

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA,  
INOVAÇÃO E EXTENSÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM  
DOUTORADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**JÚLIO PREVE MACHADO**

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS A  
PARTIR DA VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE LÃ DE VIDRO  
MOÍDA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense para obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Eduardo Junca  
Coorientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Fabiano Raupp  
Pereira

**CRICIÚMA,  
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M149a Machado, Júlio Preve.

Desenvolvimento de argamassas cimentícias a partir da valorização de resíduos de lã de vidro moída / Júlio Preve Machado. - 2023.

140 p. : il.

Tese (Doutorado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2023.

Orientação: Eduardo Junca.

Coorientação: Fabiano Raupp Pereira.

1. Argamassa cimentícia. 2. Lã de vidro. 3. Lã de vidro - Propriedades térmicas. 4. Reatividade química. 5. Reação álcali-sílica.  
I. Título.

CDD 23. ed. 620.135

Júlio Preve Machado

Desenvolvimento de argamassas cimentícias a partir da valorização de resíduos de lâ de vidro moída.

Esta Tese de Doutorado – TD foi julgada adequada à obtenção do grau de Doutor(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 18 de abril de 2023.

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

**Prof. Dr. Michael Peterson**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

**Prof. Dr. Lisandro Simão**

Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP

**Prof. Dr. Jorge Luís Coleti**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus por ter me dando forças, sabedoria e coragem para o desenvolvimento deste trabalho.

A minha esposa Luciana que me apoiou durante todo o trabalho.

Aos meus pais Pedro Paulo e Sônia que sempre me motivaram a estudar, não medindo esforços para a realização dos meus objetivos.

A minha irmã Paula que também sempre me apoiou para essa conquista.

Ao professor orientador Eduardo Junca por ter me orientado para todas as questões científicas e de pesquisa, me orientando em todas as decisões, estando presente em todo o dia a dia das atividades, esclarecendo dúvidas até mesmo das disciplinas ministradas por outros professores, não me desamparando em nenhum momento, tornando peça fundamental para esse trabalho.

A professor Coorientador Fabiano Raupp Pereira pelas suas contribuições primordiais de concepção e aprimoramento do trabalho.

A todos os demais professores do PPGCEM por estarem sempre dispostos a ajudar no que for preciso.

A toda UNESC pela oportunidade e infraestrutura disponibilizada, me possibilitando adquirir conhecimentos que levarei para todos os momentos da minha vida.

Aos acadêmicos Lúcio e David por todo apoio.

Aos colegas e técnicos da UNESC Tchesare, Fábio, Mariani e Mateus pela parceria e disposição em ajudar.

Ao Centro Universitário Barriga Verde pelo apoio dado para essa conquista.



## RESUMO

Os materiais cimentícios suplementares podem contribuir para a redução das emissões globais de CO<sub>2</sub> geradas na produção de cimento. Quando se trata de resíduos de vidro em pó, a literatura ainda carece de estudos conclusivos sobre sua viabilidade, levando em consideração propriedades mecânicas, reação álcali-sílica e redução de emissões de CO<sub>2</sub>. Visando contribuir com esse avanço científico, avaliou-se a utilização do resíduo de lâ de vidro moída como material cimentício suplementar em aplicações envolvendo argamassas cimentícias. Caracterizações físicas, químicas e morfológicas das matérias-primas e das argamassas cimentícias desenvolvidas foram realizadas com 0 %, 10 %, 17,5 % e 25,0 % de substituição de cimento por lâ de vidro moída. Propriedades das argamassas no estado fresco como consistência, início e fim de pega, densidade da massa, teor de ar incorporado e retenção de água foram realizados. Também foram realizados ensaios de resistência à compressão e reação álcali sílica. Os resultados mostram que o resíduo de lâ de vidro em pó apresentou capacidade pozolânica, sem danos com reações álcali sílica, além de reduzir os poros na microestrutura. Também que a diminuição do tamanho das partículas em até 4,9 µm (d50%) da lâ de vidro influenciou na redução de porosidade, aumento da reatividade química e aumento da resistência mecânica. Todas as argamassas cimentícias produzidas atingiram o índice de desempenho com cimento Portland superior ao exigido para materiais Pozolânicos. Os resultados de expansão por reação álcali sílica foram inferiores 0,2%, não apresentando riscos de manifestações patológicas. Desta forma, reafirma-se a hipótese que este resíduo pode ser utilizado como material cimentício suplementar com a formação de novos cristais de silicato de cálcio hidratado, reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub> e tornando as argamassas cimentícias mais duráveis.

Palavras-chave: Lã de vidro. Reatividade química. Comportamento mecânico. Reação álcali sílica. Materiais cimentícios suplementares.





## ABSTRACT

Supplementary cementitious materials can contribute to the reduction of global CO<sub>2</sub> emissions generated in cement production. When it comes to powdered glass waste, the literature still lacks conclusive studies on its viability, taking into account mechanical properties, alkali-silica reaction and reduction of CO<sub>2</sub> emissions. Aiming to contribute to this scientific advance, the use of ground glass wool residue as a supplementary cementitious material in applications involving cementitious mortars was evaluated. Physical, chemical and morphological characterizations of the raw materials and cementitious mortars developed were carried out with 0%, 10%, 17.5% and 25.0% of replacement of cement by ground glass wool. Mortar properties in the fresh state such as consistency, beginning and end of setting, mass density, incorporated air content and water retention were carried out. Tests of compressive strength and alkali-silica reaction were also carried out. The results show that the powdered glass wool residue presented pozzolanic capacity, without damage with alkali-silica reactions, in addition to reducing the pores in the microstructure. Also the decrease in particle size by up to 4.9 μm (d<sub>50</sub>%) of the glass wool influenced the reduction of porosity, increased the chemical reactivity and increased the mechanical resistance. All cementitious mortars produced reached the performance index with Portland cement superior to that required for Pozzolanic materials. The results of expansion by alkali-silica reaction were less than 0.2%, showing no risk of pathological manifestations. Thus, the hypothesis is reaffirmed that this residue can be used as supplementary cementitious material with the formation of new hydrated calcium silicate crystals, reducing CO<sub>2</sub> emissions and making cementitious mortars more durable.

**Keywords:** Glass wool. Chemical reactivity. Mechanical behavior. Alkali silica reaction. Supplementary cementitious materials



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Difração de raios X da lã de vidro. ....	33
Figura 2 - Microscopia eletrônica de varredura (a) partículas de cimento, (b) partículas de vidro de 63-75 $\mu\text{m}$ , (c) partículas de vidro de 25-38 $\mu\text{m}$ e (d) partículas de vidro de 0-25 $\mu\text{m}$ . ....	37
Figura 3 - Curva cumulativa do calor de hidratação das amostras cimentícias com e sem resíduos de vidro a 23 °C. ....	38
Figura 4 - Estrutura cristalina do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ). Os tetraedros azuis representam os átomos de $\text{SiO}^4$ e as esferas azuis representam os átomos de cálcio. ....	41
Figura 5 - Difração de raios X para os quatro pós de silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), S1, S2, R1000 e R800, correspondendo, respectivamente, as partículas de 100, 45, 0,22 e 0,07 $\mu\text{m}$ . ....	43
Figura 6 - Representação esquemática de um clínquer polifásico contendo silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) ( $\text{C}_3\text{S}$ ) e aluminatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ( $\text{C}_3\text{A}$ ). ....	44
Figura 7 - Curva de evolução do calor do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ). ....	46
Figura 8 - Taxas de reação de hidratação do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) para as razões água/sólido iguais a 10 e 0,5. ....	47
Figura 9 - Morfologia dos silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) hidratados após (a) 0,25 horas e (b) após 4,0 horas. ....	48
Figura 10 - Evolução do comprimento da agulha dos cristais de silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ). ....	49
Figura 11 - Formação da etringita ( $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) a (a) 80 segundos e (b) 160 segundos. ....	51
Figura 12 - Imagens fotográficas de transmissão (TEM) do aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) hidratados na presença de gesso ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) nos tempos de hidratação de (a) 30 minutos; (b) 90 minutos e (c) 135 minutos. Setas vermelhas indicam a formação do gel de monossulfoaluminato de cálcio hidratado ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ). ....	52
Figura 13 - Cristal de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) formado de uma amostra cimentícia em cura úmida aos 28 dias. ....	54
Figura 14 - Mapeamento químico (50 $\mu\text{m}$ ) de uma amostras de hidróxido cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e vidro em pó aos 56 dias (a) cálcio (Ca) presente da mistura; (b) Sílica (Si) presente da mistura; (c) sódio (Na) presente da	

mistura e (d) cálcio (Ca) + silício (Si) + sódio (Na) reconhecidos em fases anidras e hidratadas.....	55
Figura 15 - Curva de evolução de hidratação da pasta cimentícia com resíduos de vidro fosco moído por 6 horas. ....	57
Figura 16 - Fotomicrografia do pó de vidro reciclado. ....	60
Figura 17 - Imagens microscópicas do pó de vidro após (a) 0 minutos de moagem a úmido, (b) 20 minutos de moagem a úmido, (c) 60 minutos de moagem a úmido e (d) 120 minutos de moagem a úmido. ....	61
Figura 18 - (a) Estrutura do refrigerador em um comércio de sucatas após a retirada da manta de lã de vidro e (b) lã de vidro na forma de manta após retirada da sucata (refrigerador). ....	64
Figura 20 - Fluxograma dos processos de cominuição a seco e em moinho de alta energia a úmido. ....	65
Figura 21 - Moinhos e lã de vidro moída (a) moinho de bolas modelo MB 6595 C, (b) moinho de bolas de alta energia modelo LMZ 0,5, (c) moinho de bolas marca Servitech, modelo CT - 242, (d) lã de vidro após moagem inicial e (e) lã de vidro moída e na forma de pasta após moagem em alta energia a úmido. ....	68
Figura 22 - Data logger interligado com a amostra no recipiente de isopor (caixa isolante térmica) que foi utilizado no ensaio de calor de hidratação. ....	77
Figura 23 - Difração de raios X da lã de vidro moída. ....	92
Figura 24 - Termogravimétrica (ATD/TG) da lã de vidro. ....	93
Figura 25 - Curva de moagem a úmido de alta energia da lã de vidro. ....	95
Figura 26 - Cominuição a seco da lã de vidro (a) moagem (Mesfnormal), (b) moagem (Mesfnormal + Mesf1,6mm) e (c) moagem (Mesfnormal + Mesf1,6mm + Mesf 0,6mm). ....	96
Figura 27 - Cominuição em alta energia a úmido do resíduo de lã de vidro (a) após 30 minutos, (b) após 330 minutos e (c) após 450 minutos. ....	98
Figura 28 - Imagens da microscopia eletrônica de varredura (MEV) com destorroamento (a) amostra com 30 minutos de cominuição em alta energia a úmido e (b) amostra com 60 minutos de cominuição em alta energia a úmido. ....	99
Figura 29 - Gráfico de Pareto das variáveis tamanho de partícula e teor de lã de vidro para os resultados de porosidade no planejamento fatorial 3 <sup>2</sup> . ....	109

Figura 30 - Gráfico de Médias dos resultados de porosidade com o Tamanho de Partícula d50% ( $\mu\text{m}$ ) no planejamento fatorial $3^2$ . .....	110
Figura 31 - Gráfico de Pareto das variáveis tamanho de partícula e teor de lã de vidro para os resultados de resistência à compressão no planejamento fatorial $3^2$ . .....	111
Figura 32 - Gráfico de Médias dos resultados de resistência à compressão com o Tamanho de Partícula d50% e Teor de lã de vidro (%) no planejamento fatorial $3^2$ . .....	112
Figura 33 - Calor de hidratação das argamassas cimentícias. ....	113
Figura 34 - Termogravimetria (TG) das argamassas cimentícias.....	114
Figura 35 - Difração de Raios X (DRX) das argamassas cimentícias. ....	116
Figura 36 - FTIR das argamassas cimentícias. ....	117
Figura 37 - Experimentos após 365 dias do ensaio de reação álcali sílica .....	119
Figura 38 - Imagens microscópicas das argamassas cimentícias, (a) $\text{Arg}_{\text{ref}}$ , (b) $\text{Arg}_{20\text{s}(25)}$ , (c) $\text{Arg}_{20\text{s}30\text{u}(25)}$ e (d) $\text{Arg}_{20\text{s}60\text{u}(25)}$ . .....	120
Figura 39 - Imagens microscópicas do embriões de nucleação, (a) $\text{Arg}_{20\text{s}(25)}$ e (b) $\text{Arg}_{20\text{s}30\text{u}(25)}$ . ....	121
Figura 40 - Camada de revestimento $\text{Arg}_{20\text{s}60\text{u}(25)}$ após ensaio. ....	124



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do pó de vidro e lã de vidro .....	33
Tabela 2 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).....	40
Tabela 3 - Etapas e atividades realizadas no desenvolvimento experimental.....	63
Tabela 4 - Composição dos experimentos das argamassas cimentícias produzidas, com a quantidade das matérias-primas necessárias para produzir seis corpos de prova cilíndricos de 5,0 centímetros de diâmetro por 10 centímetros de altura. ....	74
Tabela 5 - Análise química do cimento.....	89
Tabela 6 - Tamanho de partícula do cimento anidro.....	90
Tabela 7 - Análise química da lã de vidro moída.....	91
Tabela 8- Tamanho de partícula obtida na cominuição a seco.....	94
Tabela 9 - Tamanho de partículas dos processos de cominuição em alta energia a úmido por 30 minutos e 60 minutos, antes e depois do destorroamento a seco.....	100
Tabela 10 - Teor de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) fixado da lã de vidro moída pelo método de Chapelle Modificado.....	101
Tabela 11 - Resultados do teor de álcalis disponíveis das amostras de lã de vidro moída.....	102
Tabela 12 - Índice de consistência das argamassas.....	103
Tabela 13 - Porosidade das argamassas cimentícias.....	104
Tabela 14 - Resistência à compressão das argamassas cimentícias. ...	105
Tabela 15 - Índice de desempenho das argamassas cimentícias com cimento Portland.....	106
Tabela 16 - Resultados do método ANOVA para a porosidade das argamassas cimentícias.....	107
Tabela 17 - Resultados do método ANOVA para a resistência à compressão das argamassas cimentícias.....	107
Tabela 18 - Resultados do método ANOVA para a porosidade das argamassas cimentícias do planejamento fatorial $3^2$ .....	108
Tabela 19 - Resultados do método ANOVA para a resistência à compressão das argamassas cimentícias do planejamento fatorial $3^2$ .....	110
Tabela 20 - Reação álcali sílica das argamassas cimentícias.....	118
Tabela 21 - Início e fim de pega das argamassas cimentícias.....	122

Tabela 22 - Densidade da massa e teor de ar incorporado das argamassas cimentícias. ....	123
Tabela 23 - Retenção de água das argamassas cimentícias.....	123
Tabela 24 - Emissão de CO <sub>2</sub> do processo de cominuição da lã de vidro para a produção das argamassas cimentícias. ....	125
Tabela 25 - Emissões totais de CO <sub>2</sub> das argamassas cimentícias.....	125



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AF - Fator água/argamassa fresca
- $Al_2O_3$  – Óxido de alumínio
- $A_n$  – Área nominal de seção transversal do corpo de prova
- ANOVA – Análise da variância
- $Arg_{ref}$  – Argamassa cimentícia produzida sem a substituição de cimento por lã de vidro moída
- $Arg_{20s(10)}$  – Argamassa cimentícia produzida com 10,0% de substituição de cimento por lã de vidro moída por cominuição a seco por 20 minutos
- $Arg_{20s(17,5)}$  – Argamassa cimentícia produzida com 17,5% de substituição de cimento por lã de vidro moída por cominuição a seco por 20 minutos
- $Arg_{20s(25)}$  – Argamassa cimentícia produzida com 25,0% de substituição de cimento por lã de vidro moída por cominuição a seco por 20 minutos
- $Arg_{20s30u(10)}$  – Argamassa cimentícia produzida com 10,0% de substituição de cimento por lã de vidro moída por cominuição a seco por 20 minutos mais cominuição em alta energia a úmido por 30 minutos
- $Arg_{20s30u(17,5)}$  – Argamassa cimentícia produzida com 17,5% de substituição de cimento por lã de vidro moída por cominuição a seco por 20 minutos mais cominuição em alta energia a úmido por 30 minutos
- $Arg_{20s30u(25)}$  – Argamassa cimentícia produzida com 25,0% de substituição de cimento por lã de vidro moída por cominuição a seco por 20 minutos mais cominuição em alta energia a úmido por 30 minutos
- $Arg_{20s60u(10)}$  – Argamassa cimentícia produzida com 10,0% de substituição de cimento por lã de vidro moída por cominuição a seco por 20 minutos mais cominuição em alta energia a úmido por 60 minutos
- $Arg_{20s60u(17,5)}$  – Argamassa cimentícia produzida com 17,5% de substituição de cimento por lã de vidro moída por cominuição a seco por 20 minutos mais cominuição em alta energia a úmido por 60 minutos
- $Arg_{20s60u(25)}$  – Argamassa cimentícia produzida com 25,0% de substituição de cimento por lã de vidro moída por cominuição a seco por 20 minutos mais cominuição em alta energia a úmido por 60 minutos
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- $B_2O_3$  – Trióxido de Boro
- BaO – Óxido de bário
- BET – Brunauer, Emmett, Teller. Método que descreve a adsorção física molecular
- BRE Digest – Building Research Establishment
- BS – British Standard
- Ca - Cálcio

CaAl<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>(OH)<sub>4</sub> - Chantalita  
CaCO<sub>3</sub> – Carbonato de cálcio  
Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O – Nitrato de cálcio hidratado  
CaO – Óxido de Cálcio (cal)  
Ca(OH)<sub>2</sub> – Hidróxido de Cálcio  
CaO.SiO<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O – Silicato de Cálcio Hidratado  
CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O – Sulfato de cálcio  
CECAM – Sala de caracterização de materiais  
CerTEC – Laboratório de Cerâmica Técnica  
cm - centímetro  
cm<sup>2</sup> – centímetros quadrados  
CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono  
Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de cobalto  
CP I – Cimento Portland comum  
CP I – S – Cimento Portland comum com adições  
CP II – E – Cimento Portland Composto com Escória  
CP II – Z - Cimento Portland Composto com Pozolana  
CP II – F - Cimento Portland Composto com Fíler  
CP III – Cimento Portland de Alto Forno  
CP IV – Cimento Portland Pozolânico  
CP V – ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial  
Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de cromo  
C<sub>pz</sub> – Concentração de material pozolânico  
CuK $\alpha$  – Radiação usada na difração de Raios X  
C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub> – Etilenoglicol  
C<sub>2</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> – Oxalato de amônio  
C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> – Monohidrato de ácido nítrico  
d - Densidade de massa da argamassa  
d<sub>médio</sub> – diâmetro médio das partículas  
DRX – Difração de Raios X  
d<sub>t</sub> - Densidade de massa teórica da argamassa  
d<sub>10</sub> – diâmetro das partículas a 10%  
d<sub>50</sub> - diâmetro das partículas a 50%  
d<sub>90</sub> - diâmetro das partículas a 90%  
ES – Estado do Espírito Santo  
Fc – Fator de correção  
FeO – Óxido ferroso  
FeO(OH) – Goethita  
FTIR – Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier  
[(Fe<sup>2+</sup>,Mg)<sub>5</sub>Al(AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>8</sub>] - Chamosita  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de ferro

g – grama

$F_c$  – Carga máxima aplicada à compressão

$f_{cA}$  – Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova produzidos com cimento sem o uso de vidro moída

$f_{cB}$  – Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova produzidos com 25,0% de lâ de vidro moída em substituição ao cimento

FRX – Fluorescência de Raios X

HCl – Ácido clorídrico

h - hora

H<sub>2</sub>O – Água

$I_{\text{cimento}}$  – Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias

K - Potássio

kg – quilograma

kV -quilovolt

KCl – Cloreto de Potássio

K<sup>+</sup> - Íons de potássio

K<sub>2</sub>O – Óxido de potássio

LABVALORA – Laboratório de Valorização de Resíduos

LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil

LVM<sub>(20s)</sub> – Lã de vidro moída por cominuição a seco por 20 minutos

LVM<sub>(20s30u20s)</sub> - Lã de vidro moída por cominuição a seco por 20 minutos mais 30 minutos de cominuição em alta energia a úmido mais 20 minutos de destorroamento a seco

LVM<sub>(20s60u20s)</sub> - Lã de vidro moída por cominuição a seco por 20 minutos mais 60 minutos de cominuição em alta energia a úmido mais 20 minutos de destorroamento a seco

m – metro

mA – Miliampere

$m_a$  - Massa do conjunto com argamassa

$m_{\text{água}}$  = Massa da água que compõe a argamassa fresca

$m_c$  - Massa do recipiente cilíndrico contendo argamassa

$M_{\text{esfnormal}}$  – Cominuição a seco por 20 minutos com esfera de alta alumina de 15 milímetros de diâmetro

$M_{\text{esfnormal}} + M_{\text{esf1,6mm}}$  – Cominuição a seco por 20 minutos com esfera de alta alumina de 15 milímetros de diâmetro mais 20 minutos de cominuição com esferas metálicas de 1,6 milímetros de diâmetro

$M_{\text{esfnormal}} + M_{\text{esf1,6mm}} + M_{\text{esf0,6mm}}$  – Cominuição a seco por 20 minutos com esfera de alta alumina de 15 milímetros de diâmetro mais 20 minutos de cominuição com esferas metálicas de 1,6 milímetros de diâmetro mais 20 minutos de cominuição com esferas metálicas de 0,6 milímetros

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

mg - miligrama  
MgO – Óxido de magnésio  
mm<sup>2</sup> – milímetros quadrados  
MnO – Óxido de Manganês  
MPa – MegaPascal  
m<sub>s</sub> - Massa do conjunto após a sucção  
m<sub>v</sub> - Massa do conjunto vazio  
m<sub>w</sub> - Massa total de água acrescentada à mistura  
mW - miliwatt  
m<sup>2</sup> – metro quadrado  
N - Newton  
NaCl – Cloreto de Sódio  
Na – Sódio  
Na<sup>+</sup> - Íons de sódio  
NaOH – Hidróxido de Sódio  
Na<sub>2</sub>[B<sub>4</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>]·8H<sub>2</sub>O – Tetraborato de sódio  
Na<sub>2</sub>O – Óxido de sódio  
NH<sub>4</sub>OH – Hidróxido de amônio  
NBR – Norma brasileira aprovada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas  
OH<sup>-</sup> - Hidróxido  
PbO – Monóxido de chumbo  
PF – Perda ao Fogo  
P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Pentóxido de difósforo  
Ra – Retenção de água  
R<sub>c</sub> – Resistência à compressão  
RCD's – Resíduos de construção e demolição  
R<sup>2</sup> – Coeficiente de Determinação  
s - Segundos  
Si - Silício  
SiO<sub>2</sub> – Dióxido de Silício (Sílica)  
SO<sub>2</sub> – Dióxido de Enxofre  
SO<sub>3</sub> – Trióxido de enxofre  
SrO – Óxido de estrôncio  
TG e TGA – Termogravimetria  
TiO<sub>2</sub> – Dióxido de Titânio  
Valor P – Valor da probabilidade de significância  
v<sub>r</sub> - Volume do recipiente cilíndrico  
W/mK – Watt/metroKelvin  
ZnO – Óxido de zinco  
ZrO<sub>2</sub> – Dióxido de zircônio

$\mu\text{m}$  – micrômetro

$\text{CaO.Na}_2\text{O.SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$  – Gél NASH expansivo resultado da reação álcali sílica

$2\text{CaO.SiO}_2$  – Silicato dicálcico

$3\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$  – Aluminato tricálcico

$3\text{CaO.SiO}_2$  – Silicato tricálcico

$4\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$  – Ferroaluminato tetracálcico

$4\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3.\text{SO}_3.18\text{H}_2\text{O}$  – Monossulfoaluminato de cálcio hidratado

$6\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.32\text{H}_2\text{O}$  – Etringita



## LISTA DE SÍMBOLOS

Å – angström

°C – graus Celsius

$\gamma$ ,  $\alpha'$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  – Formas polimórficas do silicato dicálcico

$2\theta$  – Posição angular dos picos cristalinos

$\gamma_s$  - Massa específica da argamassa anidra

$\epsilon t$  – Porosidade





## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>27</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>29</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	29
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	29
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>31</b>
3.1. A LÃ DE VIDRO COMO RESÍDUO MINERAL.....	31
<b>3.1.1. Classificação quanto aos riscos ao meio ambiente e saúde pública</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1.2. Potencialidade quanto às características</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1.3. Quantidade de geração do resíduo</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1.4. Viabilidade na utilização do resíduo em compostos cimentícios</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1.5. Aplicabilidade dos resíduos de vidro moído em compostos cimentícios</b> .....	<b>38</b>
3.2. IMPACTO AMBIENTAL NA PRODUÇÃO DO CIMENTO .....	39
3.3. MATÉRIAS-PRIMAS DO CLÍNQUER .....	40
3.4. PRODUTOS APÓS HIDRATAÇÃO .....	45
<b>3.4.1. Silicato de cálcio hidratado (CaO.SiO<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O)</b> .....	<b>45</b>
<b>3.4.2. Etringita (6CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3SO<sub>3</sub>.32H<sub>2</sub>O) e Monossulfoaluminato de cálcio hidratado (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SO<sub>3</sub>.18H<sub>2</sub>O)</b> .....	<b>50</b>
<b>3.4.3. Hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>)</b> .....	<b>53</b>
3.5. LÃ DE VIDRO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR.....	56
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>63</b>
4.1 OBTENÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS .....	63
4.2 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	64
<b>4.2.1. Preparação dos materiais</b> .....	<b>64</b>
<b>4.2.2. Caracterização das matérias-primas</b> .....	<b>69</b>
4.3. REATIVIDADE QUÍMICA DA LÃ DE VIDRO MOÍDA .....	70
<b>4.3.1. Teor de hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) fixado: Chappelle Modificado</b> .....	<b>70</b>
<b>4.3.2. Alcalinidade: Teor de álcalis disponíveis</b> .....	<b>72</b>
4.4. PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS .....	73
<b>4.4.1. Mistura dos experimentos: dosagem e procedimentos de mistura</b> .....	<b>73</b>
<b>4.4.2. Preparo dos experimentos: moldagem das amostras e processos de cura</b> .....	<b>75</b>

4.5. REATIVIDADE QUÍMICA E CARACTERIZAÇÕES MORFOLÓGICAS DAS ARGAMASSAS .....	76
<b>4.5.1. Reatividade química .....</b>	<b>76</b>
4.6. ENSAIOS PARA AVALIAR AS PROPRIEDADES/DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS .....	80
<b>4.6.1. Ensaio no estado fresco .....</b>	<b>80</b>
<b>4.6.2. Ensaio no estado endurecido .....</b>	<b>84</b>
4.7 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	86
4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	86
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>89</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	89
<b>5.1.1 Caracterização do cimento .....</b>	<b>89</b>
<b>5.1.2 Caracterização da lã de vidro .....</b>	<b>90</b>
5.2 REATIVIDADE QUÍMICA DA LÃ DE VIDRO MOÍDA .....	100
<b>5.2.1. Teor de hidróxido de cálcio (CA(OH)<sub>2</sub>) fixado: Chapelle Modificado .....</b>	<b>100</b>
<b>5.2.2. Alcalinidade: Teor de álcalis disponíveis .....</b>	<b>101</b>
5.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS.....	102
<b>5.3.1. Índice de consistência.....</b>	<b>102</b>
<b>5.3.1. Porosidade .....</b>	<b>103</b>
<b>5.3.2. Resistência à compressão.....</b>	<b>104</b>
<b>5.3.3. Índice de desempenho com o cimento Portland .....</b>	<b>106</b>
<b>5.3.4. Análise estatística .....</b>	<b>107</b>
5.4 REATIVIDADE QUÍMICA E CARACTERIZAÇÕES MORFOLÓGICAS DAS ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS .....	112
<b>5.4.1. Reatividade química .....</b>	<b>112</b>
<b>5.4.2. Caracterizações morfológicas .....</b>	<b>119</b>
5.5 DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS.....	121
<b>5.5.1. Início e fim de pega .....</b>	<b>122</b>
<b>5.5.2. Densidade da massa e teor de ar incorporado.....</b>	<b>122</b>
<b>5.5.3. Retenção de água.....</b>	<b>123</b>
<b>5.5.4. Resistência de aderência à tração ao substrato .....</b>	<b>124</b>
5.6 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	124
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>127</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>129</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>131</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland resultante da calcinação do calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) e argila ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), consiste num ligante hidráulico que se aglomera com os agregados, formando materiais utilizados em obras de engenharia civil como infraestrutura de barragens, pontes, rodovias, ferrovias, além de edificações residenciais, comerciais e industriais (Gunasekara et al., 2015, p. 593; QIN; GAO; CHEN, 2018, p. 223 a 224; CHEIKH; MOHAMED, 2020, p. 3).

Os materiais cimentícios apresentam características frágeis, tornando-os vulneráveis ao surgimento de trincas, tendo a estabilidade dimensional desses materiais fundamental para a prevenção de manifestações patológicas e garantia de durabilidade das construções. Além disso, a demanda pela redução das emissões de  $\text{CO}_2$  no mundo trazem novos desafios para o setor da construção civil quanto ao uso de materiais alternativos ao cimento Portland (KRAFT; ENGQVIST; HERMANSSON, 2003, p. 439; LIU et al., 2010, p. 1; ASHRAF; OLEK; JAIN, 2017, p. 360).

A estabilidade dimensional dos materiais cimentícios pode ser comprometida por esforços mecânicos internos. Assim, rachaduras tendem a ocorrer nos mesmos, quando essas tensões mecânicas internas sejam superiores aos seus resultados mecânicos como resistência à compressão (ZENG et al., 2011, p. 468; SIDDIQUI; FOWLER, 2015, p. 204).

Para suprir tais demandas, estudos sobre o processamento de novos materiais cimentícios precisam ser realizados. Materiais que contenham calcário ( $\text{CaCO}_3$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), podem ser utilizados como matéria-prima na produção de novos cimentos Portland (JANI; HOGGLAND, 2014, p. 1767-1775).

Os resíduos de lâ mineral, materiais fibrosos como lâ de vidro, lâ de vidro ou fibras de vidro, utilizados como isolantes térmicos, após sua vida útil normalmente depositados em aterros sanitários, têm suas quantidades estimadas em países da União Européia em 2.550.000 de toneladas até 2020. Os resíduos de lâ mineral podem apresentar em sua composição química 51,54% ( $\text{SiO}_2$ ), 42,93% ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), além de 1,28% ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e 0,14% ( $\text{MgO}$ ). Fazem parte dos resíduos de lâ mineral a lâ de rocha, a lâ de vidro e a lâ de escória (Ji et al., 2019, p. 625; VANTSI; KARKI, 2013, p. 62 até 64).

