



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANDRÉ LUIZ SANTOS PATRIOTA

**MÉTODO DE EQUIVALENTE ALCALINO COMO ESTRATÉGIA DE
VIABILIZAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS DE VIDRO COMO MATERIAL
CIMENTÍCIO COMPLEMENTAR**

Recife

2023

ANDRÉ LUIZ SANTOS PATRIOTA

**MÉTODO DE EQUIVALENTE ALCALINO COMO ESTRATÉGIA DE
VIABILIZAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS DE VIDRO COMO MATERIAL
CIMENTÍCIO COMPLEMENTAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Guzzo

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

P314m Patriota, André Luiz Santos.
 Método de equivalente alcalino como estratégia de viabilização do uso de
 resíduos de vidro como material cimentício complementar / André Luiz Santos
 Patriota, 2023.
 167 f.: il.

 Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
 Coorientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Guzzo.
 Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.
 Inclui Referências e Apêndice.

 1. Engenharia Civil. 2. Pó de vidro. 3. Equivalente alcalino. 4. Misturas
 binárias. 5. Índices físicos. 6. Resistência à compressão. 7. Consumo de
 portlandita. 8. Análise microestrutural. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira
 (Orientador). II. Guzzo, Pedro Luiz (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2023 - 244

ANDRÉ LUIZ SANTOS PATRIOTA

**METODO DE EQUIVALENTE ALCALINO COMO ESTRATÉGIA DE
VIABILIZAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS DE VIDRO COMO
MATERIAL CIMENTÍCIO COMPLEMENTAR**

Tese em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Área de Concentração Estruturas.

Aprovada em 01/09/2023

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Guzzo - UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Marylinda Santos de França (examinadora externa)

Universidade Técnica de Munique

participação por videoconferência

Prof. Dr. Weslei Monteiro Ambrós (examinador externo)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Janaíde Cavalcante Rocha (examinadora externa)

Universidade Federal de Santa Catarina

participação por videoconferência

Prof. Dr. Ângelo Just da Costa e Silva (examinador externo)

Universidade de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Nathália Bezerra de Lima (examinadora externa)

Universidade Federal de Pernambuco

À minha esposa Andreza e ao meu pequeno filho Isaac,
amores da minha vida, fonte de forças e contentamentos.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor e orientador Dr. Pedro Guzzo, por ter aceitado me orientar, por toda confiança, por me receber de portas abertas no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) e por todos os ensinamentos, desvelo e diligência, que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional, e que servirão de inspiração para minha vida. Agradeço por todo apreço e atenção que o senhor tem com os alunos do Instituto Federal do Sertão Pernambucano.

Ao Professor e orientador Dr. Arnaldo Carneiro, por ter aceitado me orientar e sempre me direcionar para o caminho correto, além da confiança e oportunidade de compartilhar de sua rede acadêmica que impulsionam a formação de seus orientandos. Por me ensinar o significado do processo do Doutorado. Por toda amizade, carinho e atenção e por ter desfrutado do seu conhecimento e dos esforços para viabilizar a prosperidade dos trabalhos.

À minha esposa, e amor da minha vida, Andreza por estar sempre ao meu lado, e ser fonte de forças. Ao meu filho Isaac Emmanuel, luz na minha vida, agradeço a Deus por vocês.

Aos meus Pais Geraldo e Luzia (Luz) que sempre fizeram tudo por seus filhos, tenho o maior orgulho do mundo de vocês, sou grato por tudo. Minha vida é de vocês.

Aos meus irmãos, em especial as minhas irmãs Maria Gabriela e Cléa Carolina, por estarem sempre ao meu lado.

Aos meus sobrinhos, em especial meu afilhado Guilherme.

À minha afilhada Clarice, presente de Deus em nossas vidas.

A todos os membros das famílias, Patriota, Santos, Jerônimo e Pyrrho.

À toda população do Sertão Pernambucano, que tanto me orgulho.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IFSPE) por toda contribuição para o Doutorado.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), por toda estrutura de laboratórios e servidores disponíveis.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC da UFPE.

Às servidoras da secretaria do PPGEC/UFPE.

Ao Laboratório de tecnologia mineral LTM / UFPE, por toda estrutura para produção, caracterização e análises dos materiais.

Ao Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes LabTag/UFPE, em nome dos amigos Dr. Victor Estolano e da Doutoranda Priscila Basto por todo apoio.

Ao Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas LDN/UFPE.

A todos os alunos e ex-alunos do IFSPE campus Salgueiro, que são fonte diária de

inspiração.

Aos amigos e Professores Dr. Marcos Padilha e Dr. Eduardo Teixeira, por todo companheirismo ao longo dessa jornada.

Aos amigos e Professores Dr. Leonardo Bernardo e Dr. Pedro Lemos, por toda contribuição e apoio.

Aos amigos doutorandos Filipe Marinho e Pablo Borba, por toda colaboração e ensinamentos.

A todos os bolsistas e colaboradores do LTM/UFPE.

Ao amigo Servidor Sérgio Santos Laboratório de Microscopia eletrônica – Departamento de Física/UFPE, por todo apoio e ensinamentos.

Ao amigo Servidor LTM/UFPE Marcelo Francisco Gomes, pela amizade, por todo apoio e ensinamentos.

A Fausto Soluções Ambientais Ltda, em nome do Sr. Fausto Filho, por ter permitido acesso aos resíduos de vidro.

A CSN Alhandra – Cimento Elizabeth (Alhandra, PB), em nome dos Srs. Degmar Diniz, José Aílton e Marlilton, pela doação de todo cimento utilizado nessa pesquisa e por realizar os ensaios de fluorescência de raios-X, além de toda colaboração.

A Pozo Fly comércio e beneficiamento de pozolanas.

A todos carroceiros e associações de recicladores pelo árduo e importante trabalho, por contribuir para uma cidade mais sustentável e ecológica.

“Não existe maior amor do que este: de alguém dar a própria vida por causa dos seus amigos”
(João, 15:13)

“Porque pra mim viver é Cristo e morrer é Lucro”
(Filipenses 1:21)

“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, e não tivesse amor, seria como o metal que soa ou como o sino que tine”.

“E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria”.

“E ainda que distribuísse toda a minha fortuna para sustento dos pobres, e ainda que entregasse o meu corpo para ser queimado, e não tivesse amor, nada disso me aproveitaria”.

(I Coríntios 13:1-3)

RESUMO

A fabricação de cimento Portland (CP) está entre as atividades industriais que mais emitem gases nocivos à atmosfera. Sua substituição por materiais cimentícios suplementares alternativos (SCM) é uma questão de pesquisa oportuna para enfrentar as restrições relacionadas às mudanças climáticas. A literatura é consensual sobre a possibilidade de utilizar pó de vidro sodocálcico de embalagens (PV) como SCM. Porém os trabalhos com este viés, quer sejam adições unitárias ou binárias, não consideram o potencial deletério de excesso de álcalis presentes no PV. Além disso pouco se considera sobre as operações de moagem e contribuições mais detalhadas sobre a influência do tamanho da partícula de vidro. Este estudo propõe um método de formulação para substituições unitárias e binárias contendo PV, sílica ativa (SA), metacaulim (MC) que leve em consideração a quantidade máxima de álcalis nas misturas. Nesse contexto, as adições unitárias e binárias foram analisadas isoladamente e empregadas na produção de pastas que foram caracterizadas no estado anidro, fresco e endurecido. Para esse estudo foram preparadas aproximadamente 2 kg de PV nas faixas granulométricas (45x75, 25x45, < 45 e < 25 μm) em moinho de bolas de porcelanas. Por meio de difração de raios-X e espectroscopia de infravermelho, os mesmos produtos de hidratação encontrados na amostra de referência foram observados nas pastas com substituições unitárias e binárias. A quantidade de portlandita (Ca(OH)_2) foi avaliada por meio de análise termogravimétrica. O consumo de portlandita após 7 e 56 dias foi afetado tanto pelo tamanho da partícula do PV quanto pela natureza da substituição. As pastas produzidas com PV < 45 μm e < 25 μm apresentaram mesmo nível de resistência à compressão do que as pastas de referência e as preparadas com SA e MC. Foi observado que a resistência à compressão depende simultaneamente do índice de vazios e do consumo de portlandita. A microscopia eletrônica de varredura em conjunto com a espectroscopia de dispersão de energia foi útil para mostrar o efeito do tamanho da partícula na reatividade pozolânica do PV. Foi possível concluir que a formulação das adições binárias foi um método satisfatório para dosagens em que é necessário o controle de álcalis. Foi verificado que pequenas concentrações de PV suficientes para contribuir nas adições binárias. Este estudo fornece novos direcionamentos para impulsionar o uso de resíduos ultrafinos de vidro como SCM.

Palavras-Chave: pó de vidro; equivalente alcalino; misturas binárias; índices físicos; resistência à compressão; consumo de portlandita; análise microestrutural.

ABSTRACT

The manufacture of Portland cement (PC) is among the industrial activities that emit the most harmful gases into the atmosphere. Replacing it with alternative supplementary cementitious materials (SCM) is a timely research issue to address climate change constraints. There is a consensus in the literature on the possibility of using soda lime glass powder (PV) as an SCM. However, studies with this bias, whether unitary or binary additions, do not consider the deleterious potential of excess alkalis present in the PV. In addition, little consideration is given to grinding operations and more detailed contributions on the influence of glass particle size. This study proposes a formulation method for unit and binary substitutions containing PV, silica fume (SF) and metakaolin (MC) that considers the maximum amount of alkali in the mixtures. In this context, the unitary and binary additions were analyzed in isolation and used in the production of pastes which were characterized in the anhydrous, fresh, and hardened state. For this study, approximately 2 kg of PV was prepared in the particle size ranges (45x75, 25x45, < 45 and < 25 μm) in a porcelain ball mill. By means of X-ray diffraction and infrared spectroscopy, the same hydration products found in the reference sample were observed in the pastes with unit and binary substitutions. The quantity of portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) was assessed using thermogravimetric analysis. Portlandite consumption after 7 and 56 days was affected by both the particle size of the PV and the nature of the substitution. Pastes produced with PV < 45 μm and < 25 μm showed the same level of compressive strength as the reference pastes and those prepared with SA and MC. It was also observed that compressive strength depends simultaneously on the void ratio and portlandite consumption. Scanning electron microscopy in conjunction with energy dispersive spectroscopy was useful in showing the effect of particle size on the pozzolanic reactivity of PV. It was possible to conclude that the formulation of binary additions was a satisfactory method for dosages where alkali control is required. It was found that small concentrations of PV were sufficient to contribute to the binary additions. This study provides new directions to boost the use of ultrafine glass waste as SCM.

