanitários e, conseqüentemente, reduzindo a demanda por recursos não renováveis.

### 2.3.1 Vidro

Na idade da pedra o homem utilizava a obsidiana (vidro) em sua forma natural para a fabricação de pontas de lanças, facas e flechas (PETRUCCI, 1987; MANO, 1991). Por volta de 5000 A.C., os egípcios fabricavam contas coloridas de vidro e mais tarde, em 1500 A.C., começaram a produzir peças ocas. Durante o Império Romano, o vidro teve um grande avanço, possuía cor esverdeada devido as impurezas de ferro e era translúcido. O primeiro processo de fabricação do vidro plano baseava-se em verter o vidro líquido sobre uma mesa de ferro e, posteriormente, aplainava-se com um rolo também de ferro (PETRUCCI, 1987).

Atualmente, existem diversos tipos de vidro adaptados para as mais diferentes utilizações, como serão descritos nos próximos itens.

#### 2.3.1.1 Estrutura do vidro

Os dois elementos mais abundantes na crosta terrestre são o oxigênio e o silício, sendo esses os principais compostos dos silicatos. Conseqüentemente, a maior parte das rochas e dos solos (argilas e areias) se enquadram na classificação de silicatos. A sílica ( $\text{SiO}_2$ ) é, quimicamente, o material mais simples a base de silicatos. É um dos materiais cerâmicos de maior utilização e ainda constitui a base de muitos vidros e vitrocerâmicos (CALLISTER, 2006; ASKELEND; WRIGHT, 2014; SHACKELFORD, 2008).

Em sua forma cristalina, a sílica possui 4 átomos de oxigênio que se dispõem tetraedricamente em torno de um átomo de silício, como pode-se observar na Figura 2.7. Onde, cada átomo de oxigênio se liga a dois átomos de silício, formando assim, uma estrutura cristalina regular como a presente no quartzo. Porém, os átomos não estão densamente compactados, pois redes estruturais são bastante abertas, a exemplo tem-se o quartzo que possui densidade de apenas 2,65g/cm<sup>3</sup>. (CALLISTER, 2006; MANO, 1991; ISAIA, 2007; VAN VLACK, 1996).

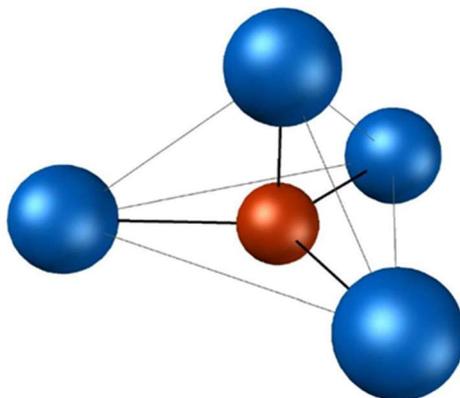


Figura 2.7: Tetraedro sílica-oxigênio: unidade básica da rede de sílica (baseado em ISAIA, 2007)

A sílica fundida é obtida aquecendo o quartzo acima de 1700°C, nessa temperatura, o coeficiente de viscosidade da sílica é cerca de 10<sup>8</sup> vezes maior que o da água líquida, devido às fortes ligações covalentes. Segundo Padilha (1997), quando em estado líquido, certas ligações são quebradas e outras distorcidas. Durante o rápido resfriamento a estrutura da sílica se torna amorfa, como pode ser observado na Figura 2.8 (b). A sílica fundida é utilizada em algumas aplicações pois possui baixa expansão térmica, porém sua alta viscosidade torna difícil sua moldagem (VAN VLACK, 1996).

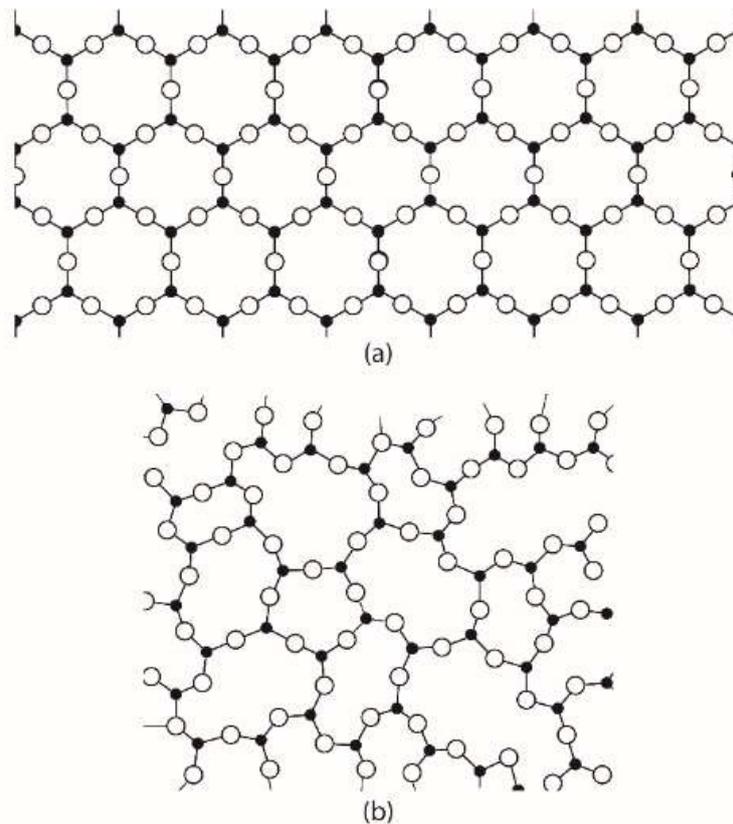


Figura 2.8: Representação bidimensional do cristal de sílica (a), e da sílica vítrea (b) (baseado em ISAIA, 2007)

Para uma fabricação economicamente viável é necessário incorporar modificadores como a soda ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) para quebrar a estrutura do reticulado e formar eutéticos com menores temperaturas de fusão. A cal ( $\text{CaO}$ ) também é incorporada com o objetivo de reduzir a solubilidade do vidro na água, resultando assim no vidro comum, conhecido também como vidro soda-cal. A composição química é de, mais ou menos, 75% de  $\text{SiO}_2$ , 15% de  $\text{Na}_2\text{O}$  e 10% de  $\text{CaO}$  (CALLISTER, 2006). Após esse processo, a formação da estrutura não é mais cristalina, mas sim amorfa tendo apenas ordem atômica de curto alcance. Os vidros são bons exemplos de materiais amorfs, pois os átomos não estão dispostos de maneira regular e periódica (ASKELAND E WRIGHT, 2014).

A Figura 2.9 mostra as posições dos íons de um vidro de carbonato de sódio, onde alguns íons metálicos (como o sódio) se ligam ionicamente com o oxigênio, resultando em uma descontinuidade na rede, visto que alguns átomos de oxigênio não são mais compartilhados entre dois tetraedros, mas apenas a um átomo de silício. Motivo pelo qual óxidos de metais alcalinos são utilizados como fundentes para diminuir a viscosidade do vidro por meio da quebra de ligações ou pontes.

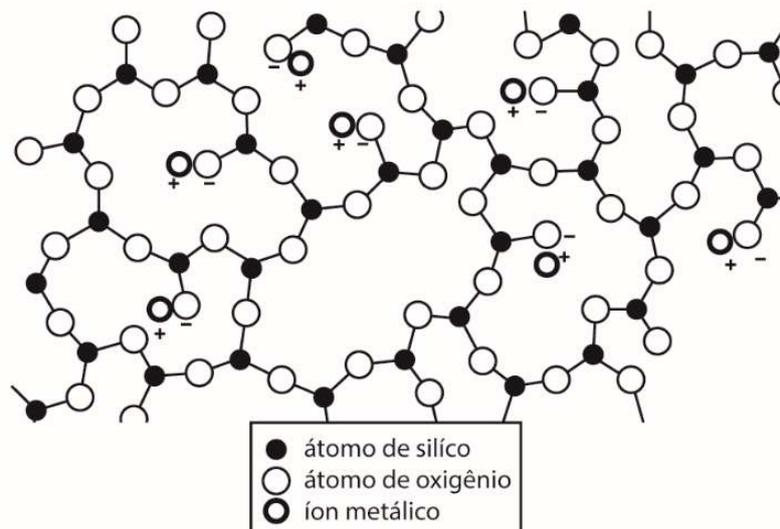


Figura 2.9: Representação esquemática das posições dos íons de um vidro de carbonato de sódio (baseado em ISAIA, 2007)

### 2.3.1.2 Principais produtos de vidro consumidos e fabricados no Brasil

Rouse (2000) cita alguns dos produtos de vidro mais consumidos e fabricados no Brasil:

- a) Vidros para embalagens: garrafas, frascos, potes e outros tipos de vasilhames fabricados com vidro soda-cal nas cores âmbar, verde e branca;
- b) Vidro plano: vidros planos lisos, vidros cristais, vidros impressos, temperados, armados, laminados e coloridos fabricados em vidro soda-cal;
- c) Vidros domésticos: copos, pratos, tigelas, dentre outros produtos domésticos, são fabricados com vidro soda-cal, borossilicato ou de chumbo;
- d) Fibras de vidro: tecidos, fios, mantas e outros produtos;
- e) Vidros técnicos: lâmpadas, tubos de televisão, vidraria de laboratório (borossilicatos), vidros para ampolas, garrafas térmicas, oftálmicos e isoladores elétricos são fabricados em vidro soda-cal, de chumbo ou com formulações específicas;

### 2.3.1.3 Reciclagem do vidro

O vidro pode ser 100% reciclado e, não ocorrendo perdas de material durante o processo de fusão, tem-se que para cada tonelada de caco de vidro limpo, obtém-se uma tonelada de vidro novo. O caco de vidro é gerado nas próprias fábricas de vidro que por sua vez

reutilizam o material, pois já tem-se o conhecimento da qualidade e de sua composição. Já o caco de vidro gerado externamente à fábrica não possui o mesmo controle de qualidade e tem diversas procedências. A principal fonte externa são os consumidores e processadores de todos os tipos de produtos de vidro. Para o segundo caso pode-se destinar o caco de vidro para outras aplicações, tais como: material de enchimento, construção de sistemas de drenagem contra enchentes, material abrasivo, fabricação de tijolos de vidro, fabricação de microesferas de vidro, matéria-prima na fabricação de asfalto, produção de espuma e fibra de vidro, tintas reflexivas, aplicações artísticas, entre outras (ROUSE, 2000; CEMPRE; 2019).

Segundo referências da CEMPRE (2019), no Brasil, cerca de 47% das embalagens de vidro foram recicladas em 2011, o que resulta em 470 mil ton/ano. Nas quais, o principal tipo de vidro encontrado no lixo urbano é o de embalagens, como garrafas de bebidas alcoólicas, águas, refrigerantes, sucos e frascos para armazenamento de produtos alimentícios (ROUSE, 2000). Ou seja, a principal parcela do vidro contido no lixo domiciliar pode ser reaproveitada de outras maneiras, inclusive na construção civil.

Em seu estudo, Disfani et al. (2012) investigaram as características geotécnicas de duas granulometrias de vidro (fina e média) para utilização em bases e sub-bases de pavimentos e ainda, realizaram ensaios de lixiviação com o objetivo de verificar as qualidades químicas e ambientais do material. Os resultados apontaram que o material apresentou boa trabalhabilidade e condutividade hidráulica e, quanto à resistência ao cisalhamento, exibiu um comportamento semelhante à de misturas de areias naturais de partículas angulares. Para o caso de ocorrência de chuva ou chuva ácida através das camadas compostas de vidro reciclado, o lixiviado não representa riscos para as águas subterrâneas durante a sua vida útil.

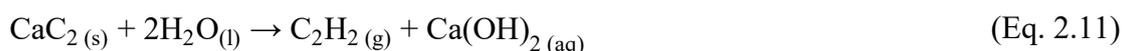
Já Younus Ali et al. (2011) realizaram estudos sobre a utilização de misturas com vidro moído (tamanho de partícula até 4,75 mm) para aplicações em sub-bases de pavimentos. Após um único ciclo de compactação com energia modificada, as amostras foram extrudadas e analisadas granulometricamente, onde verificou-se que não ocorreram mudanças significativas na granulometria do vidro reciclado, consolidando sua qualidade para operações de engenharia como espalhamento e compactação. Os valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo das amostras de vidro foram de, respectivamente, 9,2% e 18 kN/m<sup>3</sup>. Quanto aos testes de peso específico dos grãos (Gs)

o valor ficou cerca de 15% menor em relação ao agregado natural, sendo igual a 2,49 g/cm<sup>3</sup>. O resíduo de vidro do referido estudo foi submetido a ensaios de cisalhamento direto em amostras de 100x100x40 mm, onde o ângulo de atrito interno caiu de 55° para 46° com o aumento da tensão normal de 25 kPa para 400 kPa. O ângulo de atrito interno do vidro reciclado é semelhante ao de areias densas com grãos angulares, o que sugere que a fonte de vidro reciclado tem características satisfatórias quanto a fricção para algumas utilizações em engenharia geotécnica. Ainda com base nos resultados do ensaio de cisalhamento direto, os autores constataram que há falta de coesão entre as partículas.

### 2.3.2 Cal de carbureto

A cal de carbureto é um material residual da produção de gás acetileno, obtida a partir do carbeto de cálcio (ou carbureto de cálcio) que é matéria prima do acetileno utilizado como insumo na produção de materiais poliméricos. O seu volume de produção aumentou na década de 70, quando o processo eletrotérmico se tornou mais competitivo por conta da elevação do preço do petróleo. Diversos processos industriais resultam em resíduos de hidróxido de cálcio, porém alguns não podem ser empregados na construção civil por conter contaminantes com dioxinas e outras espécies químicas perigosas. A cal de carbureto, no entanto, é um tipo de cal que pode ser empregada na construção civil quando livre de contaminação (ISAIA, 2007).

A primeira etapa do processo se dá pela obtenção do carbureto a partir do calcário, esse, sofre um aquecimento e, sob altas temperaturas, libera o gás carbônico de sua estrutura para então formar a cal. Após, a produção do acetileno se dá a partir de carbureto e água que reagem sob temperaturas mais amenas, resultando no acetileno e hidróxido de cálcio (Equação 2.11). Ou seja, por hidrólise do carbeto de cálcio o gás acetileno é liberado e remanesce uma lama de hidróxido de cálcio (JATURAPITAKKUL; ROONGREUNG, 2003). Comercializada dessa maneira (lama) ou em escamas, após filtragem em filtro prensa e seca ao ar, pode conter até 40% de umidade (ISAIA, 2007).



Jaturapitakkul e Roongreung (2003) e Horpibulsuk *et al.* (2012) citam que, para 64g de carbeto de cálcio, são fornecidos 74g de cal de carbureto (Ca(OH)<sub>2</sub>) e 26g de gás acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>). Segundo Isaia (2007), a cal de carbureto brasileira é rica em hidróxido de cálcio

e não apresenta óxidos não hidratados e teor de anidrido, atendendo a norma e podendo ser utilizado como aglomerante.

Estudos feitos por Horpibulsuk *et al.* (2012), Consoli *et al.* (2001, 2018), Winter (2018) e Scheuermann Filho (2019) contendo cal de carbureto com o objetivo de estabilizar solos juntamente com a presença de pozolanas, evidenciam a capacidade de reação da cal de carbureto para produção de géis cimentantes e sua viabilidade para utilização em melhoramento de solos.

## 2.4 PROJETO DE EXPERIMENTOS

O objetivo do projeto de experimentos é obter um ajuste ótimo dos fatores controláveis do sistema com a menor quantidade possível de ensaios. Conduz a uma sequência de ensaios que permite o máximo de informação com o mínimo investimento de tempo e dinheiro (RIBEIRO; CATEN, 2000). Nesse contexto, experimentos com fatoriais completos, ou seja, onde são realizadas todas as combinações possíveis dentro dos níveis (n) de cada fator, são a maneira mais completa de analisar os efeitos das variáveis controláveis sobre a resposta. A medida que o número de fatores e níveis a serem avaliados aumentam, é acrescido, também, o número de tratamentos. Contudo, existem planejamentos alternativos em que se pode avaliar o efeito dos fatores estudados sobre a variável resposta a partir de um número menor de experimentos.

### 2.4.1 Projeto Fatorial $2^k$

Os projetos fatoriais  $2^k$  contemplam k fatores, cada um deles com apenas dois níveis: alto e baixo. Dentre as vantagens dos projetos  $2^k$  estão: a simplicidade na análise, especialmente úteis nos estágios iniciais de pesquisa, quando há muitos fatores a serem investigados e quando outros projetos são inviáveis (RIBEIRO; CATEN, 2000).

A Figura 2.10 representa um projeto  $2^3$ , ou seja, que possui três fatores (A, B e C), cada um deles com dois níveis. Dessa forma há oito tratamentos (1, a, b, ab, c, ac, bc, abc), como observado na referida figura.

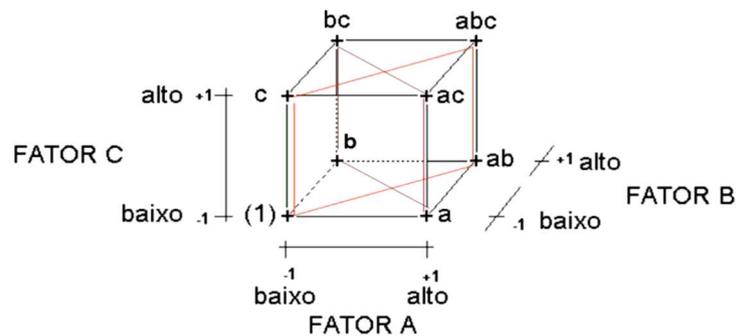


Figura 2.10: Fatorial  $2^k$  – Experimento de três fatores (RIBEIRO; CATEN, 2000).

Após a obtenção dos resultados desse tipo de experimento pode-se traçar os gráficos de efeitos principais dos fatores e de suas interações e o gráfico de Pareto, o qual permite quantificar e avaliar a significância estatística dos efeitos ao considerar um nível de significância ( $\alpha$ ) pré-determinado. O gráfico de Pareto apresenta os valores absolutos dos efeitos padronizados de cada fator e uma linha de referência, na qual todos os fatores e interações que são significativos estatisticamente cruzam a mesma (SCHEUERMANN FILHO, 2019).

#### 2.4.2 Projeto composto de segunda ordem (PCSO)

O PCSO é a soma de um experimento  $2^k$ , mais uma estrela, mais pontos centrais. Por esse motivo se chama projeto composto, dos quais os pontos da parte fatorial ( $2^k$ ) permitem a estimativa em termos lineares e interações e os pontos da estrela permitem a estimativa de efeitos quadráticos puros (RIBEIRO; CATEN, 2000).

A Figura 2.11 apresenta um PCSO para um experimento de três fatores. Na qual consiste em três partes: a parte fatorial ( $2^{k-3}$ ) vértices do cubo com coordenadas  $\pm 1, \pm 1, \pm 1$ ; a parte em estrela ( $2^k$ ) com coordenadas  $0, \pm\alpha, 0$ ; e ponto central com coordenadas  $0,0,0$ .

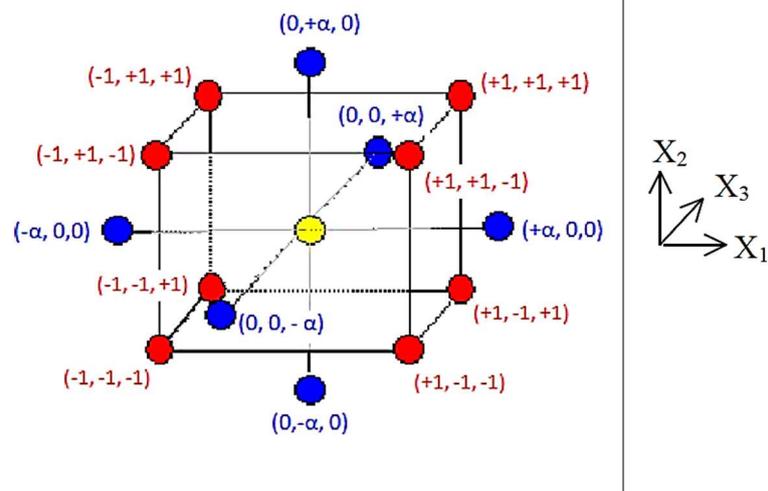


Figura 2.11: PSCO – Experimento de três fatores (RIBEIRO; CATEN, 2000).

Quando necessário, o projeto pode possuir repetições do ponto central, aumentando os graus de liberdade do termo de erro, ou seja, possibilitando uma avaliação mais precisa da variância experimental.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo pode ser dividido em três fases como é exibido no Quadro 3.1, acompanhado de uma breve descrição de cada uma das etapas. A primeira fase consiste na coleta, beneficiamento, preparação e caracterização do vidro moído e da cal de carbureto. A segunda fase apresenta a metodologia de dosagem e a definição dos fatores controláveis da pesquisa. Finalmente, a terceira fase consiste em avaliar os efeitos dos fatores controláveis na resistência a compressão não confinada, rigidez e durabilidade por molhagem-secagem.

Fase		Material	Ensaio/Procedimento	
<b>I</b>	Coleta, beneficiamento e preparação dos materiais	Vidro moído Cal de carbureto	Material: Caracterização	Granulometria
				Difração de raios X
				Área superficial – BET
				Peso específico real dos grãos
<b>II</b>	Dosagem e definição dos fatores controláveis	Mistura vidro-cal de carbureto	Método	Metodologia de dosagem
				Definição dos pesos específicos de moldagem
				Definição do tempo de cura
<b>III</b>	Efeito dos fatores controláveis na resistência, rigidez e durabilidade	Corpos de prova de vidro-cal de carbureto	Ensaios	Resistência à compressão não confinada
				Rigidez Inicial
				Durabilidade por molhagem-secagem

Quadro 3.1: Fases do estudo

## 3.1 MATERIAL

### 3.1.1 Vidro moído

O vidro utilizado no presente trabalho é proveniente de garrafas de cerveja não retornáveis e de coloração verde. Optou-se por utilizar apenas garrafas de uma mesma marca de cerveja, com o objetivo de manter a constância das características do material. O material proveniente das garrafas é classificado como vidro sodo-cálcico (ou soda-cal). Sendo um resíduo doméstico, as garrafas são de fácil acesso e por esse motivo foram escolhidas para compor o estudo.

O processo de obtenção e beneficiamento das garrafas foi o seguinte:

- a) Coleta: o material foi coletado na cidade de Santa Cruz do Sul – RS. As garrafas recolhidas tinham capacidade de 600ml e 330ml. Foram coletadas cerca de 200 garrafas;
- b) Limpeza: as garrafas que possuíam rótulos plásticos tiveram os mesmos removidos, após foram higienizadas com o auxílio de uma lavadora de alta pressão e, por último, deixadas em local arejado para secar em temperatura ambiente;
- c) Moagem: após a secagem total das garrafas de vidro as mesmas foram trituradas em um britador de mandíbula e, em seguida inseridas no moinho de bolas (Figura 3.1);



Figura 3.1: Equipamentos utilizados na moagem do vidro

O procedimento de moagem deu-se de forma padronizada, com o objetivo de obter a maior quantidade das granulometrias desejadas, ou seja, passante na peneira de malha nº 4 ( $d < 4,8\text{mm}$ ). Onde o rendimento médio de pó de vidro passante na peneira de malha nº 200 foi de 30%.

Foi adotado um padrão de moagem, que se mostrou mais eficiente para a quantidade necessária de material passante em cada peneira. A moagem foi realizada adicionando uma quantidade de 2kg de material vítreo no moinho, a uma velocidade constante de 80rpm e com 3000 rotações.

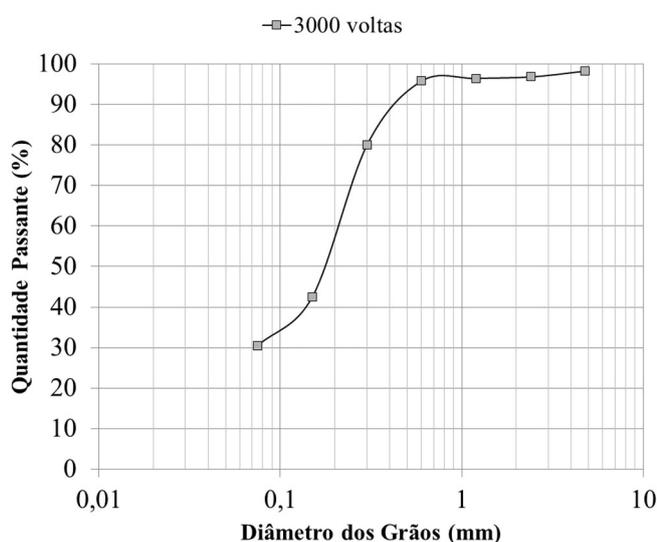


Figura 3.2: Distribuição granulométrica obtida em cada padrão de moagem

- d) Peneiramento: foram utilizadas as peneiras de malha nº 4, 8, 16, 30, 50, 100 e 200 para realização do peneiramento. Em seguida, o material passante em cada peneira foi separado e acondicionado para, posteriormente, compor as curvas granulométricas pré-determinadas para o estudo.

O pó de vidro passante na peneira de abertura 0,075mm (VM<sub>200</sub>) foi submetido a um ensaio de difração a laser (sem utilização de agente dispersante) e de sedimentação (com agente dispersante). As curvas granulométricas obtidas estão apresentadas na Figura 3.3. Na Tabela 3.1 estão expostas as características do vidro passante na peneira de malha nº

200. O resultado de Potencial Hidrogeniônico (pH) foi obtido conforme as especificações da norma D 6276 (ASTM, 1999).

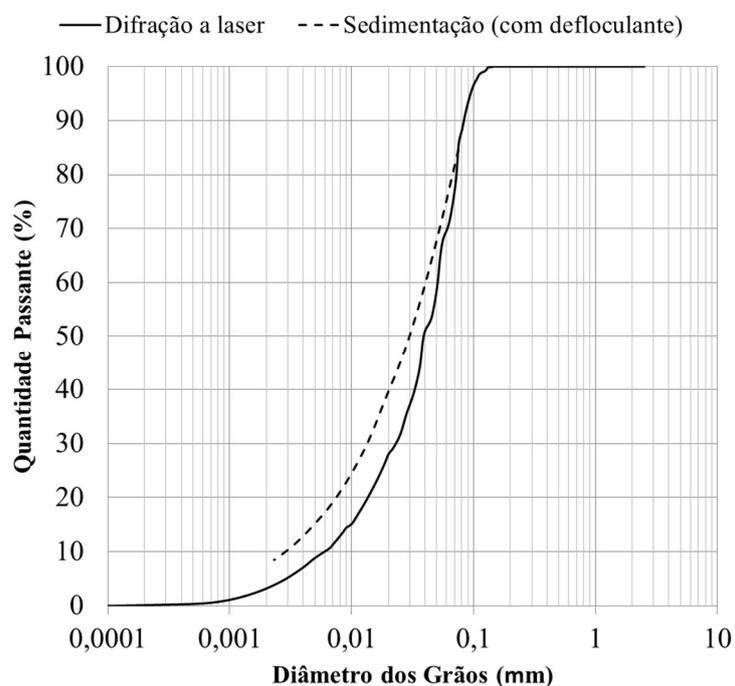


Figura 3.3: Distribuição granulométrica do VM<sub>200</sub>

O ensaio de densidade real dos grãos (Gs) para o vidro moído utilizado no estudo foi realizado conforme as recomendações da NBR 6458 (ABNT, 2017), por meio da utilização de um picnômetro (Figura 3.4) o qual se obteve um valor para Gs igual a 2,47.