A sílica ( $\text{SiO}_2$ ) amorfa presente em resíduos de vidros como a lâ de vidro, misturada no cimento Portland, com tamanhos de partículas

abaixo de 75  $\mu\text{m}$ , pode reagir com os hidróxidos de cálcio ( $\text{CaOH}_2$ ), formando cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO.SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$ ). Esses cristais são responsáveis pelo ganho das propriedades mecânicas (compressão e flexão) e durabilidade dos materiais cimentícios (ANDRADE et al., 2018, p. 446; JIANG et al., 2019, p. 441; BOSTANCI, 2019, p. 12).

O preenchimento do pó de vidro em misturas cimentícias poderá também diminuir o efeito de empacotamento com as partículas angulares e aumentar o efeito de empacotamento na zona de transição interfacial com as partículas redondas, o que promove a diminuição da porosidade do material e, conseqüentemente, o aumento da resistência à compressão (ELAQRA et al., 2019, p. 681 e 682).

Desta forma, percebe-se a potencialidade da aplicação dos resíduos de lâ de vidro moído em argamassas como materiais cimentícios suplementares, sendo objetivo deste trabalho.

Vários estudos já foram realizados envolvendo o uso de resíduos de vidro em matrizes cimentícias. Porém, esta pesquisa tem carácter inovador pelo fato de tratar o uso específico da lâ de vidro, com tamanhos e morfologias específicas das partículas em pó, envolvendo um programa experimental que possibilite a determinação da viabilidade e valorização deste material como subproduto para a produção de argamassas cimentícias.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o uso do resíduo da lâ de vidro moída como material cimentício suplementar em argamassas cimentícias.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a potencialidade no uso de argamassas cimentícias produzidas com lâ de vidro moída como material cimentício suplementar;
- Avaliar a influência em que os diferentes tamanhos de partícula de lâ de vidro moída poderão proporcionar sobre os aspectos de porosidade e reatividade química de compostos cimentícios;
- Avaliar a capacidade da lâ de vidro moída reagir com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) para a formação de fases cristalinas de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO.SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$ );
- Avaliar os possíveis impactos do emprego de resíduos de lâ de vidro moída em matrizes cimentícias em relação às reações álcali sílica.



### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. A LÃ DE VIDRO COMO RESÍDUO MINERAL

A lâ de vidro é um isolante térmico utilizado em edificações, projetos de infraestrutura, fornos de tubos e pelotas, além de refrigeradores. Após sua vida útil perde suas características, sendo descartada em aterros controlados ou são incinerados. Faz parte do grupo das lâs minerais assim como a lâ de rocha e lâ de escória, representando 60% do mercado total de produtos de isolamento térmico de paredes (VANTSI; KARKI, 2013, p. 62; DEFÁVERI et al., 2019, p. 376, YLINIEMI, 2019, p. 1).

As lâs minerais apresentam características fibrosas por serem formadas por extração e fiação de minerais fundidos (vidro). Esses minerais são compostos, quimicamente, por sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), além dos óxidos de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e magnésio ( $\text{MgO}$ ) (KUBILIUTE; KAMINSKAS; KAZLAUSKAITE, 2018, p. 130 e 131).

Como isolante térmico, as lâs minerais apresentam benefícios que justificam sua aplicação. O isolamento térmico proporcionado em suas aplicações contribui para a redução do consumo de energia elétrica para as edificações e indústrias. Supondo que linhas de vapor, caldeiras, tanques, equipamentos de processo e dutos das indústrias brasileiras fossem isolados termicamente com lâs minerais, a economia resultante seria equivalente a 29 milhões de barris de petróleo por ano, além da redução na emissão de  $\text{CO}_2$ , estimada em 12 milhões de toneladas/ano. Na proteção pessoal, as lâs minerais podem proteger trabalhadores que operam em manutenção industrial de tubulações de fornos já que 40 milímetros de espessura do isolante revestindo as tubulações podem reduzir a temperatura de 100 °C para 40 °C. Em termos de conforto acústico em edificações, as lâs minerais formam barreiras ou enclausuramento capazes de reduzir o ruído provocado por equipamentos. Cabe destacar também, que tais isolantes térmicos e acústicos são materiais incombustíveis, o que diminui os riscos de incêndio em indústrias e edificações quando comparados com outros isolantes térmicos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE LÃS ISOLANTES MINERAIS, 2021).

### **3.1.1. Classificação quanto aos riscos ao meio ambiente e saúde pública**

Os resíduos de vidro depositados em aterros controlados não são biodegradáveis. Por isso, sua reciclagem é fundamental para o meio ambiente. Além disso, quando dispostos na forma de lãs, pós ou qualquer outra forma que se torne possível a suspensão de suas partículas no ar, são considerados tóxicos e nocivos para a saúde humana (DE OLIVEIRA; GOMES; SANTOS, 2012, p. 197 e 198; VANTSI; KARKI, 2013, p. 62; ZHANG et al., 2013, p. 135).

De acordo com a NBR 10004 (2004, p. 4), os resíduos da lã de vidro são classificados como resíduos Classe IIA, não perigosos e não inertes (EVANGELHISTA, 2011, p. 133).

### **3.1.2. Potencialidade quanto às características**

Defáveri et al. (2019, p. 377) obtiveram como resultado da composição química do resíduo de lã de vidro utilizado no estudo sobre geopolímeros à base de rejeitos de minério de ferro e lã de vidro, os valores de 43,7% de  $\text{SiO}_2$ , 17,6% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 12,0% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 19,7% de  $\text{CaO}$ , 2,6% de  $\text{TiO}_2$ , 1,3% de  $\text{SO}_3$ , além de 2,9% de outros constituintes.

Os vidros apresentam em sua composição química de 5% a 12% de  $\text{CaO}$ , 60% a 75% de  $\text{SiO}_2$  e 12% a 18% de  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  (BUENO et al., 2020, p. 3).

Bostanci (2019, p. 3) em seu estudo sobre o efeito da adição do pó de vidro nas propriedades das argamassas cimentícias de sílica ativa, analisou a composição química do pó de vidro, obtendo um resultado que mostra a semelhança deste material com a lã de vidro em termos de proporção do  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em relação aos demais constituintes. A Tabela 1 apresenta os resultados de composição química do pó de vidro e lã de vidro.



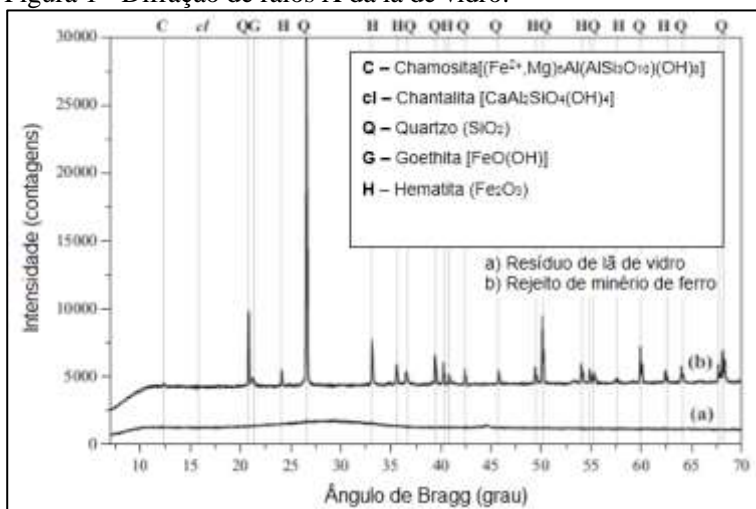
Tabela 1 - Composição química do pó de vidro e lã de vidro

COMPOSTOS	QUANTIDADE PÓ DE VIDRO	QUANTIDADE LÃ DE VIDRO
SiO <sub>2</sub>	69,45%	56,89%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,38%	3,47%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,45%	0,57%
FeO	-	0,18%
CaO	12,10%	12,61%
MgO	3,60%	3,61%
MnO	-	0,56%
BaO	-	1,49%
Na <sub>2</sub> O	12,35%	12,86%
K <sub>2</sub> O	0,59%	1,36%
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	6,00%
TiO <sub>2</sub>	0,08%	0,12%

Fonte: Bostanci (2019), Jani e Hogland (2014).

A Figura 1 apresenta o resultado de uma difração de raios X da lã de vidro.

Figura 1 - Difração de raios X da lã de vidro.



Fonte: Defáveri et al. (2019) (adaptado pelo autor).

Analisando a Figura 1 obtida da difração de raios X realizada no estudo de Defáveri et al. (2019, p. 377) percebe-se no resultado mineralógico do resíduo da lâ de vidro (a), a ausência de picos que representariam as fases cristalográficas dos minerais existentes, caracterizando o material como amorfo.

### **3.1.3. Quantidade de geração do resíduo**

Apesar das possibilidades existentes de reciclagem dos resíduos de vidro, limitações em termos de critérios de qualidade ainda dificultam a sua remanufatura (JIANG et al., 2019, p. 440).

Segundo Mirzahosseini e Riding (2014, p. 95) o volume estimado de vidros em aterros no mundo é de cerca de 200 milhões de toneladas por ano. Dos resíduos de vidro, estimar separadamente os volumes existentes na forma de lâ se torna difícil da carência de dados disponíveis.

Müller et al. (2009, p. 378 até 381) apresentam um modelo de cálculo desenvolvido para estimar, com base no volume de produção da lâ mineral, o volume de resíduos de lâ mineral de 2010 a 2020 na União Européia. Considerando que durante a aplicação do material, perdas de 5% poderão ocorrer e que o mesmo terá uma vida útil média de 30 anos, estima-se a geração aproximada de 2.550.000 toneladas de resíduos de lâ mineral até 2020 (MÜLLER et al., 2009, p. 378; VANTSI; KARKI, 2013, p. 62 e 64). Segundo estudo da Ecofys (2009, p. 15 a 17) estima-se que 30% da produção total de lâ mineral corresponde à produção da lâ de vidro.

Em 2010, o volume estimado de resíduos de lâ mineral na União Europeia foi de 2,3 milhões de toneladas, representando 0,2% de todos os resíduos de construção e demolição gerados. Em 2020, esse volume aumentou para 2,5 milhões de toneladas (VANTSI; KARKI, 2013, p. 63; YLINIEMI, 2019, p. 1).

O uso de lâs minerais em construções na Europa, surgiu em 1960 com as exigências pelo cumprimento dos conceitos de desempenho de edificações. Tais conceitos se tornaram obrigatórios a partir da década de 1980.

No Brasil, em que 122.012 toneladas de resíduos de construção e demolição foram coletadas em 2018, a partir de 2013 é que foi estabelecida uma norma técnica específica, a NBR 15575 (2013) obrigando o atendimento de níveis de desempenho térmico para as edificações, gerando assim, demandas no consumo de lâs de vidro nas construções. Até então, dados referentes ao estado do Espírito Santo (ES) revelam uma geração de resíduos de lâ de vidro de 58,83 toneladas em

2013 (ZUCOLOTO et al, 2014, p. 2; PIERRARD; AKKERMAN, 2013, p. 4; ABRELPE, 2019, p. 35).

### **3.1.4. Viabilidade na utilização do resíduo em compostos cimentícios**

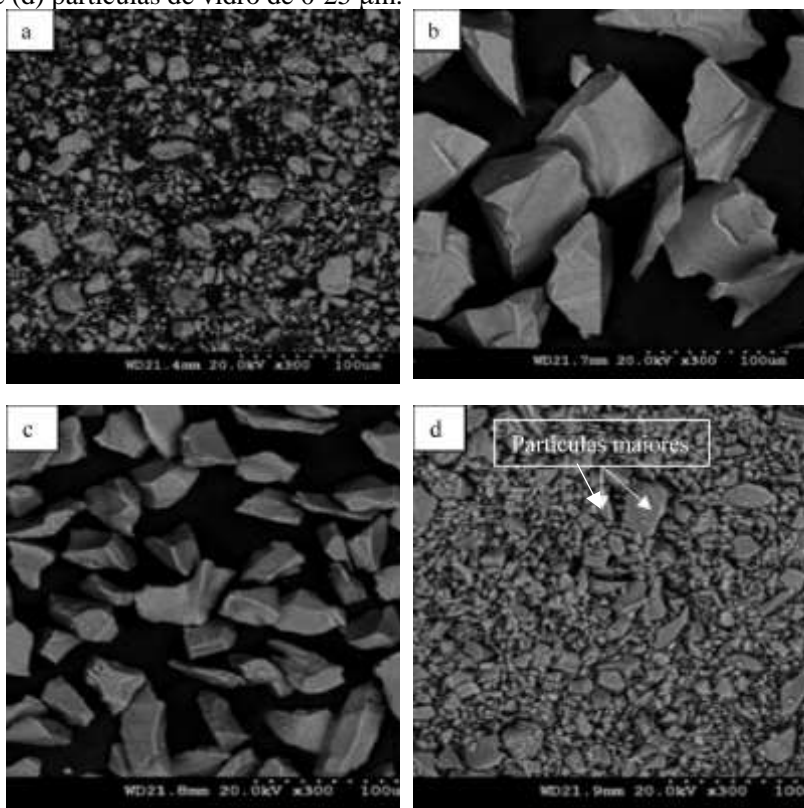
O uso de resíduos de vidro como pozolanas em misturas cimentícias pode ser limitado pela possível reação álcali-sílica. Essa reação consiste no ataque à sílica ( $\text{SiO}_2$ ) reativa instável, presente num ambiente aquoso como o das misturas cimentícias com água, pelos possíveis íons de sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ) e hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) existentes, formando um gel alcalino de silicato hidratado, que dependendo de suas proporções, poderá expandir e causar rachaduras no material após hidratação. A reação álcali-sílica pode ser controlada pela proporção de álcalis, da sílica ( $\text{SiO}_2$ ) na mistura cimentícia, assim como o controle da reatividade (FIGUEIRA et al., 2019, p. 905; THOMAS, 2010, p. 1230; BUENO et al., 2020, p. 28). A relação  $\text{CaO/SiO}_2$  também poderá influenciar no controle da expansão causada pela reação álcali-sílica. Taha e Nounu (2007, p. 504) produziram misturas cimentícias com 100% de cimento do tipo I e com 80% de cimento do tipo I e 20% de pó de vidro. No cimento do tipo I, o conteúdo de  $\text{Na}_2\text{O}$  era de 0,16% e 0,64% de  $\text{K}_2\text{O}$ . No pó de vidro, o conteúdo de  $\text{Na}_2\text{O}$  era de 13,82% e 0,52% de  $\text{K}_2\text{O}$ . A mistura com 100% de cimento foi testada com valores de 2,09 e 2,76 de relação  $\text{CaO/SiO}_2$ . A mistura com 80% de cimento do tipo I e 20% de pó de vidro foi testada com valores de 1,68 e 1,81 de relação  $\text{CaO/SiO}_2$ . Após 65 semanas, a mistura com 100% de cimento do tipo I chegou a valores de expansão por reação álcali-sílica superiores a 0,2% (limite de tolerância para expansão por reação álcali-sílica segundo BRE Digest 333 (2004, p. 1 a 8) e BS 812-123 (1999, p. 1 a 19)), enquanto a mistura com 80% de cimento do tipo I e 20% de pó de vidro chegou a valores de expansão por reação álcali-sílica inferiores a 0,04%, possibilitando sua aplicação em materiais cimentícios.

Mehdi et al (2019, p. 4 e 5) investigaram a reação pozolânica de pós de vidro de tamanho de partícula  $d_{50}$  de 10  $\mu\text{m}$  reagindo com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Os experimentos foram produzidos com 25% de pós de vidro e 75% de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), 50% de pós de vidro e 50% de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), além de 75% de pós de vidro e 25% de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). As imagens da microscopia eletrônica de varredura mostram que a formação de géis provenientes da reação álcali sílica é mais evidenciada nas amostras contendo 50% e 75% de pós de vidro (teor de  $\text{Ca/Si}$  de 1,33 e 0,5, respectivamente).

Atuando em matrizes cimentícias como material pozolânico, os resíduos de vidro em pó apresentam como seu principal composto o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) que não apresenta propriedades cimentícias somente em contato com água. Somente incorporados a um sistema contendo cálcio ( $\text{CaO}$ ) é que tais resíduos podem apresentar propriedades cimentícias como resistência mecânica e durabilidade (VARGAS; HALOG, 2015, p. 957; ARGIZ; MORAGUES; MENÉNDEZ, 2017, p. 26). Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010, p. 19) descrevem que fatores como substituição de areia ou cimento, finura e teor de vidro poderão influenciar na atividade pozolânica do vidro em compostos cimentícios.

A influência da finura das partículas de vidro na reatividade dos compostos cimentícios está relacionada a sua energia superficial. A partir de uma superfície específica em torno de  $30 \text{ m}^2/\text{kg}$ , representado por um tamanho de partícula aproximado de  $140 \mu\text{m}$ , a atividade pozolânica de resíduos de vidro se torna substancial. Com partículas menores que  $140 \mu\text{m}$  percebe-se o consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$ , formação de silicatos de cálcio hidratado ( $\text{CaO.SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$ ), além de possíveis melhoras em torno de 10% quando comparadas com misturas inertes (IDIR; CYR; TAGNIT-HAMOU, 2010, p. 28; RAMDANI et al., 2018, p. 2). Mirzahosseini e Riding (2015, p. 95 a 104) estudaram a influência de diferentes tamanhos de partículas de vidro moído na reatividade em materiais cimentícios suplementares. Foram testadas partículas de vidro com tamanhos em faixas de  $63\text{-}75 \mu\text{m}$ ,  $25\text{-}38 \mu\text{m}$  e  $0\text{-}25 \mu\text{m}$ . As Figuras 2(a), 2(b), 2(c) e 2(d) apresentam respectivamente, a morfologia das partículas de cimento, partículas de vidro de  $63\text{-}75 \mu\text{m}$ , partículas de vidro de  $25\text{-}38 \mu\text{m}$  e partículas de vidro de  $0\text{-}25 \mu\text{m}$  usadas nesta pesquisa.

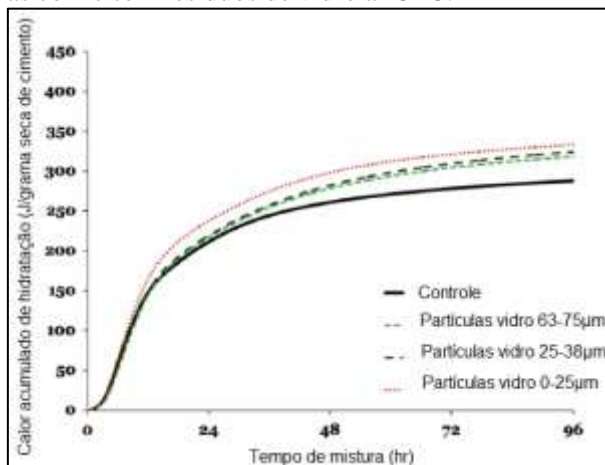
Figura 2 - Microscopia eletrônica de varredura (a) partículas de cimento, (b) partículas de vidro de 63-75  $\mu\text{m}$ , (c) partículas de vidro de 25-38  $\mu\text{m}$  e (d) partículas de vidro de 0-25  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Mirzahosseini e Riding (2015).

Analisando as Figuras 2 (b) e (c) percebe-se a ausência de partículas intersticiais aderidas nas superfícies das partículas de 63-75  $\mu\text{m}$  e 25-38  $\mu\text{m}$ . Quando as partículas do vidro foram moídas para 0-25  $\mu\text{m}$  percebe-se a existência de partículas intersticiais aderidas nas superfícies das partículas maiores. A Figura 3 apresenta a curva cumulativa do calor de hidratação das amostras com e sem resíduos de vidro a 23  $^{\circ}\text{C}$ .

Figura 3 - Curva cumulativa do calor de hidratação das amostras cimentícias com e sem resíduos de vidro a 23 °C.



Fonte: Mirzahosseini e Riding (2015) (adaptado pelo autor).

Analisando a Figura 3 percebe-se que todas as misturas cimentícias com partículas de vidro tiveram um calor de hidratação superior ao calor de hidratação da mistura cimentícia de controle (sem partículas de vidro). Além disso, entre as misturas cimentícias com partículas de vidro, aquelas com tamanho de partícula de 0-25 µm apresentaram o maior calor de hidratação (gerado em consequência da formação de cristais  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) que contribuiu para o maior valor de resistência à compressão aos 28 e 91 dias (aproximadamente 45 MPa e 50 MPa, respectivamente), possibilitando a sua aplicação em materiais cimentícios (MIRZAHOSSEINI; RIDING, 2015, p. 95 a 104).

### 3.1.5. Aplicabilidade dos resíduos de vidro moído em compostos cimentícios

Defáveri et al. (2019, p. 43) testaram a lâ de vidro moída em argamassas cimentícias, substituindo 25% do cimento Portland. Os resultados deste estudo mostraram que as argamassas contendo 25% de lâ de vidro moída consumiram 37% de hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para a formação de novos hidratos de silicato de cálcio ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Para esse teor de redução de cimento (25%) a resistência à compressão reduziu 2% em relação a esse mesmo resultado com as argamassas sem lâ de vidro moída. Os autores ainda descrevem que a aplicação de lâ de vidro moída

neste estudo proporcionou 24% de economia de cimento, além de uma melhora na intensidade do ligante de 15,5 kg/MPa.m<sup>3</sup>. A economia de cimento relatada contribui para a redução no consumo de recursos naturais e emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à produção do clínquer.

Bostanci (2019, p.1-12) estudou a substituição parcial da areia das misturas de argamassas cimentícias contendo fumo de sílica por pó de vidro. Neste estudo além da amostra de referência, foram produzidas amostras contendo 15%, 30% e 45% de pó de vidro. Os resultados deste estudo, testados aos 28 dias, mostram uma resistência de tração na flexão das amostras com 30% e 45% de pó de vidro de 9,7 MPa e 9,08 MPa respectivamente. Tais valores foram superiores ao da amostra de referência (8,61 MPa). A condutividade térmica também foi testada, em que as amostras com 15%, 30% e 45% de pó de vidro apresentam valores de 1,93 W/mK, 1,41 W/mK e 1,3 W/mK respectivamente, sendo inferiores ao resultado de condutividade térmica da amostra de referência (2,04 W/mK). Quanto ao resultado do módulo de elasticidade das amostras com 15% de pó de vidro, esse apresentou um aumento de 0,47% em relação à amostra de referência.

### 3.2. IMPACTO AMBIENTAL NA PRODUÇÃO DO CIMENTO

A produção anual de cimento no mundo chegou a 4.200 milhões de toneladas métricas. Para cada tonelada de cimento fabricado, cerca de 866 kg de CO<sub>2</sub> são emitidos em função da calcinação do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) para produzir o óxido de cálcio (CaO) (responsável pela metade das emissões de CO<sub>2</sub>) e pelo combustível usado para obtenção da temperatura de 1500 °C do forno (responsável pelo restante das emissões de CO<sub>2</sub>). Esse teor de emissões de CO<sub>2</sub> representam de 5% a 7% do total de emissões de CO<sub>2</sub> no mundo. Quanto à energia industrial, a produção de cimento consome de 12% a 15% do total gasto no mundo. Estima-se que até 2030 haverá um aumento de 50% nas emissões globais de CO<sub>2</sub> promovidas pela indústria do cimento, tornando-se responsável pelas mudanças climáticas da Terra e pelo aquecimento global (KALAKADA; DOH; ZI, 2019, p. 117916; ASHRAF; OLEK; JAIN, 2017, p. 361).

A Tabela 2 apresenta os limites de composição do cimento Portland de acordo com a NBR 16697 (2018, p. 5).

Tabela 2 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).

<b>Tipos (sigla)</b>	<b>Classe de resistência</b>	<b>Clínquer + sulfato de cálcio</b>	<b>Escória de alto forno</b>	<b>Material pozolânico</b>	<b>Material carbonático</b>
CP I		95-100	0-5		
CP I - S		90-94	0	0	6-10
CP II - E		51-94	6-34	0	0-15
CP II - Z	25, 32 ou 40 MPa	71-94	0	6-14	0-15
CP II - F		75-89	0	0	11-25
CP III		25-65	35-75	0	0-10
CP IV		45-85	0	15-50	0-10
CP V - ARI	ARI	90-100	0	0	0-10

Fonte: NBR 16697 (2018) (adaptado pelo autor).

Analisando a Tabela 1 percebe-se que as adições de escória de alto forno e os materiais pozolânicos apresentam valores de adições que podem chegar em até 75% e 50%, respectivamente.

As adições pozolânicas como a cinza volante, sílica ativa entre outros são subprodutos de outros processos que geram poluição atmosférica e demandam um consumo de energia que podem ter sua viabilidade prejudicada ao longo prazo. Neste sentido, o uso de materiais residuais reciclados como as partículas moídas de vidro podem ser indicado para a promoção de construção verde e sustentável (PEPE et al, 2016, p. 362 e 363).

### 3.3. MATÉRIAS-PRIMAS DO CLÍNQUER

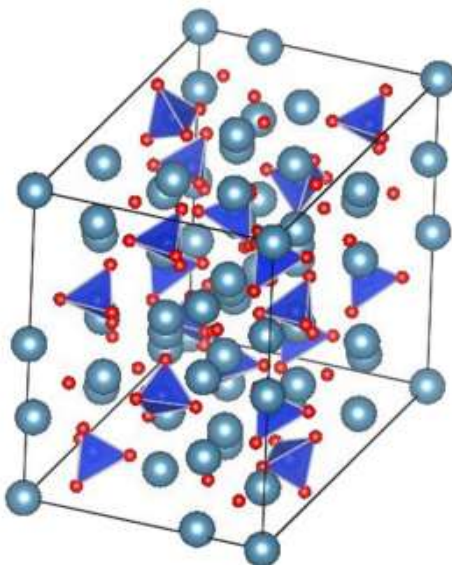
O clínquer é formado por matérias-primas originadas do calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) e argila ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) em que por meio de um processo térmico de clinquerização, chegando até 1.450 °C (obtenção do material



fundido), seguido por um resfriamento forçado afim de obter produtos estáveis como silicato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ) –  $\text{C}_3\text{S}$ : 45 a 60%; silicato dicálcico ( $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ) –  $\text{C}_2\text{S}$ : 15 a 30%, aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ) –  $\text{C}_3\text{A}$ : 6 a 12% e ferroaluminato tetracálcico ( $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) –  $\text{C}_4\text{AF}$ : 6 a 8% (OLIVEIRA et al., 2019, p. 677).

O silicato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ) apresenta uma estrutura triclínica, estável à temperatura ambiente, podendo apresentar íons incorporados de alumínio, magnésio e ferro. Transformações de fase poderão ocorrer dependendo da natureza e da quantidade de outros elementos presentes, como a água. A incorporação de novos íons de cálcio poderá ocorrer de forma a estabilizar a estrutura do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ), antes do mesmo ser convertido em silicato dicálcico ( $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ) e  $\text{CaO}$ , que tende a ocorrer com o resfriamento a temperaturas inferiores a  $1.250\text{ }^\circ\text{C}$  (OLIVEIRA et al., 2019, p. 678). A Figura 4 apresenta uma representação da estrutura cristalina do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ).

Figura 4 - Estrutura cristalina do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ). Os tetraedros azuis representam os átomos de  $\text{SiO}_4^{4-}$  e as esferas azuis representam os átomos de cálcio.



Fonte: Laanaiya, Bouibes e Zaoui (2019).

Naber et al. (2019, p. 2) descrevem o silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) como uma estrutura polimórfica apresentando composição química contendo um percentual em peso de 71,7% de CaO, 25,9% de  $\text{SiO}_2$ , 1,8% de MgO e 0,6% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . A mistura foi homogeneizada em moinho de disco vibratório, calcinada em  $1.000\text{ }^\circ\text{C}$  durante 16 horas. Na sequência, ocorreu a sinterização por 5 horas a uma temperatura de  $1.400\text{ }^\circ\text{C}$ . Após sinterização, o material foi moído, obtendo valores de  $2.600\text{ cm}^2/\text{g}$  de área de superfície de Blaine,  $0,58\text{ m}^2/\text{g}$  de área de superfície específica por BET, além de uma distribuição de tamanho de partícula com um diâmetro  $d_{50}$  de massa de  $10,4\text{ }\mu\text{m}$ .

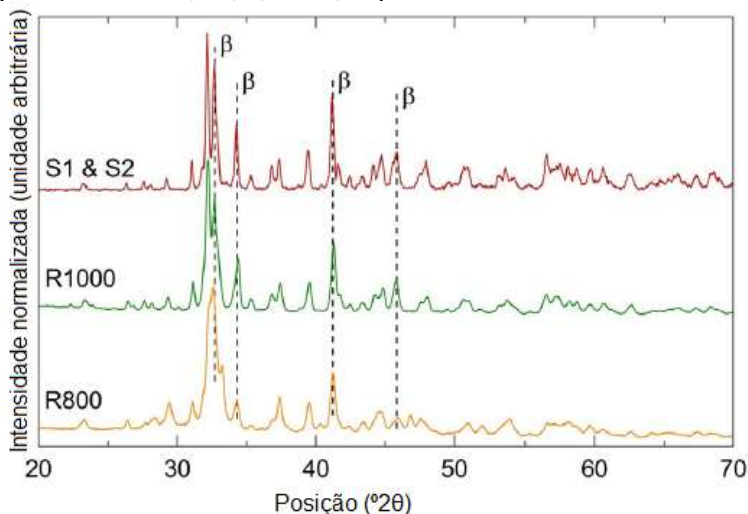
O silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) compõe uma estrutura monoclinica estável à temperatura ambiente, com capacidade de formar produtos de hidratação semelhantes aos obtidos pelo silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), contribuindo para o ganho de resistência mecânica. Para a sua formação, requer menos óxido de cálcio (CaO), além de uma formação a temperaturas inferiores ao silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ). Isso faz com que os cimentos com maior composição de silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) reduzam as emissões de  $\text{CO}_2$  quando comparados aos cimentos com maior composição de silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) (BARCELO et al., 2013, p. 1055).

Em cimentos Portland, o silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) pode existir em diferentes formas polimórficas  $\gamma$ ,  $\alpha'$ ,  $\alpha$  e  $\beta$ , dependendo das condições de resfriamento e composição química. Trata-se de uma microestrutura que tende a ser menos reativa quando comparada ao silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), implicando, conseqüentemente, num desenvolvimento mais lento das propriedades mecânicas. A reatividade do silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) pode ser aumentada com o aumento da área de superfície do pó (MASOERO; THOMAS; JENNINGS, 2013, p. 968).