Keywords: glass powder; alkaline equivalent; binary mixtures; physical indices; compressive strength; portlandite consumption; microstructural analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Composição gravimétrica dos componentes da coleta seletiva.	32
Figura 2 –	Resíduos recicláveis presentes na coleta seletiva.....	32
Figura 3 –	Fluxo de resíduos municipais - Geração de resíduos EUA.....	33
Figura 4 –	Valor de reciclagem dos resíduos presentes na coleta seletiva.	34
Figura 5 –	Distribuição dos resíduos comercializados por organizações.....	34
Figura 6 –	Taxa de reciclagem de embalagens de vidro no Reino Unido.	35
Figura 7 –	Taxa de reciclagem de embalagens de vidro 2016 em países Europeus.	36
Figura 8 –	Taxa de reciclagem de itens presentes na coleta seletiva.....	36
Figura 9 –	Fluxo de resíduos municipais - Recuperados EUA.....	37
Figura 10 –	Estrutura do vidro (a) tridimensional, (b) bidimensional e (c) amorfa.	38
Figura 11 –	Difratograma de partículas de vidro.....	39
Figura 12 –	Micrografias eletrônicas do pó de vidro com ampliações de 1000 x.	39
Figura 13 –	Teores de constituintes pozolânicos e equivalente alcalino.	40
Figura 14 –	Total de adições utilizados como substituto do cimento entre 1990 e 2018. ...	41
Figura 15 –	Ilustração do processo de produção da sílica ativa.	43
Figura 16 –	Enquadramento dos principais materiais cimentícios suplementares em função dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e CaO	44
Figura 17 –	Equivalente alcalino de diversos tipos de vidro.	47
Figura 18 –	Equivalente alcalino: sílica sativa.	48
Figura 19 –	Equivalente alcalino: metacaulim.	48
Figura 20 –	Equivalente Alcalino - cinza volante.	48
Figura 21 –	Equivalente alcalino – escória.....	49
Figura 22 –	Processo da reação pozolânica do vidro.....	51
Figura 23 –	Resistência relativa de argamassas e concreto x teor de substituição	59
Figura 24 –	Fluxograma da caracterização preliminar.	61
Figura 25 –	Pilhas de estocagem dos recipientes de vidro - (a) Vidro âmbar, (b) Vidro verde e (c) Vidro incolor.	63
Figura 26 –	Aspectos dos fragmentos de vidro.	64
Figura 27 –	Fluxograma do processo de moagem e classificação para obtenção de partículas de vidro nas faixas $45 \times 75 \mu\text{m}$ e $< 45 \mu\text{m}$	65
Figura 28 –	Fluxograma do processo de moagem e classificação para obtenção de partículas	

	de vidro nas faixas 25 x 45 μm e < 25 μm	66
Figura 29 –	Curvas de distribuição granulométrica das partículas dos pós de vidro produzidos – (a) fração passante, (b) fração retida.	67
Figura 30 –	Micrografias eletrônicas das partículas de vidro obtidas com aumentos de 1500 x (a,c), 4000 x (b) e 6000 x (d).....	68
Figura 31 –	Difratogramas de raios-X das partículas de vidro.....	69
Figura 32 –	Espectro IV do pó de vidro PV45	71
Figura 33 –	Curvas características de TG (a) e ATD (b) do pó de vidro PV45	71
Figura 34 –	Curvas de distribuição granulométrica das partículas das adições minerais – (a) fração retida, (b) fração passante.....	72
Figura 35 –	Micrografias eletrônicas das partículas de sílica ativa (a) e metacaulim (b). .	73
Figura 36 –	Difratogramas de raios-X dos materiais cimentícios suplementares – (a) sílica ativa, (b) metacaulim.	73
Figura 37 –	Espectro IV da sílica ativa e do metacaulim.	74
Figura 38 –	Curvas características de TG (a,c) e ATD (b,d) da sílica ativa e do metacaulim.	75
Figura 39 –	Curvas de distribuição granulométrica das partículas do cimento CPV e Ca(OH)_2	76
Figura 40 –	Micrografias eletrônicas das partículas de cimento CPV obtidas com aumentos	76
Figura 41 –	Difratogramas de raios-X do cimento CPV(a) e Ca(OH)_2 (b).	77
Figura 42 –	Espectro IV do cimento CPV – ARI.	78
Figura 43 –	Curvas características de TG e ATD do cimento (a, b) do hidróxido de cálcio (c, d).....	79
Figura 44 –	Resumo das análises no estado fresco anidro e endurecido	80
Figura 45 –	Ilustração do fragmento da pasta cimentícia imersa em resina.....	92
Figura 46 –	Curva de distribuição granulométrica do grupo de adições unitárias e binárias com metacaulim.....	94
Figura 47 –	Difratogramas de raios-X das adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro	95
Figura 48 –	Espectros IV das adições unitárias (vidro, sílica e metacaulim) e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.....	96
Figura 49 –	Equivalente alcalino e componentes pozolânicos das adições unitárias e binárias	

	sílica-vidro e metacaulim-vidro.....	98
Figura 50 –	Equivalente alcalino das misturas cimentícias.	100
Figura 51 –	Curvas termodiferenciais (ATD) e termogravimétricas (TG) das adições unitárias de sílica (a) e metacaulim (c) e binárias sílica-vidro (b) e metacaulim-vidro (d).	101
Figura 52 –	Variação da perda de condutividade elétrica das soluções preparadas com as adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.....	102
Figura 53 –	Resistência mecânica para análise da pozolanicidade das argamassas contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.....	105
Figura 54 –	Consistência das pastas constituídas por adições unitárias e binárias.....	107
Figura 55 –	Tempo de início e fim de pega das pastas unitárias de vidro, sílica e metacaulim e pastas binárias sílica-vidro, metacaulim-vidro.	109
Figura 56 –	Pico e cinética da temperatura das pastas unitárias de vidro, sílica e metacaulim e pastas binárias sílica-vidro, metacaulim-vidro.	110
Figura 57 –	Índice de consistência das pastas compostas pelas adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.	112
Figura 58 –	Índice de consistência das pastas compostas pelas adições unitárias (sílica, metacaulim, vidro) e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.....	112
Figura 59 –	Viscosidade das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro (a, b) e adições binárias sílica-vidro (c) e metacaulim-vidro (d).....	115
Figura 60 –	Evolução do processo de hidratação das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.....	116
Figura 61 –	Ganho de massa por hidratação das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.....	117
Figura 62 –	Índice de vazios e percentual de absorção de água das pastas unitárias e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro determinados após 28 dias.....	118
Figura 63 –	Massa específica e módulo de elasticidade das pastas unitárias e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro determinada após 28 dias.	119

Figura 64 –	Resistência à compressão das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro. Barra de erro corresponde a 1σ (3 medidas).....	121
Figura 65 –	Curvas TD após 7 dias, das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.	122
Figura 66 –	Curvas TD após 56 dias, das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.	123
Figura 67 –	Curvas termogravimétricas (TG) e respectivas perdas de massa durante as etapas de decomposição térmica (1: dessorção da água, início da desidratação do C-S-H e da etringita; 2: decomposição térmica da portlandita; 3: decomposição térmica da calcita) das pastas unitárias (sílica, metacaulim, vidro) e binárias (sílica-vidro, metacaulim-vidro) após 7 dias de cura. A perda de massa total também é apresentada nos histogramas (e) e (f).....	124
Figura 68 –	Curvas termogravimétricas (TG) e respectivas perdas de massa durante as etapas de decomposição térmica (1: dessorção da água, início da desidratação do C-S-H e da etringita; 2: decomposição térmica da portlandita; 3: decomposição térmica da calcita) das pastas unitárias (sílica, metacaulim, vidro) e binárias (sílica-vidro, metacaulim-vidro) após 56 dias de cura. A perda de massa total também é apresentada nos histogramas (e) e (f).....	125
Figura 69 –	Teor de portlandita das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.	127
Figura 70 –	Difratogramas de raios-X para as pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.....	129
Figura 71 –	Parte central dos difratogramas de raios-X para as pastas cimentícias contendo adições unitárias e binárias com sílica, metacaulim e vidro.....	130
Figura 72 –	Espectros de IV por refletância total atenuada (ATR) nas faixas do IV médio (a, b) e IV distante (c, d) para as pastas cimentícias com adições unitárias (a, c) e binárias (b, d) de sílica e vidro.....	131
Figura 73 –	Espectros de IV por refletância total atenuada (ATR) nas faixas do IV médio (a, b) e IV distante (c, d) para as pastas cimentícias com adições unitárias (a,	

	c) e binárias (b, d) de metacaulim e vidro.	132
Figura 74 –	Espectros conjuntos ATR-IV nas faixas do IV médio (a), e IV distante (b), para as pastas com adições unitárias e binárias com sílica, metacaulim e vidro..	133
Figura 75 –	Micrografia eletrônica obtida a partir de elétrons secundários, mapa geral e espectros EDS da pasta de referência após 56 dias de cura. O mapa geral EDS é referente à figura 75 (a) e os espectros EDS são referentes à figura 75 (b).	134
Figura 76 –	Micrografias eletrônicas obtidas a partir de elétrons secundários e sinal EDS dos elementos Si, Ca, Na e Mg das pastas unitárias constituídas com 5% de vidro após 56 dias de cura. Os mapas EDS são referentes às figuras 76(b) e 76(d).....	134
Figura 77 –	Micrografias eletrônicas obtidas a partir de elétrons secundários e sinal EDS dos elementos Si, Ca, Na e Mg das pastas unitárias constituídas com 10% de vidro após 56 dias de cura. Os mapas EDS são referentes às figuras 77(b) e 77(d).....	135
Figura 78 –	Micrografias eletrônicas obtidas a partir de elétrons secundários e sinal EDS dos elementos Si, Ca, Na e Mg da pasta unitária constituída por sílica e binárias sílica-vidro, após 56 dias de cura. Os mapas EDS são referentes às figuras 78 (b) e 78 (d).	136
Figura 79 –	Micrografias eletrônicas de pastas binárias sílica-vidro destacando a interface de nódulos de sílica e a matriz e respectivas perda de condutividade e relações entre óxidos alcalinos dos materiais cimentícios no estado anidro.	137
Figura 80 –	Micrografias eletrônicas obtidas a partir de elétrons secundários e sinal EDS dos elementos Si, Ca, Na e Mg da pasta unitária constituída por metacaulim e binárias metacaulim-vidro, após 56 dias de cura. Os mapas EDS são referentes às figuras 80 (b), 80 (d) e 80 (f).....	138
Figura 81 –	Variação do índice de vazios e da resistência à compressão (56 dias) em função do diâmetro característico (D_{50}) e da heterogeneidade de distribuição (D_{90}/D_{10}).	140
Figura 82 –	Variação do diâmetro de espalhamento e do módulo de elasticidade em função da absorção de água e do índice de vazios.	141
Figura 83 –	Variação da perda de massa parcial (25°C – 250°C) e total (250°C – 1050°C), em função do diâmetro de espalhamento e da absorção de água.	142