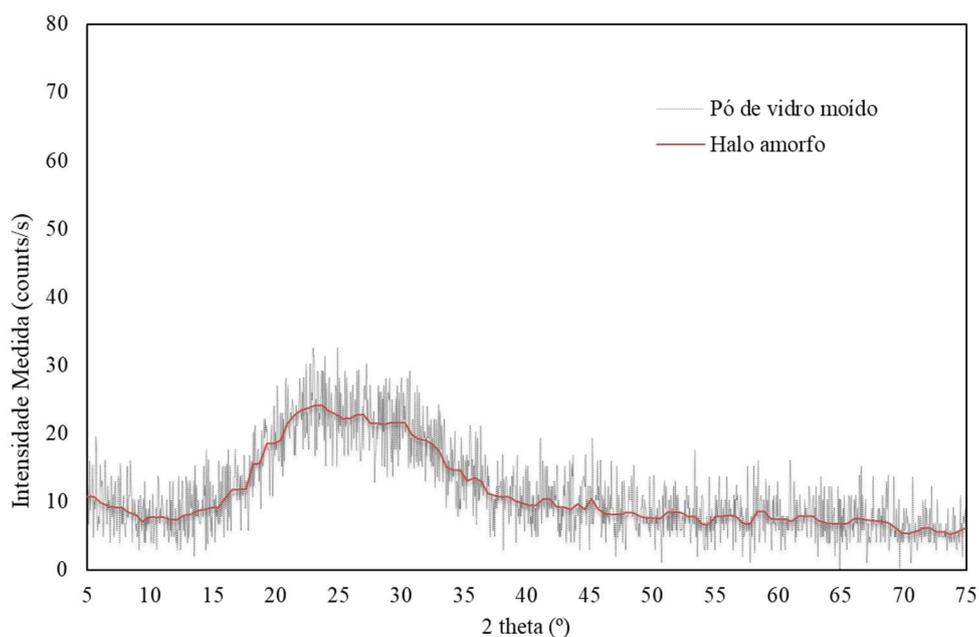


Figura 3.4: Picnômetro com capacidade de 500 ml utilizado no ensaio de peso específico real dos grãos (Gs)

Tabela 3.1: Resumo das características do pó de vidro

Granulometria ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro a 10%	5,63	Granulometria a laser
	Diâmetro a 50%	36,98	
	Diâmetro a 90%	77,86	
	Diâmetro médio	39,99	
pH		10,54	ASTM D 6276
Densidade real dos grãos		2,47	ABNT NBR 6458:2017
Superfície específica - BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )		4,821	Adsorção de nitrogênio

O ensaio de difração de raios-X foi realizado no pó de vidro moído passante na peneira de nº 200, o qual foi executado com o método do pó em um intervalo angular de 5 a 75°. Na Figura 3.5 está apresentada o difratograma e o halo amorfo (*background*) estimado pelo software *Xpert Highscore*.

Figura 3.5: Difratograma do VM<sub>200</sub>

Nota-se a ausência de fases minerais pela falta de picos, o que indica a inexistência de uma estrutura bem definida, sendo considerada uma estrutura amorfa.

### 3.1.2 Cal de carbureto

A cal de carbureto (CC) utilizada na pesquisa é um resíduo proveniente da produção de gás acetileno de uma indústria localizada na região metropolitana de Porto Alegre – RS.

Quando coletado, o material tem consistência pastosa e, para posterior utilização, deve ser seco em estufa com temperatura de 60°C, durante 48 horas. Após o processo de secagem, o material foi destorroado com mão de gral, passado na peneira de malha nº 100 com o objetivo de uniformizar o pó e, em seguida, foi acondicionado em recipiente vedado para evitar contato com o ar e a carbonatação do material.

A composição química da cal de carbureto utilizada é apresentada na Tabela 3.2, a mesma foi utilizada e caracterizada por Saldanha et al. (2018), juntamente com informações referentes a outras cales de carbureto encontradas na literatura. Como pode ser observado, o percentual de CaO na composição da cal de carbureto empregada no presente estudo é similar ou superior aos demais citados por Saldanha et al. (2018).

Tabela 3.2: Composição química das cales de carbureto

Óxido	Saldanha et al. (2018)	Jaturapitakkul (2003)	Horpibulsuk et al. (2013)	Vichan e Rachan (2013)	Jiang et al. (2016)
CaO	74,00%	51,94%	70,78%	83,10%	68,99%
SiO <sub>2</sub>	3,10%	3,36%	6,49%	5,71%	2,84%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,46%	2,56%	2,55%	2,61%	2,16%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26%	0,33%	3,25%	0,72%	0,15%
MgO	0,72%	0,46%	0,69%	0,80%	0,12%
SO <sub>3</sub>	0,54%	0,22%	0,66%	0,05%	0,76%
Na <sub>2</sub> O	ND	0,03%	ND	0,29%	ND
K <sub>2</sub> O	ND	0,03%	7,93%	ND	ND
LOI*	20,90%	41,72%	7,70%	6,70%	25,00%

ND – NÃO DETECTADO

Fonte: (baseado em SALDANHA et al., 2018)

Na Tabela 3.3 são mostradas as características da cal de carbureto, onde as faixas granulométricas foram definidas através do ensaio de granulometria a laser, obtida com a utilização de um equipamento com faixa de detecção de partícula de 0,04–2500 µm, e através de ensaio de granulometria seguindo-se as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2018). Nota-se o alto valor de superfície específica obtida por meio do ensaio de BET (adsorção de nitrogênio), podendo ser um indicativo de alta reatividade do material.

Tabela 3.3: Resumo das características da cal de carbureto

Granulometria ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro a 10%	7,75	Granulometria a laser
	Diâmetro a 50%	22,41	
	Diâmetro a 90%	39,01	
	Diâmetro médio	23,15	
pH		12,94	ASTM D 6276
Densidade real dos grãos ( $G_s$ )		2,12	ABNT NBR 16605:2017
Superfície específica - BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )		17,338	Adsorção de nitrogênio

A Figura 3.6 exibe as curvas granulométricas da cal de carbureto obtidas pelos ensaios de sedimentação (utilizando o passante da peneira de nº100) e difração a laser (utilizando o passante da peneira de nº200, por requisição do ensaio). O ensaio de densidade real dos grãos foi realizado através da utilização de um frasco volumétrico de *Le Chatelier*, seguindo-se as recomendações da NBR 16605 (ABNT, 2017).

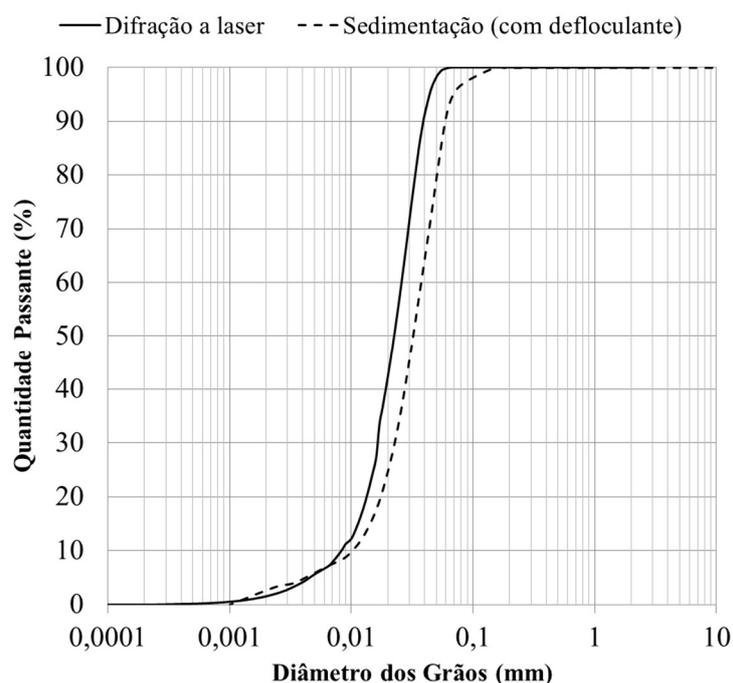


Figura 3.6: Distribuição granulométrica da cal de carbureto

Na Figura 3.7 é apresentada uma foto de MEV (microscopia eletrônica de varredura) da cal de carbureto. Onde pode-se observar que as partículas constituintes da cal são aglomeradas e têm formato ligeiramente angular.

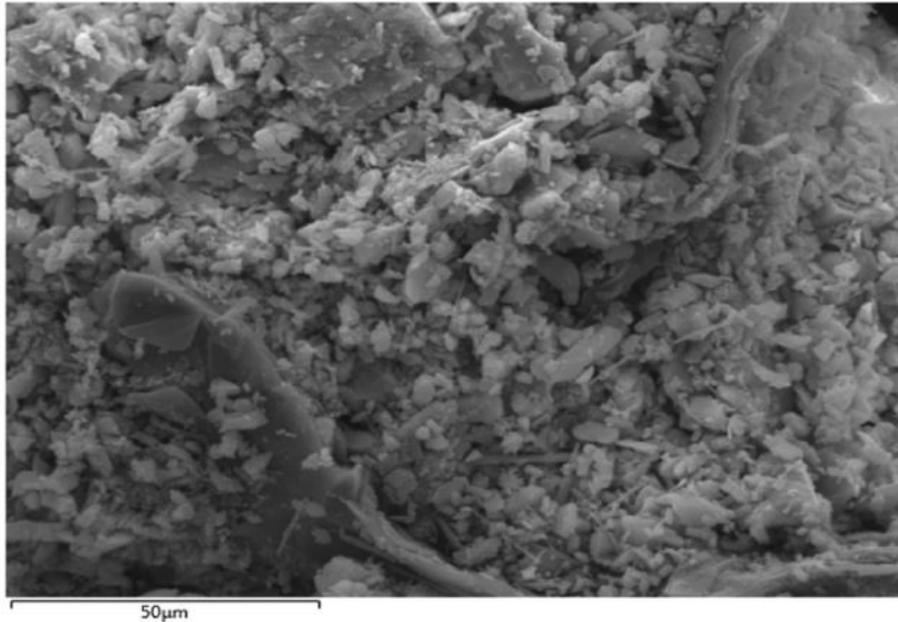


Figura 3.7: MEV da cal de carbureto (SALDANHA *et al.*, 2018)

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Abordagem experimental

A abordagem experimental adotada nesse estudo está embasada em conceitos estatísticos de projeto e análise de experimentos (ver item 2.4), sendo possível realizar a avaliação e interação dos efeitos das variáveis (fatores) controladas sobre as variáveis respostas analisadas. Dessa maneira, realizou-se uma análise em 3 níveis através de um projeto composto de segunda ordem para os espécimes de resistência à compressão simples e uma análise com fatorial  $2^k$  para os espécimes de durabilidade e rigidez inicial.

As variáveis do estudo em questão podem ser classificadas em três tipos, sendo elas: as variáveis controláveis, fixas e resposta. Onde, as variáveis controláveis representam as grandezas que estão sendo manipuladas no estudo, as variáveis fixas são as que se mantêm constantes em todas as misturas e as variáveis resposta dependem de como a variável controlável é manipulada. No presente trabalho as variáveis são:

Variáveis controladas (ou independentes) para cada granulometria de vidro moído (contínua, uniforme e descontínua):

- a) variação do teor de finos em cada mistura ( $VM_{200}$ ): 10, 20 e 30%;

- b) peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ): 15,50, 16,50 e 17,50 kN/m<sup>3</sup>;
- c) teor de cal de carbureto (CC): 5, 8 e 11% (por adição).

Variáveis fixas (ou constantes):

- a) tipo de vidro: vidro soda-cal proveniente de garrafas de coloração verde (passante na peneira nº 4);
- b) tipo de cal: cal de carbureto (passante na peneira nº 100);
- c) teor de umidade (w): 9%;
- d) tempo de cura: 28 dias;
- e) temperatura de cura: 23 °C  $\pm$  2;
- f) umidade de cura: > 95%.

Variáveis resposta (ou dependentes):

- a) resistência à compressão simples ( $q_u$ );
- b) durabilidade (PMA);
- c) rigidez inicial ( $G_0$ ).

### 3.2.1.1 Preparo e dosagem das misturas

O estudo visa avaliar a interferência da granulometria na resistência à compressão simples ( $q_u$ ), rigidez inicial ( $G_0$ ) e durabilidade (PMA) em misturas de vidro-cal de carbureto. Para tal, foram definidas nove curvas granulométricas apresentadas na Figura 3.8. Onde foram estabelecidas três formas de distribuição granulométricas, sendo elas: contínua (GC), uniforme (GU) e descontínua (GD). Foram utilizadas as partículas de vidro passantes nas peneiras de malha nº 4, 8, 16, 30, 50, 100 e 200 para compor as curvas granulométricas.

No Apêndice A encontram-se os valores passantes em cada peneira, assim como o coeficiente de curvatura ( $C_c$ ), coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ), classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) e módulo de finura obtidos para cada uma das nove curvas granulométricas definidas para o estudo.

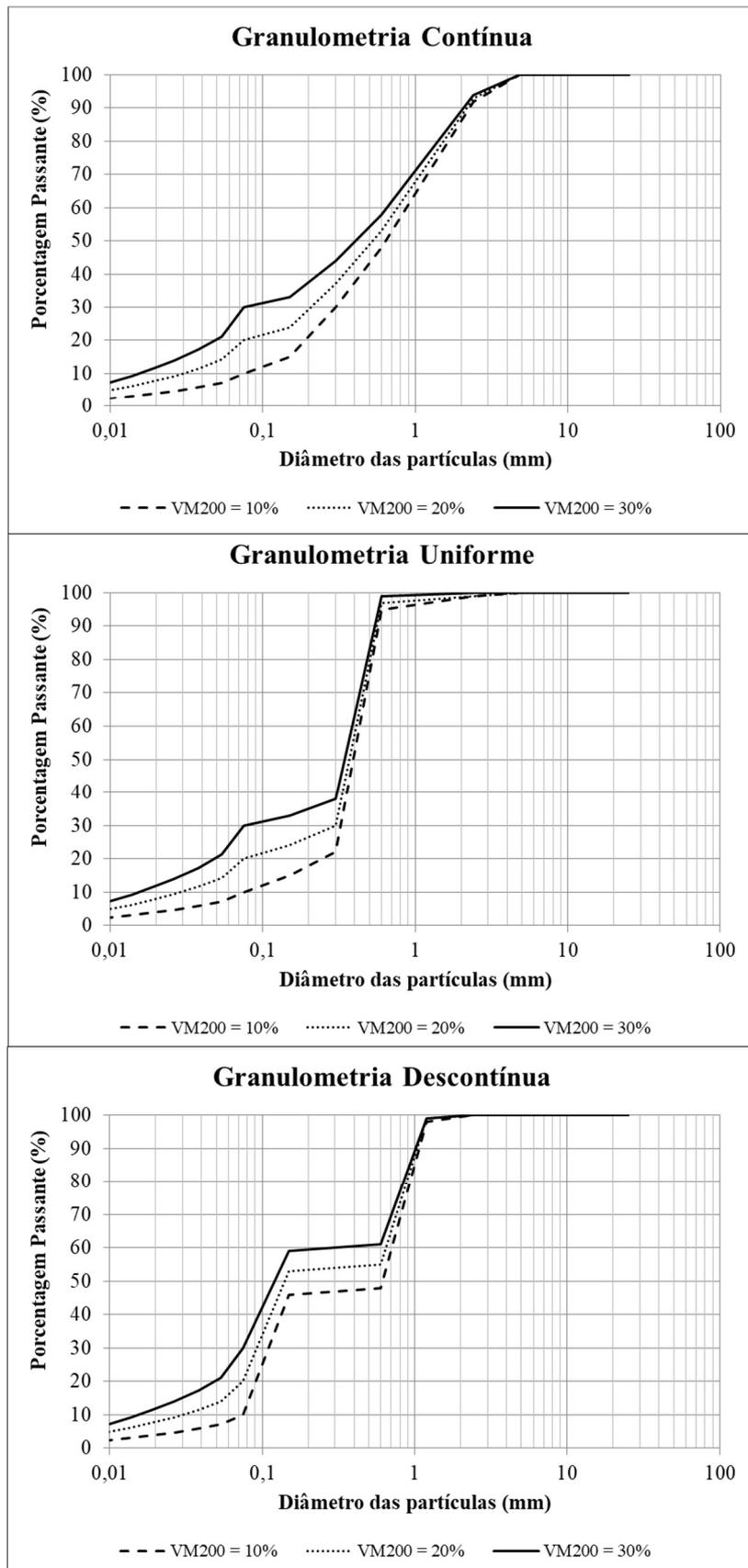


Figura 3.8: Curvas granulométricas adotadas no estudo

Os teores de cal de carbureto (CC) foram definidos com base na literatura estudada e, ainda, foi verificado o pH da mistura através do procedimento descrito na norma D 6276 (ASTM, 1999) com o auxílio de um pHmetro de bancada (Figura 3.9) para assegurar a alcalinidade da mistura.



Figura 3.9: pHmetro de bancada utilizado para aferição do pH das misturas

Para definir o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_d$ ) e a umidade ótima ( $w$ ), foram executados ensaios de compactação com energia normal e modificada, com base na NBR 7182 (ANBT, 2016). Ressaltando que o ensaio de compactação Proctor foi realizado apenas para a mistura de granulometria contínua com 30% de finos e sem adição de cal de carbureto, devido ao consumo elevado de material para o ensaio caso fosse executado em todas as nove curvas granulométricas e, também, por efeito de exsudação da mistura com 10% de VM<sub>200</sub>, não foi possível obter uma curva de compactação representativa da amostra.

Na Figura 3.10 pode-se observar o resultado do ensaio de compactação Proctor realizado, onde o teor de umidade ótimo foi de, aproximadamente, 11 e 8% para as misturas ensaiadas com energia normal e modificada, respectivamente. O peso específico aparente seco máximo para energia de compactação modificada ficou em torno de 18,9 kN/m<sup>3</sup> e para energia normal próximo a 17,8 kN/m<sup>3</sup>.

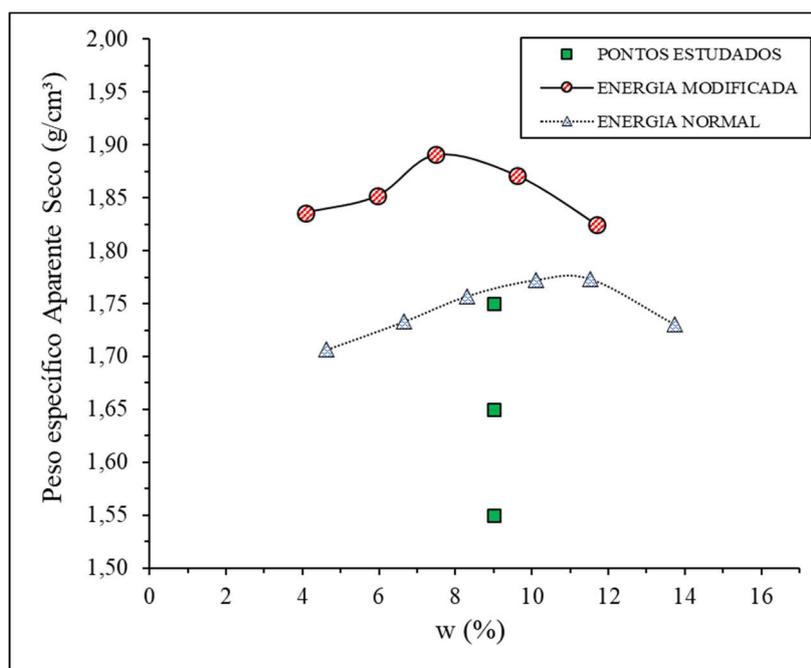


Figura 3.10: Ensaio de compactação para o vidro de granulometria contínua com 30% de finos passantes na peneira nº 200 (GC – 30% VM<sub>200</sub>)

A partir da curva obtida pelo ensaio de compactação realizado com energia normal e modificada definiu-se um teor de umidade intermediário e próximo ao ótimo para moldagem de todas as misturas, sendo este de 9%.

### 3.2.1.2 Definição dos níveis dos fatores controláveis

Sendo o projeto composto de segunda ordem com uma análise de três níveis adotado nesse estudo, na definição de cada um dos fatores controláveis buscou-se incluir níveis com dois extremos, máximo e mínimo e, um valor intermediário entre eles. Nesse contexto, o estabelecimento desses níveis – para cada um dos fatores (variáveis) controlados – seguiu diferentes critérios, mas em conformidade com os procedimentos de engenharia geotécnica. Tem-se como as variáveis controladas a quantidade de finos presente em cada mistura (VM<sub>200</sub>), o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e o teor de cal de carbureto (CC).

A quantidade de finos presente nas curvas granulométricas das misturas estudadas foi definida com base em pesquisas da área geotécnica, as quais utilizaram pozolanas em solos em conjunto com a cal (CONSOLI et al, 2018; WINTER, 2018). Com base nesses dados, o valor mínimo de VM<sub>200</sub> foi fixado em 10%, o intermediário em 20% e o máximo

em 30%. O teor de VM<sub>200</sub>, foi incorporado na granulometria do vidro moído, simulando uma areia siltosa, como pode ser observado na Figura 3.8.

Os valores de peso específico aparente seco foram embasados nas curvas de compactação apresentadas na Figura 3.10. Porém, a partir de testes de moldagem não foi possível chegar a valores de  $\gamma_d$  próximos aos da energia modificada, devido a capacidade de moldagem do macaco hidráulico e dos moldes metálicos. Logo, foram adotados como pontos de estudo os valores de  $\gamma_d$  mínimo, intermediário e máximo de, respectivamente, 15,5 kN/m<sup>3</sup>, 16,5 kN/m<sup>3</sup> e 17,5 kN/m<sup>3</sup>.

O teor mínimo de cal foi baseado em valores usuais empregados em engenharia geotécnica e similares a outros estudos com o uso de cal e pozolana incorporados ao solo. Com o intuito de verificar a alcalinidade da mistura, foi realizado o ensaio de pH, o qual seguiu os procedimentos presentes na norma D 6276 (ASTM, 1999).

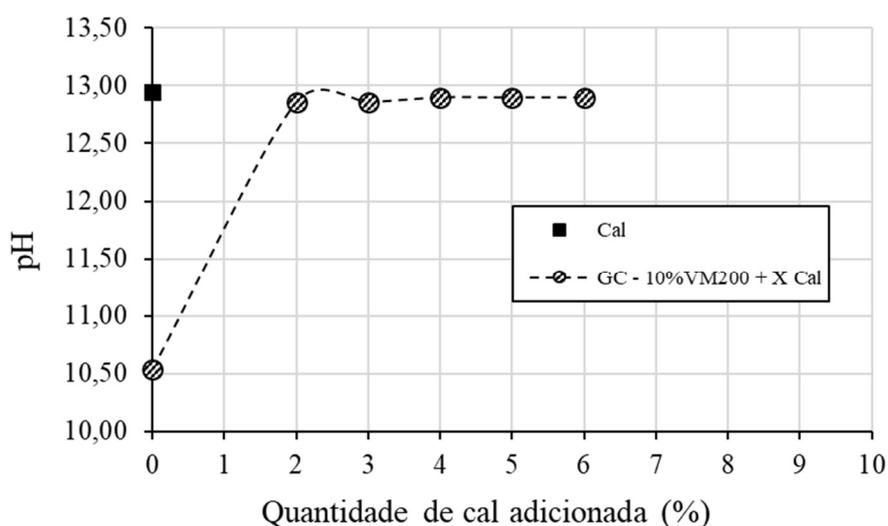


Figura 3.11: Resultado obtido para o método do pH de determinação do mínimo teor de cal

Foi estabelecido como teor mínimo 5% de cal, o máximo de 11% e o valor intermediário de 8%, a fim de se obter uma ampla variação do mesmo. Salientando que o ensaio foi realizado com a mistura de granulometria contínua com 10% de VM<sub>200</sub>, visto que é a granulometria que apresenta quantidades de vidro moído (VM) passante em todas as peneiras utilizadas e com menor quantidade VM<sub>200</sub> que tende a apresentar um pH inferior ao da mistura com 30% de VM<sub>200</sub>, por exemplo. O teor de cal é calculado em relação a soma da massa seca de VM.

### 3.2.1.3 Resumo da dosagem

As misturas (tratamentos) apresentadas a seguir foram obtidas por meio do *software* de estatística, através de projeto de experimentos utilizando-se o projeto composto de segunda ordem (PCSO) com uma análise de três níveis (Tabela 3.4).

Tabela 3.4: Resumo das variáveis controladas e seus níveis

<b>Projeto composto de segunda ordem (PCSO)</b>	
<b>Variável controlada</b>	<b>Níveis</b>
Teor de vidro passante na peneira nº200 (VM <sub>200</sub> )	10, 20 e 30%
Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )	15,50, 16,50 e 17,5 kN/m <sup>3</sup>
Teor de cal (CC)	5, 8 e 11%

Na Tabela 3.5 estão apresentadas as misturas realizadas com tempo de cura de 28 dias para o ensaio de resistência à compressão não confinada. Esse conjunto de corpos de prova foi moldado para cada tipo de granulometria. Para todas as misturas foram executados corpos de prova em triplicata, totalizando 48 corpos de prova por tipo de granulometria.