Thomas, Ghazizadeh e Masoero (2017, p. 323) desenvolveram quatro amostras diferentes de silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), sendo duas dessas amostras obtidas pela calcinação de uma mistura estequiométrica de CaO e  $\text{SiO}_2$ . Neste processo, foram obtidos tamanhos máximos de grão de  $100$  e  $45\text{ }\mu\text{m}$ . As outras duas amostras, foram submetidas ao método sol-gel Pechini, objetivando aumentar área superficial. Misturas estequiométricas foram realizadas contendo nitrato de cálcio hidratado ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) e  $\text{SiO}_2$  coloidal, incorporadas a uma matriz de resina desenvolvida a partir de monohidrato de ácido cítrico ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ) (60% em peso) e etilenoglicol ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ ) (40% em peso). Após misturas estequiométricas, promoveu-se agitação por 30 minutos, seguida por um aquecimento a  $90\text{ }^\circ\text{C}$ , até formar um gel viscoso, posteriormente seco e

moído durante 3 horas a uma temperatura de 220 °C. Este processo resultou em grãos esféricos de diâmetros médios de 0,22 e 0,07  $\mu\text{m}$ . A Figura 5 apresenta os resultados de difração de raios X para esses quatro diferentes pós de silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ).

Figura 5 - Difração de raios X para os quatro pós de silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), S1, S2, R1000 e R800, correspondendo, respectivamente, as partículas de 100, 45, 0,22 e 0,07  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Thomas, Ghazizadeh e Masoero (2017).

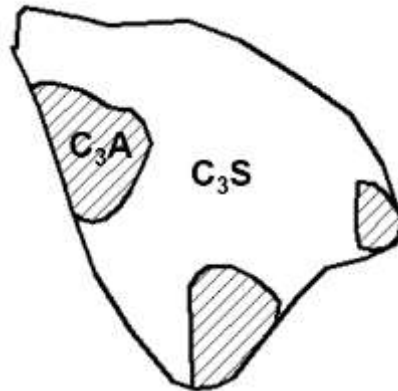
Analizando a Figura 5 percebe-se picos distintos do polimorfo silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )  $\beta$ . Nota-se semelhanças de picos entre as amostras, confirmando a eficácia da calcinação. Os processos aplicados para alterar a granulometria dos pós de 100 e 45  $\mu\text{m}$  para 0,22  $\mu\text{m}$  e 0,07  $\mu\text{m}$  não influenciaram em mudanças polimórficas na estrutura do cristal (THOMAS; GHAZIZADEH; MASOERO, 2017, p. 323).

Quanto aos aluminatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), esses possuem células unitárias formadas por íons  $\text{Ca}^{2+}$  e anéis de seis tetraedros de  $\text{AlO}_4$ . Podem conter óxidos como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , em proporções de até 10% em peso. A reatividade deste composto depende da concentração das impurezas. A estrutura pode ser do tipo cúbica, tendo teor de sódio (Na) de 0 a 0,10 e ortorrômbica, quando o teor de sódio (Na) varia de 0,16 a 0,20. A utilização do gesso ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) retarda a hidratação dessa fase, normalmente a mais reativa do clínquer

(MADDALENA; ROBERTS; HAMILTON, 2018, p. 933; MYERS et al., 2017, p. 176).

É possível obter clínqueres polifásicos constituídos de silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) e aluminatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) resultantes de sinterização com proporções adequadas de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{MgO}$ . A Figura 6 mostra a representação de um clínquer polifásico contendo silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) e aluminatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (QUENNOZ, 2014, p. 13).

Figura 6 - Representação esquemática de um clínquer polifásico contendo silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) ( $\text{C}_3\text{S}$ ) e aluminatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ( $\text{C}_3\text{A}$ ).



Fonte: Quennoz (2014) (adaptado pelo autor).

A dissolução do aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é controlada pela adsorção dos íons de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) em sítios reativos. Neste sentido, deve-se controlar a quantidade de gesso ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) adicionado ao cimento hidráulico afim de regular o retardo de pega. Sugere-se faixas de 3 a 5% de gesso ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) em relação ao cimento ou de 30 a 50% em relação ao teor de aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ). O ajuste ideal entre aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ )/gesso ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) pode ser realizado também por meio do controle de retardo de pega, obtido por testes de penetração como a medição de Vicat (RAMÍREZ et al., 2020, p. 2).

O ferroaluminato tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) consiste na principal fase presente na composição do clínquer contendo ferro (Fe). Na ausência de outros compostos nesta fase, sua hidratação é semelhante

aos aluminatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A composição química desta fase permite variações estruturais de série  $\text{Ca}_2(\text{Fe}_{2-y}\text{Al}_y)\text{O}_5$ , tendo o valor de  $y$  oscilando de 0 a 1,33 (CUESTA et al., 2015, p. 818).

Wang (2019, p. 343) analisando a resistência à compressão dos cristais de silicatos dicálcicos ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) $\beta$  e os ferroaluminatos tetracálcicos ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) submetidos a carbonatação, obteve em cubos de 20 mm de espessura de ferroaluminatos tetracálcicos ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) valores de 2,5 MPa após 2 horas de carbonatação. Esses cristais apresentaram características morfológicas similares a estruturas hexagonais plaquetárias, de forma consistente.

### 3.4. PRODUTOS APÓS HIDRATAÇÃO

Um composto cimentício é formado pela moagem do clínquer, que cristaliza com a água, formando minerais de silicatos de cálcio hidratados ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), tendo sulfatos de cálcio ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) como aditivos (SCRIVENER et al., 2019, p. 1).

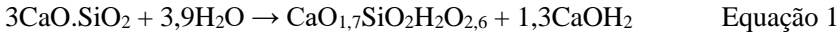
Em contato com a água, os minerais do clínquer buscam sua estabilidade química com a hidratação. A taxa de hidratação dos compostos é controlada por algumas variáveis, como tamanho e distribuição do tamanho das partículas, área de superfície específica, temperatura e uso de aditivos (RAMACHANDRAN; BEAUDOIN, 2000, p. 15).

#### 3.4.1. Silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ )

Em função da semelhança na composição química, os silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) e os silicatos dicálcicos ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) tendem a formar produtos similares de hidratação chamados de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ). Por meio do acoplamento químico com a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), duas reações simultâneas ocorrem, implicando na dissolução do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) e precipitação dos cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ). Durante o processo de dissolução-precipitação, o silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) entrega íons de cálcio (Ca) e sílica (Si) na solução do poro. A taxa de dissolução do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) e a taxa de precipitação do silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) durante a reação de hidratação são iguais entre si (THOMAS; GHAZIZADEH; MASOERO, 2017, p. 323; NABER; BELLMANN; NEUBAUER, 2020, p. 1).

Naber et al. (2019, p. 2) descrevem experimentos de hidratação do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) conduzidos em suspensões diluídas de

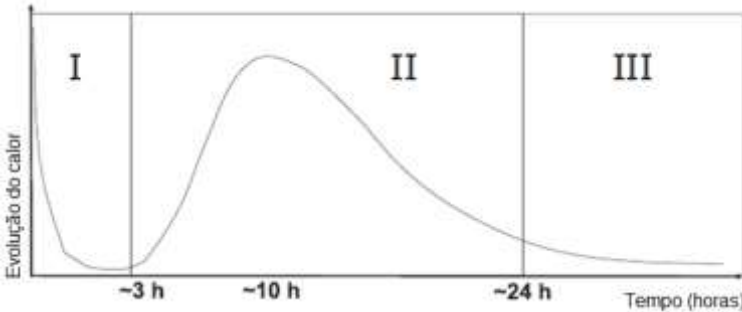
água para sólido de 10 a 23 °C. As soluções de poros contendo cálcio (Ca) e sílica (Si) foram medidas via ICP-OES. A abordagem de Debye-Hückel foi utilizada para o cálculo das atividades iônicas, distribuições de espécies aquosas e estados de saturação das fases de Portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). A equação 1 apresenta as perdas de massa obtidas por análise de termogravimetria (TGA).



Analisando a equação 1, percebe-se a formação de produtos  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , numa razão de  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  de 1,7. A razão de  $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  de 2,6 obtida foi resultante da perda de massa obtida da amostra de silicato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) totalmente hidratada (NABER et al., 2019, p. 2).

A hidratação dos silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) é controlada por mecanismos de nucleação e crescimento de cristais, interações nos limites de fases e difusão, que interagem ao longo da curva de evolução do calor de hidratação apresentada na Figura 7.

Figura 7 - Curva de evolução do calor do silicato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ).



Fonte: Scrivener et al. (2019).

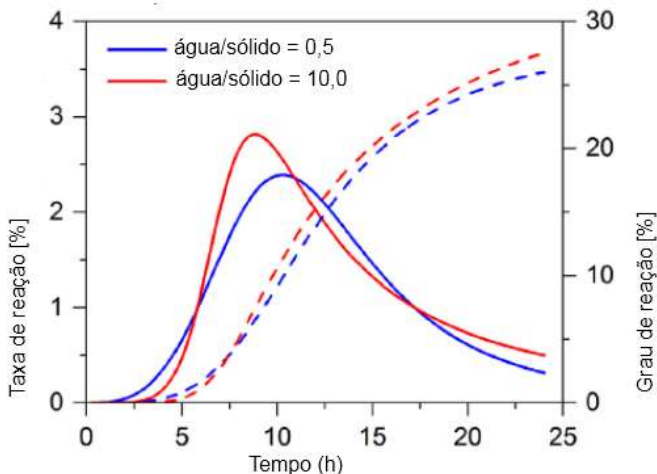
Analisando a Figura 7, percebe-se que a curva de evolução do calor do silicato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) está organizada em período I (período de indução), que se encerra a aproximadamente 3 horas, período II, que se encontra o pico máxima de hidratação a, aproximadamente, 10 horas, encerrando após 24 horas e período III que se inicia após 24 horas, representando o período após hidratação principal (KAPELUSZNA et al., 2020, p. 1).

O contato inicial da água com os grãos de clínquer implica na formação do primeiro cristal sólido hidratado estável, resultante da reação

química da água ( $H_2O$ ) com os aluminatos tricálcicos ( $3CaO.Al_2O_3$ ). A taxa de reação deste primeiro hidrato inibi a reação química do silicato tricálcico ( $3CaO.SiO_2$ ), que demanda condições favoráveis de saturação. Por isso, torna-se necessário retardar a reação química dos aluminatos tricálcicos ( $3CaO.Al_2O_3$ ) (SCRIVENER et al., 2019, p. 2).

Naber et al (2019, p. 6) realizaram testes em condições diluídas de silicatos tricálcicos ( $3CaO.SiO_2$ ) afim de avaliar as taxas de reação dos mesmos nas proporções água/sólido iguais a 10 e 0,5. A Figura 8 apresenta as curvas com as taxas de reação desses compostos.

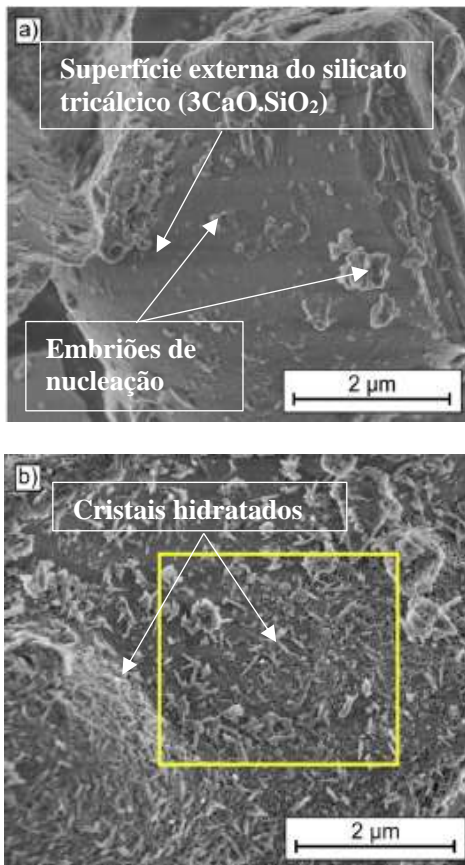
Figura 8 - Taxas de reação de hidratação do silicato tricálcico ( $3CaO.Al_2O_3$ ) para as razões água/sólido iguais a 10 e 0,5.



Fonte: Naber et al (2019).

Analisando a Figura 8 percebe-se que o grau de reação (%) foi maior para a razão água/sólido igual 10, tendo as taxas de dissolução do silicato tricálcico ( $3CaO.SiO_2$ ) diminuindo de forma não linear à medida que a subsaturação do sistema diminui, evoluindo para o equilíbrio. As Figuras 9 (a) e 9 (b) apresentam a morfologia dos silicatos tricálcicos hidratados nos períodos de 0,25 horas e 4,0 horas respectivamente (NABER et al., 2019, p. 3).

Figura 9 - Morfologia dos silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) hidratados após (a) 0,25 horas e (b) após 4,0 horas.



Fonte: Naber et al (2019).

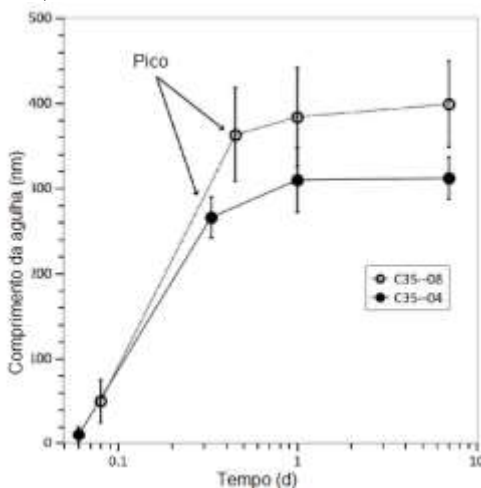
Analisando a Figura 9 (a) nota-se, a partir do contato inicial com água (até 0,25 hora), o surgimento dos primeiros embriões de nucleação de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) metaestável dispersos na superfície externa do grão de silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ). O estado de equilíbrio metaestável é mantido até que se vença a barreira de energia de ativação. Passando 4,0 horas de hidratação, superando a energia de ativação da reação, percebe-se a evolução dos cristais hidratados com a redução da taxa de dissolução e, conseqüentemente, redução da área



superficial do grão de silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) (Figura 9 (b)) (NABER et al., 2019, p. 3).

No momento em que surge o principal pico de hidratação do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) (período II) não é possível constatar a difusão como mecanismo controlador da taxa de reação. Caso os cristais de silicato de cálcio hidratados ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) precipitados na superfície dos grãos do clínquer agissem com barreira de difusão, a concentração dos cristais seria mais alta dentro dos espaços intersticiais. No entanto, a precipitação dos hidratos continua nas extremidades dos grãos do clínquer. Neste período, os aglomerados de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) crescem progressivamente, no formato de agulhas, até um determinado comprimento, conforme pode ser visto pela Figura 10 (BAZZONI, 2014, p. 73; SCRIVENER et al., 2019, p. 6).

Figura 10 - Evolução do comprimento da agulha dos cristais de silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ).



Fonte: Bazzoni (2014).

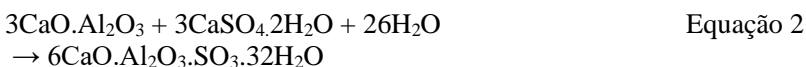
Analisando a Figura 10 percebe-se que o comprimento das agulhas dos cristais de silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) crescem até a região de pico. Na sequência, este crescimento é reduzido em função da interação por contato que ocorre entre as fronteiras das agulhas, diante do crescimento do volume das agulhas, fazendo da interação entres fases o mecanismo controlador da taxa de reação neste período (BAZZONI, 2014, p. 74).

Após 24 horas de hidratação inicia-se o período III da curva de evolução de calor dos silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) que consiste no período pós pico principal de hidratação. Neste período, a existência de poros entre as agulhas dos cristais de silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) é o que permite o desenvolvimento da fase. Assim, a disponibilidade de poros de contato para circulação d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) é indispensável para a evolução. O cristal hidratado deverá crescer para preencher um poro central. Na sequência, poros menores são preenchidos com o crescimento de cristais hidratados menores. Percebe-se assim, que no período III o preenchimento de espaço, a precipitação e a dissolução dos hidratos controlam a taxa de reação química (SCRIVENER et al., 2019, p. 10).

O silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) formado pela hidratação dos silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) e dicálcicos ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) podem compor até 60% do volume total da pasta de cimento hidratada, sendo a fase responsável pela obtenção das propriedades mecânicas e de durabilidade (NABER; BELLMANN; NEUBAUER, 2020, p. 2).

#### **3.4.2. Etringita ( $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) e Monossulfoaluminato de cálcio hidratado ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 18\text{H}_2\text{O}$ )**

O contato da água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) com os aluminatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) constituintes do clínquer promove uma dissolução instantânea deste composto, formando a fase do monossulfoaluminato de cálcio hidratado ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ). O surgimento desta fase implica na perda prematura da fluidez do material, impossibilitando o desenvolvimento da resistência mecânica. O uso do gesso ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) no retardo da dissolução do aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), permite a dissolução dos cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) que contribuem para o ganho de resistência mecânica do material. A hidratação do aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na presença de gesso ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) precipita cristais de etringita ( $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) conforme apresentado na equação 2 (BAQUERIZO et al., 2015, p. 143; HUANG et al., 2020, p. 1; WANG et al., 2020, p. 3)

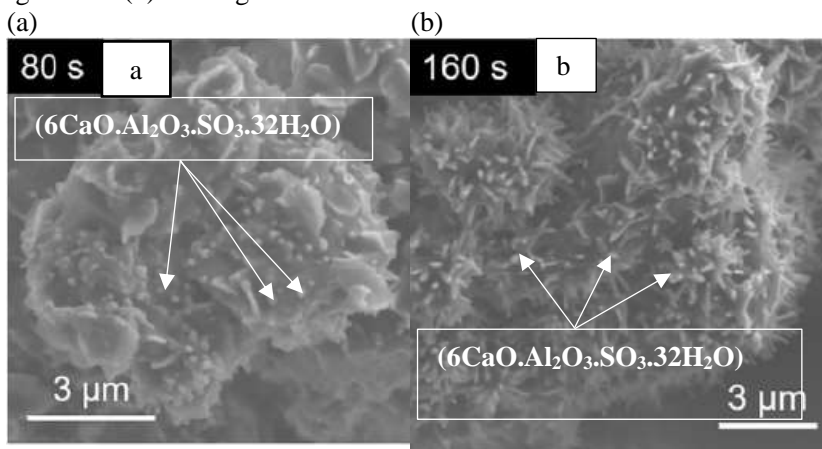


A etringita ( $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) é o primeiro produto estável hidratado obtido no período de indução. Junto com o monossulfoaluminato de cálcio hidratado

( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) podem corresponder em até 20% do volume total da pasta de cimento hidratada (SCRIVENER et al., 2019, p. 12).

Geng et al. (2018, p. 1-8) realizaram estudos morfológicos cristalográficos dos produtos de hidratação dos aluminatos tricálcicos ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A ação do gesso ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) no controle de hidratação foi observada. De forma imediata, foi possível obter as fases do monossulfoaluminato de cálcio hidratado ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) e etringita ( $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), conforme mostra as Figuras 11 (a) e 11 (b).

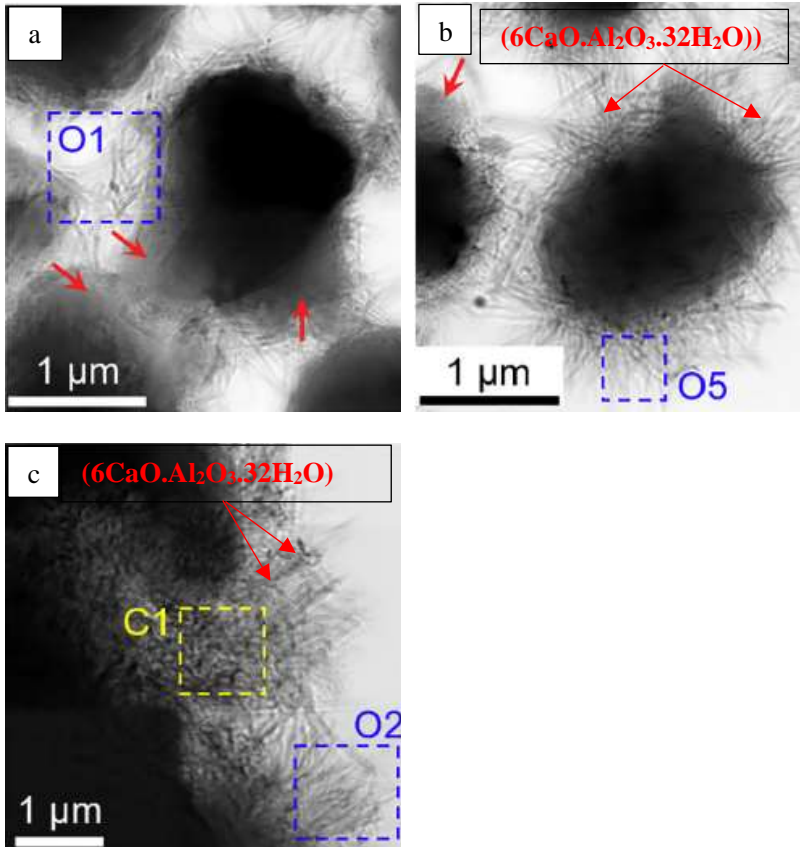
Figura 11 - Formação da etringita ( $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) a (a) 80 segundos e (b) 160 segundos.



Fonte: Geng et al. (2018).

Analisando as Figura 11 (a) e 11 (b) percebe-se que as fases do monossulfoaluminato de cálcio hidratado ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) não retardam completamente a formação inicial da etringita ( $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) já que esta forma-se aos 80 e 160 segundos. O retardo parcial promovido pelo gesso ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) pode ser observado nas Figuras 12 (a), 12 (b) e 12 (c) (GENG et al, 2018, p. 1-8).

Figura 12 - Imagens fotográficas de transmissão (TEM) do aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) hidratados na presença de gesso ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) nos tempos de hidratação de (a) 30 minutos; (b) 90 minutos e (c) 135 minutos. Setas vermelhas indicam a formação do gel de monossulfoaluminato de cálcio hidratado ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ).



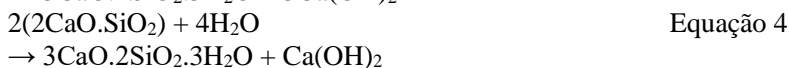
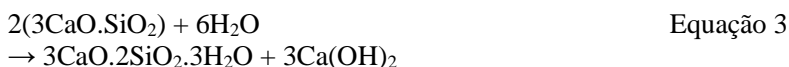
Fonte: Geng et al (2018).

Analisando a Figura 12 (a) percebe-se a adsorção específica de íons de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) na superfície das partículas de aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) formando um gel de monossulfoaluminato de cálcio hidratado ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) indicado pelas setas vermelhas. Esse gel

retarda a reatividade dos compostos que cristalizam ao longo dos próximos 90 minutos e 135 minutos, conforme mostram as Figuras 12 (b) e 12 (c) respectivamente (GENG et al, 2018, p. 1-8).

### 3.4.3. Hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>)

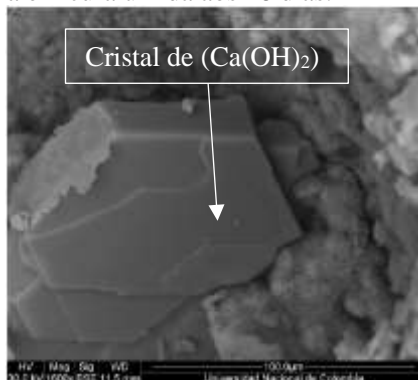
Os silicatos tricálcicos (3CaO.SiO<sub>2</sub>) e dicálcicos (2CaO.SiO<sub>2</sub>) presentes na composição dos cimentos formam, após o contato com a água (H<sub>2</sub>O) cristais de silicato de cálcio hidratado (CaO.SiO<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) e de hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), conforme apresentado nas equações 3 e 4 (HERNANDEZ; LIZARAZO-MARRIAGA; RIVAS, 2018, p. 542 e 548).



A formação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) está relacionada ao nível de hidratação do composto cimentício. Com a cura úmida de um composto cimentício, cristais de hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) podem ser formados com até 40 μm aos 28 dias, enquanto com a cura ao ar, esses cristais que podem chegar até 25 μm aos 28 dias (HERNANDEZ; LIZARAZO-MARRIAGA; RIVAS, 2018, p. 548).

O conteúdo de hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) pode chegar até 26% do total dos produtos cimentícios hidratados. Sua morfologia é representada por plaquetas hexagonais, conforme pode ser visto na Figura 13 (CHEN et al, 2019, p. 2).

Figura 13 - Cristal de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) formado de uma amostra cimentícia em cura úmida aos 28 dias.

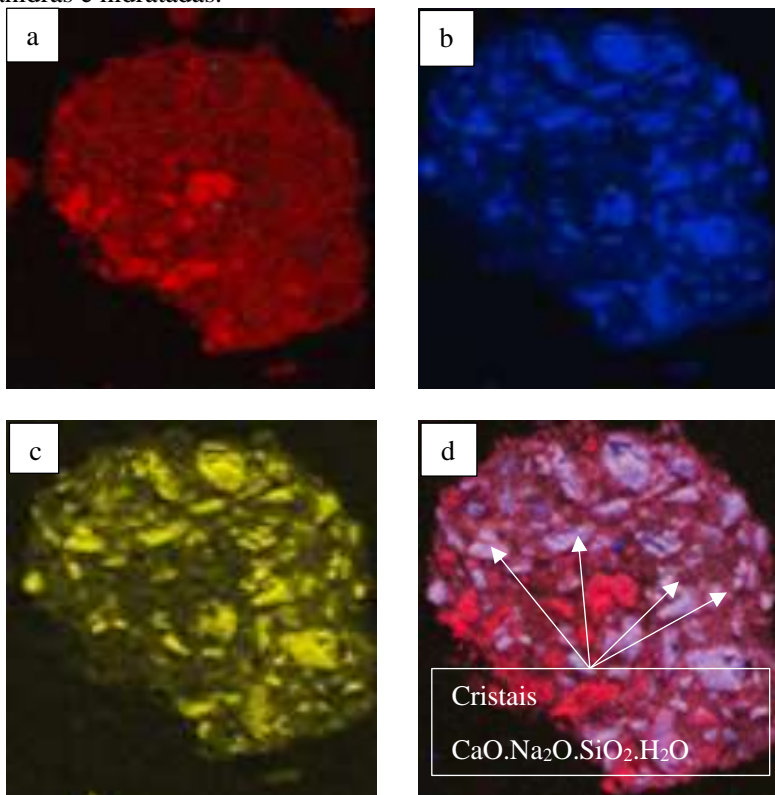


Fonte: Hernandez, Lizarazo-Marriaga e Rivas (2018).

A reatividade do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e com o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) torna-o capaz de contribuir para o processo de limpeza de gases de combustão e retardo da corrosão do aço (a reação química com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) dificulta o acesso deste ao aço presente nas estruturas de concreto armado) (BREUER et al., 2020, p. 1, CHEN et al, 2019, p. 2).

Mehdi et al (2019, p. 5) descrevem que o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) em condição saturada em água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) reage também com a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) liberada da dissolução do vidro em pó, formando cristais  $\text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , conforme pode ser observado nas Figuras 14 (a), 14 (b), 14 (c) e 14 (d).

Figura 14 - Mapeamento químico (50  $\mu\text{m}$ ) de uma amostras de hidróxido cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e vidro em pó aos 56 dias (a) cálcio (Ca) presente da mistura; (b) Sílica (Si) presente da mistura; (c) sódio (Na) presente da mistura e (d) cálcio (Ca) + silício (Si) + sódio (Na) reconhecidos em fases anidras e hidratadas.



Fonte: Mehdi et al (2019).

Analisando as Figuras 14 (a), 14 (b) e 14 (c), percebe-se, respectivamente, a existência dos compostos cálcio (Ca), silício (Si) e sódio (Na) presentes na amostra de hidróxido cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) com vidro em pó. A saturação da amostra com água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), possibilitou tais compostos a formarem cristais hidratados de  $\text{CaO.Na}_2\text{O.SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$ , que encapsularam em seu volume, partículas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e vidro em pó não hidratado, conforme apresentado na Figura 14 (d).

### 3.5. LÃ DE VIDRO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

O resíduo de lâ de vidro pode ser uma alternativa como agregado e material cimentício suplementar para argamassas e concretos. Os materiais cimentícios suplementares representam abordagens promissoras para substituir, parcialmente, o consumo de cimento em argamassas e concretos, diminuindo a demanda de produção do mesmo e, consequentemente o consumo de energia e a emissão de gases do efeito estufa (GUPTA; VYAS, 2018, p. 155; KHAN; SAHA; SARKER, 2019, p. 1).

Khan, Saha e Sarker (2019, p. 71) citam que partículas de pó de vidro inferiores a 45 µm podem ser utilizadas como materiais cimentícios suplementares em teores de substituição de 10% a 40%.

Kim, Yi e Zi (2014, p. 245 e 246) investigaram a capacidade pozolânica da lama residual de vidro e da cinza volante em substituição parcial ao cimento. Dentre os componentes identificados na composição química da lama residual de vidro, tem-se como destaque 68,2% de SiO<sub>2</sub>, 10,1% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,242% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 9,90% de CaO, além de 7,62% de Na<sub>2</sub>O e 2,94% MgO. Já a cinza volante avaliada, era composta por 48,5% de SiO<sub>2</sub>, 27,5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10,5% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5,76% de CaO, 1,30% de MgO e 0,282% de Na<sub>2</sub>O. O cimento era composto por 18,8% de SiO<sub>2</sub>, 4,18% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3,76% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 65,3% de CaO, 2,43% de MgO e 0,146% de Na<sub>2</sub>O. As amostras estudadas foram produzidas contendo 5%, 10% e 20% da lama residual de vidro em substituição do cimento, além das amostras contendo 10% e 20% de cinza volante em substituição do cimento. Quanto à área superficial, a cinza volante apresentou um resultado de 338 m<sup>2</sup>/kg enquanto a lama residual de vidro apresentou um resultado de 414 m<sup>2</sup>/kg (diâmetro médio das partículas de 14,65 µm). Os resultados de resistência à compressão das misturas com lama residual de vidro aos 28 dias apresentaram uma equivalência a 83,0% e 103,2% em relação à mistura de controle, sendo superior às misturas com cinza volante, que aos 28 dias apresentaram uma equivalência a 74,3% e 83,1% em relação à mistura de controle. Os resultados ainda mostraram uma diminuição na expansão por reação álcali sílica das misturas contendo 20% de lama residual de vidro (menor que 0,05%) em comparação à mistura de controle (superior a 0,15%). De acordo com a norma ASTM C618 (2003) o material pozolânico deverá apresentar uma equivalência de resistência à compressão em relação à mistura de controle de no mínimo 75%.