Figura 84 –	Correlação entre resistência, índice de vazios e teor de portlandita. Figura 84	
(a) lote sílica-vidro, figura 84 (b) lote metacaulim-vidro.....		143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Composição básica de vidros sodocálcicos.	38
Tabela 2 –	Classificação dos materiais cimentícios suplementares.	41
Tabela 3 –	Teores de vidros e resistências à compressão de argamassas.	56
Tabela 4 –	Teores de vidros e resistências à compressão em concretos.	58
Tabela 5 –	Diâmetro e área superficial específica do pó de vidro empregado na produção de compósitos cimentícios presentes na literatura.	63
Tabela 6 –	Carga de corpos moedores empregados na produção de pó de vidro em moinho de porcelana.	66
Tabela 7 –	Quantidades de pó de vidro produzidas.	67
Tabela 8 –	Diâmetros característicos (D10, D50, D90), heterogeneidade (D90/D10) e área superficial específica (S), referentes às faixas granulométricas das partículas de vidro.	68
Tabela 9 –	Percentual dos compostos óxidos predominantes nas amostras de vidro por espectrometria FRX.	70
Tabela 10 –	Configuração utilizada nas técnicas TR e ATR nas análises preliminares.	70
Tabela 11 –	Diâmetro característicos das adições.	72
Tabela 12 –	Percentual dos óxidos predominantes nas adições primárias obtidas por espectrometria FRX.	74
Tabela 13 –	Diâmetro característicos das partículas do cimento CPV e $\text{Ca}(\text{OH})_2$	76
Tabela 14 –	Percentual dos óxidos predominantes nas amostras do cimento CPV e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ obtido por espectrometria FRX.	77
Tabela 15 –	Arranjo e identificação dos grupos de misturas estudados.	80
Tabela 16 –	Composição das misturas binárias.	82
Tabela 17 –	Composição das pastas utilizadas no ensaio de consistência.	84
Tabela 18 –	Composição das pastas utilizadas no ensaio de minicone.	85
Tabela 19 –	Configurações do reômetro.	86
Tabela 20 –	Argamassas produzidas para o ensaio de atividade pozzolânica NBR 5752:2014.	87
Tabela 21 –	Argamassas produzidas para o ensaio de atividade pozzolânica NBR 5751:2015.	88
Tabela 22 –	Composição de pastas unitárias e binárias com sílica ativa e pó de vidro para	

	uma relação a/c de 0,4.....	89
Tabela 23 –	Composição de pastas unitárias e binárias com metacaulim e pó de vidro para uma relação a/c de 0,4.....	89
Tabela 24 –	Propriedades do sistema não curado.....	93
Tabela 25 –	Propriedades do sistema curado.....	93
Tabela 26 –	Diâmetros característicos (D_{10} , D_{50} , D_{90}), heterogeneidade (D_{90}/D_{10}) e área superficial específica (S), referentes às faixas granulométricas das adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.....	94
Tabela 27 –	Concentração dos óxidos presentes nas adições unitárias (vidro, sílica e metacaulim) e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.....	97
Tabela 28 –	Concentração dos compostos óxidos presentes nas misturas cimentícias e para o cimento CPV.....	99
Tabela 29 –	Perda de condutividade das soluções preparadas com adições unitárias (sílica, metacaulim e vidro) e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro para os intervalos 60 s e 600 s.....	103
Tabela 30 –	Resistência à compressão das argamassas compostas pelas adições, cimento CPV e $\text{Ca}(\text{OH})_2$	104
Tabela 31 –	Diâmetro de espalhamento obtidos por flow table e minicone das pastas compostas pelas adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.....	111

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 –	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 3\text{Ca}^{++}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}(\text{aq}) + 4\text{OH}^-(\text{aq})$	42
Equação 2 –	$\text{XCa}^{2+}(\text{s}) + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}(\text{s}) + 2(\text{x}-1)\text{OH}^- + \text{yH}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{C-S-H}(\text{ou } \text{xCaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{yH}_2\text{O})(\text{aq})$	42
Equação 3 –	$\text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{OH}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq})$	42
Equação 4 –	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 1,7\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{yH}_2\text{O}(\text{aq}) + 1,3\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq})$	42
Equação 5 –	$\text{C}_3\text{S}(\text{s}) + \text{H}(\text{l}) \rightarrow 1,7\text{C-S-H}(\text{aq}) + 1,3\text{CH}(\text{aq})$	42
Equação 6 –	$\text{SiO}_2(\text{aq}) + 2(\text{OH})^-(\text{aq}) \rightarrow \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}(\text{aq})$	42
Equação 7 –	$\text{XCa}^{2+}(\text{s}) + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}(\text{s}) + 2(\text{x}-1)\text{OH}^- + \text{yH}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{C-S-H}(\text{ou } \text{xCaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{yH}_2\text{O})(\text{aq})$	42
Equação 8 –	$\text{SiO}_2(\text{s}) + \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{C-S-H}(\text{gel pozolânico})(\text{aq})$	43
Equação 9 –	I Massa do Vidro mv + Massa do Material Cimentício Suplementar mcs = Massa Total mt	80
Equação 10 –	II $\text{mcs} \times \text{EA}_{\text{mcs}} + \text{mv} \times \text{EAv} = \text{LAD} \times \text{m}$	80
Equação 11 –	$\text{mv} = \text{LAD} - \text{EA}_{\text{mcs}} \times \text{mt} \times \text{EAv} - \text{EA}_{\text{mcs}}$	80
Equação 12 –	$E_d = \rho \cdot V \cdot 2(1+\nu) \cdot (1-2\nu)^{-1} \cdot \text{GPa}$	88
Equação 13 –	% Portlandita = $(\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}) \times \text{perda de massa } (400^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C})$	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIVIDRO	Associação Brasileira das Indústrias de Vidro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATD	Análise Termodiferencial
ATP	Analizador do Tamanho de Partícula
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CSI	Cement Sustainability Initiative
DRX	Difração de Raios-X
EA	Equivalente alcalino
EPA	Environmental Protection Agency
FEVE	The European Container Glass Federation
FRX	Fluorescência de Raios-X
GCCA	Global Cement and Concrete Association
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
IV	Infravermelho
MC	Metacaulim
MCPV25	Composição binária de metacaulim e vidro com tamanho de partícula < 25 μm
MCPV25x45	Composição binária de metacaulim e vidro com faixa de partículas entre 25 e 45 μm
MCPV45	Composição binária de metacaulim e vidro com tamanho de partícula < 45 μm
MCPV45x75	Composição binária de metacaulim e vidro com faixa de partículas entre 45 e 75 μm
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MMA	Ministério do Meio Ambiente
Pa	Pascal
PV25	Vidro com tamanho de partícula inferior a 25 μm
PV25x45	Vidro com faixa de partículas entre 25 e 45 μm

PV45	Vidro com tamanho de partícula inferior a 45 µm
PV45x75	Vidro com faixa de partículas entre 45 e 75 µm
AS	Sílica ativa
SAPV25	Composição binária de sílica ativa e vidro com tamanho de partícula < 25 µm
SAPV25x45	Composição binária de sílica ativa e vidro com faixa de partículas entre 25 e 45 µm
SAPV45	Composição binária de sílica ativa e vidro com tamanho de partícula < 45 µm
SAPV45x75	Composição binária de sílica ativa e vidro com faixa de partículas entre 45 e 75 µm
SCM	Material cimentício suplementar
SEDIC	Secretaria das Cidades
SEMAS	Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade de Pernambuco
SNIC	Sindicado Nacional da Indústria do Cimento
SNIR	Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos Sólidos
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
TG	Termogravimetria
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	JUSTIFICATIVA	27
1.2	OBJETIVOS	29
1.2.1	Objetivo Geral.....	29
1.2.2	Objetivos Específicos.....	29
1.3	ESTRUTURA DA TESE	30
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	30
2.1	VIDRO: TIPOS E INFORMAÇÕES SOBRE COLETA E RECICLAGEM, E CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E QUÍMICAS	31
2.2	MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES	40
2.3	PRESENÇA DE ÁLCALIS NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS	46
2.4	UTILIZAÇÃO DE VIDRO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	49
2.4.1	Como material cimentício suplementar.....	49
2.4.2	Utilização de pó de vidro em sistemas binários e ternários	52
2.4.3	Concomitantemente como material cimentício e agregado	55
2.4.4	Utilizado como agregado.....	55
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	61
3.1	OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DO VIDRO E DAS ADIÇÕES PRIMÁRIAS	61
3.1.1	Vidro: Natureza, preparo e caracterização preliminar	62
3.1.1.1	Definição do tipo de vidro	62
3.1.1.2	Definição do tamanho de partícula	62
3.1.1.3	Coleta e limpeza das embalagens de vidro	63
3.1.1.4	Produção das partículas de vidro e caracterização granulométrica	64
3.1.1.5	Análise morfológica das partículas de vidro	68
3.1.1.6	Caracterização Estrutural e Composicional.....	68
3.1.1.7	Espectroscopia IV Por Refletância Total Atenuada - ATR.....	70
3.1.1.8	Análises Térmicas.....	71
3.2	CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DAS ADIÇÕES PRIMÁRIAS	72
3.2.1	Caracterização dimensional e morfológica	72
3.2.2	Caracterização estrutural e composicional	73
3.2.3	Espectroscopia IV Por Refletância Total Atenuada – ATR	74