Tabela 3.5: Misturas de vidro moído-cal de carbureto para ensaio de compressão simples aos 28 dias

Mistura	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	CC (%)	VM <sub>200</sub> (%)
<b>1</b>	15,5	5	10
<b>2</b>	17,5	5	10
<b>3</b>	15,5	11	10
<b>4</b>	17,5	11	10
<b>5</b>	16,5	8	10
<b>6</b>	15,5	8	20
<b>7</b>	17,5	8	20
<b>8</b>	16,5	5	20
<b>9</b>	16,5	11	20
<b>10</b>	16,5	8	20
<b>11</b>	16,5	8	20
<b>12</b>	15,5	5	30
<b>13</b>	17,5	5	30
<b>14</b>	15,5	11	30
<b>15</b>	17,5	11	30
<b>16</b>	16,5	8	30

Para os ensaios de durabilidade e rigidez, as misturas foram igualmente obtidas através de um *software* estatístico, porém através de projeto de experimento utilizando-se fatorial

2<sup>k</sup>. Ou seja, esse contém dois níveis sendo os máximos e mínimos definidos anteriormente, como pode ser observado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Resumo das variáveis controladas nos ensaios de durabilidade e rigidez e seus níveis

<b>Projeto Fatorial 2<sup>k</sup></b>	
<b>Variável controlada</b>	<b>Níveis</b>
Teor de vidro passante na peneira n°200 (VM <sub>200</sub> )	10 e 30%
Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )	15,50 e 17,5 kN/m <sup>3</sup>
Teor de cal (CC)	5 e 11%

Na Tabela 3.7 estão apresentadas as misturas realizadas com tempo de cura de 28 dias para os ensaios de durabilidade e rigidez inicial. Esse conjunto de corpos de prova foi moldado apenas para granulometria contínua devido ao grande consumo de material caso fosse executado para todas as granulometrias. As misturas foram executadas sem replicação, totalizando 8 corpos de prova com dimensões de, aproximadamente, 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura.

Tabela 3.7: Misturas de vidro moído-cal de carbureto para os ensaios de durabilidade e rigidez aos 28 dias

Mistura	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	CC(%)	VM <sub>200</sub> (%)
<b>1</b>	15,5	5	10
<b>2</b>	17,5	5	10
<b>3</b>	15,5	5	30
<b>4</b>	17,5	5	30
<b>5</b>	15,5	11	10
<b>6</b>	17,5	11	10
<b>7</b>	15,5	11	30
<b>8</b>	17,5	11	30

### 3.2.2 Procedimento dos ensaios

A seguir serão exibidos os procedimentos de moldagem e cura dos corpos de prova, assim como os ensaios utilizados durante o estudo para obtenção dos parâmetros de resistência, rigidez inicial e durabilidade.

#### 3.2.2.1 Moldagem dos corpos de prova

Todos os corpos de prova (CPs) utilizados neste estudo foram moldados no Laboratório de Tecnologia da Construção - LATEC na Universidade do Vale do Taquari.

Os espécimes utilizados para realizar os ensaios de compressão não confinada (compressão simples) foram moldados em molde metálico tripartido com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (Figura 3.12), os mesmos foram moldados com o auxílio de uma prensa mecânica com capacidade para 20 toneladas. Os corpos de prova utilizados para os ensaios de durabilidade/rigidez foram moldados em um molde Proctor com dimensões de 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura e extrudados. Os critérios de aceitabilidade quanto as moldagens foram de 10% para cada dimensão para mais ou para menos.



Figura 3.12: Molde tripartido de dimensões 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura

Todos os corpos de prova foram constituídos de três camadas de mesma massa, onde no encontro de cada camada a interface era escarificada para, posteriormente, receber a próxima camada, mantendo-se uma boa aderência entre as mesmas. Após, os espécimes foram, na devida ordem, desmoldados ou extrudados mecanicamente (no caso dos espécimes de durabilidade/rigidez), pesados em balança com precisão de 1 mg, medidos e levados até a câmara úmida para a realização do processo de cura.

### 3.2.2.2 Cura dos corpos de prova

A cura dos corpos de prova foi realizada em câmara úmida com temperatura e umidade controladas de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2$  e superior a 95%, respectivamente. Onde os espécimes eram acondicionados sobre placas planas de vidro com leve inclinação para evitar o acúmulo de água na base, como pode ser observado na Figura 3.13. O período de cura de todos os corpos de prova foi de 28 dias, visto que as reações pozolânicas tendem a ser mais evidentes a partir de maiores períodos de cura, como citado no item 2.1.3.1.



Figura 3.13: Corpos de prova acondicionados em câmara úmida

### 3.2.2.3 Resistência à compressão não confinada

Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia da Construção – LATEC na Universidade do Vale do Taquari. O método de ensaio realiza-se conforme as recomendações da NBR 12025 (ABNT, 2012), a qual foi utilizada uma prensa automática com capacidade de 5 tf e com velocidade de subida de 1,14 mm/min para o rompimento dos espécimes. Para realização desse ensaio foram moldados corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Anteriormente ao rompimento dos corpos de prova, os mesmos foram imersos em água por cerca de 24 horas, com o objetivo de evitar possíveis efeitos de sucção.

Para o cálculo da resistência à compressão não confinada ( $q_u$ ) foi utilizada a Equação 3.1:

$$q_u = \frac{F}{A_{cp}} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde,

$q_u$  = resistência à compressão não confinada (Mpa);

F = carga de ruptura (kgf);

$A_{cp}$  = área da seção transversal do corpo de prova (cm<sup>2</sup>).

#### 3.2.2.4 Durabilidade

O desenvolvimento do ensaio de durabilidade deu-se no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental – LEGG na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem seguiram os procedimentos descritos na norma D 559 (ASTM, 2015). Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 12,73 cm de altura e submetidos a doze ciclos seguindo-se os procedimentos descritos:

- a) após a moldagem os corpos de prova foram submetidos a cura úmida de 28 dias;
- b) curados durante o período preestabelecido, os espécimes foram colocados em imersão por 5 horas e acondicionados em uma estufa à  $71^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  por um período de 42 horas;
- c) tiveram sua massa aferida;
- d) efetuou-se então a escovação das faces e laterais dos corpos de prova utilizando-se uma escova de aço e aplicando-se uma força de aproximadamente 13,3 N por 18 vezes e mais 4 no topo e 4 na base;
- e) foi executada a aferição da massa final, podendo ser obtida a perda de massa que ocorreu durante o ciclo;
- f) o corpo de prova foi deixado em imersão em água por um período de 5 horas;
- g) para iniciar um novo ciclo, o corpo de prova voltava a estufa após o período de imersão.

#### 3.2.2.5 Ensaio de Pulso Ultrassônico

O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental – LEGG na Universidade Federal do Rio Grande do Sul com o auxílio de um equipamento de ultrassom (Figura 3.14).



Figura 3.14: Execução do ensaio utilizando equipamento de ultrassom

O procedimento consiste em medir os tempos de propagação de ondas de compressão (ondas P) e de cisalhamento (ondas S) ao longo dos corpos de prova, com o objetivo de se obter uma estimativa do módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_0$ ). O  $G_0$  do material foi obtido multiplicando a velocidade da onda cisalhante ( $v_s$ ) ao quadrado pela densidade do material ( $\rho$ ), como pode-se observar na Equação 3.2:

$$G_0 = \rho \cdot v_s^2 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

As ondas de compressão foram induzidas pela vibração dos transdutores a uma frequência de 54 kHz e, as ondas de cisalhamento, foram induzidas por outro tipo de transdutores específicos para tal medição a uma frequência de 250 kHz. Para a realização da leitura, a interface entre o transdutor e o corpo de prova era preenchida com um gel (específico para cada tipo de onda) que auxiliava na transmissão e leitura. Foram realizadas três medidas correspondentes ao tempo de deslocamento da onda de compressão ( $t_p$ ) e mais três medidas do tempo de deslocamento da onda cisalhante ( $t_s$ ). A leitura de  $t_p$  era realizada diretamente no equipamento de ultrassom e a leitura de  $t_s$  era realizada em um *software* fornecido pelo fabricante. De modo geral, o valor de  $t_p$  era inferior ao de  $t_s$  e ainda, no caso desse estudo, corresponde a aproximadamente a metade do valor de  $t_s$ . Esses procedimentos foram realizados após o tempo de cura dos espécimes.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, durabilidade e rigidez inicial. No qual as seções estão divididas por ensaio onde são apresentados os resultados, a análise estatística e, posteriormente, as variáveis respostas relacionadas com os índices  $\eta/(L_{iv})^k$  e  $\eta/(B_{iv})^k$ .

### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Após a realização do ensaio, foram obtidos os resultados de resistência à compressão simples para 144 espécimes. Na Tabela 4.1 são apresentados os valores de  $q_u$ , a média das triplicatas de cada mistura ( $\bar{X}$ ), o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de variação (CV) para todos os espécimes moldados para as granulometrias contínua (GC), uniforme (GU) e descontínua (GD), nas quais variam-se os teores de vidro passantes na peneira de nº 200 ( $VM_{200}$ ), o teor de cal de carbureto (CC) e peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), como mostrado anteriormente na Tabela 3.5. No Apêndice B, encontram-se os dados gerais dos corpos de provas de resistência à compressão simples.

A partir dos resultados de resistência foram elaboradas as Figuras 4.1 a 4.12, nas quais estão presentes algumas análises relevantes a respeito do comportamento das misturas estudadas. A GC obteve um valor mínimo para a resistência à compressão simples de 0,4 MPa para a mistura nº 1 e máximo de 2,4 MPa para a mistura de nº 15, que possui 30% de  $VM_{200}$ , 11% de cal e 17,5 kN/m<sup>3</sup> de peso específico aparente seco. Os resultados obtidos para a GU tiveram as mesmas magnitudes.

Em relação a GD, os valores foram superiores em todas as misturas em comparação as demais granulometrias, sendo o valor mínimo obtido para a mistura de nº1, na qual a média das triplicatas foi de 1,1 MPa e, o valor máximo foi de 4,7 MPa para a mistura de nº 15.

Tabela 4.1: Resultados do ensaio de compressão simples

Mistura	Código CP	Granulometria Uniforme				Granulometria Contínua				Granulometria Descontínua			
		qu (kPa)	$\bar{X}$	$\sigma$	CV (%)	qu (kPa)	$\bar{X}$	$\sigma$	CV (%)	qu (kPa)	$\bar{X}$	$\sigma$	CV (%)
1	1	409	462	48	10,4	424	462	33	7,1	968	1116	129	11,5
	2	476				481				1185			
	3	502				481				1196			
2	4	1066	1089	20	1,8	1035	1032	93	9,0	2583	2453	119	4,8
	5	1097				937				2350			
	6	1102				1123				2427			
3	7	507	533	32	6,1	409	426	34	8,1	1092	1237	127	10,3
	8	569				404				1289			
	9	523				466				1330			
4	10	1154	1171	44	3,8	1051	1009	90	8,9	2826	2765	171	6,2
	11	1139				906				2572			
	12	1221				1071				2898			
5	13	828	832	31	3,8	554	625	73	11,6	1594	1713	122	7,1
	14	802				621				1837			
	15	864				699				1708			
6	16	838	857	24	2,9	585	747	143	19,1	1786	1751	108	6,2
	17	849				802				1837			
	18	885				854				1630			
7	19	1666	1649	44	2,7	1889	1911	39	2,0	3607	3607	31	0,9
	20	1599				1956				3576			
	21	1682				1889				3638			
8	22	1196	1164	37	3,2	1133	1190	57	4,8	2541	2524	94	3,7
	23	1123				1247				2608			
	24	1175				1190				2422			
9	25	1133	1194	52	4,4	1309	1353	66	4,9	2862	2891	27	0,9
	26	1227				1320				2914			
	27	1221				1428				2898			
10	28	1382	1392	83	6,0	1258	1251	22	1,7	2671	2708	45	1,7
	29	1315				1268				2696			
	30	1480				1227				2759			
11	31	1304	1382	68	5,0	1211	1232	27	2,2	2603	2657	50	1,9
	32	1434				1221				2665			
	33	1408				1263				2702			
12	34	1061	1140	69	6,1	963	938	42	4,5	1920	1906	33	1,7
	35	1190				890				1930			
	36	1170				963				1868			
13	37	2412	2317	82	3,5	2262	2491	236	9,5	3794	3987	168	4,2
	38	2272				2733				4099			
	39	2267				2479				4068			
14	40	1459	1389	109	7,9	1216	1227	14	1,1	2500	2489	63	2,5
	41	1263				1242				2422			
	42	1444				1221				2546			
15	43	2738	2453	403	16,4	2738	2759	95	3,4	4834	4741	166	3,5
	44	CPA*				2862				4839			
	45	2169				2676				4549			
16	46	1910	1968	66	3,3	1796	1877	71	3,8	3390	3317	78	2,4
	47	1956				1910				3328			
	48	2039				1925				3235			

\*CPA = Corpo de Prova Avariado

### 4.1.1 Efeito da cal

Na Figura 4.1 são apresentadas retas que mostram a variação da resistência à compressão simples em função do teor de cal. Cada reta, isoladamente, possui mesmo teor de finos, teor de umidade ( $w = 9\%$ ) e peso específico aparente seco.

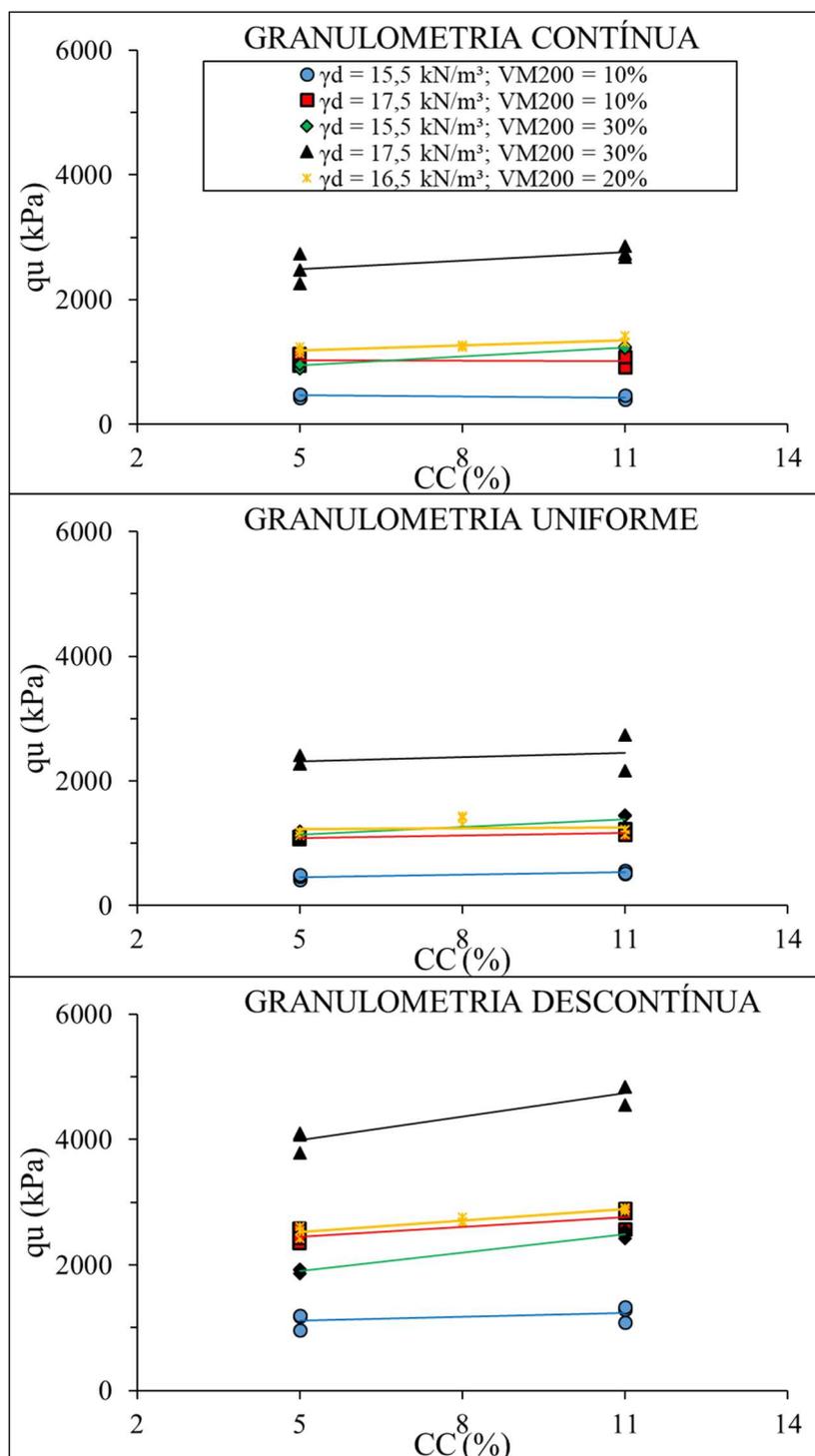


Figura 4.1: Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal

Os pontos plotados correspondem a cada corpo de prova das triplicatas. Pode-se observar que o teor de cal de carbureto presente na mistura exerce pouca influência sobre a variável resposta ( $q_u$ ), pois ao aumentar o teor de 5% para 11%, a resistência à compressão simples não tem aumento significativo. Permitindo-se supor que o teor de cal de 5% foi suficiente para a ocorrência das reações.

#### 4.1.2 Efeito do teor de finos

Na Figura 4.2 são apresentadas retas da variação da resistência à compressão simples em função do teor de finos. Cada reta, isoladamente, possui mesmo teor de cal de carbureto, teor de umidade ( $w = 9\%$ ) e peso específico aparente seco. Os pontos plotados correspondem a cada corpo de prova das triplicatas.

Pode-se observar que a quantidade de finos presentes na mistura exerce influência significativa sobre a variável resposta em questão, que ao aumentar de 10% para 30%, a resistência à compressão simples duplicou em alguns casos. Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade de finos na mistura, como pode ser analisado observando a reta central que representa os pontos centrais com 20% de finos,  $16,5 \text{ kN/m}^3$  de peso específico aparente seco e 8% de cal.

Considerando que, para a variação do teor de cal de carbureto estudado, esse teve baixa influência sobre a variável resposta  $q_u$  ou então que, no período estudado, as reações pozolânicas não aconteceram plenamente, o teor de finos da mistura pode ter causado efeito *filler*, já que o mesmo ocorre devido ao preenchimento dos vazios de empacotamento e gera melhor intertravamento entre os grãos.

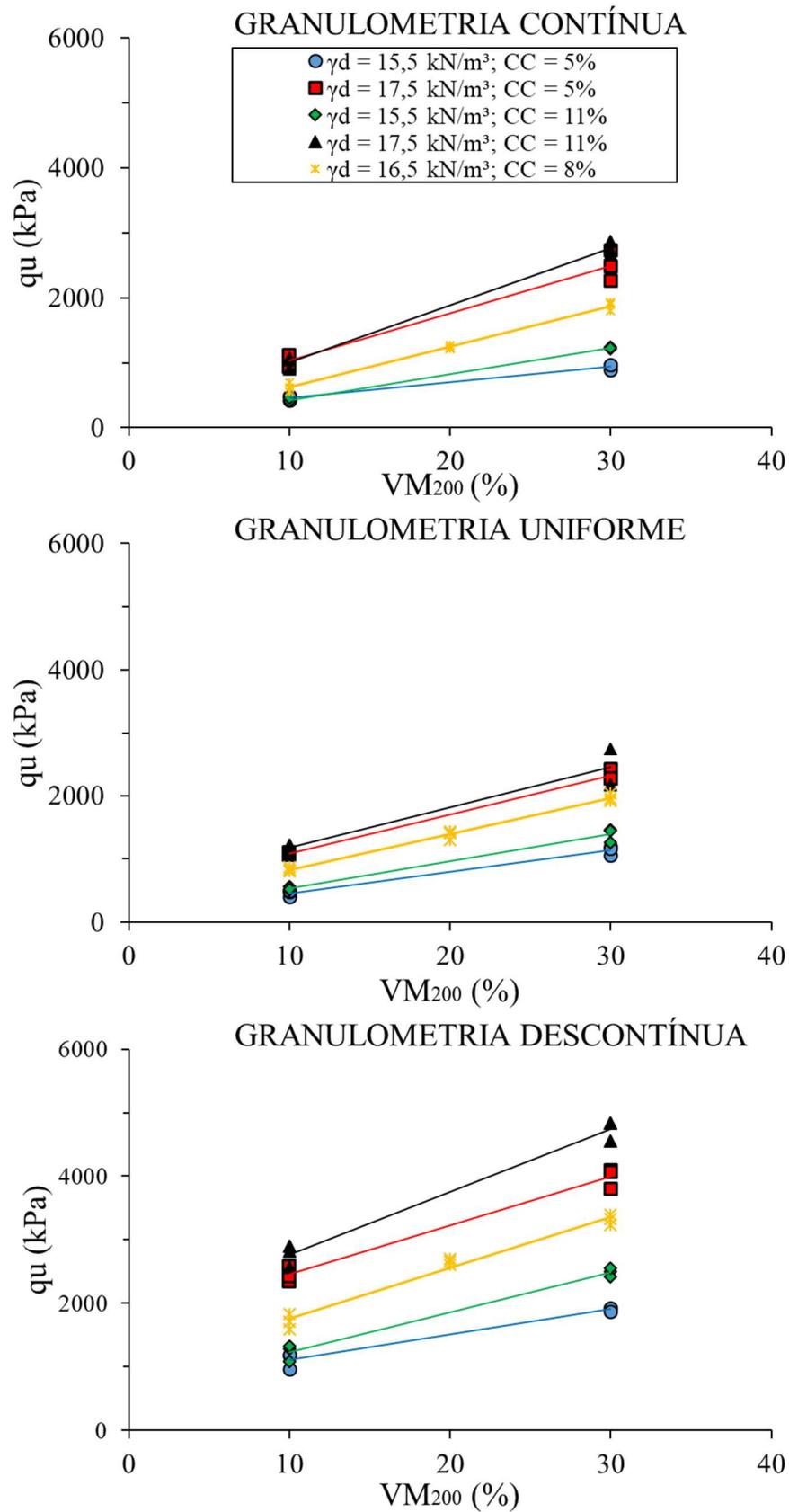


Figura 4.2: Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de finos

### 4.1.3 Efeito da Porosidade

Na Figura 4.3 são apresentadas as retas referentes à variação da resistência à compressão simples em função da porosidade da mistura compactada. Cada reta, isoladamente, possui mesmo teor de cal de carbureto, teor de umidade ( $w = 9\%$ ) e teor de finos. Os pontos plotados correspondem a cada corpo de prova das triplicatas. De maneira análoga à quantidade de finos presente na mistura, a porosidade exerce forte influência sobre a resistência à compressão simples para a mistura estudada. Os gráficos permitem analisar que uma pequena redução da porosidade pode promover ganhos significativos de resistência.

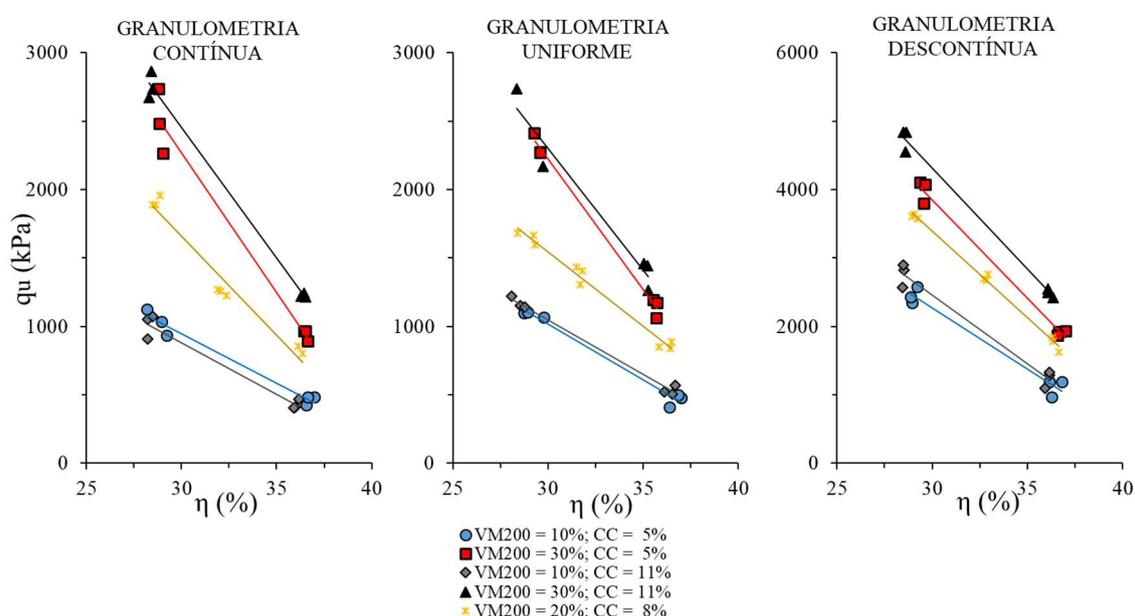


Figura 4.3: Variação da resistência à compressão simples em relação a porosidade

### 4.1.4 Projeto Composto de Segunda Ordem para o ensaio de resistência à compressão simples

Os gráficos de efeitos principais (de primeira ordem) relativos as três granulometrias em relação a variável resposta  $q_u$  estão representados nas Figuras 4.4 a 4.6. Pode-se observar uma linearidade entre as variáveis respostas e os fatores controláveis, corroborados pela tendência observada no ponto central. As Tabelas ANOVA encontram-se no Apêndice D.