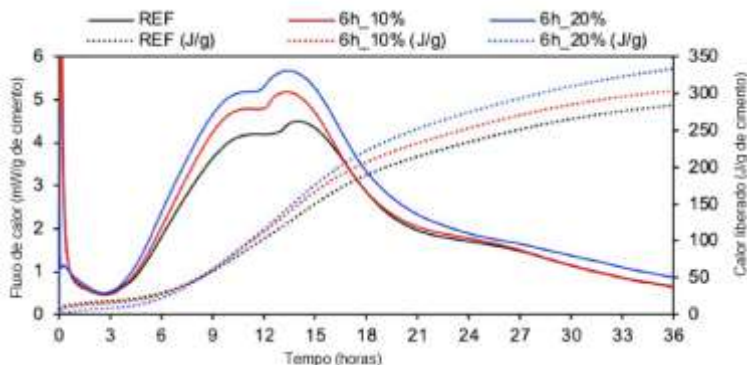
A substituição parcial do cimento por resíduos de vidro fosco em pastas cimentícias tornou-se objeto de estudo para Jochem et al (2020, p.



1 até 13). Por meio de um sistema de moagem a seco, utilizando um moinho de bola com esferas de aço de 30 mm e 20 mm de diâmetro, foi obtido pós de vidro fosco com tamanho de partícula  $d_{50}$  de 20  $\mu\text{m}$ , 14  $\mu\text{m}$  e 12  $\mu\text{m}$ , com os respectivos tempos de moagem de 6 horas, 24 horas e 48 horas. Teores de 10% e 20% do resíduo de vidro fosco foram adicionados em substituição ao cimento da pasta cimentícia. As propriedades físicas como teor de ar aprisionado e trabalhabilidade foram avaliadas. Foi percebido que a aplicação do vidro fosco moído em 6 horas funcionou como *filler*, preenchendo parte dos poros da matriz cimentícia, promovendo uma redução do ar aprisionado em comparação à amostra de referência; 0,8% de ar aprisionado na amostra de referência, 0,67% de ar aprisionado na amostra com 10% de resíduo de vidro fosco com 6 horas de moagem e 0,47% de ar aprisionado na amostra com 20% de resíduo de vidro fosco com 6 horas de moagem. A redução do teor de ar aprisionado implicou na redução da trabalhabilidade da pasta cimentícia; espalhamento da amostra de referência de 328 mm, espalhamento da amostra com 10% de resíduo de vidro fosco moído por 6 horas de 313 milímetros, espalhamento da amostra com 10% de resíduo de vidro fosco moído por 6 horas de 323 milímetros.

A cinética de hidratação das pastas cimentícias, determinadas por meio da análise calorimétrica isotérmica e termogravimétrica, também foi avaliada por Jochem et al (2020, p. 1 até 13). A Figura 15 apresenta a curva de evolução da hidratação da pasta cimentícia com resíduos de vidro em 6 horas de moagem.

Figura 15 - Curva de evolução de hidratação da pasta cimentícia com resíduos de vidro fosco moído por 6 horas.



Fonte: Jochem et al (2020) (adaptado pelo autor).

Analisando a Figura 15, percebe-se um pico inicial (período inferior a 1 hora) gerado em função da combinação da umectação e reação exotérmica das partículas do cimento, promovendo a hidratação do aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) formando cristais de etringita ( $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{SO}_4\cdot26\text{H}_2\text{O}$ ). Na sequência ocorre o período de indução, caracterizado pela baixa hidratação do cimento e baixa liberação de calor (até aproximadamente 3 horas). A partir das 3 horas, inicia-se o período de aceleração, com o aumento dos valores de fluxo de calor, ocasionando o principal pico de hidratação em decorrência da dissolução do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) e precipitação dos hidratos de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Por fim, percebe-se o período de desaceleração, em que uma baixa taxa de hidratação de cimento acontece em decorrência da formação de novos cristais de monossulfoaluminato de cálcio hidratado ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_4\cdot12\text{H}_2\text{O}$ ). Todas as pastas cimentícias contendo resíduos de vidro apresentaram menores períodos de indução e maiores picos de hidratação em comparação às pastas cimentícias de referência. Isso pode ser justificado pela alta diluição do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) em função da substituição parcial do cimento por pós de vidro, ricos em sílica ( $\text{SiO}_2$ ), fornecendo uma superfície ativa para a formação de maiores cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) (JOCHEM et al, 2020, p. 4).

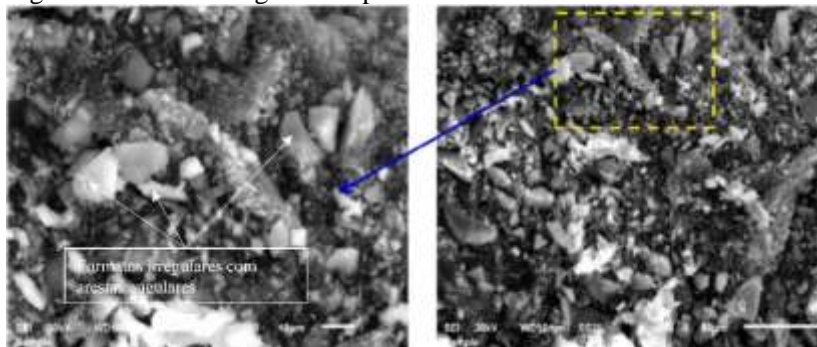
Resíduos de pó de vidro com tamanho de partículas de  $150\ \mu\text{m}$  também foram testados em compostos cimentícios por Kalakada, Doh e Zi (2019, p. 117916 até 117926). Neste estudo, níveis de substituição de 15% e 30% em relação ao cimento foram realizados. Os experimentos foram produzidos utilizando valores de fator água/cimento de 0,5, 0,45, 0,42 e 0,39. Os experimentos com 30% de utilização do pó de vidro em substituição ao cimento, com fator água/cimento de 0,39, apresentaram ganhos de resistência à compressão. Aos 91 dias de cura, com 15% e 30% de substituição de cimento por resíduo de pó de vidro, os valores de resistência à compressão foram de 46 MPa e 50 MPa, respectivamente. A amostra de controle para este período foi de 43 MPa. Quanto aos resultados de atividade pozolânica, tanto as amostras com 15% quanto as amostras com 30% de resíduos de pó de vidro apresentaram valores que ultrapassam o mínimo necessário para classificação pozolânica (75% de acordo com a ASTM C618 (2003)). Valores máximos de até 106% e 117% de atividade pozolânica foram obtidos pelas substituições de 15% e 30%, respectivamente (para fator água/cimento de 0,39).

A finura das partículas de vidro pode implicar no aumento da sua atividade pozolânica. A redução do tamanho das partículas de vidro pode

atuar como pontos de nucleação para a formação e crescimento de cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ), potencializando a hidratação cimentícia. O aumento da superfície específica aumenta a disponibilidade de precipitação dos hidratos (JOCHEM et al, 2020, p. 4; BERODIER; SCRIVENER, 2015, p.25 até 35; KALAKADA; DOH; ZI, 2019, p. 117916 até 117926). Isso foi evidenciado na pesquisa de Jochem et al (2020, p. 1 até 13) aumento no fluxo de calor da reação exotérmica no pico principal de hidratação com a redução do tamanho de partículas. Partículas com 20  $\mu\text{m}$ , 14  $\mu\text{m}$  e 12  $\mu\text{m}$  apresentaram valores respectivos de fluxo de calor de 5,18 mW/g, 5,33 mW/g e 5,47 mW/g de cimento. Este estudo ainda constatou que a variação do tamanho de partícula de vidro em pastas cimentícias pode influenciar no teor de ar aprisionado e trabalhabilidade. Quanto aos percentuais de ar aprisionado, com 10% de substituição de cimento por resíduo de vidro moído obteve-se valores de 0,67% ( $d_{50}$  igual a 20  $\mu\text{m}$ ), 2,47% ( $d_{50}$  igual a 14  $\mu\text{m}$ ) e 1,73% ( $d_{50}$  igual a 12  $\mu\text{m}$ ). Quanto à trabalhabilidade, com 10% de substituição de cimento por resíduo de vidro moído obteve-se valores de 313 milímetros ( $d_{50}$  igual a 20  $\mu\text{m}$ ), 328 milímetros ( $d_{50}$  igual a 14  $\mu\text{m}$ ) e 322 milímetros ( $d_{50}$  igual a 12  $\mu\text{m}$ ).

Tahwia et al (2022, p. 1 até 17) investigaram o efeito do pó de vidro reciclado utilizado em adição e substituição do cimento para a produção de concretos de alto desempenho. Os experimentos foram produzidos com 0%, 10%, 30% e 50% de pó de vidro reciclado em substituição ao cimento além de 25%, 50% e 100% de pó de vidro reciclado em adição ao cimento. Neste estudo as partículas de vidro trituradas apresentaram morfologias e tamanhos de partículas em formatos irregulares, com arestas angulares, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 - Fotomicrografia do pó de vidro reciclado.

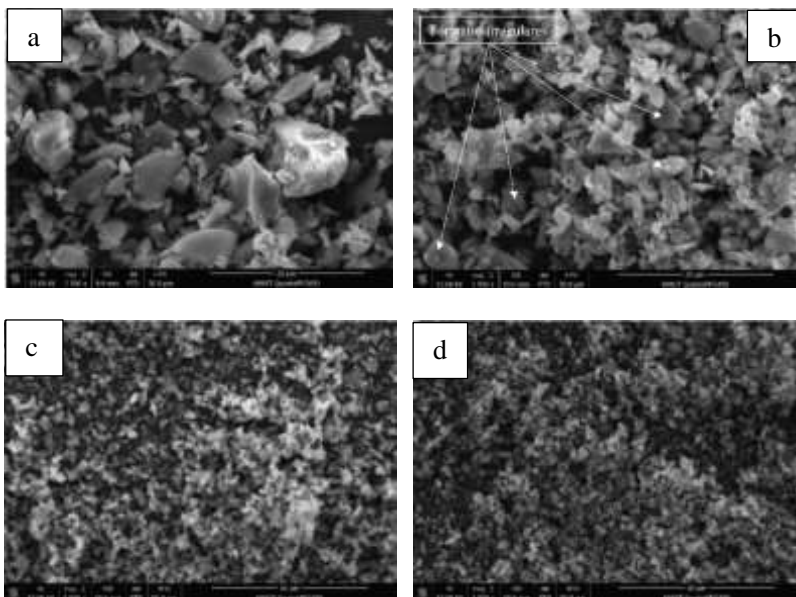


Fonte: Tahwia et al (2022).

Os resultados desta pesquisa mostraram que os experimentos com 30% e 50% de pó de vidro reciclado em substituição ao cimento proporcionaram misturas de melhor homogeneidade em função dos menores índices de vazios (30% = 0,131% e 50% = 12%).

Wang et al (2020, p. 1 até 9) estudaram a influência do pó de vidro triturado a úmido como material cimentício suplementar. Foram produzidos 4 experimentos com 20% de pó de vidro em substituição ao cimento. Os pós de vidro foram obtidos da moagem a úmido, realizada em um moinho vertical, pelos períodos de 20 minutos, 60 minutos e 120 minutos. As Figuras 17(a), 17(b), 17(c) e 17(d) mostram respectivamente imagens do pó de vidro após 0 minutos, 20 minutos, 60 minutos e 120 minutos de moagem a úmido.

Figura 17 - Imagens microscópicas do pó de vidro após (a) 0 minutos de moagem a úmido, (b) 20 minutos de moagem a úmido, (c) 60 minutos de moagem a úmido e (d) 120 minutos de moagem a úmido.



Fonte: Wang et al (2020).

Analisando as Figuras 17(a) e 17(b) percebe-se uma redução do tamanho de partícula do pó de vidro de 0 minutos para 20 minutos de moagem (0 minutos  $d_{10} = 2,16 \mu\text{m}$ ,  $d_{50} = 10,50 \mu\text{m}$  e  $d_{90} = 60,34 \mu\text{m}$ , 20 minutos  $d_{10} = 1,62 \mu\text{m}$ ,  $d_{50} = 4,96 \mu\text{m}$  e  $d_{90} = 13,00 \mu\text{m}$ ), porém com alguns formatos irregulares (Figura 17(b)). A partir de 60 minutos de moagem a úmido (Figura 17(c)) as partículas do pó de vidro exibem formatos regulares de partículas diminuídas. Com 60 minutos e 120 minutos de moagem a úmido os tamanhos de partícula foram respectivamente de  $d_{10} = 1,14 \mu\text{m}$ ,  $d_{50} = 2,71 \mu\text{m}$  e  $d_{90} = 5,53 \mu\text{m}$ ,  $d_{10} = 0,46 \mu\text{m}$ ,  $d_{50} = 0,90 \mu\text{m}$  e  $d_{90} = 2,51 \mu\text{m}$ .



## 4 METODOLOGIA

A Tabela 3 apresenta as etapas e as atividades que foram desenvolvidas.

Tabela 3 - Etapas e atividades realizadas no desenvolvimento experimental.

<b>Etapas</b>	<b>Atividades</b>
Obtenção das matérias-primas	-Obtenção: cimento, areia normal e resíduos lã de vidro.
Preparação e caracterização das matérias-primas	-Preparação dos resíduos: moagem a seco e em alta energia a úmido da lã de vidro; -Caracterização: física (granulometria); química (Fluorescência de Raios X (FRX)); morfológica (Microscopia eletrônica de varredura (MEV)); além da Difração de Raios X (DRX);
Reatividade química da lã de vidro moída	- Teor de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) fixado: Chappelle Modificado; - Alcalinidade: Teor de álcalis disponíveis;
Produção das argamassas	- Mistura dos experimentos: dosagem e procedimentos de misturas; - Preparo dos experimentos: moldagem das amostras e processos de cura.
Reatividade química e caracterizações morfológicas das argamassas	- Reatividade química: Calor de hidratação (estado fresco) e reação álcali sílica (estado endurecido); - Caracterizações morfológicas: Microscopia eletrônica de varredura (MEV), Difração de Raios X (DRX), FTIR e Termogravimetria (TG).
Ensaio para avaliar as propriedades/desempenho das argamassas	- Ensaio no estado fresco: Índice de consistência, início e fim de pega, retenção de água, densidade da massa e teor de ar incorporado; - Ensaio no estado endurecido: Porosidade, resistência à compressão, índice de desempenho com cimento Portland e aderência à tração ao substrato.

Fonte: Do autor (2023).

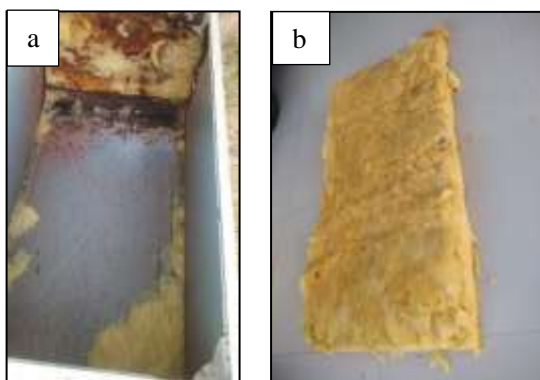
### 4.1 OBTENÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

O cimento utilizado foi CP II F-32MPa, composto de clínquer (75% a 89%) e material carbonático (11% a 25%) fornecido por empresas localizadas na região Sul de Santa Catarina, Brasil.

Foram utilizadas areias finas nº100 e nº 50, areias grossas nº 30 e nº 16, padronizadas de acordo com a NBR 7214 (2015).

O resíduo da lã de vidro foi fornecido por empresas que prestam serviços de manutenção de refrigeradores e comércio de sucatas localizadas na região Sul de Santa Catarina (SC). As Figuras 18(a) e 18(b) apresentam, respectivamente, um refrigerador após retirada da lã de vidro e a manta de lã de vidro após retirada do refrigerador.

Figura 18 - (a) Estrutura do refrigerador em um comércio de sucatas após a retirada da manta de lã de vidro e (b) lã de vidro na forma de manta após retirada da sucata (refrigerador).



Fonte: Do autor (2023).

## 4.2 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 4.2.1. Preparação dos materiais

O cimento e as areias grossa e fina foram utilizadas na produção das argamassas da mesma forma que foram obtidas.

Os resíduos de lã de vidro obtidos em manta foram inicialmente desintegrados, de forma manual, conforme apresentada na Figura 19.



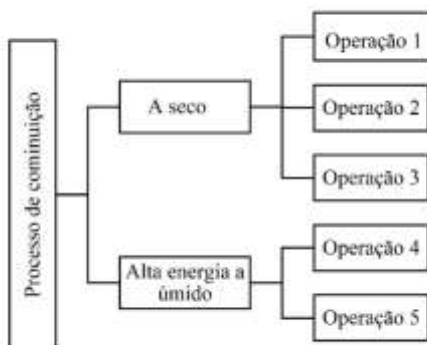
Figura 19 - Manta da lã de vidro desintegrada.



Fonte: Do autor (2023).

Após desintegração manual, as mantas de lã de vidro foram cominuídas objetivando a obtenção de três tamanhos de partículas para o programa experimental. Os processos de cominuição testados foram a seco e em alta energia a úmido, conforme apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Fluxograma dos processos de cominuição a seco e em moinho de alta energia a úmido.



Fonte: Do autor (2023).

Em todos os processos de cominuição foram ocupados cerca de 70% do volume dos moinhos com esferas e lã de vidro, numa razão esfera/lã de vidro aproximada de 0,81.

O primeiro tamanho de partícula utilizado no programa experimental deste trabalho foi obtido a partir da cominuição a seco denominada de Operação 1. Este processo envolveu o uso do moinho de molas da marca Furlan, de 1.730 kg, modelo MB6595C, com esferas de alta alumina de 15 milímetros de diâmetro, numa rotação aproximada de 1.200 rpm durante 20 minutos. Esse primeiro tamanho de partícula foi denominado de  $LVM_{(20s)}$ . A partir do tamanho de partícula  $LVM_{(20s)}$ , foram testadas as operações 2 e 3. A segunda operação a seco envolveu 20 minutos de moagem a seco, das amostras já cominuídas da operação 1. Nesta operação 2 foram utilizadas esferas metálicas de 1,6 milímetros de diâmetro. A terceira operação a seco envolveu mais 20 minutos de moagem a seco, das amostras já cominuídas da operação 2. Nesta operação 3 foram utilizadas esferas metálicas de 0,6 milímetros de diâmetro. As operações 2 e 3 foram realizadas no moinho de bolas Marca Servitech, modelo CT-242, volume de 1.000 mililitros, numa rotação aproximada de 400 rpm.

As operações 4 e 5 foram desenvolvidas no moinho em alta energia a úmido da marca NETZSCH, modelo LMZ 0,5, volume de 500 mililitros, rotação aproximada de 2.100 rpm. A operação 4 iniciou a partir da amostra  $LVM_{(20s)}$ . O material foi submetido a um processo de cominuição em alta energia a úmido por um período de 0 a 270 minutos. Nesta operação foram utilizadas esferas metálicas de 1,5 milímetros de diâmetro. A operação 5 iniciou a partir da amostra obtida após 270 minutos da operação 4. O material foi submetido a um processo de cominuição em alta energia a úmido por um período de 270 a 480 minutos. Nesta operação foram utilizadas esferas metálicas de 0,5 milímetros de diâmetro. Para cada procedimento de moagem em alta energia a úmido foram utilizados 5 kg de água deionizada, 1 kg de lã de vidro moída a seco (material seco correspondendo a 20% do líquido) e 0,006 kg de aditivo antiespumante Wanfoaw 515 da Wana Química (representando 1% da massa sólida). Antes de submeter o material ao moinho, o mesmo passou por peneiramento, com peneira malha 325 abertura 0,045 milímetros, para remoção de partículas e detritos retidos nesta malha.

Após moagem em alta energia a úmido, os pós de lã de vidro foram decantados em recipientes plásticos e na sequência submetidos à secagem em estufa da marca DeLeo, modelo A6 SEDT, 3.520 Watts, a

uma temperatura  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Após secagem, o material foi submetido ao processo de destorroamento a seco, realizado no moinho de bolas Servitech CT-242 por 20 minutos. As Figuras 21(a), 21(b), 21(c), 21(d), 21(e) e 21(f) apresentam, respectivamente, o moinho de bolas modelo MB 6595 C, moinho de alta energia modelo LMZ 0,5, moinho de bolas Marca Servitech, modelo CT-242, lâ de vidro após moagem inicial, lâ de vidro após moagem em alta energia a úmido (moinho de alta energia) e lâ de vidro após destorroamento.

Figura 21 - Moinhos e lâ de vidro moída (a) moinho de bolas modelo MB 6595 C, (b) moinho de bolas de alta energia modelo LMZ 0,5, (c) moinho de bolas marca Servitech, modelo CT - 242, (d) lâ de vidro após moagem inicial e (e) lâ de vidro moída e na forma de pasta após moagem em alta energia a úmido.



Fonte: Do autor (2023).

Os outros dois tamanhos de partículas utilizados no programa experimental deste trabalho foram os obtidos após 30 minutos e 60 minutos de cominuição em moinho de alta energia a úmido (LVM<sub>30s30u20s</sub> e LVM<sub>30s60u20s</sub> respectivamente), objetivando maior redução e regularidade das partículas.

#### **4.2.2. Caracterização das matérias-primas**

As características físicas, químicas e morfológicas dos materiais que constituíram as argamassas cimentícias foram desenvolvidas no Iparque – Parque Científico e Tecnológico e i.dt – Instituto de engenharia e tecnologia da UNESC, com exceção da Fluorescência de Raios X (FRX), que foi realizada no Instituto Senai de Tecnologia em Cerâmica – IST Cerâmica.

##### 4.2.2.1. Distribuição granulométrica

Foi realizada a distribuição granulométrica do cimento e da lã de vidro moída por meio do método a laser. Assim, as amostras desses materiais foram submetidas ao analisador de partículas a laser modelo CILAS 1064 Líquido, em via úmida, tendo água como meio líquido, numa faixa analítica de 0,04 - 500µm/100 Classes. Não foi utilizado nenhum agente dispersante. As amostras de lã de vidro submetidas a cominuição em alta energia a úmido passaram pelo processo de distribuição granulométrica antes da decantação e após destorroamento a seco. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais.

##### 4.2.2.2. Fluorescência de Raios X

A análise de fluorescência de raio X por Dispersão de Comprimento de Onda (WDXRF) foi realizada utilizando o Espectrômetro de Raio-X, marca Panalytical modelo Axios Max. A amostra foi preparada por fusão com tetraborato de lítio. O objetivo foi obter a análise química quantitativa da lã de vidro e do cimento. Este ensaio foi realizado no INSTITUTO SENAI DE TECNOLOGIA.

##### 4.2.2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada nas amostras de lã de vidro afim de verificar suas morfologias

após moagem e antes de serem empregadas nas argamassas cimentícias. O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi da marca ZEISS, modelo EVO MA10. O mesmo possui uma microssonda EDAX para análise espectrométrica de raios X e também câmera EBSD (*Electron Backscattered Diffraction*) para difração de elétrons retro-espalhados. Para a análise do MEV, as amostras de lâ de vidro moída não receberam nenhum preparo específico.

#### 4.2.2.5. Análise Térmica Diferencial e Termogravimetria (ATD/TG)

O ensaio de caracterização térmica foi realizada objetivando a análise do comportamento térmico da lâ de vidro moída submetida a uma mudança controlada da temperatura. Para tal, utilizou-se o equipamento SDT Q 600, da marca NETZSCH, modelo STA 449F3 JUPITER, localizado no laboratório de valorização de resíduos (LABVALORA). Quanto aos procedimentos, foi utilizada uma taxa de aquecimento de 10 °C/minuto, variando a temperatura de 30 a 1.100°C, sob atmosfera de gás nitrogênio, visando remover materiais voláteis da lâ de vidro, com vazão de 60 mL/minuto. Foram utilizadas amostras de tamanhos passantes na peneira de malha de 0,075 milímetro.

#### 4.2.2.6. Difração de Raios X (DRX)

A análise de difração de raios X (DRX) foi realizada em amostras da lâ de vidro moída objetivando verificar as fases cristalinas existentes. Foi utilizado o difratômetro de raios X da marca SHIMADZU, modelo XRD 6.000, com radiação  $\text{CuK}\alpha$  de 1,5418 Å, voltagem de 30 kV e corrente elétrica de 30 mA. O filtro utilizado foi de níquel, leitura entre 3° e 80° (2 $\theta$ ) e velocidade de 2°/minuto. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais (CECAM).

### 4.3. REATIVIDADE QUÍMICA DA LÃ DE VIDRO MOÍDA

#### 4.3.1. Teor de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) fixado: Chapelle Modificado

O método do teor de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) foi realizado afim de avaliar a capacidade da lâ de vidro em fixar com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Trata-se de um método padronizado de acordo com a NBR 15895 (2010).

Para a realização deste procedimento foram utilizados a balança de precisão da marca SHIMADZU, modelo AUY220, de resolução de 0,0001 gramas, estufa da marca FORTELAB, modelo 982014, com capacidade QR 1300/3, banho maria da marca DUBNOFF ORBITAL, modelo E-0532, agitador rotativo do tipo Wagner da marca TECNAL, modelo TE-160, chapa elétrica aquecedora, agitador magnético da marca Fisatom, modelo 752a, bomba a vácuo da marca Prismatec, modelo 132, além de frascos Erlenmeyer de 500 mililitros, balão volumétrico de 250 mililitros e esferas de aço de 1,6 milímetros.

A execução do ensaio iniciou com a preparação das soluções alcoólicas de fenolftaleína (1grama/litro de álcool etílico absoluto), vermelho de metila (1grama/litro de álcool etílico absoluto), além da solução de sacarose (240 gramas/litro de água deionizada) e de ácido clorídrico (HCl) (8,4 mililitros de HCl concentrado em água até completar 1.000 mililitros de solução homogeneizada). Foi utilizado também o tetraborato de sódio ( $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4]8\text{H}_2\text{O}$ ), dissolvido em 50 mililitros de água, em aquecimento de aproximadamente 75 °C. O tetraborato de sódio ( $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4]8\text{H}_2\text{O}$ ) foi utilizado para a padronização da solução de HCl (0,5 gramas de tetraborato de sódio ( $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4]8\text{H}_2\text{O}$ ) dissolvido em aproximadamente 100 mililitros de água).

Após o preparo das soluções, foi pesado 1 grama ( $\pm 0,001\text{g}$ ) da lâ de vidro moída e 2 gramas ( $\pm 0,001\text{g}$ ) de óxido de cálcio (CaO). O óxido de cálcio (CaO) foi obtido por meio da calcinação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) no forno, utilizando cadinho de porcelana, na temperatura de 1.000°C durante um período de 1 hora.

Após preparo dos materiais, esses foram pesados e colocados no frasco de Erlenmeyer de 500 mililitros com tampa rosqueada, limpo e seco. Neste frasco, foram colocados também 250 mililitros de água deionizada. Aproximadamente 20 gramas de esferas de aço de 1,6 milímetros foram colocados no frasco, afim de evitar aglomeração dos materiais nas etapas posteriores.

Completada toda colocação dos materiais no frasco de Erlenmeyer, o mesmo foi submetido ao banho maria numa agitação mecânica durante 16 horas, a uma temperatura de 90 °C. Após agitação, o frasco foi retirado do banho maria e resfriado em água corrente. Na sequência, 250 mililitros de solução de sacarose (240 g/L) foram acrescentados ao frasco Erlenmeyer fechado hermeticamente e agitado mecanicamente no agitador rotativo do tipo Wagner por 15 minutos. Após essa agitação, foram filtrados aproximadamente 100 mililitros, utilizando papel filtro médio, de 11 cm de diâmetro e a bomba a vácuo para facilitar a sucção da

solução pelo filtro. Foram pipetados 50 mililitros da solução e realizada a titulação com a solução de ácido clorídrico (HCl), usando a solução de fenolftaleína (1g/L) como indicador.

O resultado do índice de atividade pozolânica Chapelle foi determinado de acordo com a Equação 5.

$$I_{\text{Ca(OH)}_2} = \frac{28 \times (V_3 - V_2) \times F_c}{m_2} \times 1,32 \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

$I_{\text{Ca(OH)}_2}$  = Índice de atividade pozolânica (gramas);

$m_2$  = Massa do material pozolânico (gramas);

$V_2$  = Volume de ácido clorídrico (HCl) consumido no ensaio (mililitros);

$V_3$  = Volume de ácido clorídrico (HCl) consumido no ensaio em branco (mililitros);

$F_c$  = Fator de correção do ácido clorídrico (HCl);

1,32 = relação molecular  $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaO}$ .

O ensaio para a determinação do índice de atividade pozolânica por meio do teor de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) fixado (Chapelle Modificado) foi realizado no laboratório LABVALORA.

#### 4.3.2. Alcalinidade: Teor de álcalis disponíveis

O ensaio de teor de álcalis disponíveis foi realizado afim de determinar o possível teor de álcalis liberados pela lâ de vidro moída, quando reagida com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR NM 25 (2002).

Para a realização deste ensaio foram utilizados balões volumétricos de 100 cm<sup>3</sup>, 500 cm<sup>3</sup> e 1.000 cm<sup>3</sup>, frascos de Erlenmeyer de 25 cm<sup>3</sup>, bureta de 50 cm<sup>3</sup>, pipetas de 10 cm<sup>3</sup>, 20 cm<sup>3</sup>, 50 cm<sup>3</sup> e 100 cm<sup>3</sup>, béqueres de 250 cm<sup>3</sup> e 500 cm<sup>3</sup>, espectrofômetro de absorção atômica ou fotômetro de chama, balança analítica de 0,0001 gramas almofariz de porcelana, além de estufas de 105 ± 5°C e 38 ± 4°C.

Foram necessários ainda água deionizada, hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), ácido clorídrico (HCl), cloreto de sódio (NaCl), cloreto de potássio (KCl), carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e hidróxido de amônio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ).



O preparo das soluções de ácido clorídrico (HCl), oxalato de amônio ( $C_2H_8N_2O_4$ ), vermelho de metila, hidróxido de amônio ( $NH_4OH$ ), cloreto de sódio (NaCl), cloreto de potássio (KCl) e cloreto de cálcio ( $CaCl_2$ ), assim como a execução do ensaio envolveram procedimentos de mistura, dissolução e adição padronizados pela NBR NM 25 (2002).

Os teores de óxido de sódio ( $Na_2O$ ) e óxido de potássio ( $K_2O$ ) disponíveis foram determinados de acordo com a Equação 6.

$$NaO \text{ ou } K = \frac{C \times F}{C_{pz}} \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

Na = Teor de óxido de sódio ( $Na_2O$ ) em porcentagem;

K = Teor de óxido de potássio ( $K_2O$ ) em porcentagem;

C = Concentração de sódio (Na) ou potássio (K) em partes por milhão;  
 $C_{pz}$  = Concentração de material pozolânico na amostra lida em partes por milhão;

F = Fator de transformação (1,348 na determinação da porcentagem do óxido de sódio ( $Na_2O$ ) ou 1,205 na determinação do óxido de potássio ( $K_2O$ )).

Este ensaio foi realizado no laboratório LABVALORA.