3.2.4	Análise Térmica	75
3.3	CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DO CIMENTO CPV e Ca(OH)_2	75
3.3.1	Caracterização dimensional e morfológica	75
3.3.2	Caracterização estrutural e composicional	77
3.3.3	Espectroscopia de IV Por Refletância Total Atenuada – ATR	78
3.3.4	Análise Térmica	78
3.4	ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS DAS COMPOSIÇÕES	79
3.4.1	Determinação das misturas binárias.....	80
3.4.2	Ensaio no estado anidro	82
3.4.2.1	Densidade	82
3.4.2.2	Caracterização dimensional.....	82
3.4.2.3	Análise composicional.....	82
3.4.2.4	Análise da pozolanicidade por condutividade elétrica	83
3.4.3	Ensaio no estado fresco	83
3.4.3.1	Determinação da consistência normal da pasta	83
3.4.3.2	Flow table	84
3.4.3.3	Calorimetria semi-adiabática.....	84
3.4.3.4	Análise do espalhamento pelo método do minicone.	85
3.4.3.5	Análise reológica das pastas	85
3.4.4	Ensaio no estado endurecido	86
3.4.4.1	Atividade pozolânica	86
3.4.4.2	Pastas cimentícias: Preparação das amostras.....	88
3.4.4.3	Acompanhamento da hidratação	89
3.4.4.4	Análises mecânicas.....	90
3.4.4.5	Índices Físicos	90
3.4.4.6	Análise de difração de raios-X (DRX)	90
3.4.4.7	Espectroscopia de IV Por Refletância Total Atenuada – ATR	90
3.4.4.8	Análise Térmica.....	91
3.4.4.9	Microscopia Eletrônica.....	91
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	94
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ADIÇÕES NO ESTADO ANIDRO.	94
4.1.1	Caracterização dimensional.....	94
4.1.2	Caracterização estrutural	95

4.1.3	Caracterização composicional e equivalente alcalino	97
4.1.4	Caracterização da decomposição térmica	100
4.1.5	Potencial de pozolanicidade das adições unitárias e binárias.....	101
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS ADIÇÕES NO ESTADO ENDURECIDO	103
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS PASTAS	106
4.3.1	Estado fresco	106
4.3.1.1	Estudo da consistência.....	106
4.3.1.2	Calorimetria semi-adiabática.....	107
4.3.1.3	Análise da plasticidade	110
4.3.1.4	Viscosidade.....	114
4.3.2	Estado endurecido	115
4.3.2.1	Cinética da hidratação	115
4.3.2.2	Absorção de água e índice de vazios	117
4.3.2.3	Massa específica e módulo de elasticidade	118
4.3.2.4	Resistência à Compressão	120
4.4	CARACTERIZAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA DAS PASTAS.....	122
4.4.1	Identificação dos eventos térmicos.....	122
4.4.2	Perda de massa e estimativa da concentração de portlandita	123
4.5	COMPOSIÇÃO E MICROESTRUTURA DAS PASTAS	128
4.5.1	Identificação das fases cimentícias.....	128
4.5.2	Fases cimentícias: uma análise localizada	130
4.5.3	Análise microestrutural	133
4.6	RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MICROESTRUTURAIS	139
4.6.1	Efeito do tamanho de partícula no índice de vazios e na resistência à compressão	139
4.6.2	Efeito da absorção de água no diâmetro de espalhamento e módulo de elasticidade	140
4.6.3	Relações entre diâmetro de espalhamento, absorção de água e perda de massa	141
4.6.4	Correlação da resistência à compressão com o índice de vazios e a concentração de portlandita	142
5	CONCLUSÃO.....	144

6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	148
	REFERÊNCIAS.....	149
	APÊNDICE A: Composição química de vidros diversos.....	163

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o tema sustentabilidade ficou evidenciado em indústrias de diversos setores no Brasil e no mundo por conta do mapeamento dos impactos ambientais causados, como por exemplo emissões de CO₂, e pela projeção dos iminentes danos futuros, caso não existam ações para mitigação dos detrimientos resultantes de políticas de crescimento focada apenas no consumo. A produção do clínquer é responsável pela maior parcela da emissão de CO₂ no processo de fabricação no cimento (Ansari; Seifi, 2013). O desenvolvimento sustentável envolve três dimensões sendo a preservação da qualidade e do meio ambiente com base no ciclo de vida, a melhoria da equidade social e qualidade de vida através do acesso à moradia de qualidade, a eficiência econômica (Capmas, 2014).

Em 2016 o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento SNIC (2016) informou que existia no Brasil 100 fábricas produtoras de cimento com capacidade para produção de cem milhões de toneladas por ano, tendo produzido 57 milhões. Já em 2017 houve uma produção de aproximadamente 54 milhões de t (SNIC, 2017), já entre janeiro e abril de 2018 a produção foi aproximadamente 17 milhões de toneladas (SNIC, 2018, 2019). Realizando uma comparação entre indicadores nacionais e internacionais entre 2014 e 2016, a produção de cimento, clínquer, componentes minerais utilizados em cimento Portland, e emissão de CO₂, reduziram no Brasil, enquanto mundialmente houve um crescimento entre 2014 e 2015 seguido de queda em entre 2015 e 2016 (WBCSD, 2016; GCCA, 2023; SNIC 2020, 2023).

Uma vez que o concreto é o material mais fabricado e utilizado no mundo, Helene e Andrade (2010), Isaia (2011), Nonat (2014), GCCA, (2023), utilizar componentes minerais em substituição ao cimento no ato da produção do concreto também contribuem para redução das emissões de CO₂, tendo efeito bastante impactante no que concerne ao meio ambiente e características do material. Várias pesquisas analisaram o desempenho de concretos produzidos com materiais cimentícios suplementares em parceria com o cimento Portland, seja de modo binário, ternário até quaternário. Resultados animadores de estudos do efeito sinérgico da sílica ativa, cinza volante juntamente com o cimento Portland está ocasionando um aumento de utilização de misturas ternárias contendo essas adições minerais (Radlinski; Olek, 2012).

Paris *et al.* (2016) comenta que o exercício de introduzir materiais descartados em produtos de construção, além de reduzir a extração de recursos naturais contribuem para redução do descarte de resíduos em aterros, amenizando o impacto ambiental da indústria da construção civil. Ainda segundo o autor a introdução de resíduos como suplemento ou substituição ao aglomerante na produção de um concreto, seria a aplicação mais desejada do ponto de vista ambiental (Paris *et al*,

2016). O resíduo de vidro sodocálcico se apresenta como uma alternativa viável para atender essas questões.

O resíduo de vidro pode ser oriundo de diversas fontes como garrafas de bebidas, recipientes e utensílios domésticos e hospitalares, tubos de raios catódicos, lâmpadas, entre outros. O vidro comum é um sólido amorfo constituído essencialmente por sílica (SiO_2), e menores concentrações de óxidos alcalinos de sódio (Na_2O), cálcio (CaO) e potássio (K_2O). Smith e Hashemi (2012a) afirmam que o vidro é um material cerâmico constituído por materiais inorgânicos que possui estrutura cristalina amorfa, sendo os vidros sodo-cáustico o tipo mais comum que compreendem por exemplo vidros planos e louças sopradas e pressurizadas. Ele é classificado como um resíduo da construção civil classe B, de acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil, 2002).

Segundo o ITEP (2012), o vidro apresenta 2,69% da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos, ocupando a quarta colocação entre os resíduos recicláveis, liderado pelo plástico, papel/papelão e o metal ferroso. Ainda segundo o relatório de resíduos sólidos, devido à falta de comercialização de produtos recicláveis o estado aproximadamente deixa de arrecadar mensalmente R\$ 40 milhões (ITEP, 2012). Numa estimativa nacional em 2008 o vidro ocupava posição similar ao levantamento estadual, com a participação de 2,4% na composição gravimétrica dos resíduos recicláveis, liderado pelo plástico, papel/papelão e os metais ferrosos (Brasil, 2012).

Os resíduos de vidro sodocálcico possuem algumas características químicas que se assemelham a de pozolanas clássicas destacando-se o teor de $\text{SiO}_2 > 70\%$, percentual de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ superior à 70%, perda ao fogo $\leq 6\%$. Essas características tornam o resíduo de vidro um potencial material pozolânico. O elevado teor de álcalis de Na e K presente no vidro sodocálcico é o principal ponto que diverge das adições clássicas. Os trabalhos existentes na literatura indicam que em média os vidros sodocálcicos apresentam teor de álcalis superior à 10%, enquanto as adições clássicas dificilmente ultrapassam teores de 3%.

Desde que o vidro começou a ser utilizado como constituinte do concreto ele foi utilizado como material cimentício suplementar em substituição ao cimento como por exemplo os trabalhos realizados por Schwarz, Cam e Neithalath (2008), Kara, Korjakins e Kovalenko (2012) e Rodier e Savastano (2018), utilizado como agregado conforme as pesquisas de Shayan e Xu (2004) e Lam, Poon e Chan (2007) e simultaneamente como material cimentício e agregado como os estudados por Cassar e Camilleri (2012) e Du e Tan (2013). Também existem contribuições em que o pó de vidro foi utilizado em conjunto com outros materiais cimentícios suplementares, como por exemplo os trabalhos de Nassar e Soroushian (2012), Khmiri, Chaabouni e Samet (2013). No entanto não existem contribuições que tratem especificamente de um método para utilizar

partículas de vidro sodocálcico, limitando-se em analisar o efeito do pó de vidro em comparações com outras adições, em percentuais de utilização convencionalmente predeterminados. Também são necessárias mais contribuições relativas à reprodução de micropartículas de vidro, além da contribuição do tamanho da partícula nos produtos cimentícios. Sendo assim, se justifica a realização de pesquisas que investiguem métodos que venham a contribuir para modo mais eficiente de utilizar resíduos de vidro sodocálcico.

1.1 JUSTIFICATIVA

Esta Tese está baseada na defesa da utilização do pó de vidro, de modo unitário ou incorporado a outro material cimentício suplementar, observando o método mais eficiente de utilização deste resíduo, visando agregar valor para aumentar o estímulo à utilização além de contribuir para a literatura do tema. É imprescindível uma sólida e ampla fundamentação em temas relacionados à utilização do vidro oriundo de resíduos empregado em compósitos cimentícios, englobando características físicas e mecânicas, durabilidade e microestrutura. Também é importante conhecer dados da geração de vidros de embalagens uma vez que essa tese propõe reutilizar um resíduo com baixa taxa de reciclagem e elevado teor de álcalis como material cimentício suplementar substituindo parcialmente o cimento Portland ou em conjunto com adições clássicas que possui custo de aquisição superior ao cimento.

A utilização de pozolanas convencionais como sílica ativa e metacaulim visam melhorar características mecânicas e de durabilidade das misturas, porém devem ser utilizadas em proporções adequadas para obtenção de máxima eficiência e viabilidade econômica. O custo para utilização de adições minerais ativas é elevado, sendo um dos motivos de estudos de dosagem para correta especificação da pozolana e percentual ótimo de utilização. No Brasil as principais pozolanas possuem preço final ao consumidor muito superior ao cimento, chegando até 4,5 vezes o preço do cimento quando vendido para o consumidor comum. Uma maneira de contribuir para redução do custo é incorporando resíduos com características semelhantes como por exemplo o vidro. Existem poucas pesquisas que utilizaram composições pozolânicas constituídas por duas ou mais adições, sendo considerada um único material composto. Sendo assim, é de fundamental importância que existam estudos que analisem a formulação de misturas pozolânicas a eficiência do método, além de buscar um melhor entendimento sobre como as partículas de vidro interagem com as outras adições.