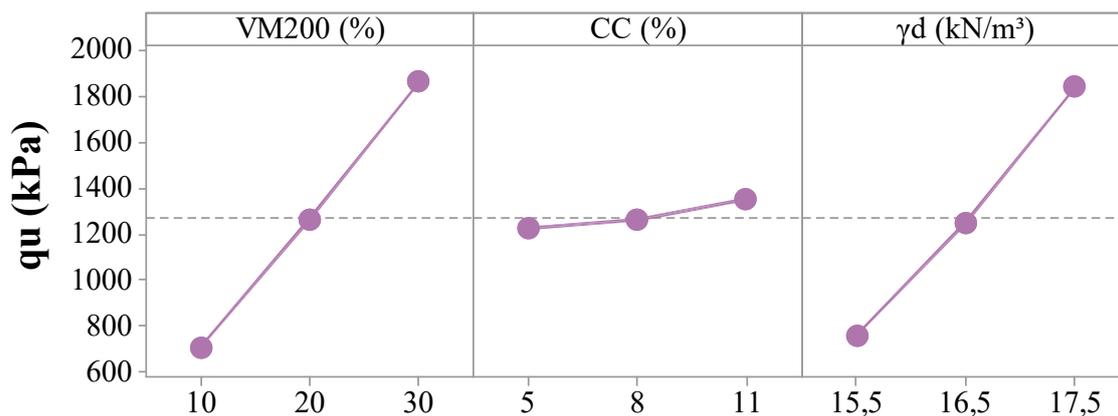


Figura 4.4: Gráfico de efeitos principais referente ao ensaio de  $q_u$  para a GC

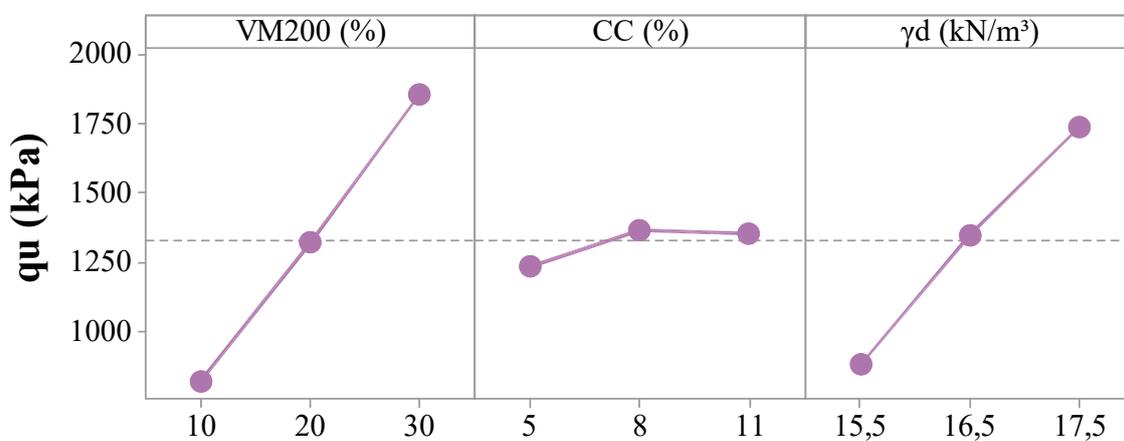


Figura 4.5: Gráfico de efeitos principais referente ao ensaio de  $q_u$  para a GU

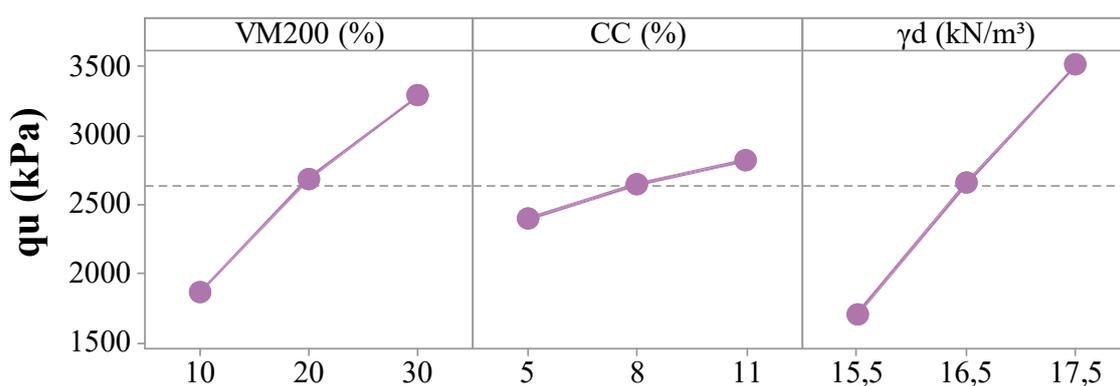


Figura 4.6: Gráfico de efeitos principais referente ao ensaio de  $q_u$  para a GD

A partir da análise dos resultados graficamente apresentados, considerando os limites experimentais aqui existentes, nota-se uma maior influência do peso específico aparente seco e do teor de finos presentes na mistura sobre a resistência à compressão simples dos

corpos de prova ensaiados. Isto pode ser explicado, em parte, pelo maior intertravamento entre as partículas de solo em consequência da maior área de contato para o desenvolvimento das reações no sistema vidro moído-cal e pela maior compacidade da mistura.

Por outro lado, o teor de cal não exerce influência significativa em nenhuma das granulometrias estudadas, esse comportamento pode indicar que um teor de 5% já é suficiente, nas condições aqui verificadas, para que se alcancem valores de resistência elevados. Porém, um maior tempo de cura pode ser necessário para que essa suposição seja confirmada, visto que parte do hidróxido de cálcio em excesso pode ainda não ter reagido com o VM<sub>200</sub> no período de 28 dias.

De modo geral, os gráficos de efeitos principais mostram que ao aumentar a quantidade de finos da mistura, pode-se obter um aumento significativo da resistência à compressão simples e, de maneira análoga, esse efeito acontece com o peso específico aparente seco. Diferentemente da cal de carbureto, que tende a não gerar efeitos significativos com o aumento do teor.

#### 4.1.5 Experimento Fatorial Completo para análise da influência da granulometria

O fatorial completo consiste basicamente em realizar todas as combinações possíveis dentro dos níveis de cada fator. No qual foram adotados os níveis máximos e mínimos (dois níveis) desse estudo para as variáveis VM<sub>200</sub> (10% e 30%), CC (5% e 11%) e  $\gamma_d$  (15,5 kN/m<sup>3</sup> e 17,5 kN/m<sup>3</sup>) e, uma análise em três níveis para as granulometrias (GU, GC e GD). As Tabelas ANOVA encontram-se no Apêndice D.

Os gráficos de efeitos principais referentes a todas as variáveis controladas em relação a variável resposta  $q_u$  estão apresentados na Figura 4.7. Na qual, pode-se observar que da granulometria uniforme para granulometria contínua praticamente não se observa melhora para as características granulométricas aqui estudadas, diferentemente do que ocorre com a granulometria descontínua que apresentou significativa melhora em relação às demais. Provavelmente promovida pelo maior número de contatos dos grãos visto que a GD tem um módulo de finura menor em relação a GU e GC. Apesar do comportamento da curva granulométrica ser descontínuo, a mesma foi composta por quantidades maiores

de partículas passantes nas peneiras mais finas, como pode ser observado na Figura 3.11 e no Apêndice A.

Quanto ao  $VM_{200}$ ,  $CC$  e  $\gamma_d$ , o comportamento observado é semelhante ao das análises feitas por PCSO que foi executada para cada granulometria separadamente e com a análise de pontos centrais.

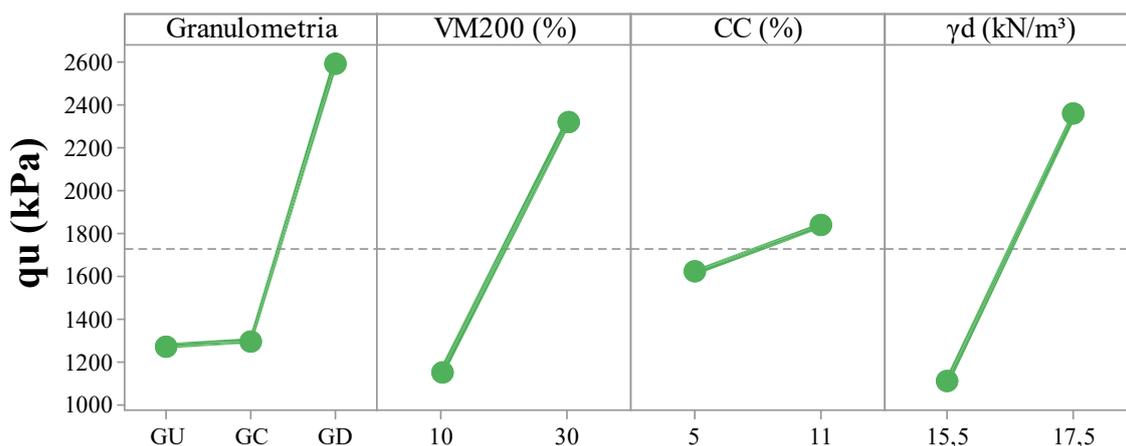


Figura 4.7: Gráfico de efeitos principais referente ao ensaio de  $q_u$

O Gráfico de interações (Figura 4.8) ilustra a semelhança nos resultados das granulometrias uniforme e contínua, nas quais as retas das interações com  $VM_{200}$ ,  $CC$  e  $\gamma_d$  ficaram extremamente próximas. Pode-se observar também que as interações com a variação dos teores de  $CC$  foram pouco influentes para os níveis aqui estudados.

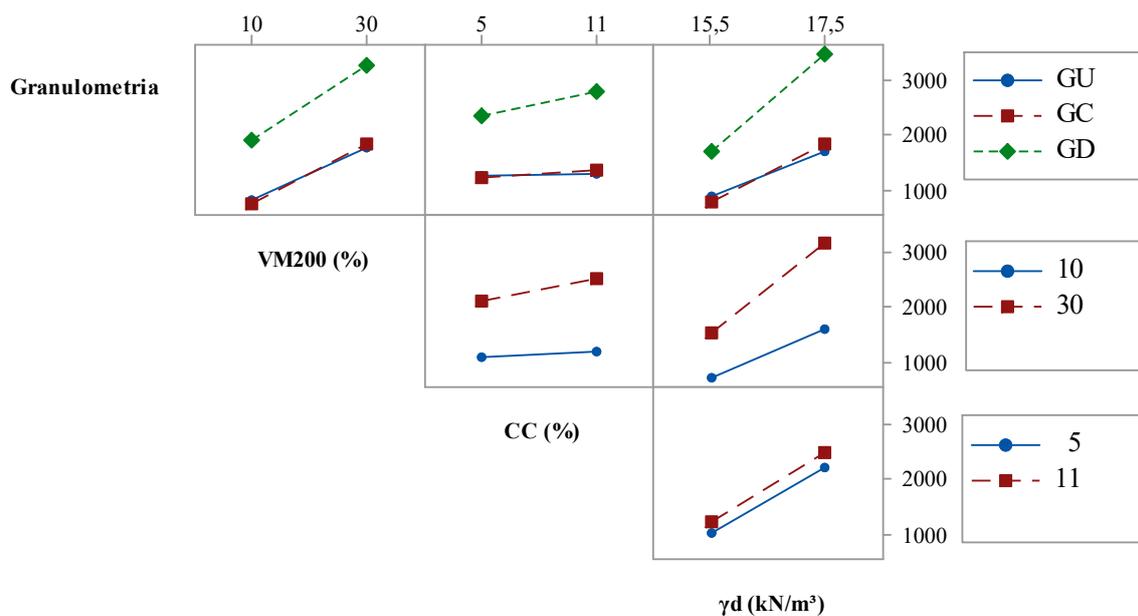


Figura 4.8: Gráfico de interações

#### 4.1.6 Resistência à compressão simples em função do índice $\eta/(L_{iv})^k$

Levando em consideração que o material estudado é uma areia artificial composta por vidro moído e estabilizada com cal de carbureto, os resultados de resistência à compressão simples podem ser relacionados ao índice porosidade/teor volumétrico de cal na tentativa de estabelecer relações matemáticas entre esse e a variável resposta.

Desse modo, relações da forma da Equação 2.8 foram propostas, nas quais o  $k$  foi adotado como 0,05, sendo esse o melhor ajuste verificado e, próximo ao valor fixado por Consoli et al. (2009a) de  $k$  igual a 0,06 para uma areia argilosa tratada com cal.

Sabe-se que quanto menor o coeficiente  $k$  maior a influência da porosidade em termos de resistência à compressão simples em relação ao teor volumétrico de cal. O valor aqui adotado corrobora com os resultados obtidos pela análise estatística que indica a baixa influência dos teores de cal de carbureto para os níveis estabelecidos.

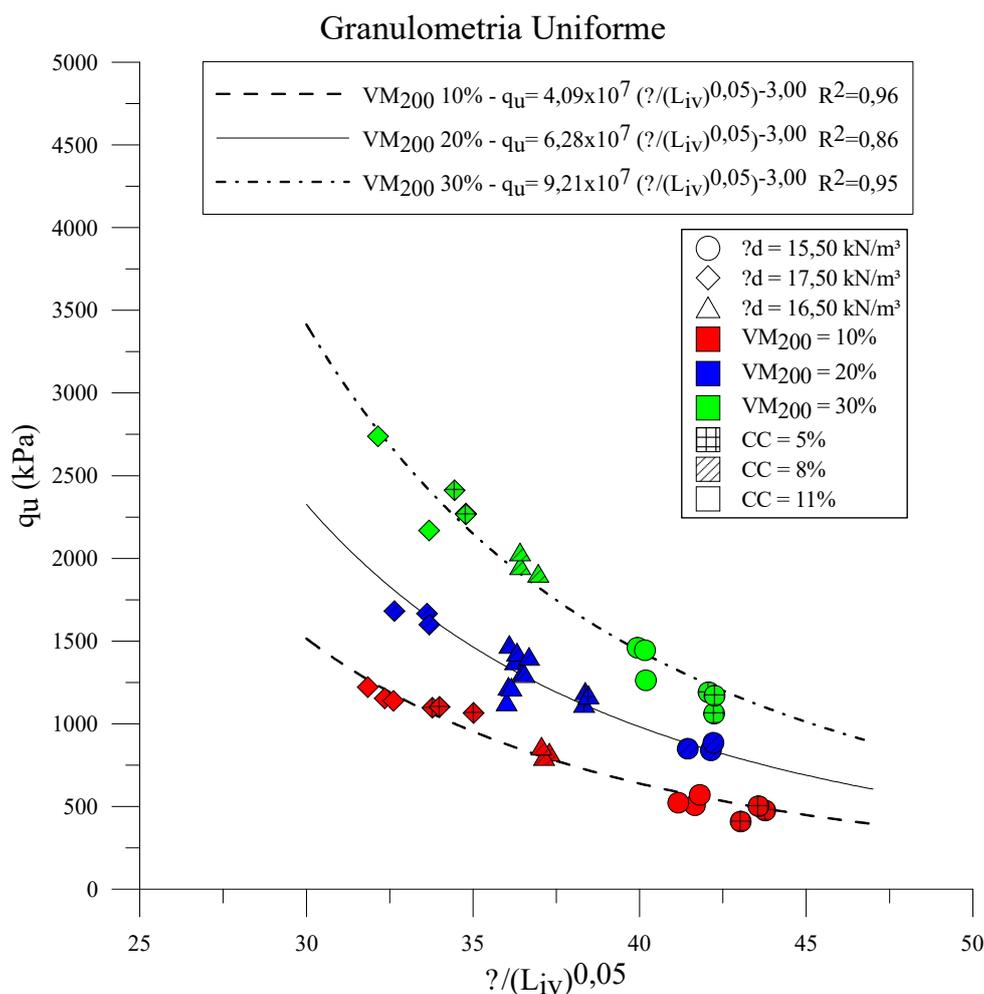


Figura 4.9: Relação entre  $q_u$  e  $\eta/(L_{iv})^{0,05}$  para a GU

Os resultados de resistência à compressão simples para os corpos de prova moldados com granulometria uniforme estão representados na Figura 4.9. Na qual, os dados experimentais são identificados quanto ao seu teor de cal, peso específico e teor de finos, a fim de corroborar com as análises feitas anteriormente. Os tratamentos plotados no gráfico são oriundos do projeto composto de segunda ordem (Tabela 4.1). A relação entre os dados experimentais e o índice  $\eta/(L_{iv})^{0,05}$  teve coeficientes de determinação para 10%, 20% e 30% de VM<sub>200</sub>, respectivamente, iguais a 96%, 86% e 95%.

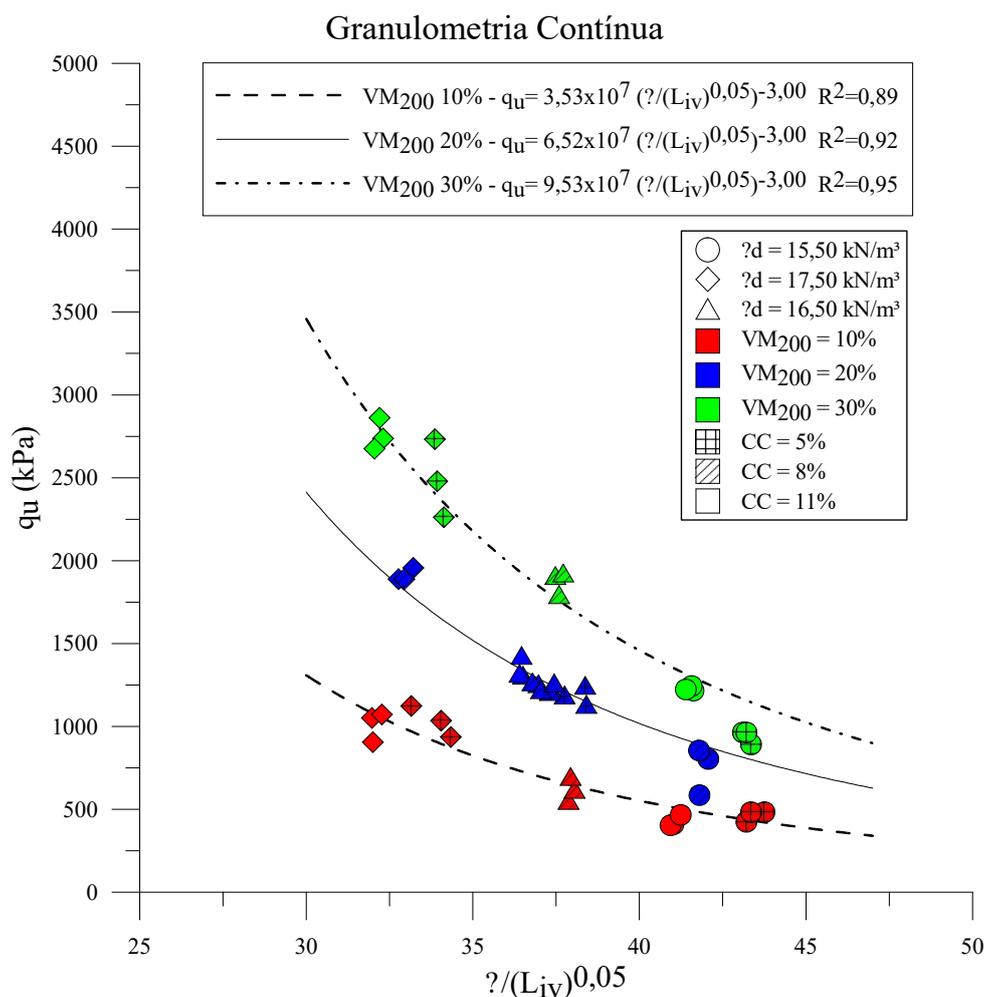


Figura 4.10: Relação entre  $q_u$  e  $\eta/(L_{iv})^{0,05}$  para a GC

De maneira análoga a GU, foram plotados os valores de resistência à compressão simples para a GC (Figura 4.10). Na qual a relação entre os dados experimentais e o índice  $\eta/(L_{iv})^{0,05}$  teve coeficientes de determinação para 10%, 20% e 30% de VM<sub>200</sub>, respectivamente, iguais a 89%, 92% e 95%. O coeficiente externo B foi fixado em -3,00 para todas as misturas, sendo um valor médio dos coeficientes obtidos nas equações de

melhor ajuste (*best fit*). De modo geral os resultados e o comportamento das GC e GU foram semelhantes, como pode ser observado pelos valores do escalar A das equações, tendo uma amplitude muito parecida.

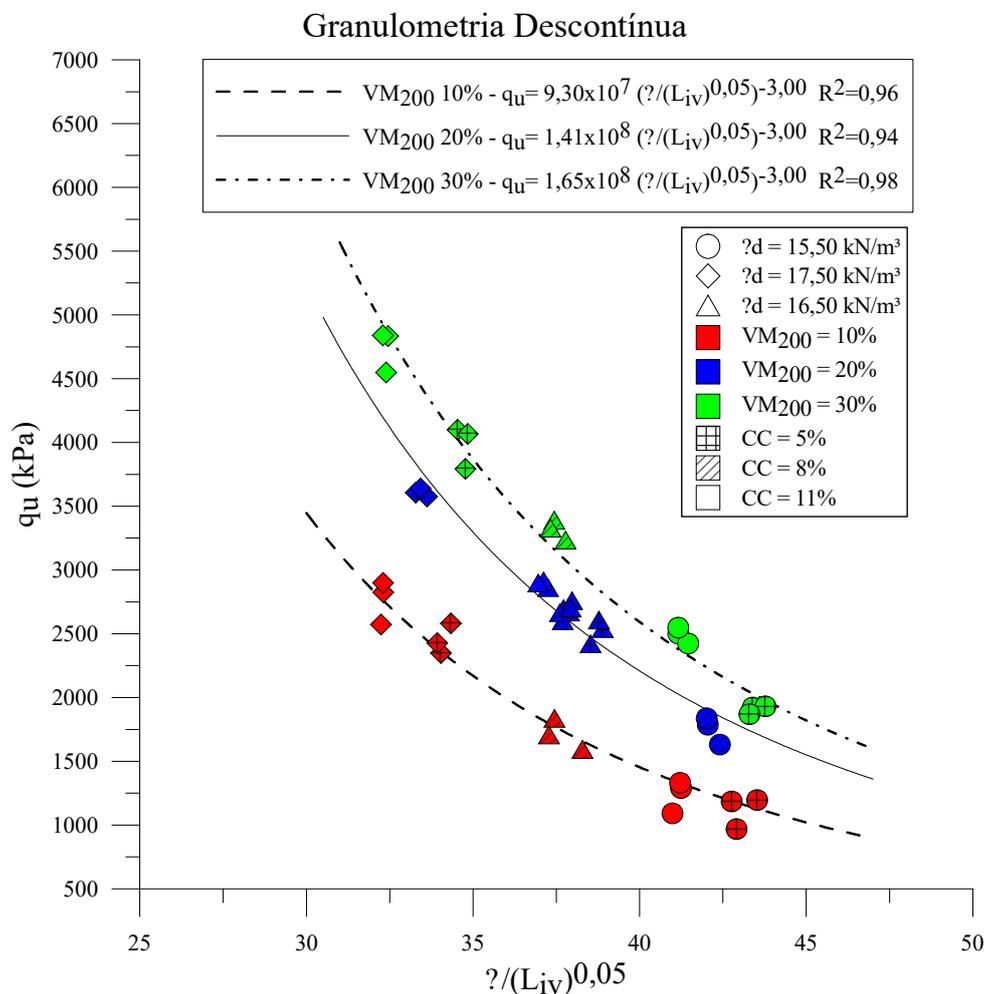


Figura 4.11: Relação entre  $q_u$  e  $\eta/(L_{iv})^{0,05}$  para a GD

Em comparação às demais granulometrias, a GD obteve valores de resistência à compressão simples maiores (Figura 4.11), como pode-se observar pela amplitude do valor do escalar A nas equações da curva. Nota-se o grande efeito do tipo de granulometria sobre a variável resposta, o qual pode se ter medida a partir do quociente entre as relações apresentadas, que resulta, em média, em 2. Isto é, a resistência à compressão simples para um espécime moldado com GD pode ser 2 vezes superior ao da mesma amostra moldada com GC ou GU.

Para as três granulometrias, pode-se perceber uma baixa dispersão dos dados experimentais com relação às equações, evidenciando que o ajuste é adequado para os níveis aqui estudados.

#### 4.1.7 Resistência à compressão simples em função do índice $\eta/(B_{iv})^k$

Tendo em vista que o material em estudo é uma areia de vidro composta de modo a obter porcentagens de finos passantes na peneira de nº 200 referentes a 10%, 20% e 30%, pode-se analisar ainda, o índice porosidade/teor volumétrico de ligante.

Estudos realizados por Consoli et al. (2018) e Winter (2018) que consideram o VM<sub>200</sub> (sílica em estado amorfo) reativo com a cal e, que ao longo do tempo, formam uma espécie de ligante por conta das reações pozolânicas, sendo o comportamento dessas, comparáveis do cimento Portland. Por esse motivo foi utilizado o expoente k igual a 0,28 que, em geral, é empregado para misturas de solos artificialmente cimentados contendo cimento Portland como estudado por Foppa (2005) e Consoli et al. (2007).

Tal expoente gerou uma boa correlação com a resistência à compressão simples para o material, na qual pode-se observar uma baixa dispersão entre os tratamentos e as curvas ajustadas. Os resultados podem ser observados nas Figuras 4.10 a 4.12. O expoente externo foi ajustado para as três granulometrias que, para o *best fit*, possuíam valores próximos ao definido ( $B = -3,57$ ). Sendo, o valor adotado, o mesmo valor teórico proposto por Diambra et al. (2017) para o  $\eta/(C_{iv})^{0,28}$ .