#### 4.4. PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

##### **4.4.1. Mistura dos experimentos: dosagem e procedimentos de mistura**

A Tabela 4 apresenta a composição dos experimentos de argamassa cimentícia que foram produzidos.

Tabela 4 - Composição dos experimentos das argamassas cimentícias produzidas, com a quantidade das matérias-primas necessárias para produzir seis corpos de prova cilíndricos de 5,0 centímetros de diâmetro por 10 centímetros de altura.

Experimento	Matérias-primas (gramas)					Água
	Cimento CPII-F 32MPa	Areia normal (* )	LVM (20s) (**)	LVM (20s30u20s) (***)	LVM (20s60u20s) (****)	
Arg <sub>ref</sub>	624 $\pm$ 0,4	1872,0	-	-	-	300 $\pm$ 0,2
Arg <sub>20s(25)</sub>	468 $\pm$ 0,4	1872,0	156 $\pm$ 0,2			300 $\pm$ 0,2
Arg <sub>20s30u(25)</sub>	468 $\pm$ 0,4	1872,0		156 $\pm$ 0,2		300 $\pm$ 0,2
Arg <sub>20s60u(25)</sub>	468 $\pm$ 0,4	1872,0			156 $\pm$ 0,2	300 $\pm$ 0,2
Arg <sub>20s(17,5)</sub>	514,8 $\pm$ 0,4	1872,0	109,2 $\pm$ 0,2			300 $\pm$ 0,2
Arg <sub>20s30u(17,5)</sub>	514,8 $\pm$ 0,4	1872,0		109,2 $\pm$ 0,2		300 $\pm$ 0,2
Arg <sub>20s60u(17,5)</sub>	514,8 $\pm$ 0,4	1872,0			109,2 $\pm$ 0,2	300 $\pm$ 0,2
Arg <sub>20s(10)</sub>	561,6 $\pm$ 0,4	1872,0	62,4 $\pm$ 0,2			300 $\pm$ 0,2
Arg <sub>20s30u(10)</sub>	561,6 $\pm$ 0,4	1872,0		62,4 $\pm$ 0,2		300 $\pm$ 0,2
Arg <sub>20s60u(10)</sub>	561,6 $\pm$ 0,4	1872,0			62,4 $\pm$ 0,2	300 $\pm$ 0,2

#### OBSERVAÇÕES:

(\* ) A areia normal foi constituída de 25% da areia normal n° 100, 25% da areia normal n° 50, 25% da areia normal n° 30 e 25% da areia normal n° 16;

(\*\*) LVM<sub>(20s)</sub> refere-se à lâ de vidro moída em 20 minutos de moagem a seco;

(\*\*\*) LVM<sub>(20s30u20s)</sub> refere-se à lâ de vidro moída em 20 minutos de moagem a seco mais 30 minutos de moagem em alta energia a úmido e 20 minutos finais destorroamento a seco;

(\*\*\*\*) LVM<sub>(20s60u20s)</sub> refere-se à lâ de vidro moída em 20 minutos de moagem a seco mais 60 minutos de moagem em alta energia a úmido e 20 minutos finais destorroamento a seco.

Fonte: Do autor (2023).

Analisando a Tabela 4 percebe-se que foram adotados experimentos contendo 10%, 17,5% e 25,0% de lã de vidro moída em substituição ao cimento CII-F 32MPa. O teor de 10% tem base na pesquisa de Jochem et al (2020, p. 1 até 13), em que com 10% de pó de vidro em substituição ao cimento, foi possível obter atividade pozolânica com a formação de novos cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) sem diminuir a resistência à compressão. Quanto ao teor de 25%, trata-se da padronização adotada da NBR 5752 (2014, p. 1 até 8) que estabelece padrões experimentais para a determinação da atividade pozolânica de um material por meio de ensaios à compressão de experimentos em argamassas cimentícias. O teor de 17,5% representa o ponto central entre os teores de 10% e 25%.

Os procedimentos de mistura, moldagem e cura dos corpos de prova das argamassas cimentícias seguiram as padronizações da NBR 7215 (2019).

Foram utilizadas argamassadeira de 5 litros da marca EMIC, modelo AG-5 e uma balança semi analítica da marca PIZZOLO, modelo AC10K.

De forma individual cada matéria-prima foi pesada. Na sequência foi iniciado o processo de produção dos experimentos com a mistura dos materiais. Inicialmente foi colocada a água e ligada a argamassadeira em rotação baixa. Na sequência, dentro de um período máximo de 30 segundos, foi colocado o cimento CP II-F32 MPa. Nos experimentos compostos por lã de vidro moída, esta foi homogeneizada manualmente com o cimento, sendo aplicados juntos na mistura (no período de aplicação do cimento). Após este período, com a argamassadeira ligada, foi adicionada toda a areia normal, com suas frações previamente misturadas, num período máximo de 30 segundos. Concluído o processo de adição da areia normal, foi modificada a argamassadeira para alta rotação, permanecendo por um período de 30 segundos. Após os 30 segundos de alta rotação, a argamassadeira foi desligada e deixada em repouso por 1 minuto e 30 segundos. Após este processo, por fim, foi ligada novamente a argamassadeira, em alta rotação, por um período de 1 minuto (NBR 7215, 2019, p. 1 até 12).

#### **4.4.2. Preparo dos experimentos: moldagem das amostras e processos de cura**

Quanto aos procedimentos de moldagem dos experimentos para os ensaios de resistência à compressão, foram produzidos 6 corpos de prova dos compostos cimentícios no estado endurecido por meio de moldes

metálicos, cilíndricos de 5,0 centímetros de diâmetro por 10,0 centímetros de altura. Estes corpos de prova foram moldados por meio da execução de quatro camadas de argamassas, compactadas manualmente com soquete metálico normal, aplicando 30 golpes em cada camada. Para os ensaios de reação álcali sílica, foram moldados 3 corpos de provas prismáticos de seção quadrada de  $25,0 \pm 0,7$  milímetro e 285 milímetros de comprimento. A moldagem desses corpos de prova ocorreu por meio da execução de duas camadas compactadas com vinte golpes com soquete metálico manual. O processo de cura de todos os corpos de provas foi ao ar por 24 horas, sendo em seguida, mantidos em uma câmara saturada de cal até o rompimento aos 28 dias. Para os ensaios de reação álcali sílica, estes foram realizados nos períodos de 1 dia, 16 dias e 30 dias. (NBR 7215, 2019, p. 3 até 10; NBR 13528-2, 2019, p. 1 até 10; NBR 15577-4, 2018, p. 1 até 11).

Os procedimentos de mistura, moldagem e cura dos corpos de prova de argamassas cimentícias foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).

## 4.5. REATIVIDADE QUÍMICA E CARACTERIZAÇÕES MORFOLÓGICAS DAS ARGAMASSAS

### 4.5.1. Reatividade química

#### 4.5.1.1. Calor de hidratação (estado fresco)

O ensaio do calor de hidratação foi realizado nas argamassas cimentícias a fim de avaliar a quantidade de calor liberado durante as primeiras 24 horas de idade, representando as reações exotérmicas ocorridas para a formação das primeiras fases sólidas cristalinas do material cimentício e que podem gerar fissuras por retração hidráulica (JOICHEM et al, 2020, p. 4; WANG et al, 2020, p. 1).

Neste ensaio foi utilizado o dispositivo eletrônico Data logger, marca Novus, um computador para aquisição de dados e termopares do tipo “k” para a mensuração e coleta de dados da amostra.

Cerca de 450 gramas de argamassa cimentícia foram colocados em um molde cilíndrico de PVC, com 75 milímetros de diâmetro e 100 milímetros de altura, vedado com tampas de PVC em cada extremidade. A tampa situada na extremidade superior foi furada com uma broca metálica de 6 milímetros para permitir a penetração do termopar. Na sequência, o recipiente foi inserido numa caixa de isopor (caixa isolante térmica) com 20 centímetros de largura por 30 centímetros de

comprimento, contendo paredes de isopor com 2 centímetros de espessura. O excesso do espaço interno da caixa foi preenchido com manta de lã de vidro afim de evitar perda de calor durante o processo. Esta caixa permaneceu em uma sala climatizada, com temperatura de  $23\pm 2$  °C e umidade relativa do ar igual a 55%. Cabe ressaltar que as amostras foram ensaiadas individualmente. Programado o data logger ao computador e ao termopar já inserido na amostra, inicia-se o ensaio. A Figura 22 mostra a imagem do data logger interligado ao recipiente de isopor (caixa isolante térmica).

Figura 22 - Data logger interligado com a amostra no recipiente de isopor (caixa isolante térmica) que foi utilizado no ensaio de calor de hidratação.



Fonte: Do autor (2023).

O ensaio de calor de hidratação foi realizado no laboratório LABVALORA.

#### 4.5.1.2. Índice de desempenho com cimento Portland (estado endurecido)

A reatividade química da lã de vidro moída nas argamassas cimentícias foi avaliada por meio da determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, padronizados de acordo com a NBR 5752 (2014, p. 1 até 4).

Com base nos resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos experimentos produzidos neste trabalho, o índice de desempenho com cimento Portland foi determinado por meio da Equação 7.

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

$I$  = Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%);

$f_{cB}$  = Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova produzidos com cimento CP II-F32 MPa e 25% de lã de vidro moída em substituição ao cimento (argamassas do tipo Arg<sub>20s</sub> (25), Arg<sub>20s30u</sub> (25) e Arg<sub>20s60u</sub> (25)) (MPa);

$f_{cA}$  = Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova produzidos com cimento CP II-F32 MPa e sem o uso de lã de vidro moída em substituição ao cimento (Arg<sub>ref</sub>) (MPa).

Este ensaio foi realizado no laboratório de materiais de construção civil (LMCC).

#### 4.5.1.3. Reação álcali sílica (estado endurecido)

A reatividade química das argamassas cimentícias contendo lã de vidro moída foi avaliada por meio da reação álcali sílica, tendo seus procedimentos padronizados de acordo com a NBR 15577-4 (2019, p. 1 até 11). Este procedimento permite a obtenção dos resultados por meio da mensuração de possíveis expansões em barras de argamassas pelo método acelerado.

Para este ensaio foram utilizados a balança semi analítica da marca PIZZOLO, modelo AC10K, argamassadeira de 5 litros da marca EMIC, modelo AG-5, conjunto de peneiras da marca Solotest com as aberturas nominais de malha de 4,75 milímetros, 2,36 milímetros, 1,18 milímetros, 850 µm, 600 µm, 300 µm e 150 µm, paquímetro digital de 0,1 milímetros de resolução com capacidade de medição de no mínimo 300 milímetros, soquete manual metálico, espátula de lâmina fina de aço com 100 milímetros a 150 milímetros de comprimento e ângulos retos, recipientes plásticos, moldes prismáticos de seção quadrada de 25,0 ± 0,7 milímetros e 285 milímetros de comprimento, relógio comparador digital da marca Mitutoyo, modelo ABSOLUTE 1D-C112Gxb, com graduação de 0,001 milímetro, barra padrão de liga de aço com coeficiente de dilatação

linear inferior a  $2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$  e estufa de marca DeLeo, modelo A6 SEDT, 3.520 W. Quanto aos reagentes, foram necessários Hidróxido de sódio (NaOH), água deionizada e solução de hidróxido de sódio (adição de 40 gramas de hidróxido de sódio (NaOH) a 900 mililitros de água, diluídos com água até a obtenção de 1 litro de solução) (NBR 15577-4, 2018, p. 1 até 6).

A sala para moldagem apresentou uma temperatura controlada ( $24 \pm 4 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), enquanto a temperatura da água de emassamento e da câmara úmida foi de  $23 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . A estufa ventilada armazenou as barras das argamassas em recipientes plásticos a uma temperatura de  $80 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . A execução do ensaio envolveu os processos de preparo do agregado, preparo do cimento padrão, dosagem da argamassa, mistura e moldagem da argamassa, além dos processos de cura inicial (câmara úmida ( $23 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), durante  $24 \pm 1$  hora) e leitura das expansões. Tais processos também foram executados conforme exigências da NBR 15577-4 (2018, p. 1 até 11).

#### 4.5.1.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi executada de acordo com os procedimentos descritos no item 4.2.2.4. Nas argamassas cimentícias após 28 dias, pretendeu-se com as imagens avaliar as características morfológicas dos experimentos, bem como a formação de possíveis géis expansivos de trincas por possíveis reações álcali sílica.

#### 4.5.1.5. Termogravimetria (TG)

A termogravimetria (TG) foi executada de acordo com os procedimentos descritos no item 4.2.2.5. Nas argamassas cimentícias após 28 dias, pretendeu-se com os resultados termogravimétricos avaliar possíveis perdas de massa nas faixas de temperatura de 0 a  $200 \text{ } ^\circ\text{C}$  (evaporação d'água, decomposição do gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), cristais de etringita ( $6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) e de alguns dos hidratos de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )),  $360 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $500 \text{ } ^\circ\text{C}$  (decomposição do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )) e entre  $600 \text{ } ^\circ\text{C}$  e  $800 \text{ } ^\circ\text{C}$  (decomposição do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ )) (JOICHEM et al, 2020, p. 6; NABER; BELLMANN; NEUBAUER, 2020, p. 2; MEDINA et al, 2017, p. 11).

#### 4.5.1.6. Difração de Raios X (DRX)

A análise de difração de raios X (DRX) foi realizada de acordo com os procedimentos descritos no item 4.2.2.6. O objetivo foi de verificar as fases cristalinas obtidas das argamassas cimentícias após 28 dias.

#### 4.5.1.7. FTIR

As análises de FTIR foram realizadas por meio do espectrofotômetro de infravermelho da marca Shimadzu, modelo IR-Prestige 21. A amostra foi utilizada em formato de pó, passante na peneira de 200 MASH. A técnica utilizada analisa o percentual de transmitância variando o número de onda entre 4000 e 400  $\text{cm}^{-1}$ . O modo de análise foi ATR.

### 4.6. ENSAIOS PARA AVALIAR AS PROPRIEDADES/DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS

#### 4.6.1. Ensaios no estado fresco

##### 4.6.1.1. Índice de consistência

O índice de consistência das argamassas cimentícias foi determinado de acordo com os procedimentos padronizados da NBR 13276 (2016, p. 1 até 2).

Para a realização deste ensaio foram utilizadas a mesa para índice de consistência, molde metálico troncônico, soquete metálico, régua metálica e paquímetro para medições de até 300 milímetros, com resolução de 1 milímetro. Para a realização do ensaio, foi utilizada a argamassa cimentícia produzida para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos. Antes de iniciar o ensaio, o tampo da mesa e a parede de molde troncônico foram limpas. Com as argamassas produzidas, encheu-se o molde troncônico posicionado no centro da mesa de consistência. O procedimento de moldagem envolveu segurar firmemente o molde e preenchê-lo com argamassa cimentícia em três camadas sucessivas, de alturas iguais, aplicando quinze, dez e cinco golpes com o soquete metálico, de maneira uniforme. O rasamento da argamassa foi realizado passando a régua metálica rente à borda do molde troncônico em movimentos curtos de vaivém ao longo da superfície. Foi eliminada qualquer partícula presente em volta do molde com pano seco



e limpo. Na sequência, retirou-se verticalmente o molde troncônico e rotacionou-se a manivela da mesa de modo que a mesma suba e caia 30 vezes durante um período de 30 segundos. Após a última queda da mesa, utilizou-se o paquímetro para medir o diâmetro do espalhamento em três pontos diferentes. Desta forma, o índice de consistência da argamassa foi representado pela média das três medidas do diâmetro (NBR 13276, 2016, p. 1 até 2).

Este ensaio foi realizado no laboratório de materiais de construção civil (LMCC).

#### 4.6.1.2. Início e fim de pega

O ensaio de início e fim de pega teve como objetivo determinar os tempos de pega das argamassas cimentícias. Os procedimentos utilizados foram os padronizados pela NBR 16607 (2018, p. 1 até 8). Foram utilizados uma balança semi analítica da marca PIZZOLO, modelo AC10K, argamassadeira de 5 litros da marca EMIC, modelo AG-5 com rotação lenta e rápida, espátulas e réguas metálicas, molde metálico de base menor de  $70 \pm 5$  milímetros, base maior de  $80 \pm 5$  milímetros e altura de  $40 \pm 0,2$  milímetros, além do aparelho de Vicat com agulhas e acessórios para a determinação do início e fim de pega. As argamassas para o ensaio foram produzidas seguindo os procedimentos da NBR 16606 (2017, p. 1 até 8). Para a determinação do início da pega, depois de um tempo de 30 minutos após o preenchimento da argamassa no molde metálico, a agulha para início de pega foi suavemente posicionada na superfície superior da argamassa modelada, para na sequência se solta em queda até a placa base. Num período de 30 segundos após soltar a agulha, efetuou-se a leitura da distância entre a agulha e a placa base, repetindo tal processo a cada 30 minutos, até que a distância entre a placa base e a agulha resultasse em  $6,0 \pm 2$  milímetros (período em que se determinou o início da pega). Após início da pega, a agulha de Vicat de início de pega foi substituída pela agulha de Vicat para fim de pega (agulha mais acessório). O molde cheio de argamassa foi invertido, fazendo com que a superfície inferior do experimento tornar-se superfície superior. O procedimento de penetração foi o mesmo utilizado para o final de pega, porém com leituras a cada 15 minutos. O tempo decorrido para que a agulha penetrasse em no máximo 0,5 milímetros foi o período de fim de pega.

#### 4.6.1.3. Retenção de água

O ensaio de retenção de água teve como objetivo avaliar o desempenho da argamassa em reter água para o processo de hidratação. Os procedimentos para a realização deste ensaio foram padronizados pela NBR 13277 (2005, p. 1 até 3). Assim, foram utilizados o funil de Buchner, discos de papel-filtro de 200 milímetros de diâmetro, bomba a vácuo da marca Prismatec, modelo 132, soquete metálico, régua metálica bisotada com 300 milímetros de comprimento, balança de massa da marca PIZZOLO, modelo AC10K de 0,1% de resolução e cronômetro digital. A execução do ensaio envolveu o uso das argamassas cimentícias produzidas para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos, além dos procedimentos executivos padronizados pela NBR 13277 (2005, p. 2). Neste sentido, o resultado da retenção de água foi obtido por meio das Equações 8 e 9.

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad \text{Equação 8}$$

$$R_a = \left[ 1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF \times (m_a - m_v)} \right] \times 100 \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

$m_a$  = Massa do conjunto com argamassa (gramas);

$m_s$  = Massa do conjunto após a sucção (gramas);

$m_v$  = Massa do conjunto vazio (gramas);

AF = Fator água/argamassa fresca;

$m_w$  = Massa total de água acrescentada à mistura (gramas);

$m$  = Massa da argamassa industrializada (gramas).

Este ensaio foi realizado no laboratório de materiais de construção civil (LMCC).

#### 4.6.1.4. Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado foram obtidos por meio da execução dos procedimentos padronizados pela NBR 13278 (2005, p. 1 até 4).

Para a realização do ensaio foram utilizados a balança de massa da marca PIZZOLO, modelo AC10K de 0,1% de resolução, recipiente rígido, cilíndrico, de material não absorvente, espátula metálica de no

mínimo 150 milímetros de comprimento por 20 milímetros de largura e placa de vidro plano, transparente de seção quadrada de 100 milímetros de lado e 3 milímetros de espessura. Após o preparo das argamassas cimentícias, essas foram introduzidas suavemente com colher ou concha as porções de argamassa cimentícia no recipiente cilíndrico, formando três camadas com alturas iguais. Em cada camada, foram aplicados 20 golpes com a espátula na posição vertical. Após a conclusão das camadas, foram efetuadas 3 quedas do recipiente a uma altura aproximada de 3 centímetros. O recipiente com argamassa foi rasado, por meio de duas passadas ortogonais entre si com a espátula, fazendo movimentos de vaivém com inclinação de 45° em relação à superfície. A densidade de massa foi obtida por meio da Equação 10.

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} \times 1000 \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

$m_c$  = Massa do recipiente cilíndrico contendo argamassa (gramas);

$m_v$  = Massa do recipiente cilíndrico vazio (gramas);

$V_r$  = Volume do recipiente cilíndrico ( $\text{cm}^3$ );

$d$  = Densidade de massa da argamassa ( $\text{kg/m}^3$ ).

O teor de ar incorporado foi obtido por meio da equação 11.

$$A = 100 \times \left( 1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad \text{Equação 11}$$

Em que:

$d$  = Densidade de massa da argamassa ( $\text{kg/m}^3$ );

$d_t$  = Densidade de massa teórica da argamassa ( $\text{g/cm}^3$ ).

A Equação 12 apresenta a fórmula para a obtenção da densidade de massa teórica da argamassa ( $d_t$ ).

$$d_t = \frac{m_s + m_{\text{água}}}{\frac{m_s}{\gamma_s} + m_{\text{água}}} \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

$m_s$  = Massa da argamassa anidra (gramas);

$m_{\text{água}}$  = Massa da água que compõe a argamassa fresca (gramas);

$\gamma_s$  = Massa específica da argamassa anidra (NBR 16605, 2017, p. 1 até 4).

O ensaio para a determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado foi realizado no laboratório de materiais de construção civil (LMCC).

#### 4.6.2. Ensaios no estado endurecido

##### 4.6.2.1. Porosidade

Para determinação da porosidade das argamassas cimentícias foram selecionadas 5 amostras de cada experimento. Inicialmente, as amostras foram secas a 105 °C por 24 horas em uma estufa e quantificou-se a massa (Ps). Na sequência, as amostras foram submersas em água à 100 °C por 5 horas em um banho Maria de marca QUIMIS, modelo DUBNOFF. Após o período em banho Maria, o excesso de água superficial foi removido e quantificou-se a massa das amostras molhadas (Pm). Adotou-se a massa específica da água como 1,0 g/cm<sup>3</sup>. Assim, o volume de poros das amostras (Vpo) foi calculado com a equação 13.

$$V_{po} = P_m - P_s \quad \text{Equação 13}$$

Em seguida, quantificou-se a massa de um balão volumétrico de 500 mililitros com água deionizada (Pb) até o menisco. Adicionou-se as amostras cimentícias imediatamente após o banho Maria, e quantificou-se a massa do balão volumétrico, adicionado com as amostras (Pbp). O volume das amostras (Vpe) foi obtido pela equação 14 e a porosidade das argamassas cimentícias pela equação 15.

$$V_{pe} = P_b - (P_{bp} - P_m) \quad \text{Equação 14}$$

$$\% \text{ poros} = (V_{po}/V_{pe}) * 100 \quad \text{Equação 15}$$

Estes ensaios foram realizados nos laboratórios de Materiais de Construção Civil (LMCC).

#### 4.6.2.2. Resistência à compressão

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão das argamassas cimentícias foram realizados de acordo com a NBR 7215 (2019, p. 1 até 12).

O rompimento do corpo de prova foi utilizado em uma prensa EMIC DL 10000, respeitando uma velocidade constante de carregamento de  $0,25 \pm 0,05$  MPa/s. O resultado da resistência à compressão foi obtido por meio de equação 16.

$$R_c = \frac{F_c}{A_n} \quad \text{Equação 16}$$

Em que:

$R_c$  é a resistência à compressão (MPa);

$F_c$  é a carga máxima aplicada (N);

$A_n$  é a área nominal de seção transversal do corpo de prova ( $\text{mm}^2$ )

O ensaio de resistência de compressão foi realizado no laboratório de materiais de construção civil (LMCC).

#### 4.6.2.3. Resistência de aderência à tração ao substrato

A argamassa cimentícia de melhor desempenho foi validada com o teste de aderência à tração ao substrato, realizado de acordo com a NBR 13528-2 (2019, p. 1 até 10).

Para a realização do ensaio foram utilizados um dinamômetro de tração que permita a aplicação contínua da carga, com erro máximo de 2%, peças metálicas circulares de seção circular de  $50 \pm 1$  milímetros de diâmetro, mínimo 10 milímetros de espessura, não deformável sob a carga do ensaio, com dispositivo no centro para o acoplamento do equipamento de tração e um dispositivo de corte cilíndrico com borda diamantada, capaz de não causar vibrações na camada de revestimento no momento do corte (aderência à tração ao substrato). Além disso, foram necessários também o uso de paquímetro, com resolução de 0,1 milímetros, cola à base de resina epóxi e materiais para sustentação das pastilhas durante o ensaio (NBR 13528-1, 2019, p. 1 até 3).

O ensaio iniciou com o corte a seco dos corpos de prova, sem prejudicar a integridade do revestimento. O corte foi realizado de forma ortogonal à superfície, até a superfície do substrato. Após o corte, colou-se as pastilhas cilíndricas metálicas, centradas ao corpo de prova

delimitado pelo corte. Após a colagem das pastilhas, com o revestimento seco, aplicou-se esforços de tração ao arrancamento com o dinamômetro posicionado de forma ortogonal ao plano do revestimento, até a ruptura do corpo de prova. A taxa de carregamento foi constante de  $250 \pm 50$  N/s. Desta forma, o resultado de resistência de aderência à tração ao substrato foi obtido por meio da Equação 17 (NBR 13528-2, 2019, p.8 até 10).

$$R_a = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 17}$$

Em que:

$R_a$  é a resistência de aderência à tração ao substrato (MPa);

$F$  é a força de ruptura (N);

$A$  é a área do corpo de prova ( $\text{mm}^2$ ).

#### 4.7 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

Foram estimadas as emissões de CO<sub>2</sub> considerando os processos de produção de energia elétrica gasta na cominuição da lâ de vidro, processos de calcinação do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) para produzir o óxido de cálcio (CaO) (responsável pela metade das emissões de CO<sub>2</sub> no processo de fabricação do cimento Portland) e pelo combustível usado para obtenção da temperatura de 1500 °C do clínquerizador (responsável pelo restante das emissões de CO<sub>2</sub> no processo de fabricação do cimento Portland). Em 20 minutos de cominuição a seco da lâ de vidro, foi possível obter 5,1 kg de pó (0,06 horas/kg). Em 30 minutos e 60 minutos da cominuição no moinho de alta energia a úmido, foi possível obter 1,0 kg de pó (0,33 horas/kg e 0,50 horas/kg respectivamente). Em 20 minutos de destorroamento a seco em moinho foi possível obter 0,6 kg de pó (0,56 horas/kg). Esses índices de tempo de cominuição foram utilizados para determinar o tempo total gasto de cominuição em cada experimento.

#### 4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Após a obtenção dos resultados experimentais, foram avaliadas as significâncias estatísticas das variáveis independentes teor e tamanho de partículas da lâ de vidro sobre a porosidade e a resistência à compressão das argamassas cimentícias estudadas com o uso de lâ de vidro moída. O planejamento utilizado envolveu os experimentos Arg<sub>20s(10)</sub>, Arg<sub>20s60u(10)</sub>, Arg<sub>20s30u(17,5)</sub> (ponto central), Arg<sub>20s(25)</sub> e Arg<sub>20s60u(25)</sub>, formando um planejamento fatorial 2<sup>2</sup> com um ponto central. Os métodos estatísticos

utilizados foram ANOVA, Pareto e Gráfico de Médias. Foram considerados significantes as combinações que tiverem o valor P-valor  $\leq 0,105$ , que corresponde à confiabilidade igual ou acima de 89,5%. Essas análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Statistica 10.





## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 5.1.1 Caracterização do cimento

##### 5.1.1.1 Análise química

Os resultados obtidos da análise química por fluorescência de raios X do cimento anidro mostram 64,8% de óxido de cálcio (CaO). A Tabela 5 apresenta os compostos e suas respectivas quantidades identificadas na análise química.

Tabela 5 - Análise química do cimento.

COMPOSTOS	QUANTIDADE
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,0%
CaO	64,8%
SiO <sub>2</sub>	18,9%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5%
K <sub>2</sub> O	0,9%
MgO	1,8%
TiO <sub>2</sub>	0,2%
Na <sub>2</sub> O	0,1%
SrO	0,2%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,2%
P.F	7,4%

Fonte: Do autor (2023).

A quantidade do composto óxido de cálcio (CaO) apresentada na Tabela 5 se assemelha à quantidade identificada do cimento Portland (64,0%) utilizado na pesquisa de Bostanci (2019, p. 2), que resultou num

aumento de 12,65% de resistência mecânica com argamassas contendo 30% de resíduos de pó de vidro.

#### 5.1.1.2 Análise granulométrica

A Tabela 6 mostra o resultado da análise granulométrica do cimento com  $d_{médio}$  (22,9  $\mu\text{m}$ ) dentro da faixa de 30  $\mu\text{m}$  a 40  $\mu\text{m}$ .

Tabela 6 - Tamanho de partícula do cimento anidro.

<b>Tamanho de partícula</b>			
<b><math>d_{10\%}</math></b>	<b><math>d_{50\%}</math></b>	<b><math>d_{90\%}</math></b>	<b><math>d_{médio}</math></b>
2,7 $\mu\text{m}$	18,4 $\mu\text{m}$	49,5 $\mu\text{m}$	22,9 $\mu\text{m}$

Fonte: Do autor (2023).

Hlobil, Kumpová e Hlobilová (2022, p. 10) descrevem que valores representativos de partícula do cimento  $d_{médio}$  devem estar dentro da faixa de 30  $\mu\text{m}$  a 40  $\mu\text{m}$  para ocorrer a hidratação formando elementos hidratados de 150  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$ .

### 5.1.2 Caracterização da lã de vidro

#### 5.1.2.1 Análise química

A Tabela 7 apresenta os resultados da análise química da lã de vidro moída em que se percebe a existência de 65,4% de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ).

Tabela 7 - Análise química da lâ de vidro moída.

COMPOSTOS	QUANTIDADE
SiO <sub>2</sub>	65,4%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,7%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2%
CaO	8,1%
K <sub>2</sub> O	0,7%
MgO	3,3%
Na <sub>2</sub> O	12,7%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1%
TiO <sub>2</sub>	0,1%
PbO	0,3%
SrO	0,1%
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5%
P.F	5,2%

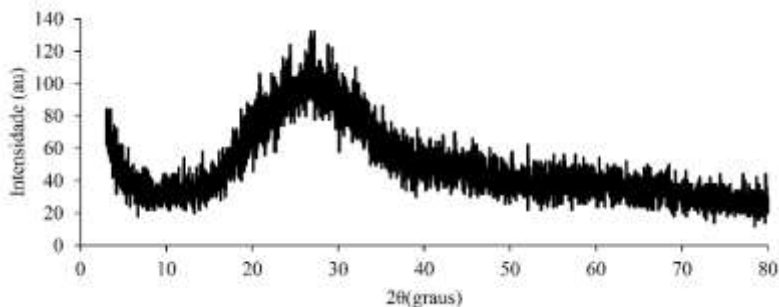
Fonte: Do autor (2023).