Estudos analisaram a utilização simultânea de materiais cimentícios suplementares em composições binárias, ternárias e quaternárias de compósitos cimentícios, como por exemplo a

pesquisa de Gesoğlu, Güneyisi e Özbay (2009) que analisou combinações quaternárias. Nochaiya, Wongkeo e Chaipanich (2010) e Radlinski e Olek (2012), relataram a contribuição simultânea das adições quando utilizadas em composições binárias, ternárias e quaternárias.

Também foram investigados a utilização de pó de vidro em conjunto com outras adições compondo sistemas binários, ternários e quaternários, como por exemplo os trabalhos de Schwarz, Cam e Neithalath (2008), Afshinnia e Rangaraju (2015), Siad *et al.* (2016), Soliman e Tagnit-Hamou (2016), Omran *et al.* (2017), Ramakrishnan *et al.* (2017) e, Bazhuni, Kamali e Ghahremaninezhad (2018). Entretanto, nesses trabalhos não foram utilizados métodos específicos para utilização do pó de vidro, justificando pesquisas que investiguem métodos para essas formulações. Outra questão é que as contribuições relativas à produção de micropartículas de vidro são insuficientes para ratificar um método para produção do pó de vidro.

A utilização do vidro em elevados teores devem ser cautelosa devido aos elevados teores de Na_2O e K_2O , podendo resultar num composto cimentício com elevado teor álcalis. O pó de vidro oriundo de recipientes de embalagens coloridas apresenta características físico-químicas mais compatíveis com outras adições pozolânicas do que com o cimento Portland, como por exemplo densidade e teor de SiO_2 , existindo maior possibilidade de serem compatíveis com outras das adições. Sendo assim, a fixação do teor de equivalente alcalino presente na mistura binária, como critério de dosagem, é uma possibilidade de mitigar efeitos negativos correlacionados com a presença desses metais alcalinos.

O fato de as embalagens de vidro serem facilmente encontradas e ter baixo custo de reciclagem é uma motivação para transformá-lo em pó de vidro visando sua incorporação em misturas cimentícias, e consequentemente incorporando valor ao produto gerando mais incentivos para seu tratamento e redução de impactos ambientais. Por fim a questão dos custos é bastante oportuna, pois o pó de vidro produzido seria de custo inferior as adições convencionais, provavelmente sendo mais vantajoso quando incorporado à adição mineral que ao cimento, visto que o material cimentício suplementar é o produto mais oneroso, resultando na redução relevante dos custos do compósito.

Sendo assim, diante da problemática apresentada essa Tese tem a finalidade de estudar o efeito do tamanho de partícula e da natureza pozolânica das adições nas propriedades físicas e microestruturais de pastas cimentícias preparadas com baixa dosagem de resíduos de vidro, sílica ativa e metacaulim. Diante desse propósito se justificam investigações que contribuam para um método eficiente para formular a produção de materiais cimentícios suplementares binários, além de contribuir para um melhor entendimento sobre a interação das partículas de vidro com as outras adições. Da mesma forma se justificam os estudos sobre as operações de produção de partículas

finas de vidro, e da influência do tamanho da partícula de vidro no estado anidro, fresco e endurecido. Finalmente contribuindo para o entendimento sobre a maneira mais eficiente de utilizar o pó de vidro, seja substituindo diretamente o cimento Portland ou incorporado aos materiais cimentícios suplementares.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar investigações que contribuam para o entendimento do efeito do tamanho de partícula e da natureza pozolânica das adições no estado anidro, fresco e endurecido e nas propriedades físicas e microestruturais de pastas cimentícias preparadas com adições unitárias, de vidro, sílica e metacaulim e binárias sílica-vidro e metacaulim vidro, formuladas a partir do equivalente alcalino, analisando a eficiência do método de dosagem de misturas binárias, contribuindo para um melhor entendimento sobre as operações de produção de partículas finas de vidro.

1.2.2 Objetivos Específicos

Em função das considerações iniciais, motivações e justificativas que norteiam essa Tese foi necessário construir os seguintes objetivos específicos.

Propor operações de moagem mapeando os processos necessários para reprodutibilidade e obtenção das respectivas faixas das partículas de vidro.

Investigar o efeito do tamanho da partícula de vidro nas características do estado anidro, fresco e endurecido dos compósitos cimentícios produzidos com este material.

Observar possíveis alterações na caracterização física, dimensional, composicional, estrutural e microestrutural das adições unitárias e binárias e das respectivas pastas preparadas com esses materiais.

Investigar através de ensaios físicos, da decomposição térmica, de análises estruturais e microestruturais a influência do tamanho da partícula e da natureza do vidro na contribuição para a hidratação da matriz e pozolanicidade das pastas formadas preparadas com adições unitárias e binárias.

Analisar a eficiência do método proposto para formulação das adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.

Investigar a maneira mais eficiente de utilizar o pó de vidro seja como substituto do cimento ou incorporado a outro material cimentício suplementar.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O capítulo 1 trata da introdução, justificativa, e objetivos da Tese.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica contemplando informações sobre resíduos de vidro no Brasil e no mundo, composição química e estrutura. Em seguida uma revisão sobre materiais cimentícios suplementares, presença de álcalis nos materiais cimentícios e aplicações do pó de vidro em compósitos cimentícios, apresentando os trabalhos e conceitos que fundamentaram a pesquisa.

O capítulo 3 está dividido em duas partes a primeira a caracterização preliminar contemplando as adições suplementares e dos aglomerantes contemplando análise granulométrica, composicional, estrutural, morfológica e térmica. A segunda parte descreve os procedimentos para realização de investigações no estado fresco, anidro e endurecido das pastas produzidas com as adições unitárias e binárias, contemplando ensaios físicos, mecânicos, estruturais, composicionais, térmicos e microestruturais.

O capítulo 4 estão os resultados e discussões sendo iniciado pela análise isolada dos materiais binários, e depois a análise das pastas no estado anidro, fresco e endurecido.

O capítulo 5 contempla as conclusões e considerações sobre trabalhos futuros.

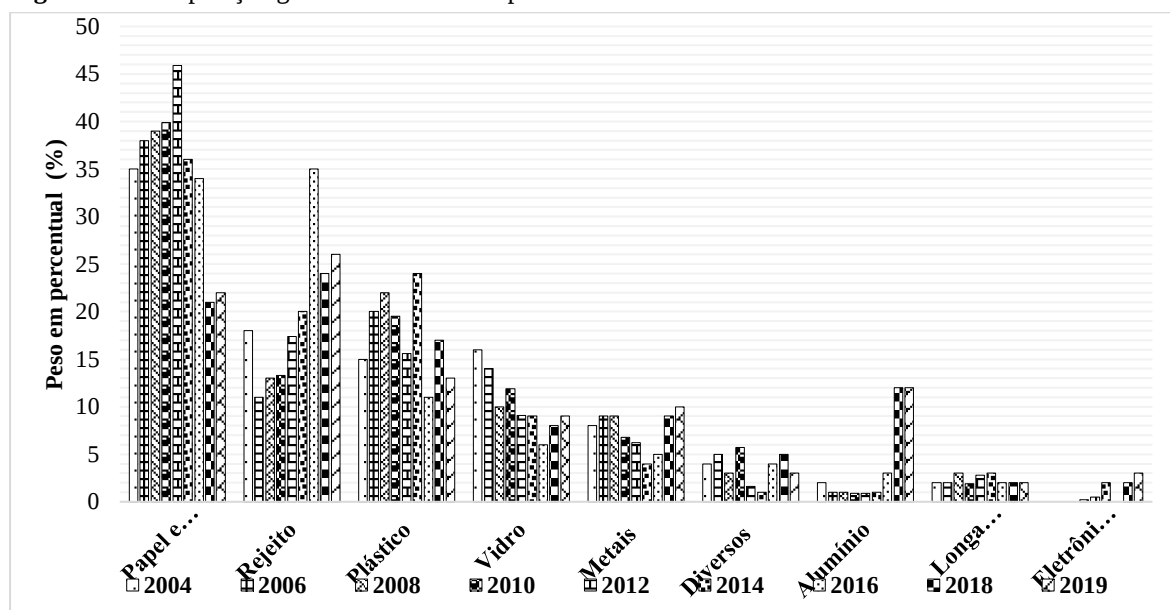
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 VIDRO: TIPOS E INFORMAÇÕES SOBRE COLETA E RECICLAGEM, E CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E QUÍMICAS

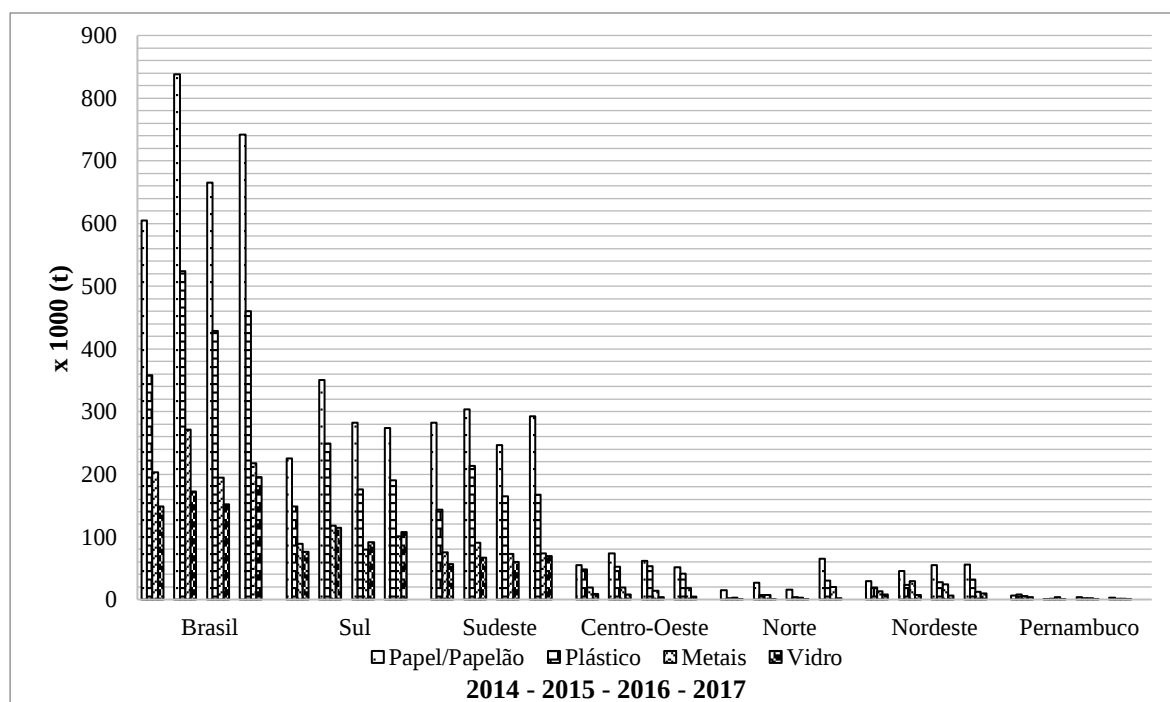
As embalagens e recipientes de vidro são um dos principais produtos geradores de resíduos no mundo, por diversos motivos que envolvem ausência de programas governamentais, poucos incentivos para reciclagem. O vidro é o material cerâmico mais consumido na forma de recipientes, possuindo matéria prima básica em abundância e de baixo custo, com processo de reciclagem que exige muita segregação, resultando em baixo preço de reciclagem (Callister Júnior; Rethwisch, 2018a). Os vidros sodocálcicos são os mais frequentes e compreendem 90% de toda produção vítrea segundo Smith e Hashemi (2012a), sendo os mais conhecidos os vidros de embalagens e recipientes domésticos. De acordo com a ABIVIDRO (2019), para fabricação desses tipos de vidro são utilizados 65% de areia, 20% de barrilha (rica em sódio), 10% de calcário e 5% de outros materiais.