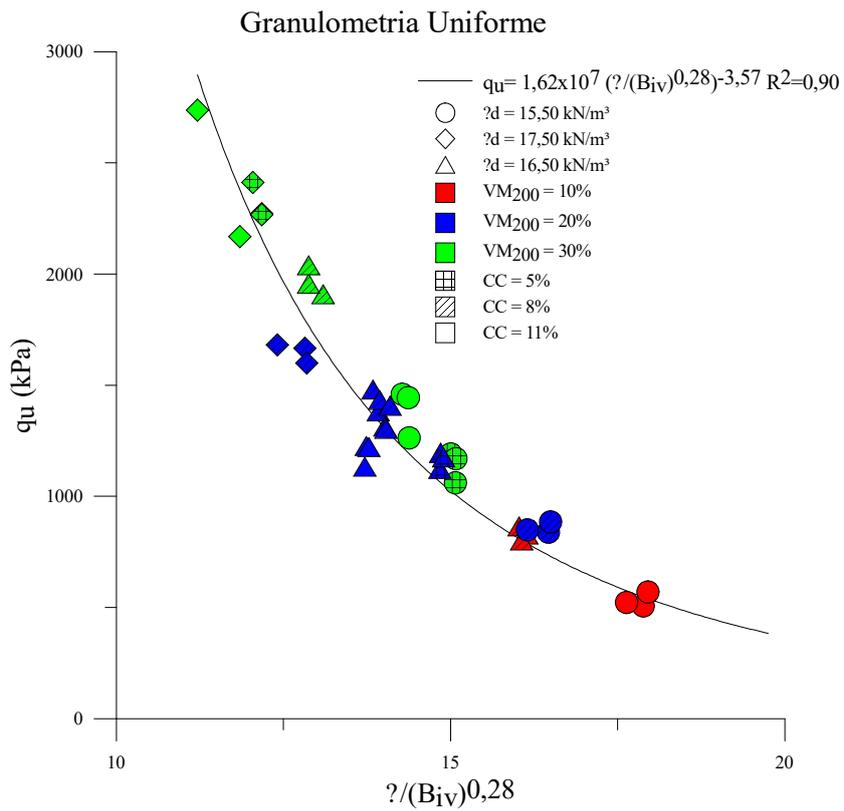


Figura 4.12: Relação entre  $q_u$  e  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  para a GU

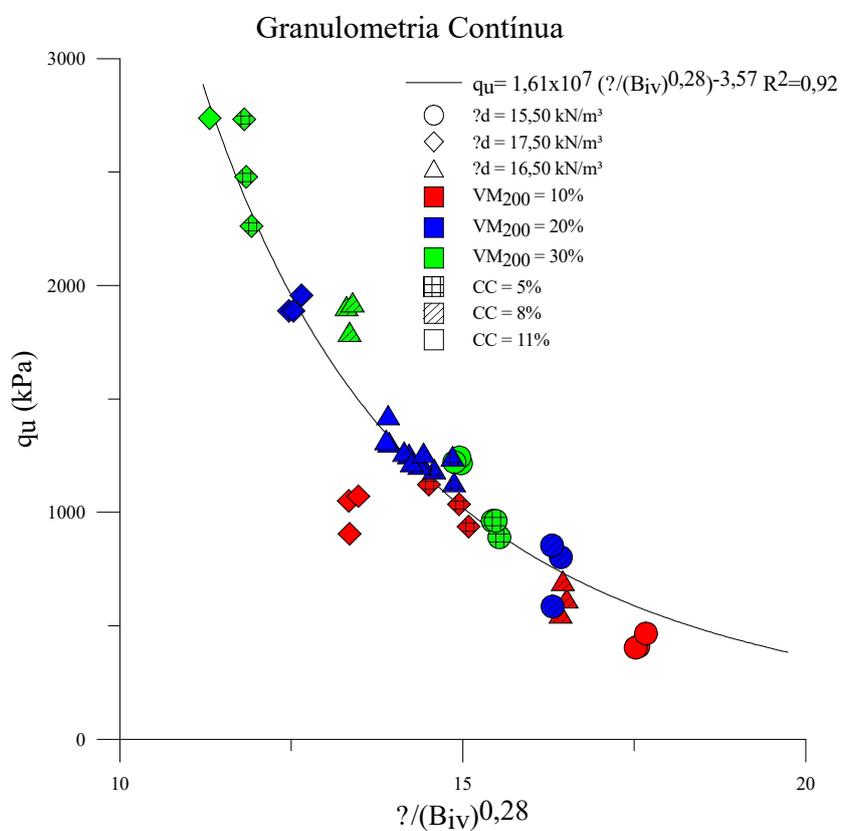


Figura 4.13: Relação entre  $q_u$  e  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  para a GC

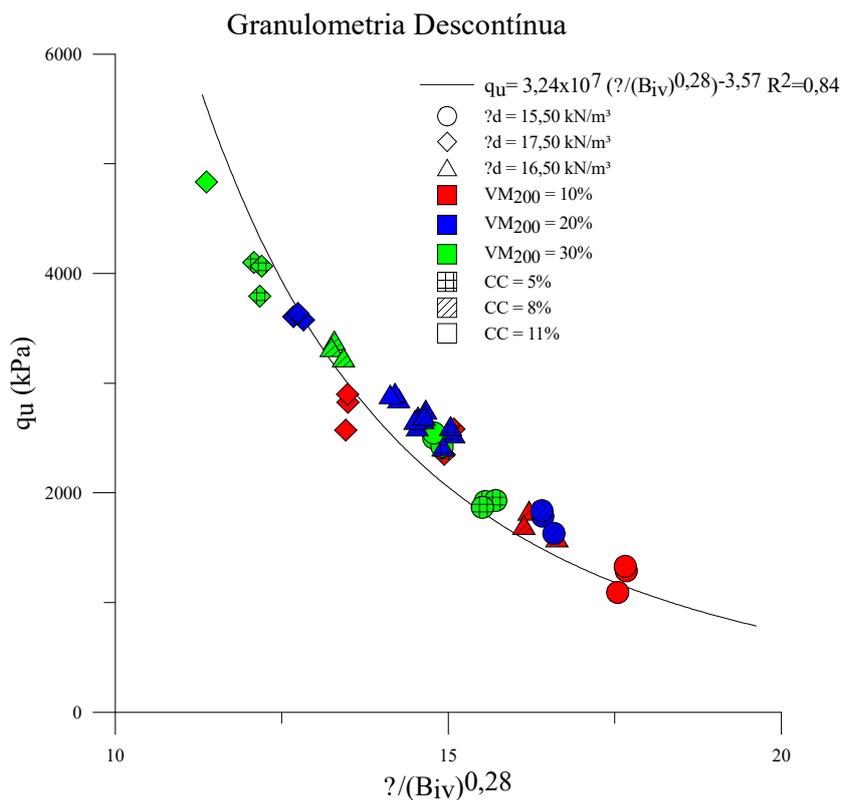


Figura 4.14: Relação entre  $q_u$  e  $\eta / (B_{iv})^{0,28}$  para a GD

## 4.2 RIGIDEZ INICIAL

Após a realização do ensaio com o equipamento de ultrassom foram obtidos os resultados de rigidez inicial para 8 tratamentos distintos. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores de  $G_0$  para os espécimes de 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura moldados apenas para a granulometria contínua (GC), na qual variam-se os teores de vidro passantes na peneira de nº 200 (VM<sub>200</sub>), o teor de cal de carbureto (CC) e peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ). No Apêndice C encontram-se os dados gerais dos corpos de provas de rigidez inicial.

Tabela 4.2: Resultados para o ensaio de rigidez inicial

Mistura	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	CC (%)	VM <sub>200</sub> (%)	$G_0$ (MPa)
1	15,5	5	10	2147,07
2	17,5	5	10	3424,42
3	15,5	5	30	2570,15
4	17,5	5	30	4260,11
5	15,5	11	10	1908,66
6	17,5	11	10	3452,32
7	15,5	11	30	2422,98
8	17,5	11	30	4150,64

#### 4.2.1 Projeto Fatorial $2^k$ para o ensaio de rigidez

O gráfico de efeitos principais referente aos resultados do ensaio de rigidez inicial é apresentado na Figura 4.15. O diagrama de Pareto com os efeitos principais é exposto na Figura 4.16. Uma vez que os ensaios de  $G_0$  foram realizados com um número menor de amostras, o nível de significância escolhido ( $\alpha$ ) foi igual a 10% e não mais 5%. Logo, há uma maior probabilidade de se cometer um erro nessa análise, isto é, rejeitar a hipótese nula quando essa é verdadeira. No entanto, a manutenção de um  $\alpha$  inferior a 10% poderia implicar na desconsideração da significância estatística de alguns efeitos importantes que, aparentemente, são influentes.

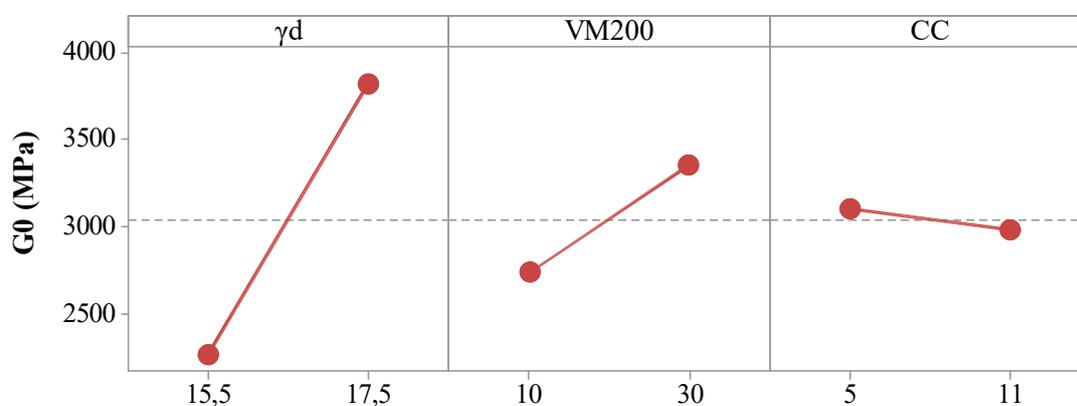


Figura 4.15: Gráfico de efeitos principais referente ao ensaio de  $G_0$

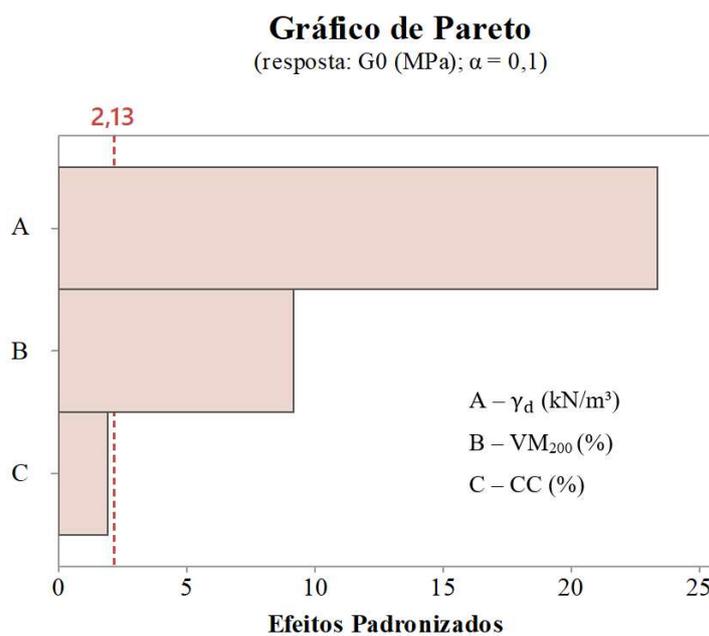


Figura 4.16: Gráfico de Pareto referente ao ensaio de  $G_0$

Analogamente a resistência à compressão simples, a rigidez inicial, considerando-se os limites aqui estipulados, também sofreu maior influência com a variação do peso específico aparente seco e do teor de finos passante na peneira de nº200. Sendo essas duas variáveis controladas as que possuem maiores níveis de significância, conforme mostra o gráfico de Pareto apresentado na Figura 4.16.

#### 4.2.2 Rigidez em função do índice $\eta/(L_{iv})^k$

Os resultados de rigidez inicial foram correlacionados com o parâmetro ajustado  $\eta/(L_{iv})^{0,05}$  de forma análoga ao exposto anteriormente para os resultados de resistência à compressão simples. A Figura 4.17 apresenta essa relação para os espécimes moldados com granulometria contínua com 10% e 30% de VM<sub>200</sub> e 5% e 11% de CC. As relações foram obtidas com coeficiente de determinação de 88% e 94%.

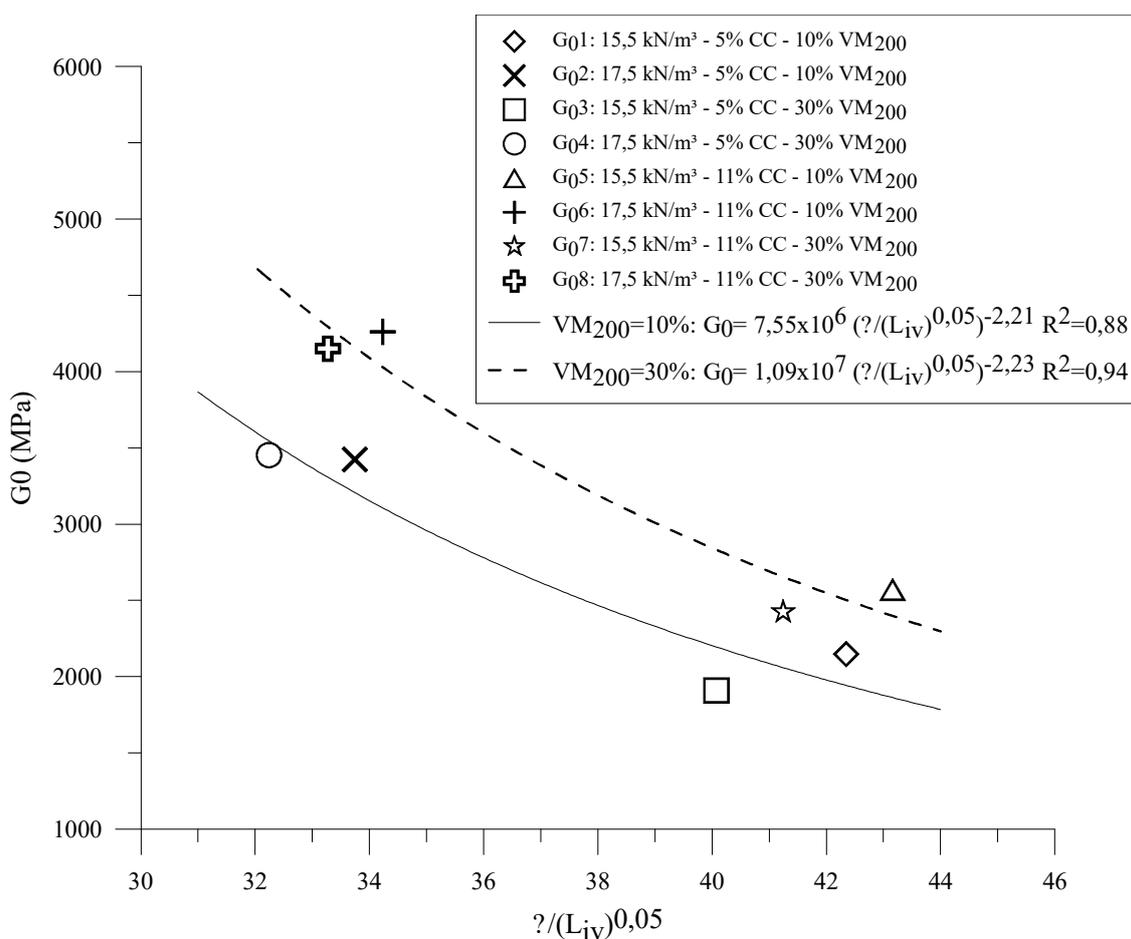


Figura 4.17: Relação entre  $G_0$  e  $\eta/(L_{iv})^{0,05}$  para a GC

### 4.2.3 Rigidez em função do índice $\eta/(B_{iv})^k$

Os resultados de rigidez inicial correlacionados com o parâmetro ajustado  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  analogamente ao exposto anteriormente para os resultados de resistência à compressão simples. A Figura 4.18 apresenta essa relação para os corpos de prova moldados com granulometria contínua. Para a relação foi obtido um coeficiente de determinação igual a 83%.

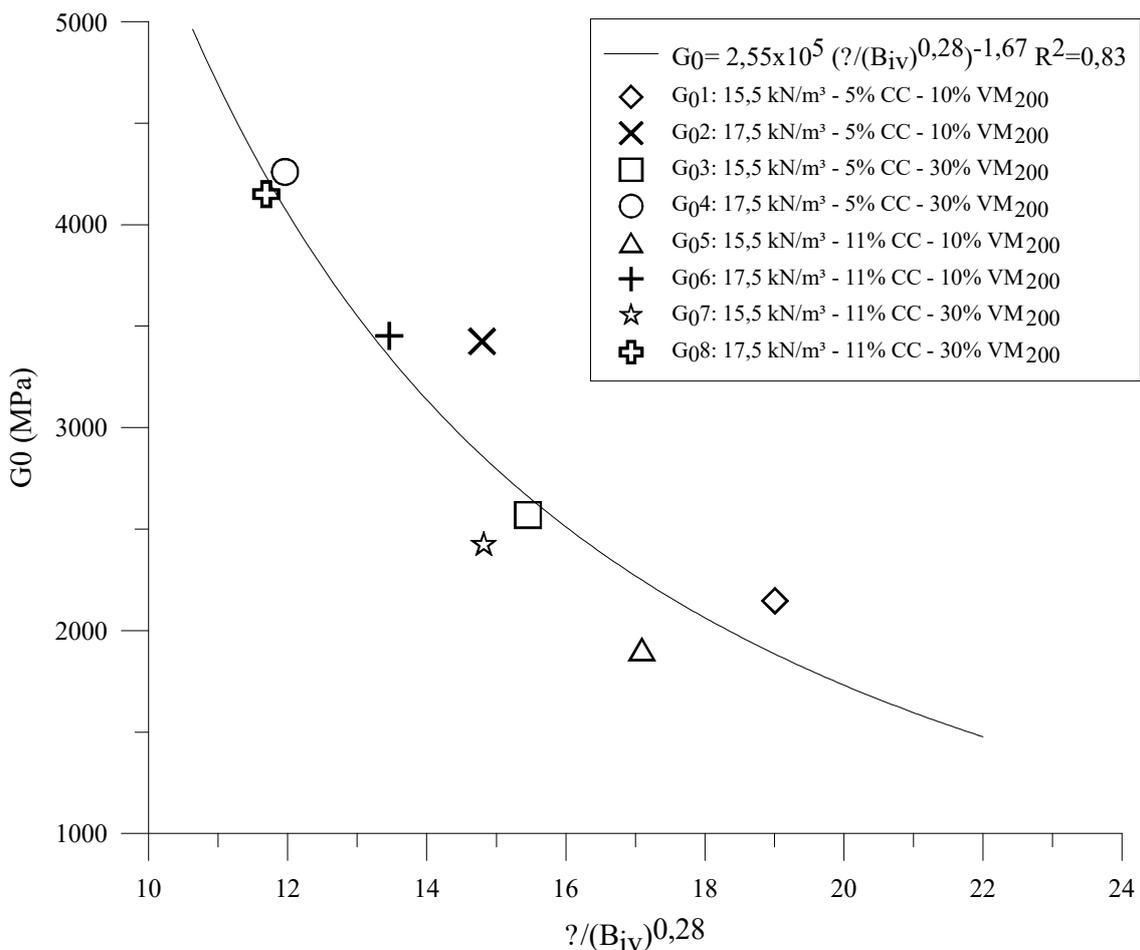


Figura 4.18: Relação entre  $G_0$  e  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  para a GC

Os coeficientes de determinação são considerados aceitáveis, todavia, há uma insuficiência de dados experimentais mais abrangentes, como pontos centrais e moldagem em triplicatas, para se obterem ajustes com maior confiabilidade tanto para a análise do  $\eta/(L_{iv})^{0,05}$  quanto para  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  em relação ao  $G_0$ .

## 4.3 DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM

Após a realização do ensaio foram obtidos os resultados de perda de massa acumulada para 8 tratamentos distintos. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de PMA (%) para os espécimes de 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura moldados apenas para a granulometria contínua (GC), na qual variam-se os teores de vidro passantes na peneira de nº 200 (VM<sub>200</sub>), o teor de cal de carbureto (CC) e peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ). No Apêndice C encontram-se os dados gerais dos corpos de provas de durabilidade.

Com o objetivo de expressar a perda de massa de cada amostra devido às escovações ao longo dos doze ciclos de molhagem e secagem, foram realizadas análises referentes à perda de massa individual (PMI) apresentada na Figura 4.19 e de perda de massa acumulada (PMA) como pode ser observado na Figura 4.20.

Tabela 4.3: Resultados para o ensaio de durabilidade

<b>Mistura</b>	<b><math>\gamma_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CC (%)</b>	<b>VM<sub>200</sub> (%)</b>	<b>PMA (%)</b>
<b>1</b>	15,5	5	10	3,85
<b>2</b>	17,5	5	10	2,84
<b>3</b>	15,5	5	30	2,03
<b>4</b>	17,5	5	30	1,26
<b>5</b>	15,5	11	10	2,40
<b>6</b>	17,5	11	10	2,43
<b>7</b>	15,5	11	30	0,87
<b>8</b>	17,5	11	30	0,68

Nota-se na Figura 4.19 que o primeiro ciclo apresentou uma taxa de perda de massa individual maior quando comparado aos demais ciclos. A partir do segundo ciclo a taxa de perda apresenta um comportamento um pouco mais constante, com exceção de alguns picos como nos ciclos 5 e 6 para o corpo de prova D1. Essas variações podem ocorrer devido às condições de execução da escovação no ensaio, no qual o operador se torna uma variável não controlada do sistema. Geralmente os espécimes mais suscetíveis a essa maior variação durante o ensaio são os mais frágeis do conjunto.

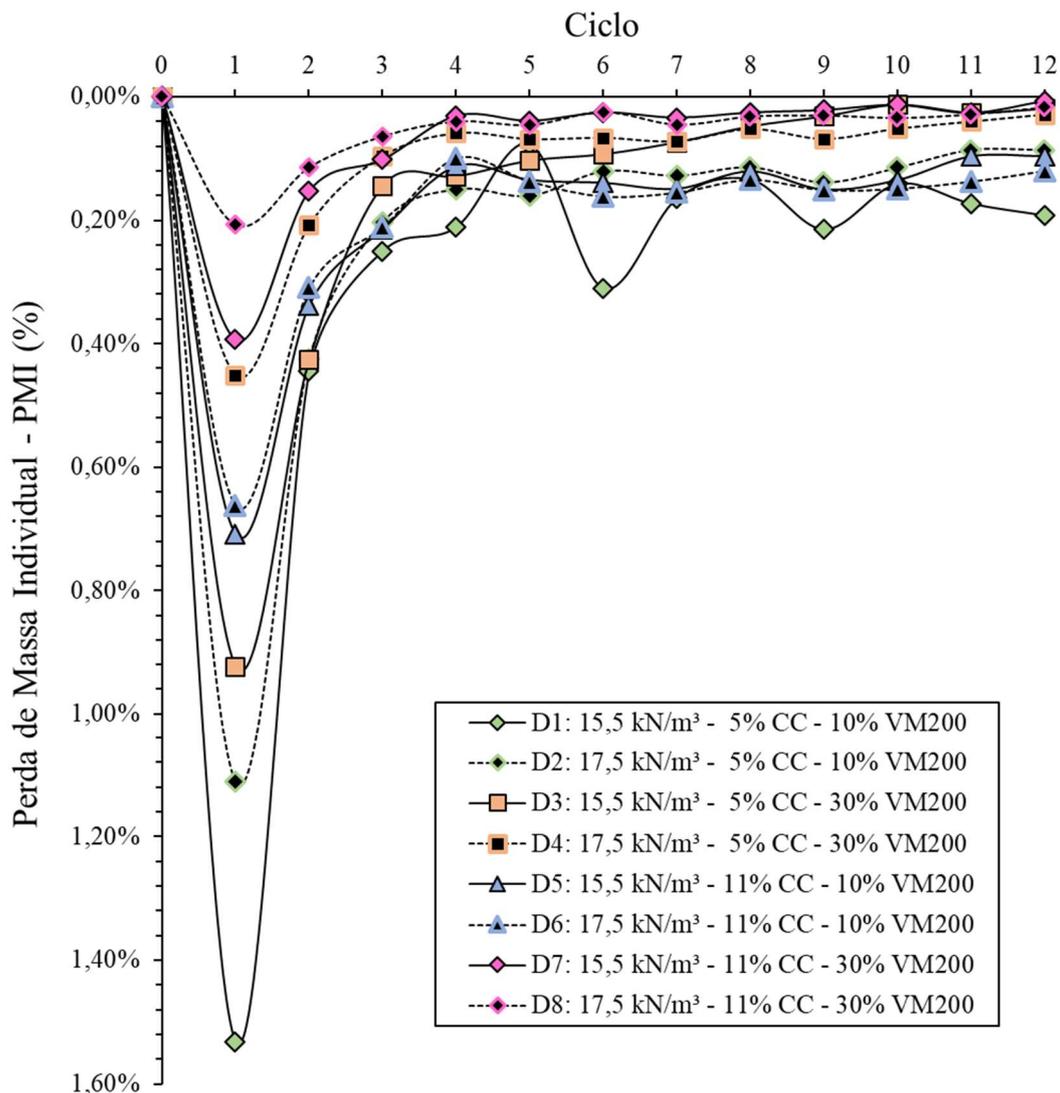


Figura 4.19: Perda de massa individual por ciclo para o ensaio de durabilidade

A partir dos resultados de perda de massa acumulada pode-se verificar a influência significativa das variáveis controladas sobre a variável resposta e também, a pouca perda de massa ao longo dos ciclos para os tratamentos em questão. No qual a maior perda de massa foi para o corpo de prova D1, sendo de 3,85% e a menor, como esperado pois é o tratamento com maior quantidade de finos, maior compactidade e maior teor de cal, para o corpo de prova D8 que perdeu apenas 0,68%. Fica evidente que o acréscimo de VM<sub>200</sub> traz melhoria em relação a perda de massa acumulada para ciclos de molhagem e secagem para as misturas estudadas. A verificação estatística da influência das variáveis controladas encontra-se no item a seguir.

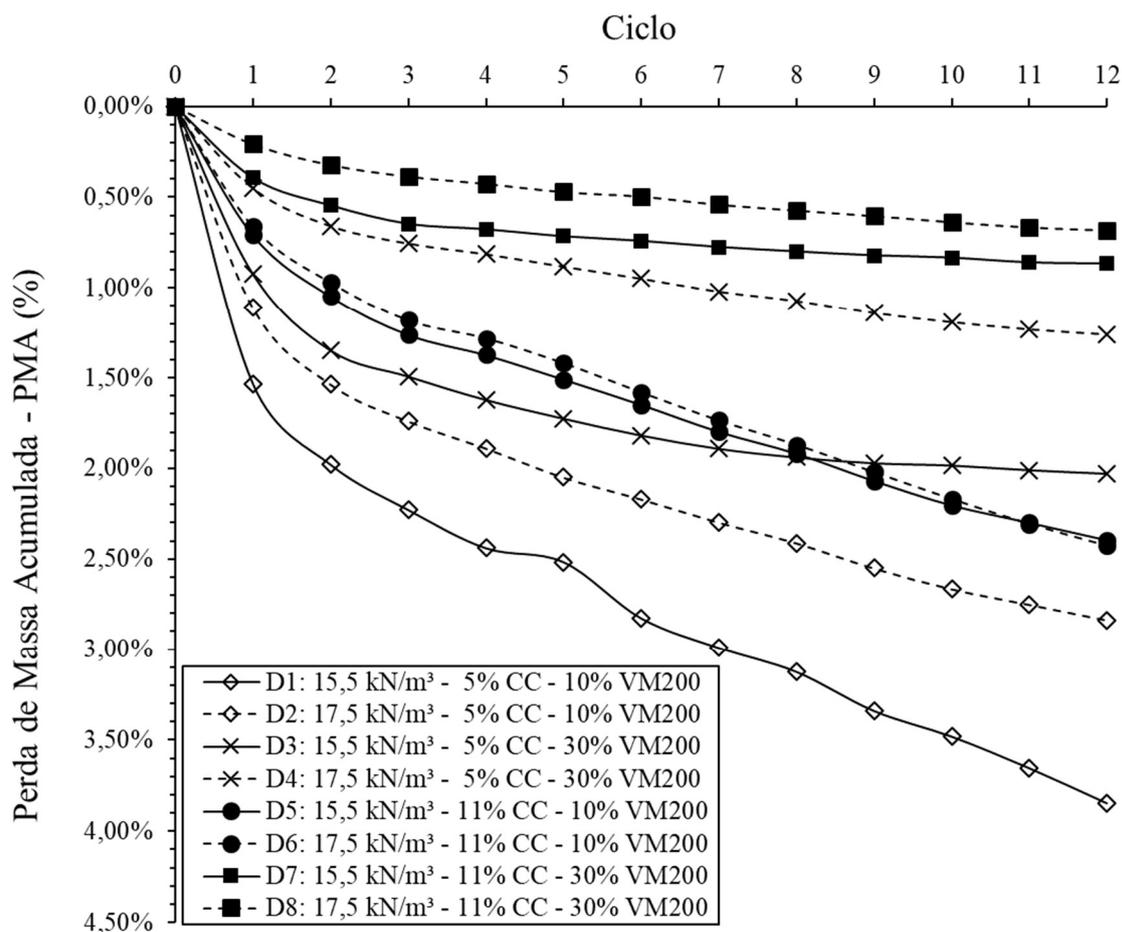


Figura 4.20: Perda de massa acumulada para o ensaio de durabilidade

#### 4.3.1 Projeto Fatorial 2<sup>k</sup> para o ensaio de durabilidade

O gráfico de efeitos principais referente aos resultados do ensaio de durabilidade é apresentado na Figura 4.21. O diagrama de Pareto com os efeitos principais é exposto na Figura 4.22. Uma vez que os ensaios de PMA foram realizados com um número menor de amostras, o nível de significância escolhido ( $\alpha$ ) foi igual a 10% e não mais 5%. Visto que, como dito anteriormente, a manutenção de um  $\alpha$  inferior a 10% poderia implicar na desconsideração da significância estatística de alguns efeitos importantes que, aparentemente, são influentes.