Analisando a Tabela 7 mostra ainda que teor de SiO<sub>2</sub> mais Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mais Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foi de 67,3%, resultado superior a 50%, que representa o valor mínimo exigido da soma desses elementos pela NBR 12653 (2014, p. 1 até 6) para ser material pozolânico. Além desses dados, como exigências químicas, esta norma ainda exige que o teor máximo de SO<sub>3</sub> seja de 5,0% e perda ao fogo máxima de 6,0% (ambos os resultados são atendidos pela lâ de vidro).

#### 5.1.2.2 Difração de Raios X

A Figura 23 apresenta o resultado da difração de raios X da lâ de vidro moída, na qual percebe-se a inexistência de picos que representem fases sólidas cristalinas, indicando que a lâ de vidro moída é um material amorfo (SILVEIRA et al, 2021, p. 4).

Figura 23 - Difração de raios X da lã de vidro moída.



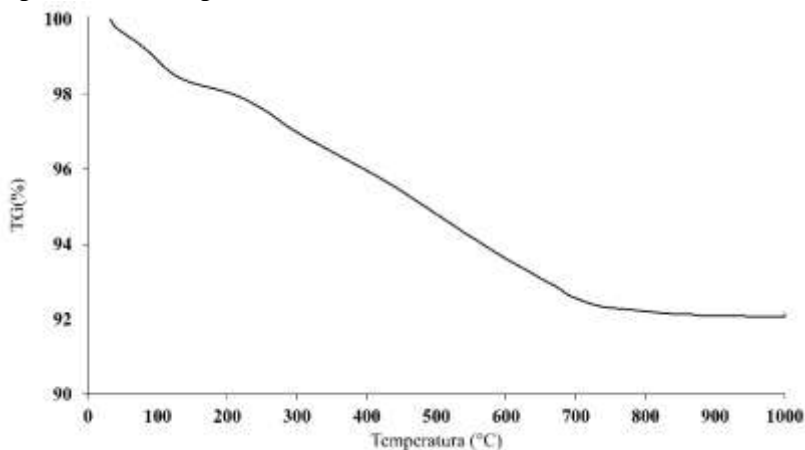
Fonte: Do autor (2023).

A natureza amorfa da lã de vidro moída junto ao teor de sílica (65,41%) em sua composição química faz a mesma ter potencial para reagir com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), formando novas fases de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO.SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$ ), o que pode aumentar a resistência mecânica da pasta de cimento hidratada (ARGVI; HALOG, 2015, p. 957; ARGIZ; MORAGUES; MENÉNDEZ, 2017, p. 26).

#### 5.1.2.2 Análise Térmica e Termogravimétrica (DTA/TG)

A Figura 24 apresenta a termogravimetria da lã de vidro com valores de perda de massa que não superam 8%, valor superior a perda ao fogo (5,2%) obtida na composição química.

Figura 24 –Termogravimétrica (ATD/TG) da lã de vidro.



Fonte: Do autor (2023).

O resultado de perda de massa apresentada na Figura 24 é semelhante aos resultados obtidos por Lin et al. (2013, p. 5) em que as argamassas de cimento com adições de lãs de rocha moída, submetidas a ensaios de termogravimetria, obtiveram perdas de massa de até 15,0% em função da decomposição de seus aglutinantes.

### 5.1.2.3 Moagem da lã de vidro

A Tabela 8 apresenta os resultados da cominuição a seco da lã de vidro. Percebe-se que o maior tempo de cominuição ( $M_{esfnormal} + M_{esf1,6mm} + M_{esf0,6mm}$ ) não resultou no menor tamanho de partícula.

Tabela 8- Tamanho de partícula obtida na cominuição a seco.

Procedimento de moagem	Tamanho de partícula			
	d10%	d50%	d90%	dmédio
Cominuição a seco 20 minutos com esfera de alta alumina de 15 milímetros de diâmetro ( $M_{esfnormal}$ )	3,2 $\mu\text{m}$	17,0 $\mu\text{m}$	47,8 $\mu\text{m}$	21,9 $\mu\text{m}$
Cominuição a seco por 20 minutos com esfera de alta alumina de 15 milímetros de diâmetro mais 20 minutos de cominuição com esferas metálicas de 1,6 milímetros de diâmetro ( $M_{esfnormal} + M_{esf1,6mm}$ )	3,0 $\mu\text{m}$	15,8 $\mu\text{m}$	40,4 $\mu\text{m}$	19,3 $\mu\text{m}$
Cominuição a seco por 20 minutos com esfera de alta alumina de 15 milímetros de diâmetro mais 20 minutos de cominuição com esferas metálicas de 1,6 milímetros mais 20 minutos de cominuição com esferas metálicas de 0,6 milímetros ( $M_{esfnormal} + M_{esf1,6mm} + M_{esf0,6mm}$ )	6,0 $\mu\text{m}$	24,7 $\mu\text{m}$	88,5 $\mu\text{m}$	38,1 $\mu\text{m}$

Fonte: Do autor (2023).

A Tabela 8 mostra uma redução do tamanho de partícula com a cominuição envolvendo esferas metálicas de 1,6 milímetros de diâmetro em comparação à cominuição exclusiva com esferas de alta alumina de 15 milímetros de diâmetro (d10%: 3,0  $\mu\text{m}$  < 3,2  $\mu\text{m}$ ; d50%: 15,8  $\mu\text{m}$  < 17,0  $\mu\text{m}$  e d90%: 40,4  $\mu\text{m}$  < 47,8  $\mu\text{m}$ ). Estes dois possibilitaram obter tamanhos de partículas inferiores das partículas do cimento anidro,

possibilitando ocupar espaços intersticiais em sua mistura, obtendo o efeito aglomerante da pasta de cimento sobre as partículas da lã de vidro.

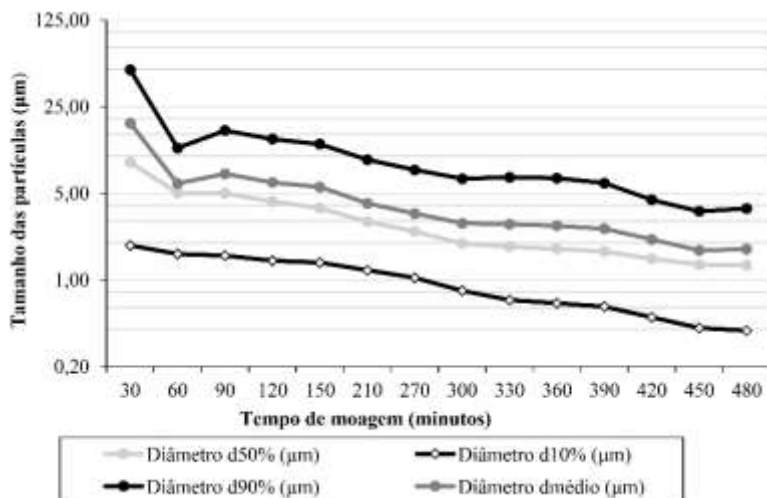
A cominuição envolvendo 20 minutos com esfera de alta alumina de 15 milímetros de diâmetro mais 20 minutos com esferas metálicas de 1,6 milímetros mais 20 minutos com esferas metálicas de 0,6 milímetros, resultou em valores de d10%, d50% e d90% de 6,0  $\mu\text{m}$ , 24,7  $\mu\text{m}$  e 88,5  $\mu\text{m}$ , respectivamente. O aumento do tamanho de partícula obtido neste processo ocorreu em função da energia superficial das partículas, implicando em aglomerações.

Os resultados obtidos cumprem o máximo de 34,0% do material superior a 45,0  $\mu\text{m}$ , uma das exigências físicas da NBR 12653 (2014, p. 1 a 6) para materiais pozolânicos.

O tamanho de partículas obtido da cominuição exclusiva à seco foram superiores aos resultados obtidos do tamanho de partículas de cimento anidro (d10% = 2,7  $\mu\text{m}$ , d50% = 18,4  $\mu\text{m}$ , d90% = 49,5  $\mu\text{m}$  e dmédio = 22,9  $\mu\text{m}$ ).

Visando obter ainda mais reduções dos tamanhos de partícula, decidiu-se testar a eficiência dos processos de cominuição em alta energia a úmido. A Figura 25 apresenta os resultados obtidos da moagem em alta energia a úmido.

Figura 25 - Curva de moagem a úmido de alta energia da lã de vidro.



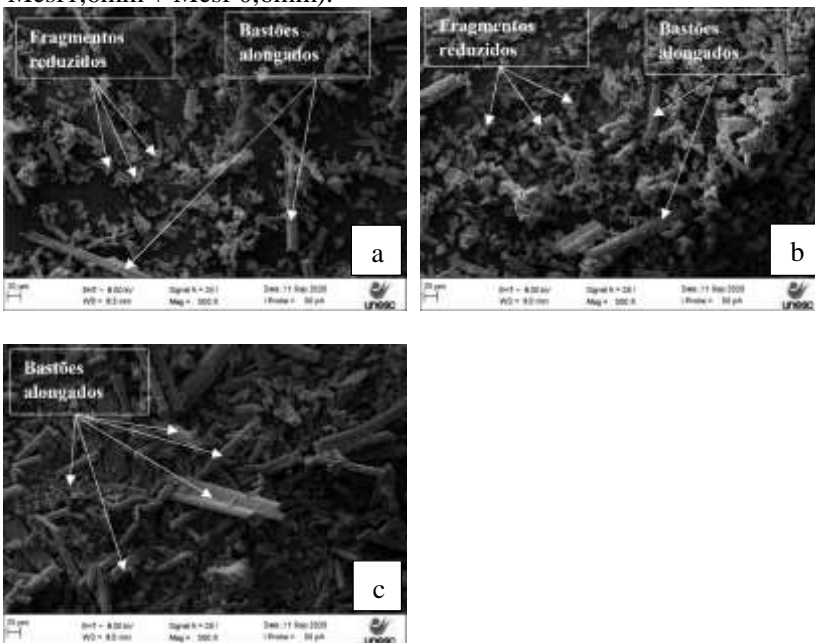
Fonte: Do autor (2023).

Analisando a Figura 25, percebe-se que na cominuição em alta energia a úmido foi possível obter partículas de tamanho de  $d_{50\%}$  de até  $1,32 \mu\text{m}$ . Com 20 minutos desta moagem, foi possível reduzir o tamanho das partículas  $d_{50\%}$  de  $17,03 \mu\text{m}$ , resultado da moagem a seco por 20 minutos com esferas de alta alumina de 15 milímetros de diâmetro (amostra usada para o início da moagem em alta energia a úmido, para  $8,88 \mu\text{m}$ ). Com 60 minutos de moagem em alta energia a úmido, foi possível obter resultados do tamanho das partículas  $d_{50\%}$  de  $5,03 \mu\text{m}$ .

### 5.1.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da lã de vidro moída.

As Figuras 26(a), 26(b) e 26(c) apresentam a morfologia da lã de vidro após as etapas de cominuição a seco.

Figura 26 - Cominuição a seco da lã de vidro (a) moagem (Mesfnormal), (b) moagem (Mesfnormal + Mesf1,6mm) e (c) moagem (Mesfnormal + Mesf1,6mm + Mesf 0,6mm).



Fonte: Do autor (2023).

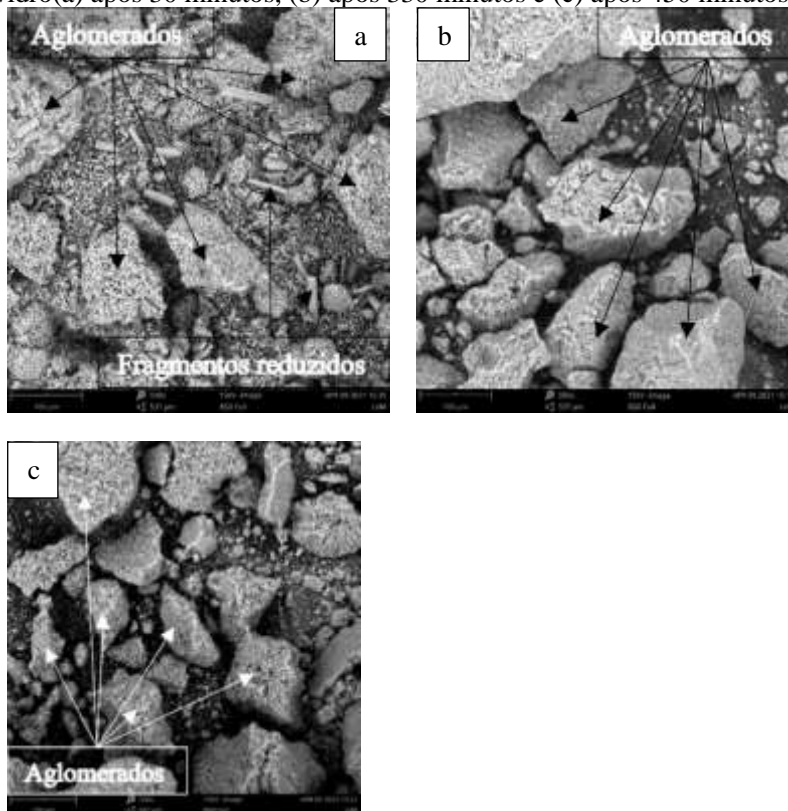
Analisando as Figuras 26(a) e 26(b) percebe-se a morfologia de vários fragmentos de tamanho reduzido em comparação aos bastões



alongados. Já a Figura 26(c) mostra a predominância em bastões alongados na moagem ( $M_{\text{esfnormal}} + M_{\text{esf1,6mm}} + M_{\text{esf0,6mm}}$ ) acompanhada com uma aglomeração das partículas moídas que, segundo Yliniemi et al (2018, p. 1255) pode ser um resultado da dificuldade da cominuição, originado pelo aumento da energia superficial das partículas. Tahwia et al (2022, p. 3) apresentam semelhanças na morfologia obtida de resíduos de vidro após moagem, com a existência de partículas irregulares de vários tamanhos e arestas angulares.

As Figuras 27(a), 27(b) e 27(c) apresentam os resultados da cominuição em alta energia a úmido após 60 minutos, 330 minutos e 450 minutos respectivamente, após decantação do material líquido e antes do destorroamento a seco.

Figura 27 - Cominuição em alta energia a úmido do resíduo de lã de vidro(a) após 30 minutos, (b) após 330 minutos e (c) após 450 minutos.

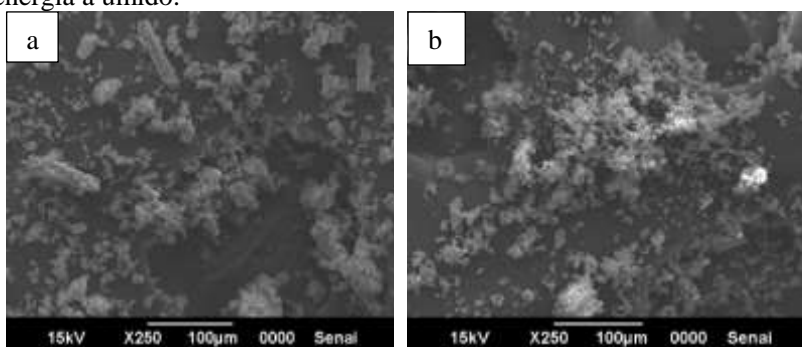


Fonte: Do autor (2023).

Analisando a Figura 27(a) percebe-se ainda a existência de fragmentos reduzidos do processo de moagem em alta energia a úmido, porém combinados com volumes de agloremação da lã de vidro em pó, ocasionada pelo aumento da energia superficial existente da redução do tamanho de partícula obtido pela cominuição em alta energia a úmido. As Figuras 27(b) e 27(c) apresentam maiores volumes de aglomeração da lã de vidro em pó, em função do maior tempo de moagem. São morfologias semelhantes às obtidas por Wang et al (2020, p. 4) em que foram obtidas reduções drásticas no tamanho de partículas dos resíduos de vidro, com formatos mais regulares com a cominuição a úmido. O processo de destorroamento via moinho de bolas a seco após cominuição em alta energia a úmido e decantação foi empregado objetivando eliminar o

destorroamento, conforme mostra as Figuras 28(a) e 28(b). A cominuição em alta energia a úmido por 60 minutos foi escolhida objetivando obter um novo produto com redução de fragmentos reduzidos, em formatos regulares, com o mínimo de gasto energético para cominuição. Wang et al (2020, p. 4) obtiveram reduções do tamanho do tamanho de partículas, com formatos regulares, com 60 minutos de moagem a úmido.

Figura 28 - Imagens da microscopia eletrônica de varredura (MEV) com destorroamento (a) amostra com 30 minutos de cominuição em alta energia a úmido e (b) amostra com 60 minutos de cominuição em alta energia a úmido.



Fonte: Do autor (2023).

As Figuras 28(a) e 28(b) mostram maior dispersão das partículas. Percebe-se na Figura 28(b) que com 60 minutos de cominuição em alta energia a úmido foram suficientes para diminuir a relação comprimento/diâmetro da partícula em comparação à Figura 28(a), apresentando maior regularidade do material.

A Tabela 9 apresenta os resultados de tamanho de partículas após 30 minutos e 60 minutos de cominuição a úmido (material em meio líquido, não decantado) e após 30 minutos e 60 minutos de cominuição a úmido, decantação e destorroamento a seco por 20 minutos.

Tabela 9 - Tamanho de partículas dos processos de cominuição em alta energia a úmido por 30 minutos e 60 minutos, antes e depois do destorroamento a seco.

Tempo de cominuição	Tamanho de partículas ( $\mu\text{m}$ ) (Após moagem em alta energia a úmido)				Tamanho de partículas ( $\mu\text{m}$ ) (Após moagem em alta energia a úmido, decantação e destorroamento a seco)			
	D10	D50	D90	Dmédio	D10	D50	D90	Dmédio
30 minutos	1,9	8,9	49,6	18,4	1,8	8,5	23,7	10,7
60 minutos	1,6	5,0	11,6	6,0	1,6	4,9	12,9	6,2

Fonte: Do autor (2023).

Analisando a Tabela 9 percebe-se a eficácia do processo de destorroamento a seco, com os tamanhos de partículas de lâ de vidro semelhantes aos resultados obtidos sem destorroamento. Nota-se ainda com os resultados, a obtenção da lâ de vidro moída respeitando o máximo de 34,0% do material superior a 45,0  $\mu\text{m}$ , uma das exigências físicas da NBR 12653 (2014, p. 1 a 6) para materiais pozolânicos.

O tamanho de partículas obtido com 30 minutos e 60 minutos de cominuição em alta energia a úmido foram inferiores aos resultados obtidos do tamanho de partículas de cimento anidro ( $d_{10\%} = 2,7 \mu\text{m}$ ,  $d_{50\%} = 18,4 \mu\text{m}$ ,  $d_{90\%} = 49,5 \mu\text{m}$  e  $d_{\text{médio}} = 22,9 \mu\text{m}$ ).

## 5.2 REATIVIDADE QUÍMICA DA LÃ DE VIDRO MOÍDA

### 5.2.1. Teor de hidróxido de cálcio ( $\text{CA}(\text{OH})_2$ ) fixado: Chapelle Modificado

A Tabela 10 apresenta os resultados do teor de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) fixado da lâ de vidro moída pelo método de Chapelle Modificado.

Tabela 10 - Teor de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) fixado da lã de vidro moída pelo método de Chapelle Modificado.

Lã de vidro após cominuição	Tamanho de partícula d50% ( $\mu\text{m}$ )	Iap (mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ )
$\text{LVM}_{(20\text{s})}$	17,0	473,69
$\text{LVM}_{(20\text{s}30\text{u}20\text{s})}$	8,5	472,86
$\text{LVM}_{(20\text{s}60\text{u}20\text{s})}$	4,9	479,00
$\text{LVM}_{(20\text{s}330\text{u}20\text{s})}$	1,9	472,65
$\text{LVM}_{(20\text{s}450\text{u}20\text{s})}$	1,3	472,00

Fonte: Do autor (2023).

Analisando a Tabela 10 percebe-se que as amostras de lã de vidro de diferentes tamanhos de partícula testadas chegaram a resultados próximos de 480 mg de  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ . Esses resultados mostram a reatividade química disponível do material, com valores típicos de materiais pozolânicos que, segundo Grellier et al. (2021, p. 2) devem estar entre 350 a 400 mg de  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ .

Em função dos resultados do teor de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) fixado da lã de vidro moída e dos produtos finais obtidos do processo de moagem, o programa experimental para a produção das argamassas cimentícias foi pelas amostras de lã de vidro  $\text{LVM}_{(20\text{s})}$  (cominuição a seco a seco por 20 minutos, tamanho de partícula d50% igual a 17,0  $\mu\text{m}$ ),  $\text{LVM}_{(20\text{s}30\text{u}20\text{s})}$  (cominuição a seco por 20 minutos, cominuição em alta energia por 30 minutos e destorroamento a seco por 20 minutos, tamanho de partícula d50% igual a 8,5  $\mu\text{m}$ ) e  $\text{LVM}_{(20\text{s}60\text{u}20\text{s})}$  (cominuição a seco por 20 minutos, cominuição em alta energia por 60 minutos e destorroamento a seco por 20 minutos, tamanho de partícula d50% igual a 4,9  $\mu\text{m}$ ).

### 5.2.2. Alcalinidade: Teor de álcalis disponíveis

A Tabela 11 apresenta os resultados do teor de álcalis disponíveis das amostras de lã de vidro moída  $\text{LVM}_{(20\text{s})}$ ,  $\text{LVM}_{(20\text{s}30\text{u}20\text{s})}$  e  $\text{LVM}_{(20\text{s}60\text{u}20\text{s})}$  superiores a 1,5%, valor máximo permitido pela NBR 12653 (2014, p. 1 até 6).

Tabela 11 - Resultados do teor de álcalis disponíveis das amostras de lâ de vidro moída.

Amostra	Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)
LVM <sub>(20s)</sub>	23,9%	1,8%
LVM <sub>(20s30u20s)</sub>	24,3%	1,6%
LVM <sub>(20s60u20s)</sub>	31,9%	1,8%

Fonte: Do autor (2023).

Os resultados da Tabela 11 mostram os riscos de possíveis reações álcali sílica (CaO.Na<sub>2</sub>O.SiO<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) provocando expansões volumétricas nas argamassas cimentícias. Por isso, visando reduzir os riscos de ocorrência de tal reação, a composição dos compostos cimentícios com lâ de vidro moída foram planejadas com 25% de lâ de vidro (relação CaO/SiO<sub>2</sub> igual a 1,66), com 17,5% de lâ de vidro (relação CaO/SiO<sub>2</sub> igual a 2,03) e compostos com 10% de lâ de vidro (relação CaO/SiO<sub>2</sub> igual a 2,51). Essas relações CaO/SiO<sub>2</sub> são inferiores a 2,76 determinado como de possibilidade de reação álcali sílica (CaO.Na<sub>2</sub>O.SiO<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) (MEHDI et al, 2019, p. 5; TAHA, NOUNU, 2007, p. 504).

### 5.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS

#### 5.3.1. Índice de consistência

A Tabela 12 apresenta os resultados do índice de consistência das argamassas. Percebe-se que todos os experimentos produzidos com lâ de vidro moída (exceto o experimento Arg<sub>20s60u(25)</sub>) apresentaram valores inferiores ao experimento Arg<sub>ref</sub> (149,9 milímetros).

Tabela 12 - Índice de consistência das argamassas.

Experimento	Índice de consistência médio (milímetros)	Desvio padrão (milímetros)
Arg <sub>ref</sub>	149,9	0,0
Arg <sub>20s(10)</sub>	126,8	0,0
Arg <sub>20s30u(10)</sub>	128,8	0,0
Arg <sub>20s60u(10)</sub>	127,3	0,1
Arg <sub>20s(17,5)</sub>	127,0	0,0
Arg <sub>20s30u(17,5)</sub>	129,0	0,0
Arg <sub>20s60u(17,5)</sub>	127,5	0,5
Arg <sub>20s(25)</sub>	130,0	0,1
Arg <sub>20s30u(25)</sub>	130,1	0,1
Arg <sub>20s60u(25)</sub>	150,1	0,0

Fonte: Do autor (2023).

A morfologia de bastões alongados e formatos irregulares da lâ de vidro moída dos experimentos Arg<sub>20s(10)</sub>, Arg<sub>20s30u(10)</sub>, Arg<sub>20s(17,5)</sub>, Arg<sub>20s30u(17,5)</sub>, Arg<sub>20s(25)</sub> e Arg<sub>20s30u(25)</sub> junto à insuficiência no empacotamento das partículas dos experimentos contendo 10% e 17,5% de lâ de vidro moída coincidem com as conclusões de Jochem et al (2020, p. 4) em que a morfologia irregular e angular dos resíduos de vidro ocasionaram prejuízos na consistência das argamassas cimentícias estudadas.

O experimento Arg<sub>20s60u(25)</sub> não sofreu prejuízos de consistência (150,1 milímetros) em comparação ao experimento ARG<sub>ref</sub> (149,9 milímetros). Com base nas conclusões de Wang et al (2020, p. 4), o tamanho de partículas menor da lâ de vidro moída em relação às partículas de cimento anidro junto com a sua morfologia regular contribuirá para melhoras na homogeneidade da mistura e, conseqüentemente, melhora na consistência da argamassa fresca.

### 5.3.1. Porosidade

A Tabela 13 apresenta os resultados de porosidade das argamassas cimentícias, em que o menor valor foi obtido pelo experimento Arg<sub>ref</sub> (13,49%). Entre as argamassas cimentícias com lâ de vidro em pó, o menor valor de porosidade foi obtido pelo experimento Arg<sub>20s60u(25)</sub> (13,84%).

Tabela 13 - Porosidade das argamassas cimentícias.

Experimento	Porosidade média (%)	Desvio padrão (%)
Arg <sub>ref</sub>	13,49	0,34
Arg <sub>20s(10)</sub>	14,92	0,22
Arg <sub>20s30u(10)</sub>	16,69	0,57
Arg <sub>20s60u(10)</sub>	14,40	0,18
Arg <sub>20s(17,5)</sub>	16,70	0,57
Arg <sub>20s30u(17,5)</sub>	16,56	0,96
Arg <sub>20s60u(17,5)</sub>	14,84	0,65
Arg <sub>20s(25)</sub>	15,19	0,37
Arg <sub>20s30u(25)</sub>	14,76	0,21
Arg <sub>20s60u(25)</sub>	13,84	0,19

Fonte: Do autor (2023).

Percebe-se que os resultados da Tabela 13 coincidiram com as conclusões de Bostanci (2019, p.7) que produziu argamassas cimentícias com 15% e 30% de resíduos de vidro em pó que promoveram o surgimento de poros adicionais aumentando em no mínimo, 2,74% de porosidade em relação ao experimento cimentício sem o resíduo de vidro em pó. O aumento da porosidade do experimento Arg<sub>20s60u(25)</sub> (experimento de menor porosidade entre as argamassas cimentícias com lã de vidro moída) em relação ao experimento Arg<sub>ref</sub> foi de aproximadamente 2,59%.

Entre os compostos cimentícios com lã de vidro moída percebe-se que os experimentos Arg<sub>20s60u(10)</sub>, Arg<sub>20s60u(17,5)</sub> e Arg<sub>20s60u(25)</sub> apresentaram os menores valores comparados as demais (14,40%, 14,84% e 13,84%, respectivamente). Estes experimentos foram produzidos com lã de vidro de partículas menores e mais regulares em comparação aos demais experimentos com lã de vidro moída, resultando num melhor preenchimento intersticial promovendo um melhor encapsulamento das partículas pela pasta de cimento e, conseqüentemente, reduções de poros (TAHWIA et al, 2022, p. 1 até 17).

### 5.3.2. Resistência à compressão

A Tabela 14 apresenta os resultados da resistência à compressão. Percebe-se que o maior resultado foi do experimento Arg<sub>20s60u(25)</sub> (36,72



MPa). Nota-se ainda que o experimento  $\text{Arg}_{20s30u(25)}$  apresentou um resultado superior (36,10 MPa) ao experimento  $\text{Arg}_{\text{ref}}$  (35,52 MPa).

Tabela 14 - Resistência à compressão das argamassas cimentícias.

Experimento	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
$\text{Arg}_{\text{ref}}$	35,52	2,42
$\text{Arg}_{20s(10)}$	33,00	2,22
$\text{Arg}_{20s30u(10)}$	31,52	2,29
$\text{Arg}_{20s60u(10)}$	34,71	0,86
$\text{Arg}_{20s(17,5)}$	28,51	1,70
$\text{Arg}_{20s30u(17,5)}$	32,15	1,41
$\text{Arg}_{20s60u(17,5)}$	35,30	1,47
$\text{Arg}_{20s(25)}$	28,03	0,61
$\text{Arg}_{20s30u(25)}$	36,10	1,37
$\text{Arg}_{20s60u(25)}$	36,72	1,43

Fonte: Do autor (2023).

Os resultados superiores obtidos pelos experimentos  $\text{Arg}_{20s30u(25)}$  e  $\text{Arg}_{20s60u(25)}$  em comparação ao experimento  $\text{Arg}_{\text{ref}}$  coincidem com os resultados obtidos na pesquisa de Mirzahosseini e Riding (2015, p. 95 a 104) que mostra misturas cimentícias com partículas de vidro de tamanho entre 0  $\mu\text{m}$  a 25  $\mu\text{m}$  apresentando resistência à compressão superior ao experimento de referência (sem partículas de vidro) em função da formação de cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).

Entre os experimentos contendo lã de vidro moída percebe-se que os maiores resultados de resistência à compressão coincidem com os menores resultados de porosidade. O pó de vidro em misturas cimentícias diminui o efeito de empacotamento com as partículas angulares e aumentam o efeito de empacotamento na zona de transição interfacial com as partículas redondas, promovendo a diminuição da porosidade do material e, conseqüentemente, o aumento da resistência à compressão (ELAQRA et al., 2019, p. 681 e 682). A maior porosidade das argamassas cimentícias com lã de vidro (exceto  $\text{Arg}_{20s30u(25)}$  e  $\text{Arg}_{20s60u(25)}$ ) justificam a menor resistência à compressão obtida em relação ao experimento  $\text{Arg}_{\text{ref}}$ .

### 5.3.3. Índice de desempenho com o cimento Portland

A Tabela 15 mostra o índice de desempenho à compressão das argamassas cimentícias com cimento Portland. Percebe-se que todas as argamassas cimentícias produzidas com lâ de vidro moída apresentaram resultados superiores a 75%, que segundo a NBR 12653 (2014, p. 1 até 6) cumprem uma das exigências físicas para materiais pozolânicos.

Tabela 15 - Índice de desempenho das argamassas cimentícias com cimento Portland.

Experimento	Índice de desempenho com cimento Portland (MPa)
Arg <sub>ref</sub>	100,0%
Arg <sub>20s(10)</sub>	92,9%
Arg <sub>20s30u(10)</sub>	88,7%
Arg <sub>20s60u(10)</sub>	80,2%
Arg <sub>20s(17,5)</sub>	99,4%
Arg <sub>20s30u(17,5)</sub>	90,5%
Arg <sub>20s60u(17,5)</sub>	77,6%
Arg <sub>20s(25)</sub>	78,9%
Arg <sub>20s30u(25)</sub>	101,6%
Arg <sub>20s60u(25)</sub>	103,3%

Fonte: Do autor (2023).