Uma estimativa do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2012) apontou que em 2008 o vidro era o quarto resíduo mais produzido no país, entre os materiais recicláveis, com participação de 2,4%, sendo gerado 4.388,60 t/dia equivalente a 1.601,838 t/ano, enquanto a quantidade recuperada por programas oficiais de coleta seletiva se aproxima de 50.900,00 t/ano, indicando uma taxa de reciclagem de 10,4%. O levantamento realizado na região de desenvolvimento metropolitana de Pernambuco, apresentou o percentual gerado de resíduos sólidos urbanos recicláveis presentes na coleta seletiva, indicando o vidro com um percentual de 2,8%, próximo do metal com 2,6% e atrás do plástico e papelão/papel com 12,3% e 8,1% respectivamente (Pernambuco; SEDIC, 2018). Observa-se que a presença do vidro na composição gravimétrica teve um aumento aproximado de 17% entre os anos de 2010 e 2018.

Em análise mais detalhada o relatório CICLOSOFT produzido pelo CEMPRE, entre os biênios de 2004 a 2020 também apresenta o vidro como o quarto componente mais presente na composição gravimétrica da coleta seletiva, apresentando um percentual de participação de 20% em 2004 e 9% em 2019. conforme a figura 1 (CEMPRE, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018). De acordo com a figura 1 o vidro está atrás do papel/papelão, rejeitos e do plástico, apresentando patamares próximos dos metais.

Figura 1 – Composição gravimétrica dos componentes da coleta seletiva.

Fonte: CEMPRE – síntese de dados presentes no CICLOSOFT referente aos biênios de 2004 a 2020.

Figura 2 – Resíduos recicláveis presentes na coleta seletiva.

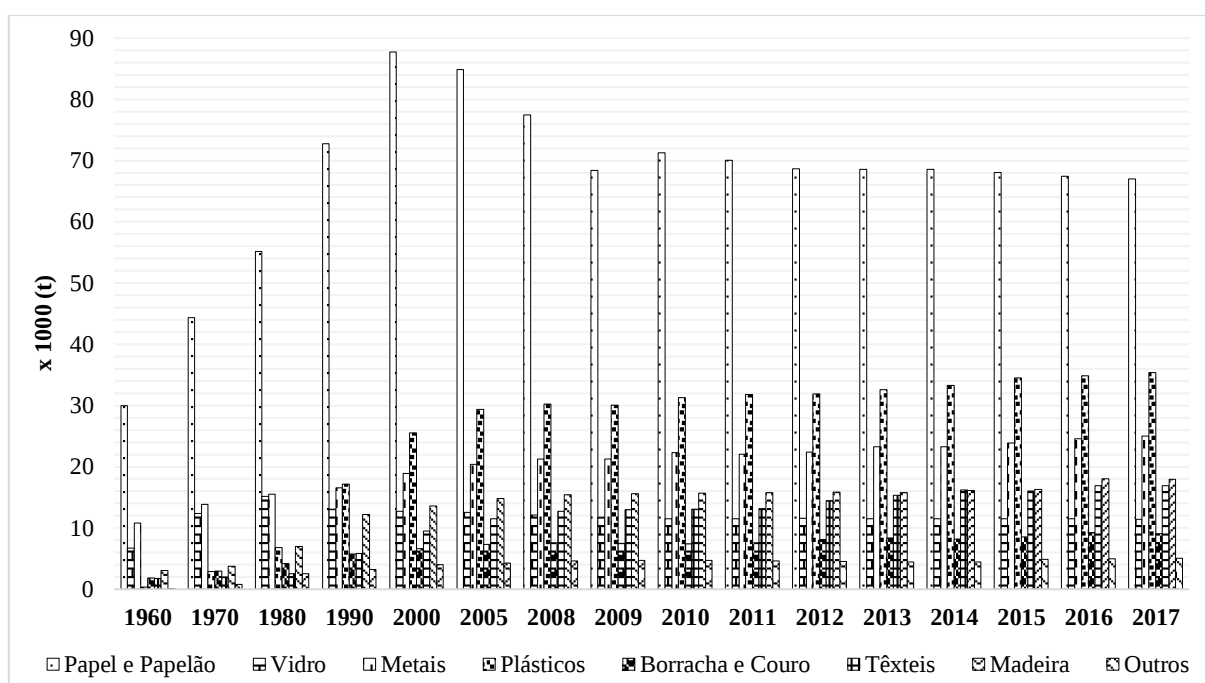
Fonte: MMA, SNIR – Síntese de dados presentes no SNIS.

Analisando informações governamentais entre os anos de 2014 e 2017 do Ministério do Meio Ambiente - MMA através do Sistema nacional de informações sobre gestão de resíduos sólidos – SNIR, sobre a produção de resíduos recicláveis presentes na coleta seletiva, observa-se que o vidro possui uma participação inferior a 200.000 t/ano no Brasil, ficando atrás do papel/papelão, plástico e dos metais. Conforme a figura 2 as regiões Sul e Sudeste apresentam

maior quantidade de vidro coletado, com quantidades variando entre 80.000 t/ano e 100.000 t/ano, enquanto as demais regiões apresentaram quantidade inferior a 10.000 t/ano.

De acordo com os dados presentes nos relatórios de avanço sustentável de gestão de materiais dos anos de 2012 a 2017, da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – EPA, foi possível sintetizar informações sobre o fluxo de resíduos municipais entre as décadas de 1960 e 2000, do ano de 2005 e entre os anos de 2008 e 2017 (EPA, 2014, 2015, 2016). De acordo com a figura 3, o vidro oscilou entre o terceiro e o quarto resíduo mais gerado entre as décadas de 1960 e 2000. A partir de 2005 ele oscilou entre o sexto e o sétimo resíduo mais presente, sendo o papel/papelão e plástico os resíduos mais frequentes.

Figura 3 – Fluxo de resíduos municipais - Geração de resíduos EUA.



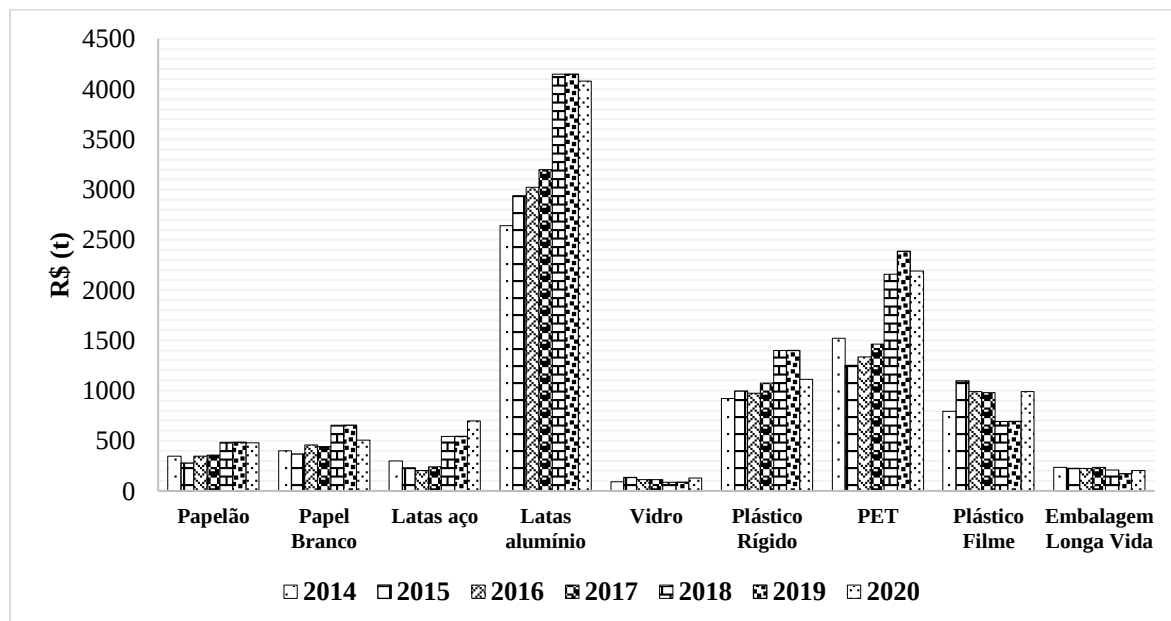
Fonte: EPA – Síntese de dados presentes nos relatórios de avanço sustentável de gestão de materiais dos anos de 2012 a 2017.

O plano de resíduos sólidos do Estado de Pernambuco apontou que o vidro é o quarto resíduo mais presente na composição gravimétrica em 2010 com 2,69%, apresentando o valor de R\$ 150,00/t, sendo o resíduo de menor valor, atrás do papelão e do metal ferroso com R\$ 300,00/t, do PET com R\$ 1.600,00/t e do alumínio tendo valor de R\$ 2.800,00/t (ITEP, 2012).