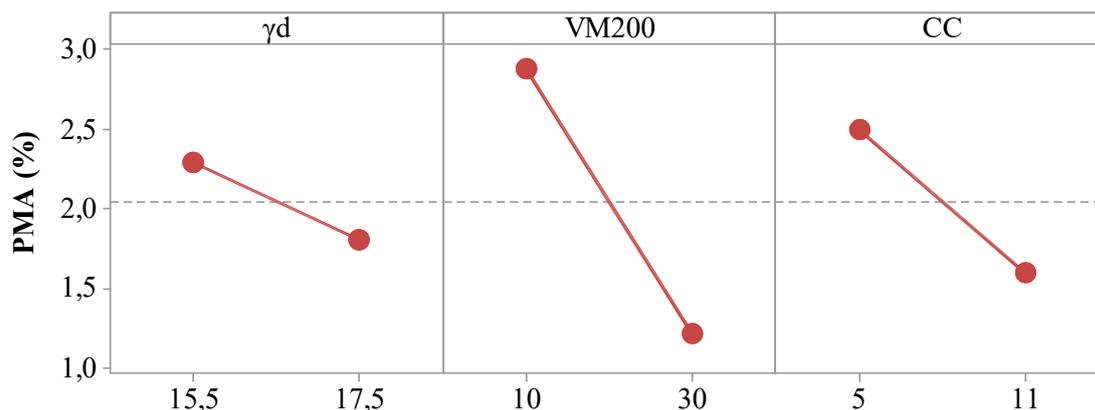


Figura 4.21: Gráfico de efeitos principais referente ao ensaio de PMA

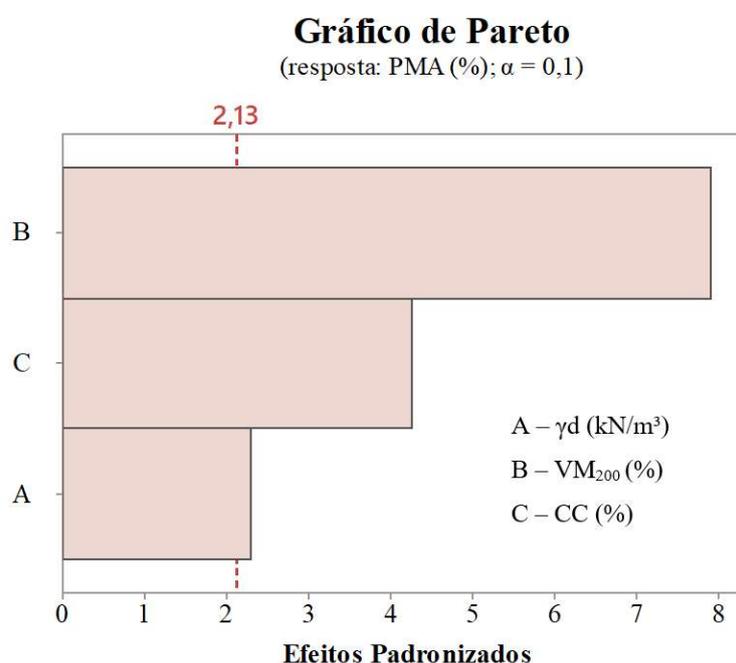


Figura 4.22: Gráfico de Pareto referente ao ensaio de PMA

A partir da análise dos resultados apresentados, considerando-se os limites experimentais aqui existentes, nota-se a grande influência do teor de finos passantes na peneira de nº200 e do teor de cal, sobre a perda de massa acumulada dos espécimes ensaiados. Entretanto o peso específico aparente seco, para os limites aqui ensaiados, não teve significativa influência sobre a PMA, comportamento geralmente incomum para esse ensaio. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de que as compacidades aqui estudadas, já promoveram proximidade suficiente entre as partículas a ponto de prover maior resistência mecânica contra a abrasão da escova durante os ciclos.

A maior influência do teor de cal pode ser explicada por uma provável influência da alta temperatura na qual os espécimes de durabilidade são submetidos. Uma vez que o ensaio consiste em doze ciclos alternados de molhagem (por um período de 5 horas), período de secagem em estufa a 71°C (por um período de 42 horas) e de escovação, espera-se que paralelamente a degradação dos corpos de prova ocorra certa catálise nas reações pozolânicas devido à ação da temperatura. Desse modo, ao passo que os ciclos se desenvolvem, pode estar ocorrendo também uma certa contribuição no desenvolvimento da matriz cimentícia.

A Figura 4.23 apresenta a imagem dos espécimes antes do início do ensaio e ao final do ensaio de durabilidade, ficando evidente a pouca perda de massa, mesmo após 12 ciclos de molhagem e secagem, principalmente do corpo de prova D8, que sofre menos de 0,7% de PMA.

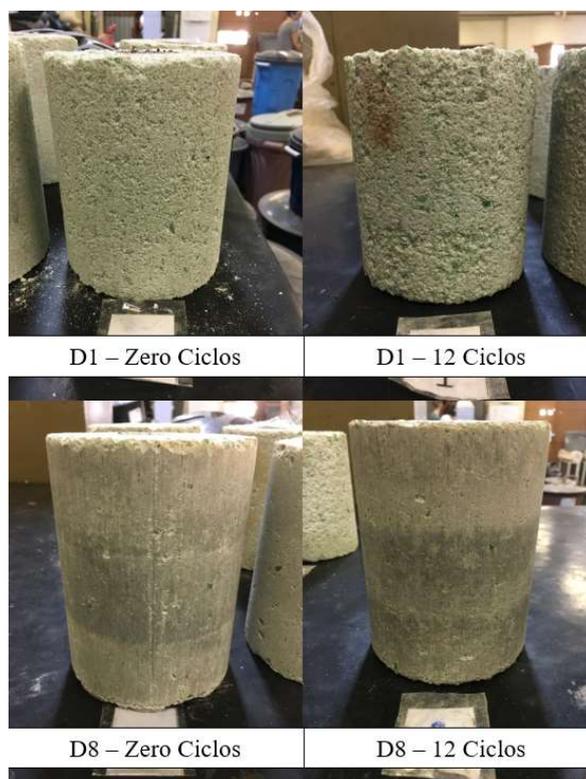


Figura 4.23: Amostras antes do início do ensaio de durabilidade e após os 12 ciclos

Segundo Yoder e Witczak (1975), os critérios de aceitabilidade de perda de massa acumulada para solos arenosos a siltosos de acordo com a Portland Cement Association é de 14%. Portanto, todas as misturas testadas nesse estudo, sob as condições de molhagem e secagem, possuem resultados satisfatórios quanto a perda de massa acumulada.

### 4.3.2 Durabilidade em função do índice $\eta/(B_{iv})^k$

Os resultados do ensaio de durabilidade, em termos de perda de massa acumulada (PMA), foram relacionados ao índice porosidade/teor volumétrico de ligante com expoente  $k$  igual a 0,28 para os ciclos 1, 3, 6, 9 e 12. Cinco relações distintas foram obtidas (uma para cada ciclo citado anteriormente), sendo elas apresentadas nas Equações 4.1 a 4.5, cujos coeficientes de determinação foram de 79%, 73%, 76%, 80% e 85%, na devida ordem crescente.

Na Figura 4.24 apresentam-se os resultados verificados ao longo do ensaio bem como as curvas ajustadas para cada ciclo. Ressaltando que os espécimes D2 e D6 foram retirados dessa análise pois apresentaram um comportamento não usual, tal comportamento pode ser devido a fatores de variação na execução do ensaio, mesmo esse sendo executado pelo mesmo operador em todos os corpos de prova e ciclos.

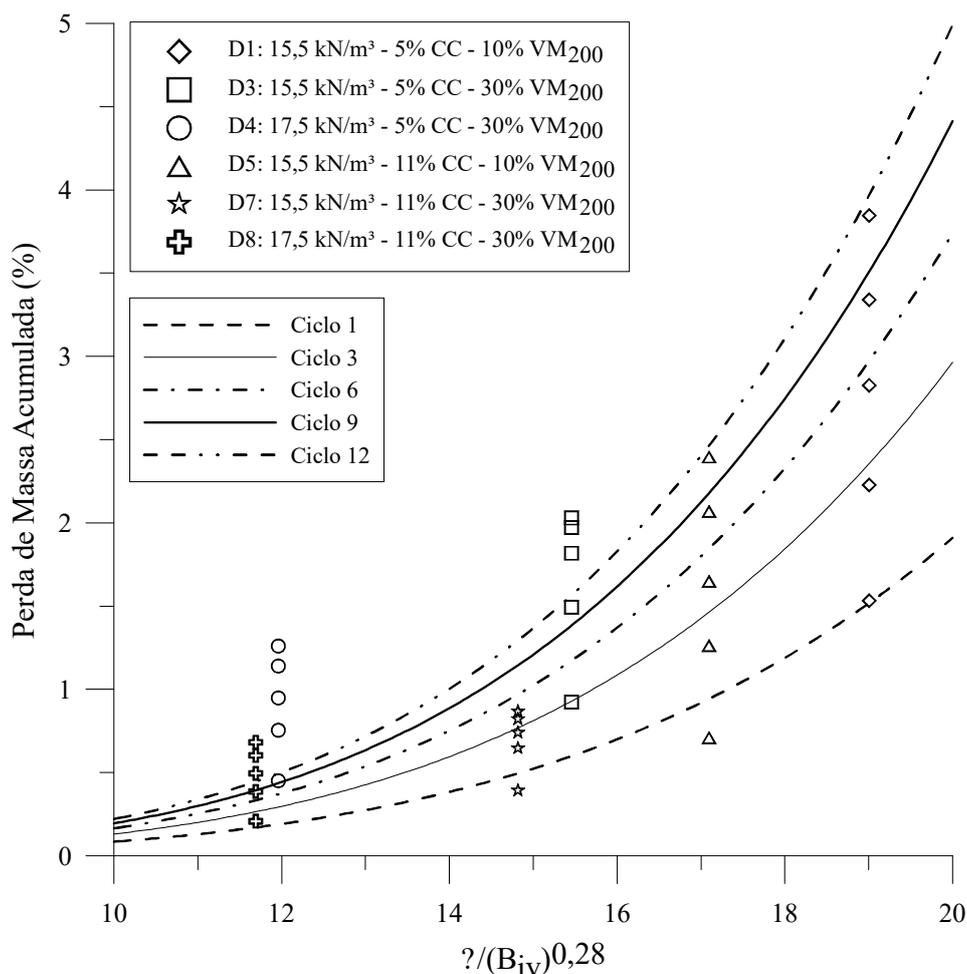


Figura 4.24: Relação entre PMA e  $\eta/(B_{iv})^k$

$$\text{PMA}(\%)_1 = 2,66 \times 10^{-6} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{4,5} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$\text{PMA}(\%)_3 = 4,14 \times 10^{-6} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{4,5} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$\text{PMA}(\%)_6 = 5,22 \times 10^{-6} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{4,5} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$\text{PMA}(\%)_9 = 6,17 \times 10^{-6} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{4,5} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$\text{PMA}(\%)_{12} = 6,97 \times 10^{-6} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{4,5} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

### 4.3.3 Relação PMA x $G_0$

Consoli et al. (2020) propuseram uma relação entre a perda de massa acumulada e a rigidez inicial como citado ao final do item 2.1.3.2 e, com o intuito de corroborar com a análise feita pelos autores, na Figura 4.25 foi plotada a curva de ajuste presente na Figura 2.2 e também o resultado do ensaio obtido nesse trabalho. No qual, pode-se observar que a maioria dos pontos se encontram próximos da curva de ajustada, fortalecendo a sugestão dos autores de que essa correlação pode ser realizada para diversos tipos de solos e materiais artificialmente cimentados.

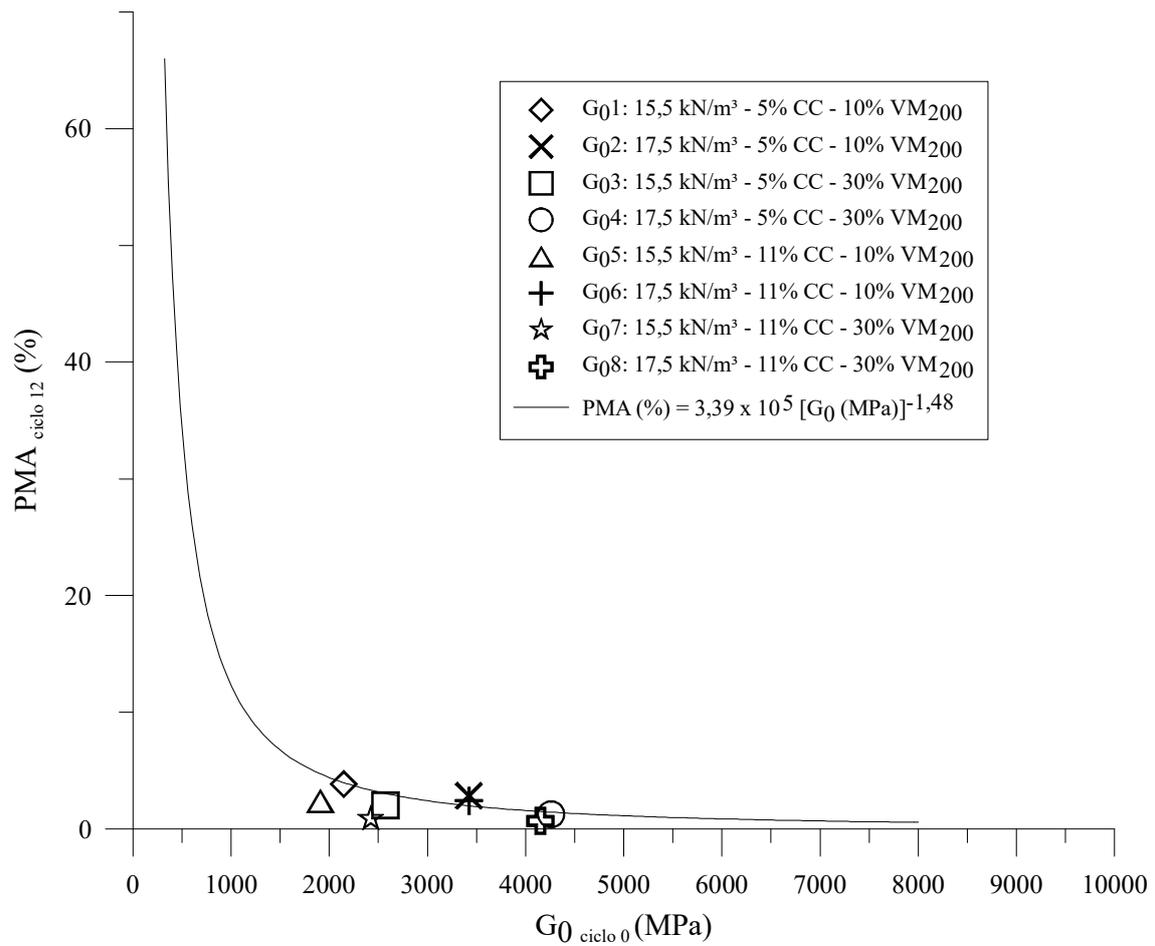


Figura 4.25: Relação entre PMA e  $G_0$  para os espécimes estudados

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

### 5.1 CONCLUSÕES

Das análises dos resultados realizadas no Capítulo 4 para a resistência à compressão simples, rigidez inicial e durabilidade por molhagem e secagem, estabeleceram-se, considerando as limitações experimentais do presente estudo, as seguintes conclusões:

#### **Resistencia à compressão simples ( $q_u$ ):**

- a) Quanto ao teor de cal de carbureto (CC) empregado nas misturas observou-se que o mesmo exerce pouquíssima influência sobre a variável resposta ( $q_u$ ), pois ao aumentar o teor de 5% para 11%, a resistência à compressão simples não apresentou efeitos significativos;
- b) Quanto ao teor de finos da mistura ( $VM_{200}$ ) observou-se uma influência significativa sobre a variável resposta em questão, ao aumentar o teor de 10% para 30%. Pela análise de efeitos principais as retas mostram, ainda, um comportamento linear, corroborado pelos pontos centrais com 20% de  $VM_{200}$ ;
- c) Tendo em vista que a variação do teor de cal de carbureto estudado teve pouquíssima influência sobre a variável resposta, pode-se supor que o teor de cal de 5% foi suficiente para a ocorrência das reações. Ou que, para o período de cura estudado, as reações pozolânicas não aconteceram plenamente e o teor de finos da mistura pode ter causado efeito *filler*, já que o mesmo ocorre devido ao preenchimento dos vazios de empacotamento e gera melhor intertravamento entre os grãos;

- d) Sobre o tipo de granulometria, a GD obteve maiores valores de resistência, provavelmente promovidos pelo maior número de contatos dos grãos visto que esta mistura tem um módulo de finura menor em relação as demais. Apesar do comportamento da curva ser descontínuo, a mesma foi composta por quantidades maiores de partículas passantes nas peneiras mais finas;
- e) A porosidade também exerce forte influência sobre a resistência à compressão simples para a mistura estudada. Pode-se analisar que uma pequena redução da porosidade pode promover ganhos significativos na resistência à compressão simples;
- f) Ao relacionar  $q_u$  com o índice  $\eta/(L_{iv})^{0,05}$  foi possível estabelecer uma relação aceitável utilizando o coeficiente de ajuste de 0,05. No qual os coeficientes de determinação foram todos superiores a 80%, mostrando que, apesar de terem uma certa variabilidade entre os espécimes, por conta de variáveis externas durante a moldagem, cura, homogeneidade da mistura e etc., as relações obtiveram uma aproximação satisfatória;
- g) Quanto a relação entre porosidade e teor volumétrico de ligante ( $B_{iv}$ ), foi possível obter o estabelecimento de uma relação entre a variável resposta  $q_u$  e o parâmetro  $\eta/L_{iv}$ , utilizando um expoente  $k$  igual a 0,28. No qual os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) verificados podem ser considerados aceitáveis, pois apesar das variáveis externas citadas anteriormente que podem interferir nesse tipo de análise, as relações obtiveram  $R^2$  superiores a 80%.

#### **Rigidez Inicial ( $G_0$ ):**

- a) Quanto a influência do peso específico aparente seco, este foi o fator mais influente nos resultados de  $G_0$ . Ou seja, uma maior compactação facilita a formação de uma matriz mais rígida, o que foi verificado com o aumento da rigidez inicial;
- b) Quanto à influência do teor de cal (CC) o mesmo não foi estatisticamente significativo. Logo, seu efeito em alterar a resposta das misturas quanto à rigidez inicial foi insignificante para as condições aqui adotadas. Portanto, tal resultado é similar ao observado para os resultados de resistência à compressão simples, nos quais, o teor de cal teve influência discreta;

- c) Quanto ao teor de finos da mistura ( $VM_{200}$ ) observou-se uma influência significativa sobre a rigidez inicial, porém menor em relação ao peso específico aparente seco. Nesse sentido, a influência do teor de finos no  $G_0$  pode estar relacionada ao aumento do contato entre os grãos promovido pelo efeito *filler*, implicando em maiores velocidades de onda;
- d) Em relação aos ajustes da variável resposta e os índices  $\eta/(L_{iv})^{0,05}$  e  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ , os coeficientes de determinação são considerados aceitáveis. Todavia, há uma insuficiência de dados experimentais mais abrangentes, como pontos centrais e moldagem em triplicatas, para se obterem ajustes com maior confiabilidade.

#### **Durabilidade por molhagem e secagem (PMA):**

- a) As misturas submetidas a ciclos de molhagem, secagem e escovação possuem resultados satisfatórios quanto a durabilidade, sendo o valor máximo de PMA inferior a 4%. O que contribui para a viabilidade técnica do emprego de misturas vidro moído-cal de carbureto;
- b) Diferentemente dos ensaios de resistência e rigidez, o ensaio de durabilidade sofreu influência significativa em relação ao teor de cal, sendo o segundo fator de maior influência no resultado de perda de massa acumulada. Possivelmente, como já citado no capítulo anterior, devido a uma certa catálise nas reações pozolânicas promovida pela ação da temperatura de 71°C a que é submetida ao longo dos ciclos;
- c) O teor de finos foi a variável mais influente para o ensaio em questão, esse comportamento pode ter se sobressaído, pelo fato das reações pozolânicas terem sido catalisadas ao longo dos ciclos causando um aumento na cimentação e promovendo menor PMA, perante maiores teores de  $VM_{200}$  e CC;
- d) Quanto ao peso específico aparente seco, para os limites aqui estudados (15,5  $kN/m^3$  e 17,5  $kN/m^3$ ), não teve significativa influência sobre a perda de massa acumulada, comportamento geralmente incomum para esse ensaio. Tal desempenho pode ser explicado pelo fato de que as compacidades estudadas, já promoveram proximidade suficiente entre as partículas a ponto de prover maior resistência mecânica contra a abrasão da escova durante os ciclos;
- e) Em relação aos ajustes da variável resposta e o índice  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ , os coeficientes de determinação são considerados regulares. Porém, há uma insuficiência de

dados experimentais mais abrangentes, como pontos centrais e moldagem em triplicatas, para se obterem ajustes com maior confiabilidade.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para uma maior compreensão sobre o tema aqui estudado e possibilidade de correlação entre os resultados obtidos, sugere-se:

- a) Realizar ensaios diferentes dos aqui estudados, como ensaio de cisalhamento direto, fadiga, triaxial, lixiviação e etc.;
- b) Avaliar variáveis diferentes, para os mesmos ensaios, como diferentes tempos de cura, temperaturas de cura, teores de cal de carbureto inferiores e etc.;
- c) Realizar os mesmos ensaios e utilizar as mesmas variáveis, porém com o emprego de teores cimento Portland ao invés de cal para posterior comparação entre o comportamento dos índices  $\eta/(C_{iv})^k$  e  $\eta/(B_{iv})^k$ ;
- d) Utilizar as mesmas misturas, porém com a adição de ativadores alcalinos como o NaOH, a fim de comparar os possíveis ganhos de resistência;
- e) Realizar análises de microestrutura, como microscopia eletrônica de varredura (MEV).

## REFERÊNCIAS

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Report on Soil Cement: ACI 230.1R-09. Farmington Hills: ACI, 2009. 28 p.

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

\_\_\_\_\_. ASTM D 6276: standard test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization. Philadelphia, 1999.

ARRIVABENI, B. S. Alternativas para estabilização granulométrica e química de solo de estradas florestais. 2017. 62 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2017.

ASKELAND, D.R.; WRIGHT, W.J. Ciência e engenharia de materiais. 3ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 648 p., 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Dosagem das misturas de solo-cimento; normas de dosagem e métodos de ensaios. 3.ed. atual. Revisada pelo Eng. Márcio Rocha Pitta. 2004. 54p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, massa específica aparente e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 7181: Solo — Análise granulométrica, Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 7182: Solo — Ensaio de compactação, Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 12025: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

BAUER, L.A.F. Materiais de construção. 3ª ed., vol. 1. Rio de Janeiro: LTC, 403 p., 1987.

BAUER, L.A.F. Materiais de construção. 5ª ed., vol. 1. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

CALLISTER. W.D. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Vidro**. Artigos e publicações – Fichas técnicas. Disponível em: <[www.cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro](http://www.cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro)>. Acesso em: Dezembro de 2019.

CHEN, Z.; WANG, Y.; LIAO, S.; HUANG, Y. Grinding kinetics of waste glass powder and its composite effect as pozzolanic admixture in cement concrete. *Construction and Building Materials*. V. 239, pg. 1-8, 2020.

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.; 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.; FERREIRA, P. M. V.; TANG, C. S.; MARQUES, S. F. V.; FESTUGATO, L.; CORTE, M. B. A unique relationship determining strength of silty/clayey soils – Portland cement mixes. *Soils and Foundations* 56 1082–1088, 2016.

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.; MARQUES, S. F. V.; VENSON, G. I., PASCHE, E.; VELÁSQUEZ, L. E. G. Single model establishing strength of dispersive clay treated with distinct binders. *Canadian Geotechnical Journal* 2017.

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

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

CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; MARQUES, S. F. V.; VENSON, G. I., PASCHE, E.; VELÁSQUEZ, L. E. G. Single model establishing strength of dispersive clay treated with distinct binders. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12), 2072-2079, 2016.

CONSOLI, N.C.; WINTER, D. LEON, H.B.; 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.; CARRETA, M. S.; D. LEON, H. B.; 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(10), 2019.

CONSOLI, N.C.; FESTUGATO, L.; SCHEUERMANN FILHO, H.C.; MIGUEL, G. D.; TEBECHRANI NETO, A.; ANDREGHETTO, D. Durability Assessment of Soil-Pozzolan-Lime Blends through Ultrasonic Pulse Velocity Test. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020.

CRISTELO, N. M. C., Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal. 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2001.

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

DAVIDSON, L. K.; DEMIREL, T.; HANDY, R. I. Soil pulverization and lime migration in soil lime stabilization. *Highway Research Record* 92, p. 103–126. 1965.

DISFANI, M.M; ARULRAJAH, A.; BO, M.W.; HANKOUR, R. Recycled crushed glass in road work applications. *Journal of Waste management*, p. 2341-2351, 2011.

DISFANI, M.M; ARULRAJAH, A.; BO, M.W.; SIVAKUGAN, N. Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications. *Journal of Cleaner Production*, v. 20, p. 170-179, 2012.

FOPPA, D.. Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados. 2005. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

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

HORPIBULSUK, S.; PHETCHUAY, C.; CHINKULKIJNIWAT, A. Soil Stabilization by Calcium Carbide Residue and Fly Ash. *Journal of materials in civil engineering*, v. 24(2), p. 184-193, 2012.

IMTEAZ, M. A.; YONNUS ALI, M. M.; ARULRAJAH, A. Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material. *Waste Management & Research*, P. 917-921, 2012.

INGLES, O.G.; METCALF, J.B. *Soil stabilization: Principles and Practice*. Melbourne: Butterworths, 366 p., 1972.

ISAIA, G.C. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. vol. 1 e 2. São Paulo: IBRACON, 1712 p., 2007.

JATURAPITAKKUL, C.; ROONGREUNG, B. Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash. *Journal of materials in civil engineering*, v. 15(5), p. 470-475, 2003.