Os resultados obtidos coincidem com os resultados de Kim, Yi e Zi (2014, p. 245 e 246) que apresentaram argamassas cimentícias com 10,0% e 20,0% de resíduo de vidro ( $d_{médio} = 14,7 \mu\text{m}$ ) em substituição ao cimento obtendo índices de desempenho respectivos de 83,0% e 103,2%. Os resultados obtidos dos experimentos Arg<sub>20s30u(25)</sub> (101,6%) e Arg<sub>20s60u(25)</sub> (103,3%) se assemelham com as conclusões de Defáveri et al. (2019, p. 43) que apresentaram argamassas cimentícias com 25% de lâ de vidro moída em substituição ao cimento atingindo 98,0% da argamassa de controle, proporcionando 24,0% de economia de cimento.

### 5.3.4. Análise estatística

A Tabela 16 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para os resultados de porosidade das argamassas cimentícias. Não foi possível obter significância estatística das variáveis avaliadas. Nenhum dos valores “p” foram inferiores a 0,105.

Tabela 16 - Resultados do método ANOVA para a porosidade das argamassas cimentícias.

<b>Fator</b>	<b>SS</b>	<b>df</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
(1) Tamanho de Partícula d50%	0,237	1	0,237	0,109	0,773
(2) Teor de lã de vidro (%)	0,021	1	0,021	0,010	0,931
1 de 2	0,172	1	0,172	0,079	0,805
Erro	4,364	2	2,182		
Total SS	4,794	5			
R-quadrado = 0,090					

Fonte: Do autor (2023).

A Tabela 17 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para os resultados de resistência à compressão das argamassas cimentícias. Não foi possível obter significância estatística das variáveis avaliadas. Nenhum dos valores “p” foram inferiores a 0,105.

Tabela 17 - Resultados do método ANOVA para a resistência à compressão das argamassas cimentícias.

<b>Fator</b>	<b>SS</b>	<b>df</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
(1) Tamanho de Partícula d50%	21,703	1	21,703	4,738	0,161
(2) Teor de lã de vidro (%)	2,190	1	2,190	0,478	0,561
1 de 2	12,180	1	12,180	2,659	0,244
Erro	9,161	2	4,580		
Total SS	45,233	5			
R-quadrado = 0,798					

Fonte: Do autor (2023).

Buscando significância estatística, uma outra região de estudo foi analisada. Foi avaliada a significância estatística dos experimentos

Arg<sub>20s30u(10)</sub>, Arg<sub>20s60u(10)</sub>, Arg<sub>20s30u(17,5)</sub>, Arg<sub>20s60u(17,5)</sub>, Arg<sub>20s30u(25)</sub> e Arg<sub>20s60u(25)</sub>, formando um planejamento fatorial 3<sup>2</sup>.

A Tabela 18 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para os resultados de porosidade das argamassas cimentícias nesta nova análise. Foi possível obter significância estatística da variável Tamanho de Partícula d50% sobre os resultados de porosidade.

Tabela 18 - Resultados do método ANOVA para a porosidade das argamassas cimentícias do planejamento fatorial 3<sup>2</sup>.

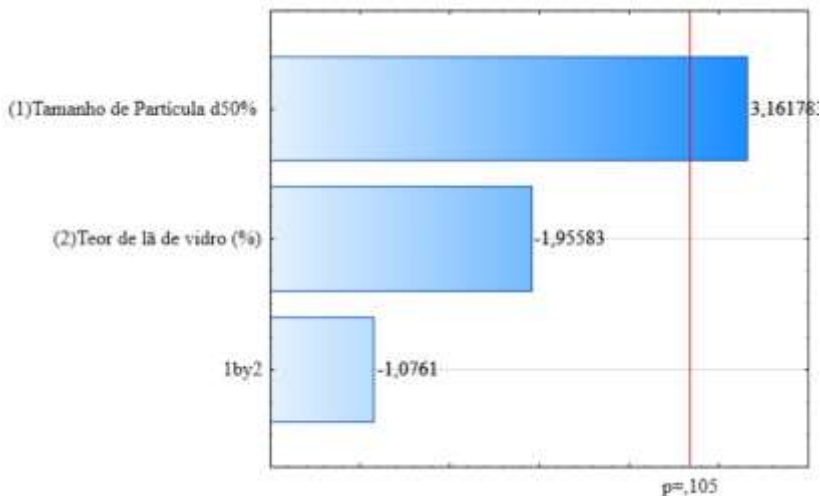
<b>Fator</b>	<b>SS</b>	<b>df</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
(1) Tamanho de Partícula d50%	4,051	1	4,051	10,000	0,087
(2) Teor de lã de vidro (%)	1,550	1	1,550	3,825	0,190
1 de 2	0,469	1	0,469	1,158	0,394
Erro	0,810	2	0,405		
Total SS	6,880	5			
R-quadrado = 0,882					

Fonte: Do autor (2023).

A Tabela 18 mostra que o valor “p” obtido da variável Tamanho de Partícula d50% ( $\mu\text{m}$ ) foi inferior a 0,105 (0,087). Além do valor “p”, o valor “F” de significância foi o maior entre as variáveis analisadas (10,000).

A Figura 29 apresenta o gráfico de pareto para a porosidade das argamassas cimentícias do planejamento fatorial 3<sup>2</sup>, demonstrando que somente a variável Tamanho de Partícula d50% atinge o nível de confiabilidade de 89,5% ( $p=0,105$ ).

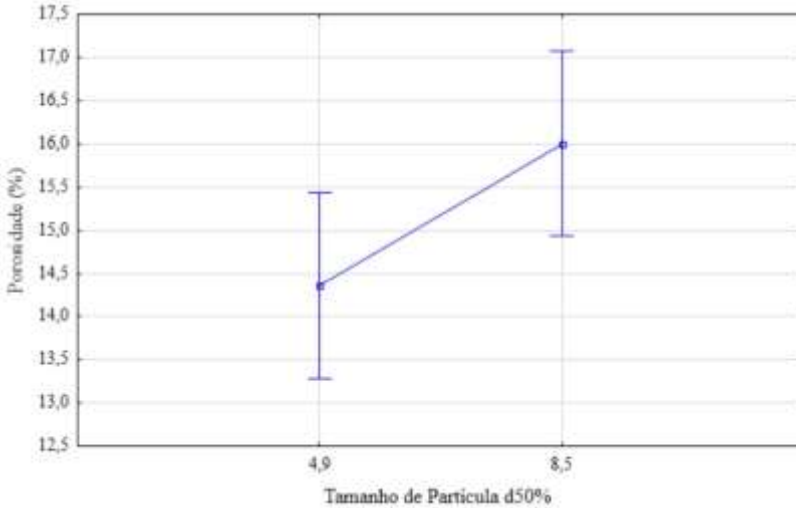
Figura 29 - Gráfico de Pareto das variáveis tamanho de partícula e teor de lã de vidro para os resultados de porosidade no planejamento fatorial  $3^2$ .



Fonte: Do autor (2023).

A Figura 30 apresenta o gráfico de Médias que representa a relação entre as médias dos resultados de porosidade com o Tamanho de Partícula d50%. Percebe-se a redução da porosidade com o menor tamanho de partícula.

Figura 30 - Gráfico de Médias dos resultados de porosidade com o Tamanho de Partícula d50% ( $\mu\text{m}$ ) no planejamento fatorial  $3^2$ .



Fonte: Do autor (2023).

A Tabela 19 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para os resultados de resistência à compressão das argamassas cimentícias nesta nova análise. Foi possível obter significância estatística das variáveis Tamanho de Partícula d50% e Teor de lã de vidro (%) sobre os resultados de porosidade.

Tabela 19 - Resultados do método ANOVA para a resistência à compressão das argamassas cimentícias do planejamento fatorial  $3^2$ .

<b>Fator</b>	<b>SS</b>	<b>df</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
(1) Tamanho de Partícula d50%	8,074	1	8,074	8,273	0,103
(2) Teor de lã de vidro (%)	10,857	1	10,857	11,125	0,079
1 de 2	1,651	1	1,651	1,692	0,323
Erro	1,952	2	0,976		
<b>Total SS</b>	<b>22,534</b>	<b>5</b>			

R-quadrado = 0,913

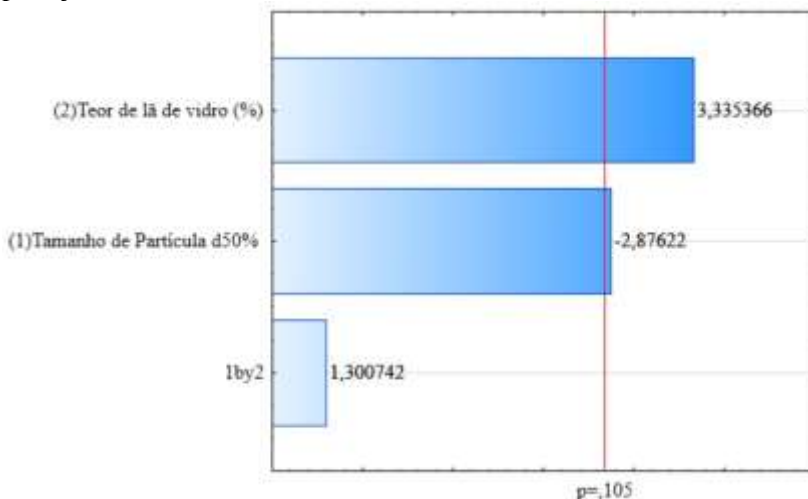
Fonte: Do autor (2023).

A Tabela 19 mostra que o valor “p” obtido das variáveis Tamanho de Partícula d50% e Teor de lã de vidro (%) foram inferiores a 0,105

(0,103 e 0,079 respectivamente). Além do valor “p”, o valor “F” de significância foi o maior entre as variáveis analisadas (8,273 e 11,125 respectivamente).

A Figura 31 apresenta o gráfico de pareto para a resistência à compressão das argamassas cimentícias do planejamento fatorial  $3^2$ , demonstrando novamente as variáveis Tamanho de Partícula d50% e Teor de lã de vidro atingindo o nível de confiabilidade de 89,5% ( $p=0,105$ ).

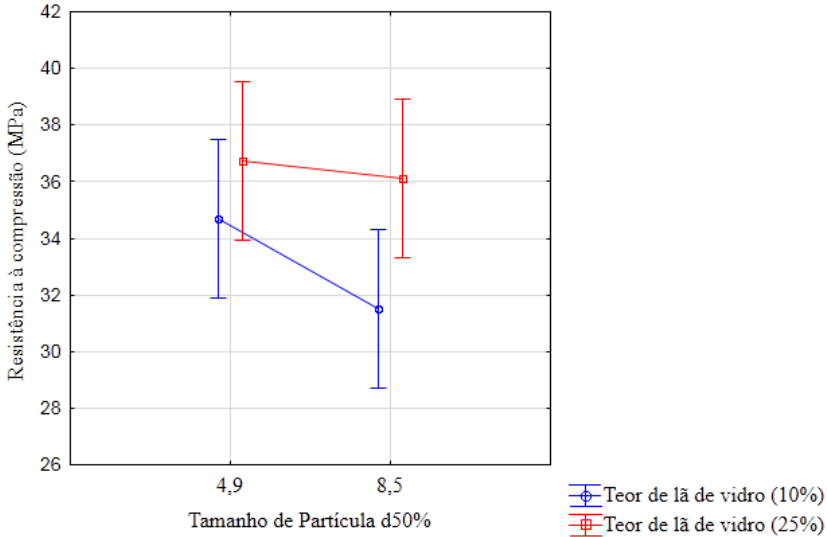
Figura 31 - Gráfico de Pareto das variáveis tamanho de partícula e teor de lã de vidro para os resultados de resistência à compressão no planejamento fatorial  $3^2$ .



Fonte: Do autor (2023).

A Figura 32 apresenta o gráfico de Médias que representa a relação entre as médias dos resultados de resistência à compressão com o Tamanho de Partícula d50% e Teor de lã de vidro (%). Percebe-se o aumento da resistência à compressão com a redução do tamanho de partícula e com o aumento do Teor de lã de vidro (%).

Figura 32 - Gráfico de Médias dos resultados de resistência à compressão com o Tamanho de Partícula d50% e Teor de lã de vidro (%) no planejamento fatorial 3<sup>2</sup>.



Fonte: Do autor (2023).

## 5.4 REATIVIDADE QUÍMICA E CARACTERIZAÇÕES MORFOLÓGICAS DAS ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS

Além do experimento  $Arg_{ref}$ , os testes de reatividade química e caracterizações morfológicas foram realizadas nas argamassas cimentícias  $Arg_{20s(25)}$ ,  $Arg_{20s30u(25)}$  e  $Arg_{20s60u(25)}$  por representar os experimentos de maior consumo de lã de vidro em pó (expectativa de maior economia de cimento).

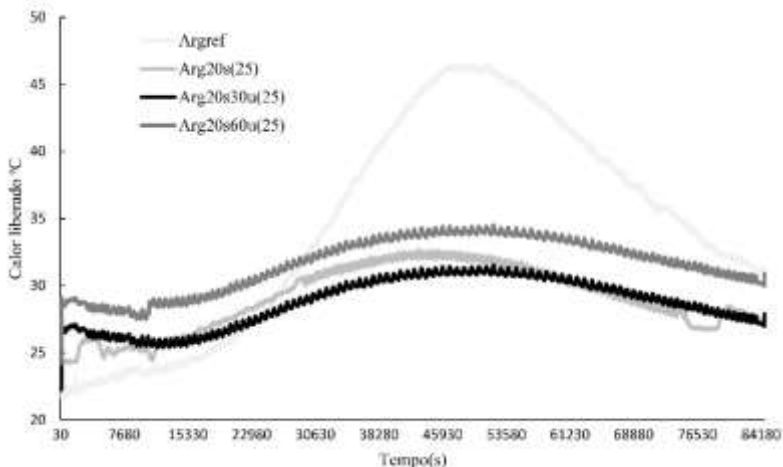
### 5.4.1. Reatividade química

#### 5.4.1.1 Calor de hidratação

A Figura 33 apresenta os resultados acumulados do calor de hidratação obtido das argamassas cimentícias. Percebe-se que os experimentos com lã de vidro moída tiveram redução de calor liberado no processo de hidratação em comparação ao experimento  $Arg_{ref}$ .



Figura 33 - Calor de hidratação das argamassas cimentícias.



Fonte: Do autor (2023).

O maior pico de liberação de calor obtido da amostra Arg<sub>ref</sub> justifica-se do processo de hidratação do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) formando novas fases cristalinas de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ). Kapeluszna et al. (2020, p. 1) descrevem que a formação de cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) obtidos pela hidratação do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) formam-se dentro do período de 10 a 24 horas.

A diminuição dos picos de liberação de calor obtidos pelos experimentos Arg<sub>20s(25)</sub>, Arg<sub>20s60u20s(25)</sub> e Arg<sub>20s480u20s(25)</sub> são justificados pela diminuição dos processos de hidratação do silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) ocorridos nas primeiras 24 horas, pela redução do teor de clínquer da composição em função da substituição parcial do cimento por lâ de vidro moída (WANG et al, 2020, p. 1 até 13).

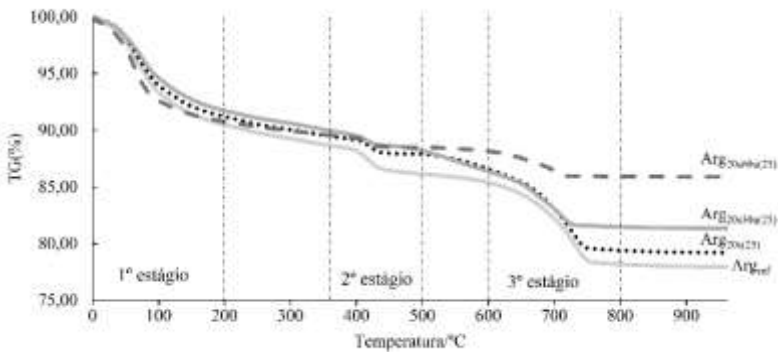
Entre as argamassas cimentícias contendo lâ de vidro moída percebe-se que os experimentos Arg<sub>20s30u(25)</sub> e Arg<sub>20s(25)</sub> apresentaram valores de calor de hidratação semelhantes e inferiores aos do experimento Arg<sub>20s60u(25)</sub>. A morfologia regular e o menor tamanho de partícula (maior área superficial) da lâ de vidro moída existente no experimento Arg<sub>20s60u(25)</sub> possibilitou uma maior formação de cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) o que gerou uma maior quantidade de calor liberado (ANDRADE et al., 2018, p. 446; JIANG et al., 2019, p. 441; BOSTANCI, 2019, p. 12). A diminuição do calor de

hidratação dos compostos cimentícios contribui para a diminuição de fissuras por retração hidráulica, possibilitando ganhos de durabilidade e resistência dos materiais de base cimentícia (WANG et al, 2020, p. 1 até 13).

#### 5.4.1.2 Termogravimetria das argamassas hidratadas (TG)

A Figura 30 apresenta o resultado de termogravimetria (TG) das argamassas cimentícias. A maior perda de massa na faixa de 0 °C a 1.000 °C ocorreu no experimento Arg<sub>ref</sub>.

Figura 34 - Termogravimetria (TG) das argamassas cimentícias.



Fonte: Do autor (2023).

Na faixa de temperatura de 0 °C a 200 °C (1º estágio) percebe-se semelhanças nas perdas de massa dos experimentos em função da evaporação d'água, além da decomposição do gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), cristais de etringita ( $6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) e de alguns dos hidratos de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) (JOICHEM et al, 2020, p. 6).

Os resultados de perda de massa entre as faixas de temperatura de 360 °C a 500 °C mostram um menor conteúdo de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) nos experimentos Arg<sub>20s(25)</sub>, Arg<sub>20s30u(25)</sub> e Arg<sub>20s60u(25)</sub> (perdas de massa aproximadas de 1,5%) em comparação ao experimento Arg<sub>ref</sub> (perda de massa aproximada de 2,2%), mostrando a capacidade pozolânica da lã de vidro moída em reagir com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) formando novos cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) assim como possivelmente em função da redução de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) disponível para reação química pela substituição

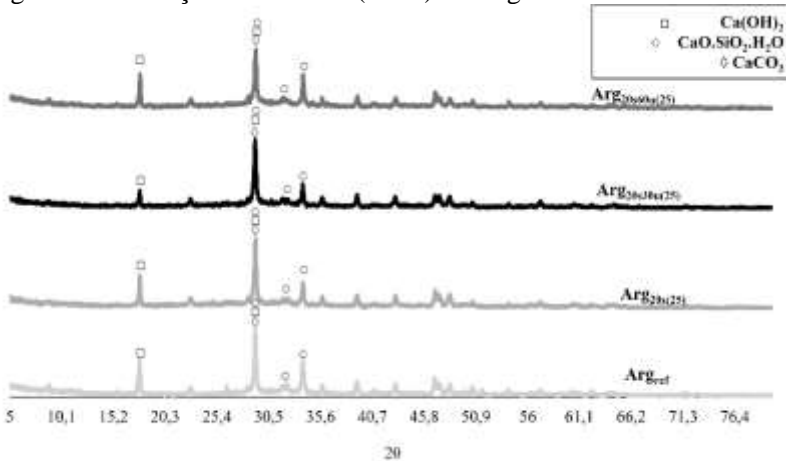
parcial do cimento pela lã de vidro moída (NABER; BELLMANN; NEUBAUER, 2020, p. 2).

Entre as faixas de temperatura de 600 °C a 800 °C percebe-se que as perdas de massa dos experimentos  $Arg_{ref}$ ,  $Arg_{20s(25)}$ ,  $Arg_{20s30u(25)}$  e  $Arg_{20s60u(25)}$  de aproximadamente 8,0%, 5,5%, 4,0% e 2,5% respectivamente. Esses resultados mostram que a ausência de lã de vidro moída no experimento  $Arg_{ref}$  junto ao maior teor de cimento CP II F – 32 MPa (cimento com adições de filer calcário) implicou numa maior disponibilidade de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ). O experimento  $Arg_{20s60u(25)}$  que apresentou maior consumo de hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) para a formação de novos cristais de silicato de cálcio hidratado ( $CaO.SiO_2.H_2O$ ) apresentou menor disponibilidade de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) (MEDINA et al, 2017, p. 11).

#### 5.4.1.3 Difração de Raios X (DRX)

A Figura 31 apresenta os resultados de difração de raios-X (DRX) das argamassas cimentícias. Os picos cristalinos nas posições  $2\theta$  17,8, 29,2, 32,0 e 33,8, segundo Thomas, Ghazizadeh e Masoero (2017, p. 323), Ibrahim e Meawad (2018, p. 455), Jochem et al (2020, p. 6), Geng et al (2022, p. 3) e Rui et al (2022, p. 4) referem-se às estruturas cristalinas dos cristais de hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) (00-084-1276), carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) (00-086-2340) e silicato de cálcio hidratado ( $CaO.SiO_2.H_2O$ ) (00-079-1343).

Figura 35 - Difração de Raios X (DRX) das argamassas cimentícias.



Fonte: Do autor (2023).

Na posição  $2\theta$  17,8 percebe-se que os maiores picos foram obtidos nos experimentos  $\text{Arg}_{\text{ref}}$ , em função da maior disponibilidade de óxido de cálcio (CaO) para a formação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e  $\text{Arg}_{20s60u(25)}$ . Comparando com os demais experimentos ( $\text{Arg}_{20s(25)}$  e  $\text{Arg}_{20s30u(25)}$ ), o experimento  $\text{Arg}_{20s60u(25)}$  apresenta maior energia superficial das partículas de lâ de vidro moída em função do seu menor tamanho, possibilitando maior reatividade para a formação de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO.SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$ ) (ANDRADE et al., 2018, p. 446; JIANG et al., 2019, p. 441; BOSTANCI, 2019, p. 12). Este resultado relaciona-se com os resultados obtidos da termogravimetria (TG), tendo o experimento  $\text{Arg}_{\text{ref}}$  apresentando maior conteúdo de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).

Todos os experimentos apresentaram picos cristalinos na posição  $2\theta$  29,2 devido à existência dos cristais de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO.SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$ ) identificados também nos resultados de termogravimetria (TG) (MEDINA et al, 2017, p. 11).

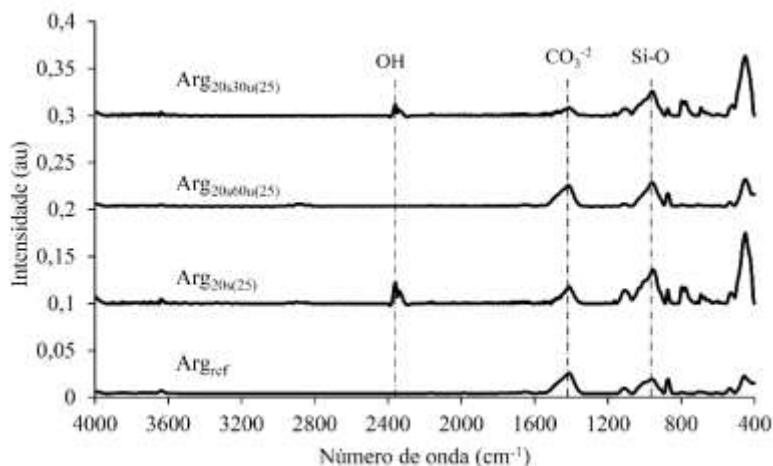
Nas posições  $2\theta$  32,0 e 38,0 percebe-se que os menores picos foram obtidos pelos experimentos  $\text{Arg}_{20s(25)}$  e  $\text{Arg}_{20s30u(25)}$  em função do menor conteúdo de clínquer na composição, implicando numa menor formação de cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO.SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$ ) em comparação ao experimento  $\text{Arg}_{\text{ref}}$ . O maior tamanho e a morfologia

angular e irregular das partículas de lã de vidro moída dos experimentos  $\text{Arg}_{20s(25)}$  e  $\text{Arg}_{20s30u(25)}$  implicou numa menor reatividade química em comparação ao experimento  $\text{Arg}_{20s60u(25)}$ , resultando em menores picos cristalinos nestas posições. Tal conclusão se assemelha ao que foi visto nos resultados de calor de hidratação, que teve os experimentos  $\text{Arg}_{20s(25)}$  e  $\text{Arg}_{20s30u(25)}$  apresentando menores valores de calor liberado da reação química.

#### 5.4.1.4 FTIR

A Figura 36 apresenta os resultados obtidos do FTIR das argamassas cimentícias.

Figura 36 - FTIR das argamassas cimentícias.



Fonte: Do autor (2023).

Analisando a Figura 36 percebe-se banda em  $1470\text{ cm}^{-1}$  no  $\text{Arg}_{\text{ref}}$ ,  $\text{Arg}_{20s(25)}$ ,  $\text{Arg}_{20s30u(25)}$  e  $\text{Arg}_{20s60u(25)}$  devido ao rompimento do  $\text{CO}_3^{2-}$  (GENG et al., 2022, p. 7). Em  $949\text{ cm}^{-1}$ , as bandas de estiramento de Si-O foram identificadas para todos os experimentos, resultados dos cristais de silicato de cálcio hidratados formados nos processos de hidratação cimentícia. Em  $2400\text{ cm}^{-1}$  percebe-se o estiramento de OH existentes nos experimentos  $\text{Arg}_{20s(25)}$  e  $\text{Arg}_{20s30u(25)}$ , decorrentes de cristais não desenvolvidos (IBRAHIM; MEAWAD, 2022, p. 5).

#### 5.4.1.5 Reação álcali sílica

A Tabela 20 mostra que todos os resultados obtidos da reação álcali-sílica foram inferiores a 0,19% aos 30 dias (expansão máxima permitida pela NBR 15577-1 (2008, p. 4 e p. 7)). De acordo com a BS 812-123 (1999, p. 1 a 19) o valor limite de tolerância para expansão por reação álcali-sílica é de 0,2%.

Tabela 20 - Reação álcali sílica das argamassas cimentícias.

Experimentos	Expansão média aos 30 dias (%)	Desvio padrão (%)
$Arg_{ref}$	0,04	0,01
$Arg_{20s(25)}$	0,05	0,01
$Arg_{20s30u(25)}$	0,03	0,01
$Arg_{20s60u(25)}$	0,02	0,01

Fonte: Do autor (2023).

Os resultados de redução da expansão média por reação de sílica alcalina dos experimentos  $Arg_{20s30u(25)}$  e  $Arg_{20s60u(25)}$  coincidem com os resultados obtidos por Cai, Xuan e Poon (2019, p. 298) e Taha e Nounu (2007, p. 504) que produziram experimentos cimentícios com 10% e 20% de resíduos de pó de vidro em substituição ao cimento, resultando na redução da expansão por álcali sílica em comparação com o experimento de controle em até 57%.

A Figura 37 mostra a inexistência de fraturas nos experimentos ensaiados, comprovando a inexistência da reação álcali sílica. Esta avaliação foi feita com os experimentos após 365 dias.

Figura 37 - Experimentos após 365 dias do ensaio de reação álcali sílica



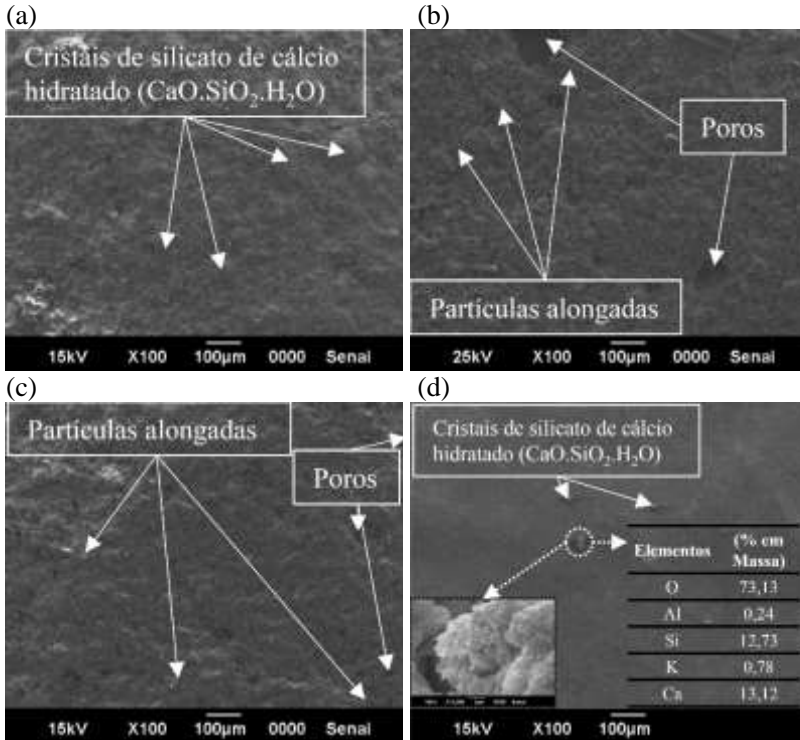
Fonte: Do autor (2023).

## 5.4.2. Caracterizações morfológicas

### 5.4.2.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As Figuras 38 (a), 38 (b), 38 (c) e 38 (d) apresentam respectivamente imagens microscópicas formadas dos experimentos  $Arg_{ref}$ ,  $Arg_{20s(25)}$ ,  $Arg_{20s30u(25)}$  e  $Arg_{20s60u(25)}$ . Em nenhuma imagem foi possível identificar a presença de géis expansivos decorrentes da reação álcali sílica (fases  $CaO.Na_2O.SiO_2.H_2O$ ).

Figura 38 - Imagens microscópicas das argamassas cimentícias, (a) Arg<sub>ref.</sub>, (b) Arg<sub>20s(25)</sub>, (c) Arg<sub>20s30u(25)</sub> e (d) Arg<sub>20s60u(25)</sub>.



Fonte: Do autor (2023).

Analisando a Figura 38 (a) percebe-se a predominância dos cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) decorrentes das reações de hidratação dos silicatos tricálcicos ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) e dicálcico ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) presentes no clínquer do cimento do experimento Arg<sub>ref.</sub> (OLIVEIRA et al., 2019, p. 677).