Estudos realizados pelo Compromisso Empresarial para Reciclagem - CEMPRES, entre os anos de 2014 e 2020 (CEMPRES, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020), mostram que o vidro é o resíduo presente na coleta seletiva com menor valor de reciclagem, sendo o único resíduo que não ultrapassou o valor médio R\$200,00. As latas de alumínio e as embalagens PET são os resíduos mais valorizados. As informações presentes nas figuras 4 e 5, corroboram com os dados

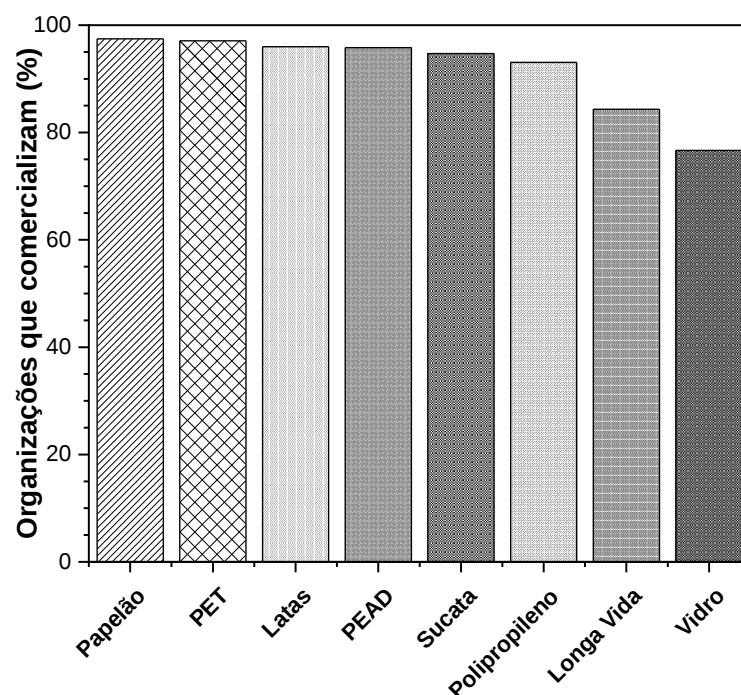
do plano de resíduos sólidos do Estado de Pernambuco.

Figura 4 – Valor de reciclagem dos resíduos presentes na coleta seletiva.



Fonte: CEMPRE – síntese de dados referente aos anos de 2014 a 2020.

Figura 5 – Distribuição dos resíduos comercializados por organizações.

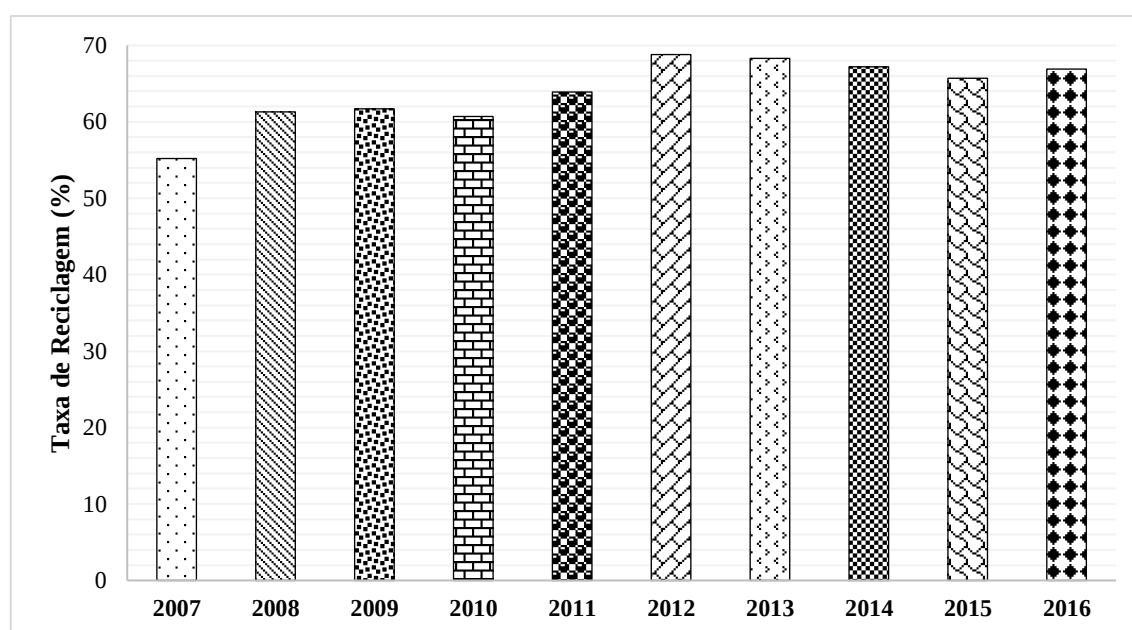


Fonte: CEMPRE – CICLOSOFT (2020).

Em 2008 12,2 milhões de toneladas de resíduos de vidro foram gerados nos EUA, (Rajabipour; Maraghechi; Fischer, 2010). Três milhões de toneladas de resíduos de vidro são produzidos todos os anos no Reino Unido (Liu, 2011).

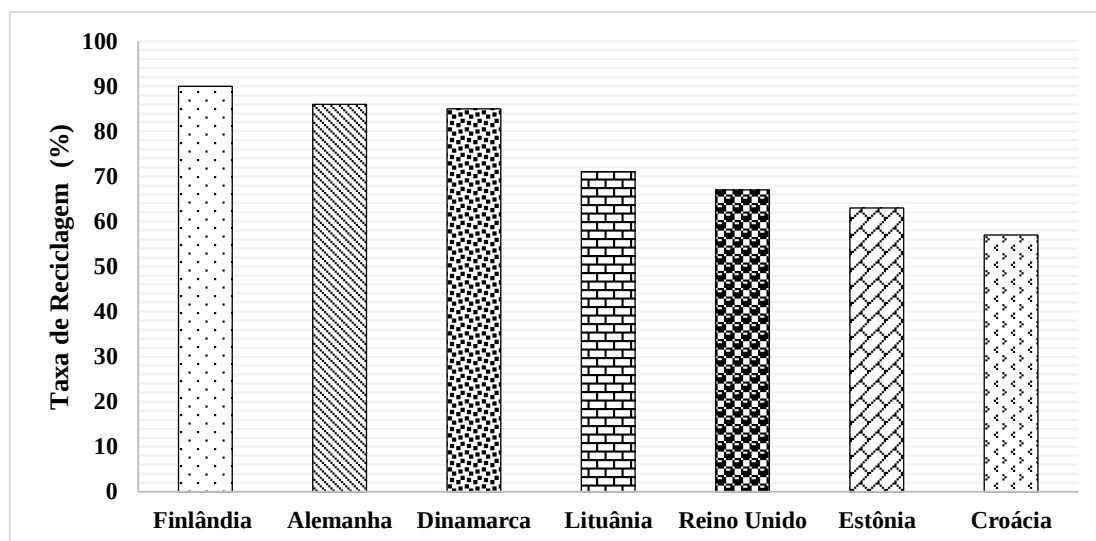
De acordo com a FEVE (2010) 11 milhões de toneladas de embalagens de vidro são recolhidos para reciclagem na União Europeia, sendo equivalente a 67% das embalagens produzidas. A Diretiva (UE) 2018/852 (2018) estabeleceu como meta que até 31 de dezembro de 2025 que 70% das embalagens de vidro devem ser recicladas, alcançando 75% até 31 de dezembro de 2030 (Parlamento Europeu, 2018). Em 2019, a taxa de reciclagem de embalagens de vidro na Escócia era de 64% enquanto a meta do reino unido foi de 79% (Peter, 2019). De acordo com a consulta sobre a reforma do sistema de responsabilidade do produtor de embalagens do Reino Unido UK (2019), as metas de reciclagem para embalagens de vidro entre os anos de 2018, 2019 e 2020 foi de 68,2% 69,1% e 70,0% respectivamente. A consulta também informa que as metas de reciclagem do Reino Unido dessas embalagens em 2025 e 2030 serão de 82%.

Figura 6 – Taxa de reciclagem de embalagens de vidro no Reino Unido.



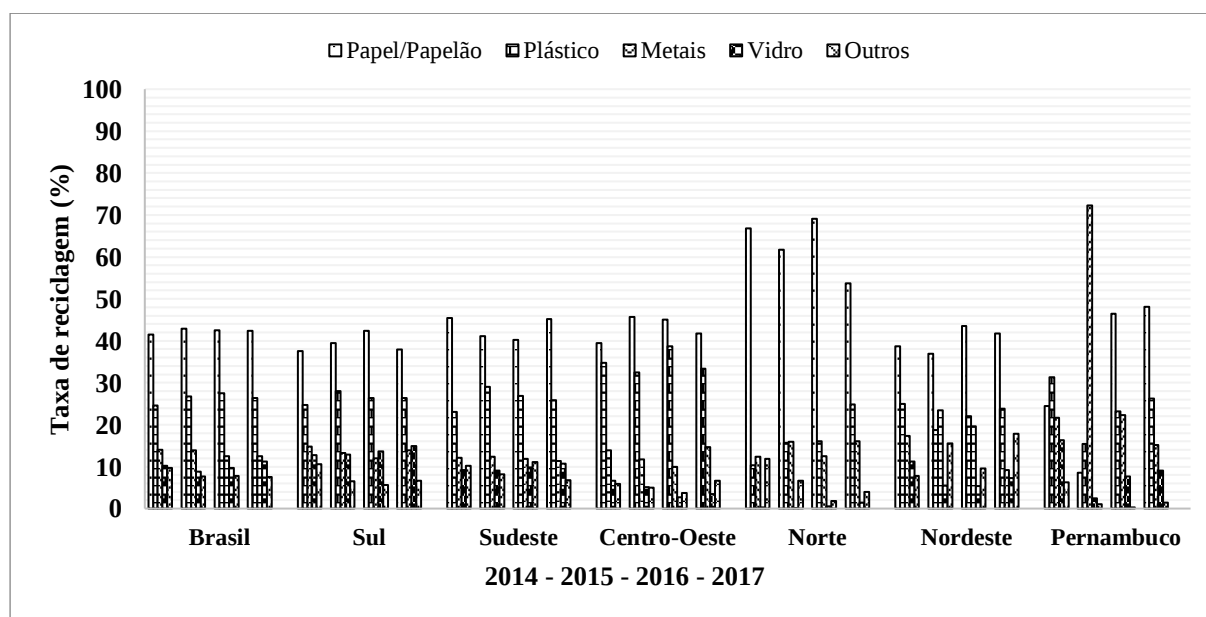
Fonte: Peter (2019) – Relatório de reciclagem de embalagens na Escócia.