MALLMANN, J. E. C. estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomíticas hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à

temperatura constante. 21996. 164 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

MANO, E. B. Polímeros como materiais de engenharia. São Paulo: Ed. Blücher, 1991. 197 p.

MASSAZZA, 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.

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.

OOI, P.S.K., LI, M.M.W., SAGARIO, M.L.Q., SONG, Y., 2008. Shear strength characteristics of recycled glass. *J. Transplant. Res. Board*. 2059, 52–62.

PADILHA, A. F. Materiais de engenharia: microestrututa e propriedades. São Paulo: Hemus, 1997. 349 p.

PETRUCCI, E.G.R. Materiais de construção. 8ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 435 p., 1987.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION – PCA. *Soil-cement laboratory handbook*. Illinois: Portland Cement association, 59 p., 1992

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S.: Projeto de Experimentos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000. Apostila

ROUSE, C. G. Capítulo V: Vidro. In: D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. (Coord.). *Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado*. 2. ed., rev. e ampl. São Paulo: IPT, 2000. 370 p.

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.

SAMARAKOON, M.H.; RANJITH, P.G.; DE SILVA, V.R.S. Effect of soda-lime glass powder on alkali-activated binders: Rheology, strength and microstructure characterization. *Construction and Building Materials*. v. 241, p. 1-16, 2020.

SARGENT, P. 21 - The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation. In: PACHECO-TORGAL, F. et al. (Ed.). Oxford: Woodhead Publishing, 2015. p. 555–604.

SCHEUERMANN FILHO, H.C. Estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal de carbureto. 2019. 197 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SHACKELFORD, J.F. *Ciência dos materiais*. 6ª ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SHAO, Y., LEFORT, T., MORAS, S. AND RODRIGUEZ, D. (2000). “Studies on concrete containing ground waste glass”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, n. 3, p. 91–100.

SINGH, N.B.; MIDDENDORF, B. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*. v. 237, pg. 1-14, 2020.

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

TONG, K.T.; VINAI, R.; SOUTSOS, M.N. Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders. *J. Cleaner Prod.* v. 201, p. 272–286. 2018.

TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products. *Construction and Building Materials*. v. 139, p. 342-354, 2017.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Lime Stabilization - reactions, properties, design, and construction. State of the Art Report 5, Washington, D.C., 58p. 1987.

TURNER, L.K.; COLLINS, F.G. Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Constr. Build. Mater.* v. 43, p. 125–130, 2013.

VAN VLACK, L. H. *Princípios de ciência e tecnologia dos materiais*. 8. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1996. 567 p.

VIZCARRA, G. O. C. Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos. 2010. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2010.

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.

YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. *Principles of pavement design*. 2ª ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1975. 711 p.

YONNUS ALI, M. M.; NEWMAN, G., ARULRAJAH, A.; DISFANI, M.M. Application of recycled glass - crushed rock blends in road pavements. *Australian Geomechanics*, v. 46, No 1, p. 113-122, 2011.

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.

## **APÊNCIDE A - GRANULOMETRIAS**

<b>GRANULOMETRIA CONTÍNUA (VM<sub>200</sub> = 10%)</b>					
Peneira	Abertura (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante acumulado (%)
	25	0,00	0,0	0,0	100,0
	19	0,00	0,0	0,0	100,0
	12,5	0,00	0,0	0,0	100,0
3,8"	9,5	0,00	0,0	0,0	100,0
1/4"	6,3	0,00	0,0	0,0	100,0
4	4,8	0,00	0,0	0,0	100,0
8	2,4	8,00	8,0	8,0	92,0
16	1,2	22,00	22,0	30,0	70,0
30	0,6	22,00	22,0	52,0	48,0
50	0,3	18,00	18,0	70,0	30,0
100	0,15	15,00	15,0	85,0	15,0
200	0,075	5,00	5,0	90,0	10,0
FUNDO		10,0	10,0	100,0	0,0
TOTAL		100,0	100,0	-	-
D <sub>10</sub>	0,075	D <sub>30</sub>	0,30	D <sub>60</sub>	0,90
Cu	12,00	Cc	1,33	SW-SM	
Classificação SUCS					
solo arenoso bem graduado com certa quantidade de finos não plásticos					
Módulo de Finura					2,45

<b>GRANULOMETRIA CONTÍNUA (VM<sub>200</sub> = 20%)</b>					
Peneira	Abertura (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante acumulado (%)
	25	0,00	0,0	0,0	100,0
	19	0,00	0,0	0,0	100,0
	12,5	0,00	0,0	0,0	100,0
3,8"	9,5	0,00	0,0	0,0	100,0
1/4"	6,3	0,00	0,0	0,0	100,0
4	4,8	0,00	0,0	0,0	100,0
8	2,4	7,00	7,0	7,0	93,0
16	1,2	20,00	20,0	27,0	73,0
30	0,6	20,00	20,0	47,0	53,0
50	0,3	16,00	16,0	63,0	37,0
100	0,15	13,00	13,0	76,0	24,0
200	0,075	4,00	4,0	80,0	20,0
FUNDO		20,0	20,0	100,0	0,0
TOTAL		100,0	100,0	-	-
D <sub>10</sub>	0,03	D <sub>30</sub>	0,08	D <sub>60</sub>	0,75
Cu	25,00	Cc	0,25	SM	
Classificação SUCS					
solo arenoso com certa quantidade de finos não plásticos					
Módulo de Finura					2,2

<b>GRANULOMETRIA CONTÍNUA (VM<sub>200</sub> = 30%)</b>					
Peneira	Abertura (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante acumulado (%)
	25	0,00	0,0	0,0	100,0
	19	0,00	0,0	0,0	100,0
	12,5	0,00	0,0	0,0	100,0
3,8"	9,5	0,00	0,0	0,0	100,0
1/4"	6,3	0,00	0,0	0,0	100,0
4	4,8	0,00	0,0	0,0	100,0
8	2,4	6,00	6,0	6,0	94,0
16	1,2	18,00	18,0	24,0	76,0
30	0,6	18,00	18,0	42,0	58,0
50	0,3	14,00	14,0	56,0	44,0
100	0,15	11,00	11,0	67,0	33,0
200	0,075	3,00	3,0	70,0	30,0
FUNDO		30,0	30,0	100,0	0,0
TOTAL		100,0	100,0	-	-
D <sub>10</sub>	0,015	D <sub>30</sub>	0,08	D <sub>60</sub>	0,65
Cu	43,33	Cc	0,58	SM	
Classificação SUCS					
solo arenoso com certa quantidade de finos não plásticos					
Módulo de Finura					1,95

GRANULOMETRIA UNIFORME (10%)						GRANULOMETRIA DESCONTÍNUA (10%)					
Peneira	Abertura (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante acumulado (%)	Peneira	Abertura (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante acumulado (%)
	25	0,00	0,0	0,0	100,0		25	0,00	0,0	0,0	100,0
	19	0,00	0,0	0,0	100,0		19	0,00	0,0	0,0	100,0
	12,5	0,00	0,0	0,0	100,0		12,5	0,00	0,0	0,0	100,0
3,8"	9,5	0,00	0,0	0,0	100,0	3,8"	9,5	0,00	0,0	0,0	100,0
1/4"	6,3	0,00	0,0	0,0	100,0	1/4"	6,3	0,00	0,0	0,0	100,0
4	4,8	0,00	0,0	0,0	100,0	4	4,8	0,00	0,0	0,0	100,0
8	2,4	1,00	1,0	1,0	99,0	8	2,4	0,00	0,0	0,0	100,0
16	1,2	2,00	2,0	3,0	97,0	16	1,2	2,00	2,0	2,0	98,0
30	0,6	2,00	2,0	5,0	95,0	30	0,6	50,00	50,0	52,0	48,0
50	0,3	73,00	73,0	78,0	22,0	50	0,3	1,00	1,0	53,0	47,0
100	0,15	7,00	7,0	85,0	15,0	100	0,15	1,00	1,0	54,0	46,0
200	0,075	5,00	5,0	90,0	10,0	200	0,075	36,00	36,0	90,0	10,0
FUNDO		10,0	10,0	100,0	0,0	FUNDO		10,0	10,0	100,0	0,0
TOTAL		100,0	100,0	-	-	TOTAL		100,0	100,0	-	-
D10	0,075	D30 0,35		D60 0,43		D10	0,075	D30 0,12		D60 0,7	
Cu	5,7	Cc 3,8		SP-SM		Cu	9,7	Cc 0,3		SP-SM	
Classificação SUCS				SP-SM		Classificação SUCS				SP-SM	
solo arenoso mal graduado com certa quantidade de finos não plásticos						solo arenoso mal graduado com certa quantidade de finos não plásticos					
Módulo de Finura				1,72		Módulo de Finura				1,61	

GRANULOMETRIA UNIFORME (20%)						GRANULOMETRIA DESCONTÍNUA (20%)					
Peneira	Abertura (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante acumulado (%)	Peneira	Abertura (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante acumulado (%)
	25	0,00	0,0	0,0	100,0		25	0,00	0,0	0,0	100,0
	19	0,00	0,0	0,0	100,0		19	0,00	0,0	0,0	100,0
	12,5	0,00	0,0	0,0	100,0		12,5	0,00	0,0	0,0	100,0
3,8"	9,5	0,00	0,0	0,0	100,0	3,8"	9,5	0,00	0,0	0,0	100,0
1/4"	6,3	0,00	0,0	0,0	100,0	1/4"	6,3	0,00	0,0	0,0	100,0
4	4,8	0,00	0,0	0,0	100,0	4	4,8	0,00	0,0	0,0	100,0
8	2,4	1,00	1,0	1,0	99,0	8	2,4	0,00	0,0	0,0	100,0
16	1,2	1,00	1,0	2,0	98,0	16	1,2	1,00	1,0	1,0	99,0
30	0,6	1,00	1,0	3,0	97,0	30	0,6	44,00	44,0	45,0	55,0
50	0,3	67,00	67,0	70,0	30,0	50	0,3	1,00	1,0	46,0	54,0
100	0,15	6,00	6,0	76,0	24,0	100	0,15	1,00	1,0	47,0	53,0
200	0,075	4,00	4,0	80,0	20,0	200	0,075	33,00	33,0	80,0	20,0
FUNDO		20,0	20,0	100,0	0,0	FUNDO		20,0	20,0	100,0	0,0
TOTAL		100,0	100,0	-	-	TOTAL		100,00	100,0	-	-
D10	0,03	D30 0,30		D60 0,40		D10	0,03	D30 0,10		D60 0,68	
Cu	13,33	Cc 7,50		SM		Cu	22,67	Cc 0,44		SM	
Classificação SUCS				SM		Classificação SUCS				SM	
solo arenoso com certa quantidade de finos não plásticos						solo arenoso com certa quantidade de finos não plásticos					
Módulo de Finura				1,52		Módulo de Finura				1,39	

GRANULOMETRIA UNIFORME (30%)						GRANULOMETRIA DESCONTÍNUA (30%)					
Peneira	Abertura (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante acumulado (%)	Peneira	Abertura (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante acumulado (%)
	25	0,00	0,0	0,0	100,0		25	0,00	0,0	0,0	100,0
	19	0,00	0,0	0,0	100,0		19	0,00	0,0	0,0	100,0
	12,5	0,00	0,0	0,0	100,0		12,5	0,00	0,0	0,0	100,0
3,8"	9,5	0,00	0,0	0,0	100,0	3,8"	9,5	0,00	0,0	0,0	100,0
1/4"	6,3	0,00	0,0	0,0	100,0	1/4"	6,3	0,00	0,0	0,0	100,0
4	4,8	0,00	0,0	0,0	100,0	4	4,8	0,00	0,0	0,0	100,0
8	2,4	0,00	0,0	0,0	100,0	8	2,4	0,00	0,0	0,0	100,0
16	1,2	0,50	0,5	0,5	99,5	16	1,2	1,00	1,0	1,0	99,0
30	0,6	0,50	0,5	1,0	99,0	30	0,6	38,00	38,0	39,0	61,0
50	0,3	61,00	61,0	62,0	38,0	50	0,3	1,00	1,0	40,0	60,0
100	0,15	5,00	5,0	67,0	33,0	100	0,15	1,00	1,0	41,0	59,0
200	0,075	3,00	3,0	70,0	30,0	200	0,075	29,00	29,0	70,0	30,0
FUNDO		30,0	30,0	100,0	0,0	FUNDO		30,0	30,0	100,0	0,0
TOTAL		100,00	100,0	-	-	TOTAL		100,0	100,0	-	-
D10	0,015	D30 0,08		D60 0,39		D10	0,015	D30 0,08		D60 0,30	
Cu	26,00	Cc 0,96		SM		Cu	20,00	Cc 1,25		SM	
Classificação SUCS				SM		Classificação SUCS				SM	
solo arenoso com certa quantidade de finos não plásticos						solo arenoso com certa quantidade de finos não plásticos					
Módulo de Finura				1,31		Módulo de Finura				1,21	

**APÊNDICE B – DADOS GERAIS DOS CORPOS DE PROVA DE  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES**

## GRANULOMETRIA UNIFORME - VM200 = 10%

Código	Dosagem yd (kN/m³)	CC (%)	u (%)	Massa m do cp (g)	Volume do CP moldado V real (cm³)	TENSÃO qu (kPa)	Massa Vidro total (g)	Massa Cal (g)	Vol. Vidro total (cm³)	Vol. Vidro #200 (cm³)	Vol. Cal (cm³)	Volume de sólidos (g)	Volume de Vazios (g)	N (%)	Liv (%)	k	N/Liv·k	Bk (%)	N/Biv	k	N/Biv·k
1	15,5	5%	9%	330,86	195,29	409	289,98	14,50	117,4	11,74	6,84	124,24	71,05	36,38	3,48%	0,05	43,03	9,5%	3,82	0,28	19,36
2	15,5	5%	9%	331,18	197,41	476	290,26	14,51	117,51	11,75	6,85	124,36	73,05	37,00	3,48%	0,05	43,77	9,4%	3,93	0,28	19,75
3	15,5	5%	9%	331,29	196,95	502	290,36	14,52	117,55	11,76	6,85	124,40	72,55	36,84	3,48%	0,05	43,57	9,4%	3,90	0,28	19,64
4	17,5	5%	9%	372,9	199,77	1066	327,39	16,37	132,55	13,25	7,72	140,27	59,50	29,78	3,93%	0,05	35,02	10,5%	2,84	0,28	15,42
5	17,5	5%	9%	373,28	197,02	1097	327,72	16,39	132,68	13,27	7,73	140,41	56,61	28,73	3,93%	0,05	33,78	10,7%	2,70	0,28	14,81
6	17,5	5%	9%	373,48	197,62	1102	327,90	16,39	132,75	13,28	7,73	140,48	57,14	28,91	3,93%	0,05	33,99	10,6%	2,72	0,28	14,92
7	15,5	11%	9%	331,39	197,39	507	274,26	30,17	111,0	11,10	14,23	125,27	72,12	36,54	7,24%	0,05	41,66	12,8%	2,85	0,28	17,88
8	15,5	11%	9%	331,78	198,01	569	274,59	30,20	111,12	11,12	14,25	125,42	72,59	36,66	7,24%	0,05	41,80	12,8%	2,86	0,28	17,95
9	15,5	11%	9%	331,31	195,98	523	274,20	30,16	111,01	11,10	14,23	125,24	70,74	36,10	7,24%	0,05	41,16	12,9%	2,79	0,28	17,63
10	17,5	11%	9%	374,47	198,78	1154	310,99	34,21	125,91	12,59	16,14	142,04	56,74	28,54	8,18%	0,05	32,35	14,5%	1,98	0,28	13,51
11	17,5	11%	9%	374,02	199,20	1139	310,62	34,17	125,76	12,58	16,12	141,87	57,32	28,78	8,18%	0,05	32,61	14,4%	2,00	0,28	13,64
12	17,5	11%	9%	374,35	197,48	1221	310,89	34,20	125,87	12,59	16,13	142,00	55,48	28,10	8,18%	0,05	31,84	14,5%	1,93	0,28	13,28
13	16,5	8%	9%	352,16	196,45	828	300,34	24,03	121,60	12,16	11,33	132,93	63,52	32,34	5,77%	0,05	37,29	12,0%	2,70	0,28	16,14
14	16,5	8%	9%	352,9	196,47	802	300,98	24,08	121,85	12,19	11,36	133,21	63,26	32,20	5,77%	0,05	37,13	12,0%	2,69	0,28	16,06
15	16,5	8%	9%	353,17	196,41	864	301,21	24,10	121,95	12,19	11,37	133,31	63,10	32,13	5,77%	0,05	37,05	12,0%	2,68	0,28	16,02

## GRANULOMETRIA UNIFORME - VM200 = 20%

Código	Dosagem yd (kN/m³)	CC (%)	u (%)	Massa m do cp (g)	Volume do CP moldado V real (cm³)	TENSÃO qu (kPa)	Massa Vidro total (g)	Massa Cal (g)	Vol. Vidro total (cm³)	Vol. Vidro #200 (cm³)	Vol. Cal (cm³)	Volume de sólidos (g)	Volume de Vazios (g)	N (%)	Liv (%)	k	N/Liv·k	Bk (%)	N/Biv	k	N/Biv·k
16	15,5	8%	9%	331,02	197,05	838	283,04	22,64	114,59	22,92	10,68	125,27	71,78	36,43	5,42%	0,05	42,14	17,1%	2,14	0,28	16,46
17	15,5	8%	9%	331,08	195,24	849	283,09	22,65	114,61	22,92	10,68	125,30	69,94	35,82	5,42%	0,05	41,45	17,2%	2,08	0,28	16,15
18	15,5	8%	9%	331,03	197,24	885	283,05	22,64	114,60	22,92	10,68	125,28	71,96	36,49	5,42%	0,05	42,21	17,0%	2,14	0,28	16,49
19	17,5	8%	9%	374,2	199,77	1666	319,40	25,55	129,31	25,86	12,05	141,37	58,40	29,23	6,11%	0,05	33,62	19,0%	1,54	0,28	12,82
20	17,5	8%	9%	373,3	199,46	1599	318,63	25,49	129,00	25,80	12,02	141,03	58,43	29,30	6,11%	0,05	33,69	19,0%	1,54	0,28	12,85
21	17,5	8%	9%	374,3	197,45	1682	319,49	25,56	129,35	25,87	12,06	141,40	56,05	28,39	6,11%	0,05	32,64	19,2%	1,48	0,28	12,41
22	16,5	5%	9%	353,42	196,92	1196	310,06	15,50	125,53	25,11	7,31	132,84	64,08	32,54	3,71%	0,05	38,37	16,5%	1,98	0,28	14,85
23	16,5	5%	9%	353,34	196,79	1123	309,99	15,50	125,50	25,10	7,31	132,81	63,98	32,51	3,71%	0,05	38,33	16,5%	1,97	0,28	14,84
24	16,5	5%	9%	353,76	197,36	1175	310,36	15,52	125,65	25,13	7,32	132,97	64,39	32,62	3,71%	0,05	38,47	16,4%	1,98	0,28	14,90
25	16,5	11%	9%	354,28	196,99	1133	294,65	32,41	119,29	23,86	15,29	134,58	62,41	31,68	7,71%	0,05	36,01	19,9%	1,59	0,28	13,72
26	16,5	11%	9%	353,42	196,64	1227	293,94	32,33	119,00	23,80	15,25	134,26	62,39	31,73	7,71%	0,05	36,06	19,9%	1,60	0,28	13,74
27	16,5	11%	9%	354,14	197,27	1221	294,54	32,40	119,25	23,85	15,28	134,53	62,74	31,81	7,71%	0,05	36,15	19,8%	1,60	0,28	13,78
28	16,5	8%	9%	353,84	196,21	1382	303,91	24,31	123,04	24,61	11,47	134,51	61,70	31,45	5,77%	0,05	36,27	18,4%	1,71	0,28	13,92
29	16,5	8%	9%	354,19	196,97	1315	304,21	24,34	123,16	24,63	11,48	134,64	62,33	31,64	5,77%	0,05	36,50	18,3%	1,73	0,28	14,01
30	16,5	8%	9%	354,3	196,01	1480	304,31	24,25	123,20	24,64	11,44	134,68	61,33	31,29	5,77%	0,05	36,09	18,4%	1,70	0,28	13,84
31	16,5	8%	9%	353,21	196,37	1304	303,10	24,25	122,71	24,54	11,44	134,15	62,22	31,69	5,77%	0,05	36,54	18,3%	1,73	0,28	14,04
32	16,5	8%	9%	354,63	196,60	1434	304,31	24,35	123,20	24,64	11,48	134,69	61,92	31,49	5,77%	0,05	36,32	18,4%	1,71	0,28	13,94
33	16,5	8%	9%	353,08	196,63	1408	302,98	24,24	122,67	24,53	11,43	134,10	62,53	31,80	5,77%	0,05	36,68	18,3%	1,74	0,28	14,09

## GRANULOMETRIA UNIFORME - VM200 = 30%

Código	Dosagem yd (kN/m³)	CC (%)	u (%)	Massa m do cp (g)	Volume do CP moldado V real (cm³)	TENSÃO qu (kPa)	Massa Vidro total (g)	Massa Cal (g)	Vol. Vidro total (cm³)	Vol. Vidro #200 (cm³)	Vol. Cal (cm³)	Volume de sólidos (g)	Volume de Vazios (g)	N (%)	Liv (%)	k	N/Liv·k	Bk (%)	N/Biv	k	N/Biv·k	
																						34
34	15,5	5%	9%	331,82	195,62	1061	293,56	14,68	118,85	35,66	6,92	125,77	69,85	35,71	3,48%	0,05	42,23	21,8%	1,64	0,28	15,07	
35	15,5	5%	9%	332,75	195,75	1190	294,38	14,72	119,18	35,76	6,94	126,13	69,62	35,57	3,48%	0,05	42,07	21,8%	1,63	0,28	15,00	
36	15,5	5%	9%	331,84	195,68	1170	293,58	14,68	118,86	35,66	6,92	125,78	69,90	35,72	3,48%	0,05	42,25	21,8%	1,64	0,28	15,08	
37	17,5	5%	9%	373,81	198,96	2412	328,31	16,42	132,92	39,88	7,74	140,66	58,30	29,30	3,93%	0,05	34,79	23,8%	1,22	0,28	12,04	
38	17,5	5%	9%	369,43	197,44	2272	324,47	16,22	131,36	39,41	7,65	139,02	58,42	29,59	3,93%	0,05	34,79	23,8%	1,24	0,28	12,18	
39	17,5	5%	9%	373,33	199,51	2267	327,89	16,39	132,75	39,82	7,73	140,48	59,03	29,59	3,93%	0,05	34,78	23,8%	1,24	0,28	12,17	
40	15,5	11%	9%	332,69	195,33	1459	277,86	30,57	112,50	33,75	14,42	126,91	68,42	35,03	7,24%	0,05	39,94	24,7%	1,42	0,28	14,28	
41	15,5	11%	9%	331,83	195,48	1263	277,15	30,49	112,21	33,66	14,38	126,59	68,89	35,24	7,24%	0,05	40,19	24,6%	1,43	0,28	14,38	
42	15,5	11%	9%	331,6	195,28	1444	276,95	30,46	112,13	33,64	14,37	126,50	68,78	35,22	7,24%	0,05	40,16	24,6%	1,43	0,28	14,37	
43	17,5	11%	9%	374,01	199,37	2738	312,70	34,40	126,60	37,98	16,22	142,82	56,55	28,36	8,18%	0,05	32,15	27,2%	1,04	0,28	11,25	
44																						
45	17,5	11%	9%	362,06	196,71	2169	302,71	33,30	122,55	36,77	15,71	138,26	58,46	29,72	8,18%	0,05	33,68	26,7%	1,11	0,28	11,85	
46	16,5	8%	9%	352,22	196,96	1910	302,41	24,19	122,43	36,73	11,41	133,84	63,11	32,04	5,77%	0,05	36,96	24,4%	1,31	0,28	13,09	
47	16,5	8%	9%	352,59	195,81	1956	302,73	24,22	122,56	36,77	11,42	133,99	61,83	31,57	5,77%	0,05	36,42	24,6%	1,28	0,28	12,88	
48	16,5	8%	9%	352,41	195,70	2039	302,57	24,21	122,50	36,75	11,42	133,92	61,78	31,57	5,77%	0,05	36,41	24,6%	1,28	0,28	12,88	

## GRANULOMETRIA CONTÍNUA - VM200 = 10%

Código	Dosagem	Massa m do ep (g)	Volume do CP moldado V real (cm³)	Massa Vidro total (g)	Massa Cal (g)	Vol. Vidro #200 (cm³) 10%	Vol. Vidro total (cm³)	Vol. Cal de sólidos (cm³)	Volume de Vazios (g)	N (%)	Liv (%)	k	N/Liv*k	Biv (%)	N/Biv	k	N/Biv*k
1	15,5 5%	331,77	195,17	289,08	14,45	117,04	117,04	6,82	123,86	71,31	36,54	0,05	43,22	9,5%	3,85	0,28	19,46
2	15,5 5%	331,81	196,60	289,12	14,46	117,05	117,05	6,82	123,87	72,73	36,99	0,05	43,76	9,4%	3,93	0,28	19,74
3	15,5 5%	332,26	195,81	289,51	14,48	117,21	117,21	6,83	124,04	71,77	36,65	0,05	43,35	9,5%	3,87	0,28	19,53
4	17,5 5%	374,48	198,45	327,66	16,38	132,66	132,66	7,73	140,39	57,24	28,96	0,05	34,05	10,6%	2,76	0,28	14,95
5	17,5 5%	374,22	197,63	327,89	16,39	132,77	132,77	7,73	140,48	57,97	29,21	0,05	34,34	10,6%	2,76	0,28	15,09
6	17,5 5%	374,56	195,70	327,96	16,40	132,78	132,78	7,73	140,51	55,18	28,20	0,05	33,15	10,7%	2,63	0,28	14,51
7	15,5 11%	332,33	196,26	275,12	30,26	111,38	111,38	11,14	125,52	70,60	35,97	0,05	41,02	12,9%	2,78	0,28	17,56
8	15,5 11%	332,28	196,02	275,08	30,26	111,37	111,37	11,14	125,52	70,60	35,97	0,05	41,02	12,9%	2,78	0,28	17,56
9	15,5 11%	331,89	196,60	274,76	30,22	111,24	111,24	11,12	125,49	71,10	36,17	0,05	41,24	12,9%	2,80	0,28	17,67
10	17,5 11%	374,34	196,81	309,33	34,03	125,24	125,24	12,52	141,29	55,52	28,21	0,05	31,97	14,5%	1,94	0,28	13,34
11	17,5 11%	374,59	197,00	309,54	34,05	125,32	125,32	12,53	141,38	55,62	28,24	0,05	32,00	14,5%	1,95	0,28	13,35
12	17,5 11%	374,75	197,75	309,67	34,06	125,37	125,37	12,54	141,44	56,31	28,47	0,05	32,27	14,5%	1,97	0,28	13,48
13	16,5 8%	353,43	196,59	298,30	23,86	120,77	120,77	12,08	132,03	64,56	32,84	0,05	37,88	11,9%	2,77	0,28	16,43
14	16,5 8%	353,42	197,04	298,29	23,86	120,77	120,77	12,08	132,02	65,01	33,00	0,05	38,06	11,8%	2,79	0,28	16,52
15	16,5 8%	352,96	196,48	297,91	23,83	120,61	120,61	12,06	131,85	64,63	32,89	0,05	37,94	11,9%	2,77	0,28	16,46