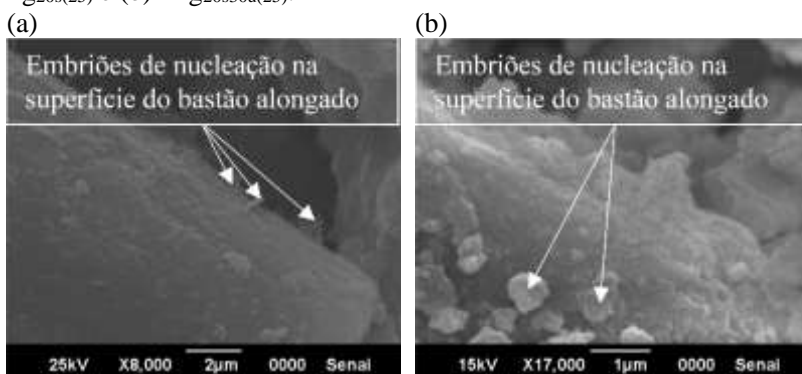
As Figuras 38 (b) e 38 (c) também mostram a existência de cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) porém acompanhadas com a presença de bastões alongados de lã de vidro moída dos experimentos Arg<sub>20s(25)</sub>, Arg<sub>20s30u(25)</sub>, em formato irregular, de forma dispersa na microestrutura cimentícia, implicando na formação de poros, também constatado pelos resultados de porosidade dos experimentos.



A Figura 38 (d) ilustra uma superfície lisa, compacta, com a menor presença de poros e com cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) decorrentes da reação química de hidratação do clínquer e da reação química das partículas regulares de lã de vidro moída com o hidróxido de cálcio (OLIVEIRA et al., 2019, p. 677; THOMAS; GHAZIZADEH; MASOERO, 2017, p. 323; NABER; BELLMANN; NEUBAUER, 2020, p. 1; IDIR; CYR; TAGNIT-HAMOU, 2010, p. 28; RAMDANI et al., 2018, p. 2). Os hidratos desenvolvidos após superar a energia de ativação formaram aglomerações na extremidade da partícula de lã de vidro moída, formando resultados semelhantes ao de Scrivener et al (2019, p. 6).

As Figuras 39 (a) e 39 (b) mostram a existência de embriões de nucleação de silicato de cálcio hidratado dos experimentos  $\text{Arg}_{20s(25)}$ ,  $\text{Arg}_{20s30u(25)}$ .

Figura 39 - Imagens microscópicas do embriões de nucleação, (a)  $\text{Arg}_{20s(25)}$  e (b)  $\text{Arg}_{20s30u(25)}$ .



Fonte: Do autor (2023).

Os embriões de nucleação apresentados nas Figuras 39 (a) e 39 (b) mostram a dificuldade existente em superar a energia de ativação da reação de hidratação para promover o desenvolvimento dos cristais hidratados, que poderia ter ocorrido após 4 horas do início da hidratação, mas permaneceu lento por mais de 28 dias (NABER et al., 2019, p. 3).

## 5.5 DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS

Além do experimento  $\text{Arg}_{\text{ref}}$ , os testes de desempenho foram realizados nas argamassas cimentícias  $\text{Arg}_{20s(25)}$ ,  $\text{Arg}_{20s30u(25)}$  e

Arg<sub>20s60u(25)</sub> por representarem os experimentos de maior consumo de lã de vidro em pó (expectativa de maior economia de cimento) e pelas significâncias estatísticas obtidas no planejamento fatorial 3<sup>2</sup>.

### 5.5.1. Início e fim de pega

A Tabela 21 apresenta os resultados de início e fim de pega das argamassas cimentícias. Percebe-se reduções nos períodos de início e fim de pega dos experimentos cimentícios com lã de vidro moída em relação ao experimento Arg<sub>ref</sub>.

Tabela 21 - Início e fim de pega das argamassas cimentícias.

Experimento	Período de início de pega (minutos)	Período de fim de pega (minutos)
Arg <sub>ref</sub>	170,0	200,0
Arg <sub>20s(25)</sub>	120,0	150,0
Arg <sub>20s30u(25)</sub>	110,0	140,0
Arg <sub>20s60u(25)</sub>	110,0	140,0

Fonte: Do autor (2023).

As reduções nos períodos de início e fim de pega dos experimentos Arg<sub>20s(25)</sub>, Arg<sub>20s30u(25)</sub>, Arg<sub>20s60u(25)</sub> são justificadas pelo maior consumo de água de emassamento para a lubrificação das partículas, já que esses experimentos envolveram a substituição de 25,0% de cimento por partículas de lã de vidro moída menores (maior área superficial) (JOICHEM et al, 2020, p. 4).

Todos os experimentos atenderam às exigências da NBR 5753 (2016, p. 1 até 11) para cimentos pozolânicos (início de pega: mínimo de 60 minutos e fim de pega: máximo 720 minutos).

### 5.5.2. Densidade da massa e teor de ar incorporado

A Tabela 22 apresenta os resultados de densidade da massa e teor de ar incorporado das argamassas cimentícias. Percebe-se igualdade nos valores de densidade da massa e diferenças nos valores de teor de ar incorporado.

Tabela 22 - Densidade da massa e teor de ar incorporado das argamassas cimentícias.

Experimento	Densidade da massa (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)
Arg <sub>ref</sub>	2.000,0	14,1
Arg <sub>20s(25)</sub>	2.000,0	13,0
Arg <sub>20s30u(25)</sub>	2.000,0	12,9
Arg <sub>20s60u(25)</sub>	2.000,0	13,0

Fonte: Do autor (2023).

A lã de vidro moída, com tamanhos de partícula inferiores ao cimento anidro penetrou na matriz cimentícia reduzindo os poros da mistura fresca diminuindo o teor de ar incorporado. Embora os experimentos com lã de vidro moída apresentassem uma menor massa específica da argamassa anidra (2,7 g/cm<sup>3</sup>) em comparação ao experimento Arg<sub>ref</sub> (2,8 g/cm<sup>3</sup>) a diminuição dos poros da mistura fresca fez com que os valores de densidade da massa fossem iguais (JOICHEM et al, 2020, p. 3).

### 5.5.3. Retenção de água

A Tabela 23 apresenta os resultados de retenção de água das argamassas cimentícias.

Tabela 23 - Retenção de água das argamassas cimentícias.

Experimento	Retenção de água (%)
Arg <sub>ref</sub>	97,7
Arg <sub>20s(25)</sub>	98,2
Arg <sub>20s30u(25)</sub>	97,8
Arg <sub>20s60u(25)</sub>	97,9

Fonte: Do autor (2023).

Analisando a Tabela 23 percebe-se que os experimentos contendo lã de vidro moída aumentaram os valores de retenção de água. A maior demanda por lubrificação das partículas por parte desses experimentos promoveu uma maior retenção da água de emassamento (WANG et al, 2020, p. 5 e 6). A maior retenção de água possibilita maior disponibilidade para a dissolução do silicato tricálcico (3CaO.SiO<sub>2</sub>), o

que resulta na formação de cristais de silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) (NABER et al., 2019, p. 3).

#### 5.5.4. Resistência de aderência à tração ao substrato

A Figura 40 mostra o resultado da amostra  $\text{Arg}_{20\text{s}60\text{u}(25)}$  após o ensaio de aderência à tração ao substrato.

Figura 40 - Camada de revestimento  $\text{Arg}_{20\text{s}60\text{u}(25)}$  após ensaio.



Fonte: Do autor (2023).

Analisando a Figura 39 percebe-se que a camada do substrato foi aderida na superfície da amostra. O resultado de aderência à tração ao substrato obtida com a argamassa  $\text{Arg}_{20\text{s}60\text{u}(25)}$  foi de 0,39 MPa sendo superior aos valores exigidos pela NBR 13749 (2013, p. 3) para camadas de revestimento interno (0,20 MPa) e externo (0,30 MPa).

## 5.6 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE $\text{CO}_2$

A Tabela 24 mostra o tempo de cominuição necessário para produzir 0,156 kg de lã de vidro moída utilizada na produção dos experimentos  $\text{Arg}_{20\text{s}(25)}$ ,  $\text{Arg}_{20\text{s}30\text{u}(25)}$  e  $\text{Arg}_{20\text{s}60\text{u}(25)}$  e as emissões de  $\text{CO}_2$  gerado para a produção de energia elétrica consumida no processo de moagem.

Tabela 24 - Emissão de CO<sub>2</sub> do processo de cominuição da lâ de vidro para a produção das argamassas cimentícias.

Experimentos	Lã de vidro moída	Tempo (h)*	Consumo de energia elétrica (W.h)	CO <sub>2</sub> emitido para a produção de energia elétrica consumida na cominuição (kg)
Arg <sub>ref</sub>	-	0,000	0,000	0,000
Arg <sub>20s(25)</sub>	LVM <sub>(20s)</sub>	0,009	4,500	0,001
Arg <sub>20s30u(25)</sub>	LVM <sub>(20s30u20s)</sub>	0,148	74,000	0,019
Arg <sub>20s60u(25)</sub>	LVM <sub>(20s60u20s)</sub>	0,175	87,500	0,022

Obs.: consumo de energia elétrica foi calculado com base na potência elétrica da usina utilizada de 500W. A geração de CO<sub>2</sub> foi calculada com base no índice de 0,0002561 kgCO<sub>2</sub>/W.h (ENGIE (2020, p. 9))

Fonte: Do autor (2023).

Analisando a Tabela 24 percebe-se que a maior quantidade de CO<sub>2</sub> emitido foi no experimento Arg<sub>20s60u(25)</sub> (0,022 kg) em função de seu maior tempo de moagem em alta energia a úmido.

A Tabela 25 apresenta o total de CO<sub>2</sub> emitido para a produção dos experimentos Arg<sub>ref</sub>, Arg<sub>20s(25)</sub>, Arg<sub>20s30u(25)</sub> e Arg<sub>20s60u(25)</sub> em função da energia elétrica gasta dos processos de cominuição e da produção do cimento utilizado.

Tabela 25 - Emissões totais de CO<sub>2</sub> das argamassas cimentícias.

Experimentos	CO <sub>2</sub> emitido na produção do cimento (kg)	CO <sub>2</sub> emitido na cominuição da lâ de vidro (kg)	Total de CO <sub>2</sub> emitido(kg)
Arg <sub>ref</sub>	0,540	0,000	0,540
Arg <sub>20s(25)</sub>	0,405	0,001	0,406
Arg <sub>20s30u(25)</sub>	0,405	0,019	0,424
Arg <sub>20s60u(25)</sub>	0,405	0,022	0,427

Obs.: As emissões de CO<sub>2</sub> na produção de cimento foram calculadas considerando o indicador 0,866 gramas de CO<sub>2</sub> emitido/1,000 grama de cimento produzido (KALAKADA; DOH; ZI, 2019, p. 117916; ASHRAF; OLEK; JAIN, 2017, p. 361).

Fonte: Do autor (2023).

Analisando a Tabela 25 percebe-se que mesmo com o maior gasto energético de cominuição da lâ de vidro moída para a produção do experimento  $Arg_{20s60u(25)}$ , as emissões totais de  $CO_2$  foram menores (0,427 kg) em comparação ao experimento  $Arg_{ref}$  (0,540 kg). A redução no consumo de cimento, possibilitou uma diminuição de no mínimo 20,9% de emissões de  $CO_2$ .

## 6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos pode-se dizer que o resíduo da lâ de vidro moída apresenta potencial para ser utilizado como material cimentício suplementar em argamassas cimentícias. Conclui-se que:

- O uso da lâ de vidro em pó em substituição parcial do cimento na produção de argamassas cimentícias possibilitou a reação química com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) formando novos cristais de silicato de cálcio hidratado;
- A lâ de vidro em pó apresentou maior reatividade química com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) quando utilizado na morfologia regular, com menores tamanhos de partícula. Porém, partículas de tamanhos menores obtidos em cominuição em alta energia a úmido por mais de 60 minutos, não apresentaram ganhos na reatividade química;
- Entre as argamassas cimentícias contendo lâ de vidro moída foi possível obter diminuições de porosidade com o aumento do teor de substituição e diminuição do tamanho das partículas do resíduo;
- Foi possível obter ganhos de resistência à compressão com o uso da lâ de vidro, além do índice de desempenho com cimento Portland necessário para qualificar o resíduo como material pozolânico;
- Foram obtidas reduções do calor de hidratação com argamassas cimentícias contendo a lâ de vidro moída, possibilitando diminuições de fissuras por retração hidráulica, elevando a durabilidade do material;
- A lâ de vidro moída não influenciou as características das argamassas cimentícias em relação à reação álcali sílica, classificando-a como potencial inócuo, possibilitando o uso em compostos cimentícios;
- O desempenho das argamassas cimentícias no estado fresco não foi inviabilizado com o uso de lâ de vidro moída, apresentando diminuições de ar incorporado nas misturas e melhoras na retenção de água necessária para a aplicação na construção civil;
- As argamassas produzidas com lâ de vidro moída geram menores taxas de emissões de  $\text{CO}_2$  que as argamassas sem resíduos.





## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das conclusões obtidas deste trabalho, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Avaliar o emprego de diversos tipos de vidro em compostos cimentícios, aplicando os métodos de processamento apresentados deste trabalho;
- Estudar a aplicação da lã de vidro em formato de fibras para reforços de placas cimentícias;
- Estudar o comportamento reológico das argamassas cimentícias com a aplicação combinada da lã de vidro em pó e aditivos superplastificantes.



## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Daniel da Silva et al. Investigation of C-S-H in ternary cement pastes containing nanosilica and highly-reactive supplementary cementitious materials (SCMs): Microstructure and strength .

**Construction and Building Materials**, Brazil, v. 198, p. 445-455, 31 oct. 2018;

ARGIZ, Cristina; MORAGUES, Amparo; MENÉNDEZ, Esperanza. Use of ground coal bottom ash as cement constituent in concretes exposed to chloride environments. **Journal of Cleaner Production**, Spain, v. 170, p. 25-33, 12 sep. 2017;

ASHRAF, Warda; OLEK, Jan; JAIN, Jitendra, Microscopic features of non-hydraulic calcium silicate cement paste and mortar. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 100, p. 361-372, 29 jan. 2017;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE LÃS ISOLANTES MINERAIS. **O Poder do Isolamento**. Disponível em: [https://www.abraliso.org.br/poder\\_iso.html](https://www.abraliso.org.br/poder_iso.html). Acesso em: 18 maio 2021;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2019. 68 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia Normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015. 4 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: 2017. Cimento Portland –Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018, 8 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: 2018. Cimento Portland –Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018, 8 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5753**: 2016. Cimento Portland – Ensaio de pozolanidade para cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 2016, 11 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: 2017. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017. 4 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019. 12 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014. 4 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 25**: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de álcalis disponíveis. Rio de Janeiro, 2003. 11 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010. 6 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 6 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 77 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528-1**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2019. 3 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528-2**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração Parte 2: Aderência ao substrato. Rio de Janeiro, 2019. 10 p.;

BAQUERIZO, Luis G. et al. Hydration states of AFm cement phases. **Cement and Concrete Research**, Switzerland, v. 73, p. 143-157, 10 feb. 2015;

BARCELO, Laurent et al. Cement and carbon emissions. **Materials and Structures**, Canada, v. 47, p. 1055-1065, 30 jun. 2013;

BAZZONI, Amélie. **Study of early hydration mechanisms of cement by means of electron microscopy**. 2014. 165 p. Thèse (Programme doctoral en Science et génie des matériaux) – École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2014;

BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Evolution of pore structure in blended systems. **Cement and Concrete Research**, v. 73, p. 25-35, 13 mar. 2015;

BOSTANCI, Levent. Effect of waste glass powder addition on properties of alkali-activated silica fume mortars. **Journal of Building Engineering**, Turkey, v. 29, p. 1-13, 24 dec. 2019;

BREUER, S. et al. Thermoelastic properties of synthetic single crystal portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – Temperature-dependent thermal diffusivity with derived thermal conductivity and elastic constants at ambient conditions. **Cement and Concrete Research**, Germany, v. 137, p. 1-17, 29 aug. 2020;

BS 812 Part 123. **Testing aggregates. Method for determination of alkali-silica reactivity. Concrete prism method**. London, 1999. 19 p.;

BUENO, Eduard Tora et al. A Review of Ground Waste Glass as a Supplementary Cementitious Material: A Focus on Alkali-Silica

Reaction. **Journal of Cleaner Production**, United States, v. 20, p. 1 a 50, 17 jan. 2020;

Building Research Establishment, BRE Digest 330, Part 2: 1997, **Alkali-silica reaction in concrete – detailed guidelines for new construction**, BRE. Watford, 2004. 8 p.;

CAI, Yamei; XUAN, Dongxing; POON, Chi Sun. Effects of nano-SiO<sub>2</sub> and glass powder on mitigating alkali-silica reaction of cement glass mortars. **Construction and Building MATERIALS**, v. 201, p. 295-302, 27 dec. 2018;

CHEIKH, Zemri; MOHAMED, Bachir Bouiadjra. Comparison between physical-mechanical properties of mortar made with Portland cement (CEMI) and slag cement (CEMIII) subjected to elevated temperature. **Case Studies In Construction Materials**, Algérie, v. 12, p. 1-29, 5 feb. 2020;

CHEN, Xin et al. Morphology prediction of portlandite: Atomistic simulations and experimental research. **Applied Surface Science**, China, v. 502, p. 1-12, 16 oct. 2019;

CUESTA, A. et al. Hydration of C<sub>4</sub>AF in the presence of other phases: A synchrotron X-ray powder diffraction study. **Construction and Building MATERIALS**, Spain, v. 101, p. 818-827, 18 oct. 2015;

DEFÁVERI, Keoma do Carmo e Silva et al. Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties. **Construction and Building Materials**, Brazil, v. 220, p. 375-385, 11 jun. 2019;

DEFÁVERI, Keoma do Carmo e Silva et al. Glass Wool Residue: A Potential Supplementary Cementitious Material. **ACI MATERIALS JOURNAL**, Brazil, v. 116, n. 4, p. 43-49, 11 jul. 2019;

DE OLIVEIRA, Luiz A.; GOMES, João P. Castro; SANTOS, Pedro M.S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 197-203, 25 jan. 2012;

ECOFYS, Fraunhofer Institute for System and Innovation Research, Öko-Institute (2009). **Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012—Sector report for the mineral wool industry**. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/benchmarking/docs/bm\\_study-mineral\\_wool\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/benchmarking/docs/bm_study-mineral_wool_en.pdf)> Acessado: 26 de março de 2020;

ELAQRA, Hossam A. et al. Effect of immersion time of glass powder on mechanical properties of concrete contained glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, Palestine, v. 206, p. 674-682, 18 feb. 2019;

EVANGELHISTA, Neuza. **Estudo da utilização de resíduos industriais de lâ cerâmica e lâ de vidro em argamassas e concretos**. 2011. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011;

GENG, Guoqing et al. Synchrotron X-ray nanotomographic and spectromicroscopic study of the tricalcium aluminate hydration in the presence of gypsum. **Cement and Concrete Research**, United States, v. 111, p. 130-137, 13 jun. 2018;

GENG, Chenzi et al. Reusing waste glass powder to improve the strength stability of cement at HTHP. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, China, v. 213, p. 1-8, 12 mar. 2022;

FIGUEIRA, R. B. et al. Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. **Construction and Building Materials**, Portugal, v. 222, p. 903-931, 19 jul. 2019;

GRELLIER, Adèle et al. Alternative hydraulic binder development based on brick fines: Influence of particle size and substitution rate. **Journal of Building Engineering**, France, v. 39, p. 1-8, 13 feb. 2021;

GUNASEKARA, Chamila et al. Zeta potential, gel formation and compressive strength of low calcium fly ash geopolymers. **Construction and Building Materials**, Australia, v. 95, p. 592–599, 23 jul 2015;

GUPTA, Lalit Kumar; VYAS, Ashok Kumar. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder.

**Construction and Building Materials**, Índia, v. 191, p. 155-164, 30 sep. 2018;

HERNANDEZ, Nicole; LIZARAZO-MARRIAGA, Juan; RIVAS, Miguel Angel. Petrographic characterization of Portlandite crustal sizes in cement pastes affected by diferente hydration environments.

**Construction and Building Materials**, Colombia, v. 182, p. 541-549, 16 jun 2018;

HLOBIL, Michal; KUMPOVÁ, Ivana; HLOBILOVÁ, Adéla. Surface área and size distribution of Cement particles in hydrating paste as indicators for the conceptualization of cement paste representative volume element. **Cement and Concrete Composites**, Switzerland, v. 134, p. 1-14, 2 octo 2022;

HUANG, Tingjie et al. Understanding the mechanisms behind the time-dependent viscoelasticity of fresh C<sub>3</sub>A-gypsum paste. **Cement and Concrete Research**, China, v. 133, p. 1-11, 13 apr. 2020;

IDIR, Rachida; CYR, Martin; TAGNIT-HAMOU, Arezki. Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. **Cement & Concrete Composites**, France, v. 33, p. 19-29, 18 sep. 2010;

JANI, Yahya; HOGLAND, William. Waste glass in the production of cement and concrete – A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Sweden, v. 2, p. 1767-1775, 25 mar. 2014;

JIANG, Yi et al. A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products. **Journal of Environmental Management**, China, v. 242, p. 440-449, 23 apr. 2019;

JI, Ru et al. Utilization of mineral wool waste and waste glass for synthesis of foam glass at low temperature. **Construction and Building Materials**, China, v. 215, p. 623-632, 3 may 2019;

JOCHEM, Lidiane Fernanda et al. Effect of partial replacement of the cement by glass waste on cementitious pastes. **Construction and Building Materials**, Brazil, v. 273, p. 1-13, 19 dec. 2020;



KALAKADA, Z.; DOH, J. H.; ZI, G. Utilisation of coarse glass powder as pozzolanic cement-A mix design investigation. **Construction and Building Materials**, Australia, v. 240, p. 117916-117926, 19 dec. 2019;

KAPELUSZNA, Ewa et al. The effect of highly reactive pozzolanic material on the early hydration of alite – C<sub>3</sub>A – gypsum synthetic cement systems. **Construction and Building Materials**, Poland, v. 251, p. 1-10, 21 feb. 2020;

KHAN, Md Nabi Newaz; SAHA, Ashish Kumer; SARKER, Prabir Kumar. Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: A review. **Journal of Building Engineerign**, Australia, v. 19, p. 1-71, 03 nov. 2019;

KIM, Jihwan; YI, Chongku; ZI, Goangseup. Waste glass sludge as partial cement replacement in mortar. **Construction and Building Materials**, South Korea, v. 75, p. 242-246, 06 nov. 2014;

KRAFT, Lars; ENGQVIST, Hakan; HERMANSSON, Leif. Early-age deformation, drying shrinkage and thermal dilation in a new type of dental restorative material based on calcium aluminate cement. **Cement and Concrete Research**, Sweden, V. 34, p. 439-446, 25 aug. 2003;

KUBILIUTE, Raimonda; KAMINSKAS, Rimvydas;  
KAZLAUSKAITE, Akvile. Mineral wool production waste as an additive for Portland cement. **Cement and Concrete Composites**, Lithuania, v. 88, p. 130-138, 8 feb. 2018;

LAANAIYA, M.; BOUIBES, A.; ZAOU, A. Understanding why Alite is responsible of the main mechanical characteristics in Portland cement. **Cement and Concrete Research**, France, v. 126, p. 1-5, 1 oct. 2019;

LIN, Wei-Ting et al.. Improved Microstructure of Cement-Based Composites through the Addition of Rock Wool Particles. **Materials Characterization**, Taiwan, v. 84, p. 1-9, 17 jun. 2013;

LIU, Zhuangzhuang et al. Microstructure characterization of Portland cement pastes influenced by lower curing pressures. **Construction and Building Materials**, China, v. 227, p. 1-9, 2 agu.2019;

- MADDALENA, Riccardo; ROBERTS, Jennifer J.; HAMILTON, Andrea. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 933-942, 10 jun. 2018;
- MASOERO, Enrico; THOMAS, Jeffrey J.; JENNINGS, Hamlin M. A reaction zone hypothesis for the effects of particle size and water-to-cement ratio on the early kinetics of C<sub>3</sub>S. **Journal of the American Ceramic Society**, United States, v. 97, p. 967-975, 23 dec. 2013;
- MEDINA G. et al. Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations. **Journal of Cleaner Production**, Spain, v. 148, p. 467-476, 6 feb. 2017;
- MEHDI, Mejdí et al. Investigating the pozzolanic reaction of post-consumption glass powder and the role of portlandite in the formation of sodium-rich C-S-H. **Cement and Concrete Research**, v. 123. p. 1-8, 14 jun. 2019;
- MIRZAHOSSEINI, Mohammadreza; RIDING, Kyle A., Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM). **Cement & Concrete Composites**, United States, v. 56, p. 95-105, 15 nov. 2014;
- MÜLLER, A.; LEYDOLPH, B.; STANELLE, K. Recycling mineral wool waste Technologies for the conversion of the fiber structure, Part 1. **International Ceramic Review**, Germany, v. 58, p. 378–381, 10 nov. 2009;
- MYERS, Rupert J. et al. Solution chemistry of cubic and orthorhombic tricalcium aluminate hydration. **Cement and Concrete Research**, United States, v. 100, p. 176-185, 29 jun. 2017;
- NABER, C. et al. Alite dissolution and C-S-H precipitation rates during hydration. **Cement and Concrete Research**, Germany, v. 115, p. 283 – 293, 3 jan. 2019;
- NABER, C.; BELLMANN, F.; NEUBAUER, J. Influence of w/s ratio on alite dissolution and C-S-H precipitation rates during hydration.

**Cement and Concrete Research**, Germany v. 134, p. 1-10, 20 apr. 2020;

OLIVEIRA, F.A. Costa et al. Portland cement clíiquer production using concentrated solar energy – A proof-of-concept approach. **Solar energy**, Portugal, v. 183, p. 677-688, 16 mar. 2019;

PEPE, M. et al. A novel mix design methodology for Recycled Aggregate Concrete. **Construction and Building Materials**, Brazil, v. 122, p. 362-372, 14 jun. 2016;

QIN, Ling; GAO, Xiaojian; CHEN, Tiefeng. Recycling of raw rice husk to manufacture magnesium oxysulfate cement based lightweight building materials. **Journal of Cleaner Production**, China, v. 191, p. 220–232, 26 apr. 2018;

QUENNOZ, Alexandra. **Hydration of C<sub>3</sub>A with Calcium Sulfate Alone and in the Presence of Calcium Silicate**. 2011. 154 p. Thèse (Programme doctoral en Science et génie des matériaux) – École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2011;

RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. **Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: principles, techniques, and applications**. Building Materials Series. Nova York: Noyes Publications, p. 1-1536, 1 nov. 2000;

RAMÍREZ, A. et al. C<sub>3</sub>A passivation with gypsum and hemihydrate monitored by optical spectroscopy. **Cement and Concrete Research**, Germany, v. 133, p. 1-9, 13 apr. 2020;

RUI, Yafeng et al. Different carbon treatments for steel slag powder and their subsequent effects on properties of cement-based materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 362, p. 1-14, 23 may 2022;

SCRIVENER, Karen; OUZIA, Alexandre; JUILLAND, Patrick; MOHAMED, Aslam Kunhi. Advances in understanding cement hydration mechanisms. **Cement and Concrete Research**, Switzerland, v. 124, p. 1 – 16, 18 jul. 2019;

SIDDIQUI, Md Sarwar; FOWLER, David W. A systematic optimization technique for the coefficient of thermal expansion of

Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, United States, v. 88, p. 204-211, 4 may 2015;

SILVEIRA, Nathália Cristina et al. Ecological geopolymer produced with a ternary system of red mud, glass waste, and Portland Cement. **Cleaner Engineering and Technology**, Brazil, v. 6, p. 1-14, 25 dec 2021;

PIERRARD, J.F; AKKERMAN, D. Manual ProAcústica sobre a norma de desempenho: Guia prático sobre cada uma das partes relacionadas à área de acústica nas edificações da Norma ABNT NBR 15575:2013 Edificações habitacionais – Desempenho. São Paulo: RUSH Gráfica e Editora Ltda, 2013;

RAMDANI, Samiha et al. Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder. **Journal of Building Engineering**, Algeria, v. 18, p. 1-45, 5 nov. 2018;

TAHA, Bashar; NOUNU, Ghassan. Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors. **Cement & Concrete Composites**, United Kingdom, v. 30, p. 497-505, 23 aug. 2007;

TAHWIA, Ahmed M. et al. Enhancing sustainability of ultra-high performance concrete utilizing high-volume waste glass powder. **Case Studies in Construction Materials**, Egypt, v. 17, p. 1-17, 9 nov. 2022;

THOMAS, Jeffrey J.; GHAZIZADEH, Sam; MASOERO, Enrico. Kinetic mechanisms and activation energies for hydration of standard and highly reactive forms of  $\beta$ -dicalcium silicate ( $C_2S$ ). **Cement and Concrete Research**, United States, v. 100, p. 322-328, 8 jun. 2017;

THOMAS, Michael. The effect of supplementary cementary cementing materials on álcali-silica reaction: A review. **Cement and Concrete Research**, Canada, v. 41, p. 1224-1231, 4 nov. 2010;

VANTSI, Olli; KARKI, Timo. Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Japan, v. 16, p. 62-72, 16 aug. 2013;

VARGAS, J.; HALOG, A. Effective Carbon Emission Reductions from Using Upgraded Fly Ash in the Cement Industry. **Journal of Cleaner Production**, Australia, v. 103, p. 948-959, 30 apr. 2015;

WANG, Dan; CHANG, Jun. Comparison on accelerated carbonation of  $\beta$ -C<sub>2</sub>S, Ca(OH)<sub>2</sub>, and C<sub>4</sub>AF: Reaction degree, multi-properties, and products. **Construction and Building MATERIALS**, v. 224, p. 336-347, 8 jul. 2019;

WANG, Yingbin et al. Effects of wet-grinded superfine waste glass on the fresh properties and reaction characteristic of cement pastes. **Construction and Building MATERIALS**, China, v. 247, p. 1-9, 20 feb. 2020;

WANG, Xinming et al. The effects of silica fume on C<sub>3</sub>A hydration. **Construction and Building MATERIALS**, China, v. 250, p. 1-10, 15 mar. 2020;

WANG, Lei et al. Hydration, shrinkage, pore structure and fractal dimension of silica fume modified low heat Portland cement-based materials. **Construction and Building MATERIALS**, China, v. 272, p. 1-13, 4 dec. 2020;

YLINIEMI, J. et al. Nanostructural evolution of alkali-activated mineral wools. **Cement & Concrete Composites**, United Kingdom, v.106, p. 1-12, 21 nov. 2019;

ZENG, Qiang et al. Effect of porosity on thermal expansion coefficient of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, China, v. 28, p. 468-475, 15 nov. 2011;

ZHANG, Tongsheng et al. Effectiveness of novel and tradition methods to incorporate industrial wastes in cementitious materials – An overview. **Resources, Conservation and Recycling**, China, v. 74, p. 134 – 143, 6 mar. 2013;

ZUCOLOTO, S. C.; SOUZA, F. S.; TONON, M.; BRINGHENTI, J. R.; DELLA, V. P. **Quantificação e características dos resíduos de lâ de**

**vidro gerados no Estado do Espírito Santo.** In: XII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Natal. 2014.