## GRANULOMETRIA CONTÍNUA - VM200 = 20%

Código	Dosagem	Massa m do ep (g)	Volume do CP moldado V real (cm³)	Massa Vidro total (g)	Massa Cal (g)	Vol. Vidro #200 (cm³) 20%	Vol. Vidro total (cm³)	Vol. Cal de sólidos (cm³)	Volume de Vazios (g)	N (%)	Liv (%)	k	N/Liv*k	Biv (%)	N/Biv	k	N/Biv*k
16	15,5 8%	332,25	196,06	282,91	22,63	114,54	114,54	10,68	125,22	70,85	36,13	0,05	41,81	17,1%	2,11	0,28	16,31
17	15,5 8%	331,61	196,38	282,37	22,59	114,32	114,32	10,66	124,97	71,41	36,36	0,05	42,07	17,1%	2,13	0,28	16,43
18	15,5 8%	331,83	195,76	282,56	22,60	114,40	114,40	10,66	125,06	70,70	36,12	0,05	41,79	17,1%	2,11	0,28	16,30
19	17,5 8%	374,11	196,74	317,84	25,42	128,68	128,68	11,99	140,67	56,07	28,50	0,05	32,77	19,2%	1,49	0,28	12,46
20	17,5 8%	374,03	197,76	317,78	25,42	128,66	128,66	11,99	140,65	57,11	28,88	0,05	33,21	19,1%	1,51	0,28	12,65
21	17,5 8%	373,95	197,07	317,71	25,42	128,63	128,63	11,99	140,62	56,45	28,65	0,05	32,94	19,1%	1,50	0,28	12,54
22	16,5 5%	353	195,83	308,17	15,41	124,77	124,77	24,95	132,03	63,79	32,58	0,05	38,41	16,5%	1,98	0,28	14,87
23	16,5 5%	353,22	195,85	308,36	15,42	124,84	124,84	24,97	132,12	63,74	32,54	0,05	38,37	16,5%	1,98	0,28	14,85
24	16,5 5%	353,78	194,65	308,85	15,44	125,01	125,01	25,01	132,33	62,33	32,02	0,05	37,75	16,6%	1,93	0,28	14,58
25	16,5 5%	353,61	195,07	292,90	32,22	118,58	118,58	23,72	133,78	63,29	32,11	0,05	36,50	19,7%	1,63	0,28	13,93
26	16,5 11%	353,27	196,61	292,62	32,19	118,47	118,47	23,69	133,65	62,96	32,02	0,05	36,40	19,8%	1,62	0,28	13,88
27	16,5 11%	353,22	196,74	292,58	32,18	118,45	118,45	23,69	133,63	62,96	32,08	0,05	36,46	19,8%	1,62	0,28	13,91
28	16,5 8%	353,09	196,06	300,98	24,08	121,85	121,85	24,37	133,21	62,84	32,35	0,05	36,97	18,2%	1,76	0,28	14,22
29	16,5 8%	353,37	195,77	301,21	24,10	121,95	121,95	24,39	133,32	62,45	31,90	0,05	36,79	18,3%	1,75	0,28	14,14
30	16,5 8%	353,48	197,23	301,31	24,10	121,99	121,99	24,40	133,36	63,88	32,39	0,05	37,35	18,1%	1,79	0,28	14,39
31	16,5 8%	353,66	196,87	300,93	24,07	121,84	121,84	24,37	133,19	63,68	32,35	0,05	37,31	18,1%	1,78	0,28	14,37
32	16,5 8%	352,93	195,83	300,31	24,02	121,58	121,58	24,32	132,92	62,91	32,13	0,05	37,05	18,2%	1,76	0,28	14,26
33	16,5 8%	352,79	196,74	300,19	24,02	121,54	121,54	24,31	132,86	63,88	32,47	0,05	37,45	18,1%	1,79	0,28	14,43

## GRANULOMETRIA CONTÍNUA - VM200 = 30%

Código	Dosagem	Massa m do ep (g)	Volume do CP moldado V real (cm³)	Massa Vidro total (g)	Massa Cal (g)	Vol. Vidro #200 (cm³) 30%	Vol. Vidro total (cm³)	Vol. Cal de sólidos (cm³)	Volume de Vazios (g)	N (%)	Liv (%)	k	N/Liv*k	Biv (%)	N/Biv	k	N/Biv*k
34	15,5 5%	332,16	195,73	290,32	14,52	117,54	117,54	35,26	6,85	124,38	71,34	0,05	43,11	21,5%	1,69	0,28	15,44
35	15,5 5%	332,34	196,45	290,47	14,52	117,60	117,60	35,28	6,85	124,45	72,00	0,05	43,35	21,4%	1,71	0,28	15,53
36	15,5 5%	332,01	195,91	290,19	14,51	117,48	117,48	35,25	6,84	124,33	71,58	0,05	43,22	21,5%	1,70	0,28	15,48
37	17,5 5%	373,72	196,87	326,09	16,30	132,02	132,02	39,61	7,69	139,71	57,16	0,05	34,13	24,0%	1,21	0,28	11,92
38	17,5 5%	373,02	195,86	325,48	16,27	131,77	131,77	39,53	7,68	139,45	56,41	0,05	33,86	24,1%	1,19	0,28	11,81
39	17,5 5%	374,37	196,74	326,66	16,33	132,25	132,25	39,68	7,70	139,96	56,79	0,05	33,93	24,1%	1,20	0,28	11,84
40	15,5 11%	331,8	196,51	273,20	30,05	110,61	110,61	33,18	14,18	124,78	71,73	0,05	41,62	24,1%	1,51	0,28	14,97
41	15,5 11%	331,99	196,48	273,36	30,07	110,67	110,67	33,20	14,18	124,86	71,73	0,05	41,57	24,1%	1,51	0,28	14,95
42	15,5 11%	331,63	195,79	273,06	30,04	110,55	110,55	33,17	14,17	124,72	71,07	0,05	41,39	24,2%	1,50	0,28	14,88
43	17,5 11%	374,19	197,33	308,89	33,98	125,06	125,06	37,52	16,03	141,08	56,25	0,05	32,30	27,1%	1,05	0,28	11,31
44	17,5 11%	374,37	197,38	309,04	33,99	125,12	125,12	37,54	16,04	141,15	56,01	0,05	32,20	27,2%	1,04	0,28	11,27
45	17,5 11%	373,56	196,38	308,37	33,92	124,85	124,85	37,45	16,00	140,85	55,53	0,05	32,05	27,2%	1,05	0,28	11,21
46	16,5 8%	353,19	196,71	299,59	23,97	121,29	121,29	36,39	11,31	132,59	64,12	0,05	37,59	24,2%	1,34	0,28	13,35
47	16,5 8%	353,11	196,38	299,52	23,96	121,26	121,26	36,38	11,30	132,56	63,82	0,05	37,48	24,3%	1,34	0,28	13,30
48	16,5 8%	353,29	197,07	299,67	23,97	121,32	121,32	36,40	11,31	132,63	64,44	0,05	37,71	24,2%	1,35	0,28	13,40

## GRANULOMETRIA DESCONTÍNUA - VM200 = 10%

Código	γd (kN/m <sup>2</sup> )	Dosagem	u (%)	Massa m do cp (g)	Volume do CP moídodo V real (cm <sup>3</sup> )	qu (kPa)	Massa Vidro total (g)	Cal (g)	Vol. Vidro total (cm <sup>3</sup> )	Vol. Vidro #200 (cm <sup>3</sup> )	Vol. Cal de sólidos (cm <sup>3</sup> )	Volume de vazios (g)	N (%)	Liv (%)	k	N/Liv <sup>v</sup> ·k	Biv (%)	N/Biv	k	N/Biv <sup>v</sup> ·k	
																					CC (%)
1	15,5	5%	9%	331,86	196,33	968	291,99	14,60	118,21	11,82	6,89	125,10	71,23	36,28	3,48%	0,05	42,91	9,5%	3,81	0,28	19,30
2	15,5	5%	9%	331,11	195,51	1185	291,33	14,57	117,95	11,79	6,87	124,82	70,69	36,16	3,48%	0,05	42,77	9,5%	3,79	0,28	19,22
3	15,5	5%	9%	330,73	197,28	1196	290,99	14,55	117,81	11,78	6,86	124,67	72,60	36,80	3,48%	0,05	43,53	9,5%	3,89	0,28	19,62
4	17,5	5%	9%	373,45	198,43	2583	327,87	16,39	132,74	13,27	7,73	140,48	57,95	29,21	3,93%	0,05	34,34	10,6%	2,76	0,28	15,08
5	17,5	5%	9%	373,49	197,73	2350	327,91	16,40	132,76	13,28	7,74	140,49	57,24	28,95	3,93%	0,05	34,03	10,6%	2,72	0,28	14,94
6	17,5	5%	9%	373,92	197,70	2427	328,29	16,41	132,91	13,29	7,73	140,65	57,05	28,86	3,93%	0,05	33,93	10,6%	2,71	0,28	14,88
7	15,5	11%	9%	331,83	196,10	1092	275,03	30,25	111,35	11,13	14,27	125,62	70,48	35,94	7,24%	0,05	40,98	13,0%	2,77	0,28	17,54
8	15,5	11%	9%	331,48	196,58	1289	274,74	30,22	111,23	11,12	14,26	125,49	71,10	36,17	7,24%	0,05	41,24	12,9%	2,80	0,28	17,67
9	15,5	11%	9%	331,13	196,30	1330	274,45	30,19	111,11	11,11	14,24	125,35	70,95	36,14	7,24%	0,05	41,21	12,9%	2,80	0,28	17,66
10	17,5	11%	9%	373,70	197,73	2826	309,50	34,04	125,30	12,53	16,06	141,36	56,37	28,51	8,18%	0,05	32,31	14,5%	1,97	0,28	13,49
11	17,5	11%	9%	373,77	197,60	2572	309,56	34,05	125,33	12,53	16,06	141,39	56,21	28,45	8,18%	0,05	32,24	14,5%	1,97	0,28	13,46
12	17,5	11%	9%	373,97	197,85	2898	309,72	34,07	125,39	12,54	16,07	141,46	56,38	28,50	8,18%	0,05	32,30	14,5%	1,97	0,28	13,49
13	16,5	8%	9%	352,82	198,87	1594	300,17	24,01	121,53	12,15	11,33	132,85	66,02	33,20	5,77%	0,05	38,29	11,8%	2,81	0,28	16,63
14	16,5	8%	9%	352,51	196,55	1837	299,91	23,99	121,42	12,14	11,32	132,74	63,82	32,47	5,77%	0,05	37,45	11,9%	2,72	0,28	16,22
15	16,5	8%	9%	352,61	196,19	1708	299,99	24,00	121,45	12,15	11,32	132,77	63,41	32,32	5,77%	0,05	37,28	12,0%	2,70	0,28	16,13

## GRANULOMETRIA DESCONTÍNUA - VM200 = 20%

Código	γd (kN/m <sup>2</sup> )	Dosagem	u (%)	Massa m do cp (g)	Volume do CP moídodo V real (cm <sup>3</sup> )	qu (kPa)	Massa Vidro total (g)	Cal (g)	Vol. Vidro total (cm <sup>3</sup> )	Vol. Vidro #200 (cm <sup>3</sup> )	Vol. Cal de sólidos (cm <sup>3</sup> )	Volume de vazios (g)	N (%)	Liv (%)	k	N/Liv <sup>v</sup> ·k	Biv (%)	N/Biv	k	N/Biv <sup>v</sup> ·k	
																					CC (%)
16	15,5	8%	9%	331,39	195,98	1786	281,89	22,55	114,12	22,82	10,64	124,76	71,22	36,34	5,42%	0,05	42,05	17,1%	2,13	0,28	16,42
17	15,5	8%	9%	331,29	195,85	1837	281,80	22,54	114,09	22,82	10,63	124,72	71,12	36,32	5,42%	0,05	42,02	17,1%	2,13	0,28	16,41
18	15,5	8%	9%	331,27	196,89	1630	281,78	22,54	114,08	22,82	10,63	124,72	72,18	36,66	5,42%	0,05	42,41	17,0%	2,16	0,28	16,59
19	17,5	8%	9%	373,42	197,35	3607	316,85	25,35	128,28	25,66	11,96	140,24	57,12	28,94	6,11%	0,05	33,28	19,1%	1,52	0,28	12,68
20	17,5	8%	9%	373,47	198,20	3576	316,89	25,35	128,30	25,66	11,96	140,25	57,94	29,24	6,11%	0,05	33,62	19,0%	1,54	0,28	12,82
21	17,5	8%	9%	373,12	197,54	3638	316,59	25,33	128,18	25,64	11,95	140,12	57,41	29,06	6,11%	0,05	33,42	19,0%	1,53	0,28	12,74
22	16,5	5%	9%	353,11	197,32	2541	308,64	15,43	124,96	24,99	7,28	132,24	65,08	32,98	3,71%	0,05	38,89	16,4%	2,02	0,28	15,08
23	16,5	5%	9%	352,62	196,76	2608	308,22	15,41	124,78	24,96	7,27	132,05	64,71	32,89	3,71%	0,05	38,78	16,4%	2,01	0,28	15,03
24	16,5	5%	9%	353,11	196,42	2422	308,64	15,43	124,96	24,99	7,28	132,24	64,19	32,68	3,71%	0,05	38,53	16,4%	1,99	0,28	14,92
25	16,5	5%	9%	352,41	197,60	2862	290,85	31,99	117,75	23,55	15,09	132,85	64,76	32,77	7,71%	0,05	37,25	19,6%	1,68	0,28	14,25
26	16,5	11%	9%	353,67	197,98	2914	291,89	32,11	118,18	23,64	15,15	133,32	64,66	32,66	7,71%	0,05	37,12	19,6%	1,67	0,28	14,20
27	16,5	11%	9%	352,51	196,91	2898	290,93	32,00	117,79	23,56	15,10	132,88	64,02	32,51	7,71%	0,05	36,96	19,6%	1,66	0,28	14,13
28	16,5	8%	9%	352	196,94	2671	298,80	23,97	120,97	24,20	11,28	132,25	64,69	32,85	5,77%	0,05	37,88	18,0%	1,82	0,28	14,62
29	16,5	8%	9%	352,94	197,03	2696	299,60	23,97	121,30	24,26	11,31	132,60	64,43	32,70	5,77%	0,05	37,71	18,1%	1,81	0,28	14,55
30	16,5	8%	9%	353,15	197,82	2759	299,78	23,98	121,37	24,27	11,31	132,68	65,14	32,93	5,77%	0,05	37,98	18,0%	1,83	0,28	14,66
31	16,5	8%	9%	352,94	197,33	2603	300,15	24,01	121,52	24,30	11,33	132,84	64,49	32,68	5,77%	0,05	37,69	18,1%	1,81	0,28	14,54
32	16,5	8%	9%	352,42	196,83	2665	299,70	23,98	121,34	24,27	11,31	132,65	64,18	32,61	5,77%	0,05	37,61	18,1%	1,80	0,28	14,50
33	16,5	8%	9%	352,77	197,85	2702	300,00	24,00	121,46	24,29	11,32	132,78	65,07	32,89	5,77%	0,05	37,93	18,0%	1,83	0,28	14,64

## GRANULOMETRIA DESCONTÍNUA - VM200 = 30%

Código	γd (kN/m <sup>2</sup> )	Dosagem	u (%)	Massa m do cp (g)	Volume do CP moídodo V real (cm <sup>3</sup> )	TENSAO (kPa)	Massa Vidro total (g)	Cal (g)	Vol. Vidro total (cm <sup>3</sup> )	Vol. Vidro #200 (cm <sup>3</sup> )	Vol. Cal de sólidos (cm <sup>3</sup> )	Volume de vazios (g)	N (%)	Liv (%)	k	N/Liv <sup>v</sup> ·k	Biv (%)	N/Biv	k	N/Biv <sup>v</sup> ·k	
																					CC (%)
34	15,5	5%	9%	331,81	196,24	1920	289,99	14,50	117,41	35,22	6,84	124,25	72,00	36,69	3,48%	0,05	43,40	21,4%	1,71	0,28	15,55
35	15,5	5%	9%	331,97	197,34	1930	290,13	14,51	117,46	35,24	6,84	124,30	73,03	37,01	3,48%	0,05	43,78	21,3%	1,74	0,28	15,71
36	15,5	5%	9%	331,84	196,00	1868	290,02	14,50	117,42	35,22	6,84	124,26	71,75	36,60	3,48%	0,05	43,30	21,5%	1,71	0,28	15,51
37	17,5	5%	9%	373,75	198,78	3794	326,73	16,34	132,28	39,68	7,71	139,98	58,80	29,58	3,93%	0,05	34,78	23,8%	1,24	0,28	12,17
38	17,5	5%	9%	373,65	198,16	4099	326,64	16,33	132,24	39,67	7,70	139,95	58,21	29,38	3,93%	0,05	34,54	23,9%	1,23	0,28	12,08
39	17,5	5%	9%	373,84	198,99	4068	326,81	16,34	132,31	39,69	7,71	140,02	58,97	29,64	3,93%	0,05	34,84	23,8%	1,24	0,28	12,20
40	15,5	11%	9%	331,45	196,09	2500	274,35	30,18	111,07	33,32	14,24	125,31	70,78	36,10	7,24%	0,05	41,16	24,3%	1,49	0,28	14,78
41	15,5	11%	9%	331,47	196,91	2422	274,37	30,18	111,08	33,32	14,24	125,32	71,60	36,36	7,24%	0,05	41,46	24,2%	1,51	0,28	14,91
42	15,5	11%	9%	332,12	196,50	2546	274,91	30,24	111,30	33,39	14,26	125,56	70,94	36,10	7,24%	0,05	41,16	24,3%	1,49	0,28	14,78
43	17,5	11%	9%	373,27	198,01	4834	309,38	34,03	125,26	37,58	16,05	141,31	56,71	28,64	8,18%	0,05	32,46	27,1%	1,06	0,28	11,37
44	17,5	11%	9%	373,69	197,84	4839	309,73	34,07	125,40	37,62	16,07	141,47	56,37	28,49	8,18%	0,05	32,29	27,1%	1,05	0,28	11,31
45	17,5	11%	9%	373,98	198,24	4549	309,97	34,10	125,49	37,65	16,08	141,58	56,66	28,58	8,18%	0,05	32,39	27,1%	1,05	0,28	11,35
46	16,5	8%	9%	353,24	197,15	3390	300,85	24,07	121,80	36,54	11,35	133,16	63,99	32,46	5,77%	0,05	37,44	24,3%	1,34	0,28	13,29
47	16,5	8%	9%	353,24	196,87	3328	300,85	24,07	121,80	36,54	11,35	133,16	63,72	32,37	5,77%	0,05	37,33	24,3%	1,33	0,28	13,24
48	16,5	8%	9%	352,3	197,49	3235	300,05	24,00	121,48	36,44	11,32	132,80	64,69	32,76	5,77%	0,05	37,78	24,2%	1,35	0,28	13,42

**APÊNDICE C – DADOS GERAIS DOS CORPOS DE RIGIDEZ  
INICIAL E DURABILIDADE**

## RIGIDEZ INICIAL E DURABILIDADE - GRANULOMETRIA CONTÍNUA

Dosagem	VM <sub>300</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	Cal (%)	u (%)	Massa m do cp (g)	Volume do CP moldado	G <sub>0</sub> (MPa)	PMA após 12 ciclos (%)	Massa vidro total (g)	Massa Cal (g)	Vol. Vidro total (cm <sup>3</sup> )	Vol. Vidro #200 (cm <sup>3</sup> )	Vol. Cal (cm <sup>3</sup> )	Volume de sólidos (cm <sup>3</sup> )	Volume de Vazios (cm <sup>3</sup> )	N (%)	Liv	k	N/Liv <sup>k</sup>	Biv (%)	N/Biv	k	N/Biv <sup>k</sup>
10%	15,5	5%	9%	9%	1697,54	991,26	2147,07	3,85%	1485,26	74,26297	601,3196	60,13196	35,03	636,35	354,91	35,80%	3,48%	0,05	42,35	9,6%	3,73	0,28	19,01
10%	17,5	5%	9%	9%	1904,42	998,21	3424,42	2,84%	1661,09	83,0545	672,5061	67,25061	39,18	711,68	286,53	28,70%	3,93%	0,05	33,75	10,7%	2,69	0,28	14,80
30%	15,5	5%	9%	9%	1689,67	994,96	2570,15	2,03%	1474,92	73,7461	597,1344	179,1403	34,79	631,92	363,04	36,49%	3,48%	0,05	43,16	21,5%	1,70	0,28	15,45
30%	17,5	5%	9%	9%	1904,66	1007,21	4260,11	1,26%	1666,28	83,31425	674,6093	202,3828	39,30	713,91	293,30	29,12%	3,93%	0,05	34,23	24,0%	1,21	0,28	11,96
10%	15,5	11%	9%	9%	1695,36	988,14	1908,66	2,40%	1403,09	154,3401	568,0534	56,80534	72,80	640,86	347,28	35,15%	7,25%	0,05	40,07	13,1%	2,68	0,28	17,10
10%	17,5	11%	9%	9%	1904,86	1004,97	3452,32	2,43%	1574,35	173,1781	637,3871	63,73871	81,69	719,07	285,89	28,45%	8,18%	0,05	32,24	14,5%	1,97	0,28	13,46
30%	15,5	11%	9%	9%	1688,69	996,89	2422,98	0,87%	1393,10	153,2409	564,0077	169,2023	72,28	636,29	360,60	36,17%	7,25%	0,05	41,25	24,2%	1,49	0,28	14,82
30%	17,5	11%	9%	9%	1909,52	1021,55	4150,64	0,68%	1579,99	173,799	639,6723	191,9017	81,98	721,65	299,90	29,36%	8,18%	0,05	33,27	26,8%	1,09	0,28	11,69

## **APÊNDICE D – TABELAS ANOVA**

ANOVA - Resistência à compressão simples - Granulometria contínua					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	20446102	2271789	379,27	0,000
Linear	3	18897399	6299133	1051,63	0,000
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	1	8770695	8770695	1464,25	0,000
CC (%)	1	128446	128446	21,44	0,000
VM200 (%)	1	9998259	9998259	1669,19	0,000
Square	3	41285	13762	2,30	0,089
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )* $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	1	29865	29865	4,99	0,030
CC (%)*CC (%)	1	39	39	0,01	0,936
VM200 (%)*VM200 (%)	1	2723	2723	0,45	0,503
2-Way Interaction	3	1507418	502473	83,89	0,000
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )*CC (%)	1	2	2	0,00	0,987
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )*VM200 (%)	1	1349953	1349953	225,37	0,000
CC (%)*VM200 (%)	1	157464	157464	26,29	0,000
Error	50	299495	5990		
Lack-of-Fit	5	42008	8402	1,47	0,219
Pure Error	45	257487	5722		
Total	59	20745597			

ANOVA - Resistência à compressão simples - Granulometria uniforme					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	14350921	1594547	176,14	0,000
Linear	3	13785200	4595067	507,59	0,000
$\gamma_d$	1	5580591	5580591	616,45	0,000
CC	1	101967	101967	11,26	0,002
VM200	1	8102643	8102643	895,05	0,000
Square	3	170738	56913	6,29	0,001
$\gamma_d$ * $\gamma_d$	1	12046	12046	1,33	0,254
CC*CC	1	103880	103880	11,47	0,001
VM200*VM200	1	97040	97040	10,72	0,002
2-Way Interaction	3	394983	131661	14,54	0,000
$\gamma_d$ *CC	1	2646	2646	0,29	0,591
$\gamma_d$ *VM200	1	369520	369520	40,82	0,000
CC*VM200	1	22817	22817	2,52	0,119
Error	50	452638	9053		
Lack-of-Fit	5	136947	27389	3,90	0,005
Pure Error	45	315691	7015		
Total	59	14803559			

ANOVA - Resistência à compressão simples - Granulometria descontínua					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	14350921	1594547	176,14	0,000
Linear	3	13785200	4595067	507,59	0,000
$\gamma_d$	1	5580591	5580591	616,45	0,000
CC	1	101967	101967	11,26	0,002
VM200	1	8102643	8102643	895,05	0,000
Square	3	170738	56913	6,29	0,001
$\gamma_d$ * $\gamma_d$	1	12046	12046	1,33	0,254
CC*CC	1	103880	103880	11,47	0,001
VM200*VM200	1	97040	97040	10,72	0,002
2-Way Interaction	3	394983	131661	14,54	0,000
$\gamma_d$ *CC	1	2646	2646	0,29	0,591
$\gamma_d$ *VM200	1	369520	369520	40,82	0,000
CC*VM200	1	22817	22817	2,52	0,119
Error	50	452638	9053		
Lack-of-Fit	5	136947	27389	3,90	0,005
Pure Error	45	315691	7015		
Total	59	14803559			

ANOVA - Resistência à compressão simples - todas as granulometrias					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	23	86192101	3747483	264,68	0,000
Linear	5	78786973	15757395	1112,93	0,000
Granulometria	2	26005051	13002525	918,35	0,000
VM200 (%)	1	24277243	24277243	1714,68	0,000
CC (%)	1	963490	963490	68,05	0,000
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	1	27330148	27330148	1930,30	0,000
2-Way Interactions	9	6489261	721029	50,93	0,000
Granulometria*VM200 (%)	2	441135	220568	15,58	0,000
Granulometria*CC (%)	2	388940	194470	13,74	0,000
Granulometria* $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	2	2817106	1408553	99,48	0,000
VM200 (%)*CC (%)	1	374699	374699	26,46	0,000
VM200 (%)* $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	1	2343714	2343714	165,53	0,000
CC (%)* $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	1	7982	7982	0,56	0,456
3-Way Interactions	7	281781	40254	2,84	0,015
Granulometria*VM200 (%)*CC (%)	2	82631	41316	2,92	0,064
Granulometria*VM200 (%)* $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	2	166078	83039	5,86	0,005
Granulometria*CC (%)* $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	2	44070	22035	1,56	0,222
VM200 (%)*CC (%)* $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	1	3942	3942	0,28	0,600
4-Way Interactions	2	2276	1138	0,08	0,923
Granulometria*VM200 (%)*CC (%)* $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	2	2276	1138	0,08	0,923
Error	47	665449	14158		
Total	70	86857550			