As figuras 6 e 7 apresentam as taxas de reciclagem de embalagens de vidro do Reino Unido e de Países Europeus. No Reino Unido a taxa de reciclagem entre os anos de 2007 e 2016 variou entre 55% e 70%, enquanto no ano de 2016 a Croácia obteve a menor taxa de reciclagem com 57% e a Finlândia foi a nação com maior taxa de reciclagem com a marca de 90%. Esses números são bastante superiores aos índices de reciclagem existentes no Brasil e nos EUA.

Figura 7 – Taxa de reciclagem de embalagens de vidro 2016 em países Europeus.

Fonte: Peter (2019) - Relatório de reciclagem de embalagens na Escócia.

As figuras 8 e 9 apresentam as taxas de reciclagem dos itens presentes na coleta seletiva no Brasil e em aterros nos EUA. No Brasil entre os anos de 2014 e 2017 a taxa de reciclagem de embalagens de vidro se manteve próximo de 10%, é notável que o vidro é o resíduo de menor taxa de reciclagem entre os destacados, enquanto o papel/papelão apresentou taxa de reciclagem neste mesmo período superior a 40%. A região Sul apresentou a maior taxa de reciclagem neste período com valores variando entre 10 e 15%. A região Norte apresentou índices de reciclagem próximo de 1%. O estado de Pernambuco superou a região nordeste, com exceção do ano de 2015.

Figura 8 – Taxa de reciclagem de itens presentes na coleta seletiva.

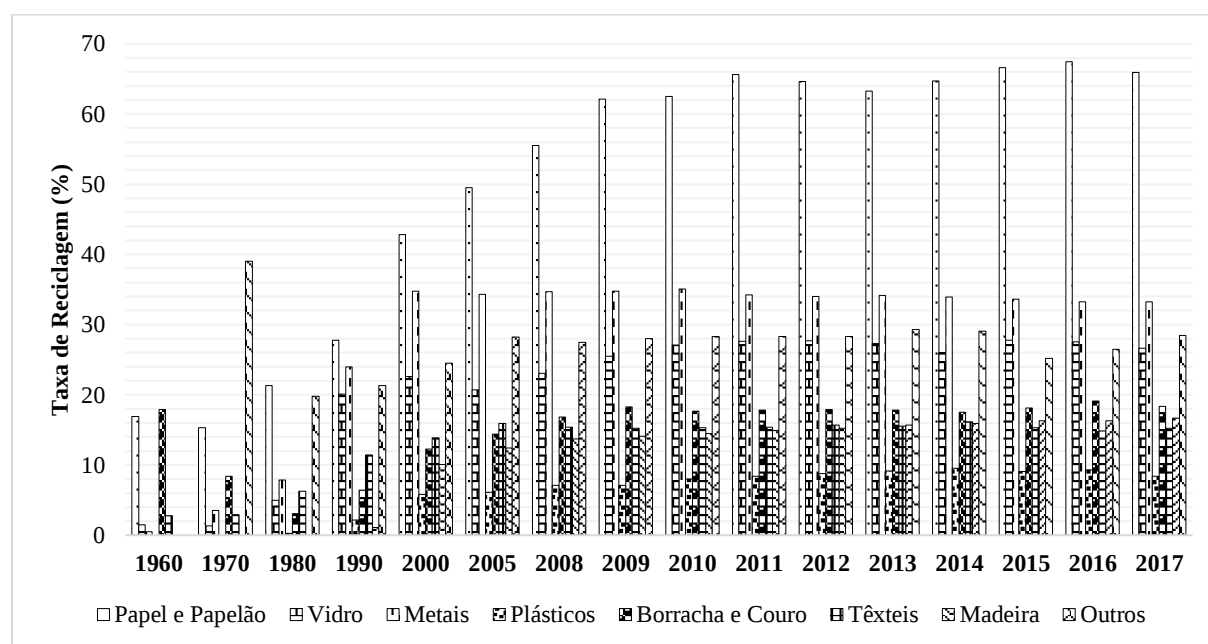
Fonte: MMA, SNIR – Síntese de dados presentes no SNIS.

Em análise aos dados dos resíduos sólidos domésticos nos EUA, entre as décadas de 1960

e 2000 a taxa de reciclagem do vidro saltou de 1,5% para 22%. Entre os anos 2005 e 2017 variou entre 20% e 27%. A maior taxa de reciclagem é do papel/papelão sendo superior a 50% a partir de 2005. Entre os resíduos destacados, até os anos 1980 o vidro apresentou uma das menores taxas, entre 1990 e 2014 apresentou a quarta maior taxa de reciclagem. Nos anos de 2015 e 2016 alcançou a terceira colocação e em 2017 voltou a quarta posição (EPA, 2015, 2018, 2019).

A taxa de reciclagem de embalagens de vidro no Brasil de acordo com o MMA, SNIR (2014 – 2017), ficou próxima dos 10% (Brasil, 2020), os EUA alcançaram uma média superior a 20% no mesmo período, alguns países Europeus como a Finlândia alcançaram uma taxa de reciclagem de 90%, enquanto o Reino Unido foi de 67% em 2016. Esses números mostram uma grande diferença entre a reciclagem praticada de embalagens de vidro praticadas no Brasil e em outros países, ratificando a importância de estudos que contribuam para soluções de reciclagem desse material e consequentemente aumentando a taxa de reciclagem.

Figura 9 – Fluxo de resíduos municipais - Recuperados EUA.



Fonte: EPA – Síntese de dados presentes nos relatórios de avanço sustentável de gestão de materiais dos anos de 2012 a 2017.

O vidro é um material com amplas aplicações em diversos setores industriais sendo um dos materiais mais geram resíduos no mundo. Sichieri, Caram e Santos (2010) explicam que o vidro é obtido pelo resfriamento de uma mistura inorgânica em fusão que enrijece sem cristalizar, sendo classificados em função da composição química em sodocálcicos, borosilicato, ao chumbo e aluminoborosilicato.

Essa definição corrobora com a de Smith e Hashemi (2012a), que conceituaram o vidro como um material cerâmico oriundo de materiais inorgânicos a altas temperaturas, sendo definido como produto a fusão de massa inorgânica que após resfriamento atingiu uma forma rígida sem

cristalização. O aquecimento dos constituintes até o ponto de fusão, seguido resfriamento até o estado rígido sem existir cristalização, diferenciam o vidro das demais cerâmicas (Smith; Hashemi, 2012b). Newell (2015) afirma que a ausência de estrutura cristalina difere os vidros da maioria dos materiais sólidos. A tabela 1 apresenta uma breve composição química dos vidros sodocálcicos, objeto dessa pesquisa, apresentada por Smith e Hashemi (2012a) e Newell (2015).

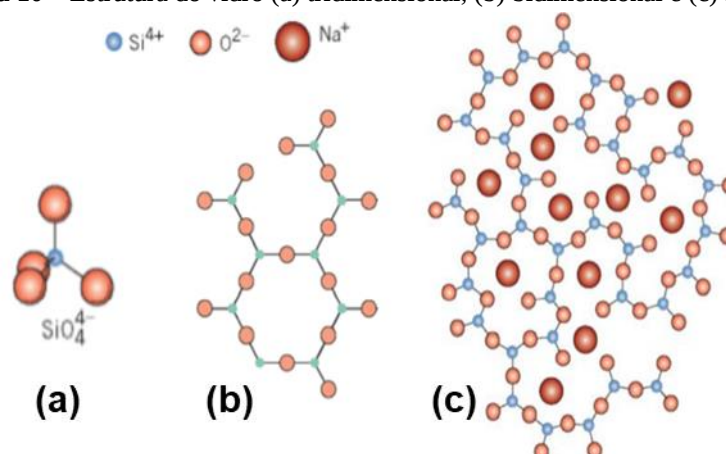
Tabela 1 – Composição básica de vidros sodocálcicos.

(%) Óxidos constituintes	Autores	
	Smith e Hashemi (2012)	Newell (2015)
SiO₂	71 – 73	72
Al₂O₃	0,5 1 1,5	1,8
CaO	10 – 12	7,8
K₂O		< 1
Na₂O	12 – 14	14
MgO	1 – 4	-
Li₂O	-	1
BaO	-	< 1

Fonte: Adaptado de Smith e Hashemi (2012a) e Newell (2015).

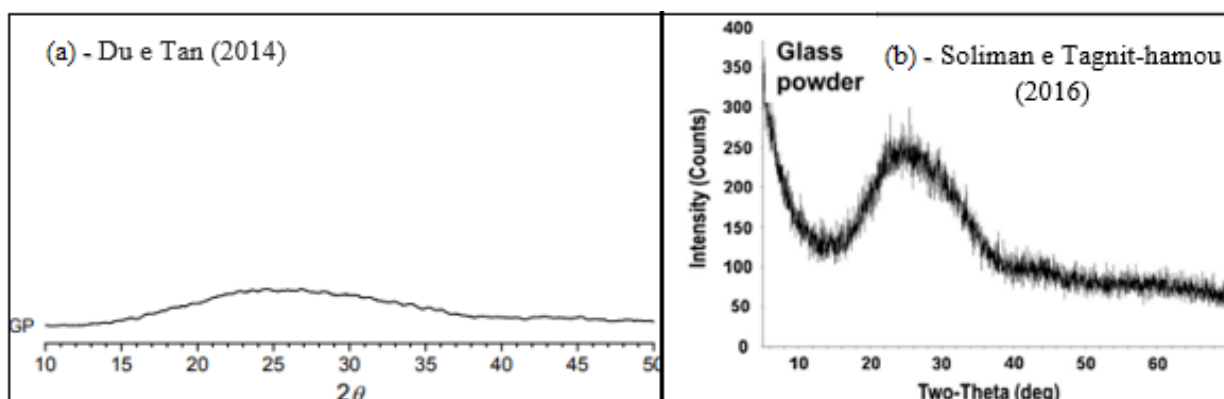
Callister Júnior e Rethwisch (2018a, 2018b) explicam o vidro como pertencente a um grupo de cerâmica, contendo silicatos não cristalinos, possuem arranjo atômico irregular, com outros óxidos como de cálcio, sódio, potássio e alumina. Como tipos de vidros comerciais o autor cita o de sílica fundida, vyvor, borosilicato, sococálcio, fibra de vidro, sílex óptico e o vitrocerâmico. A figura 10 apresenta um modelo para o (SiO₂) cristalino e amorfo.

Figura 10 – Estrutura do vidro (a) tridimensional, (b) bidimensional e (c) amorfa.



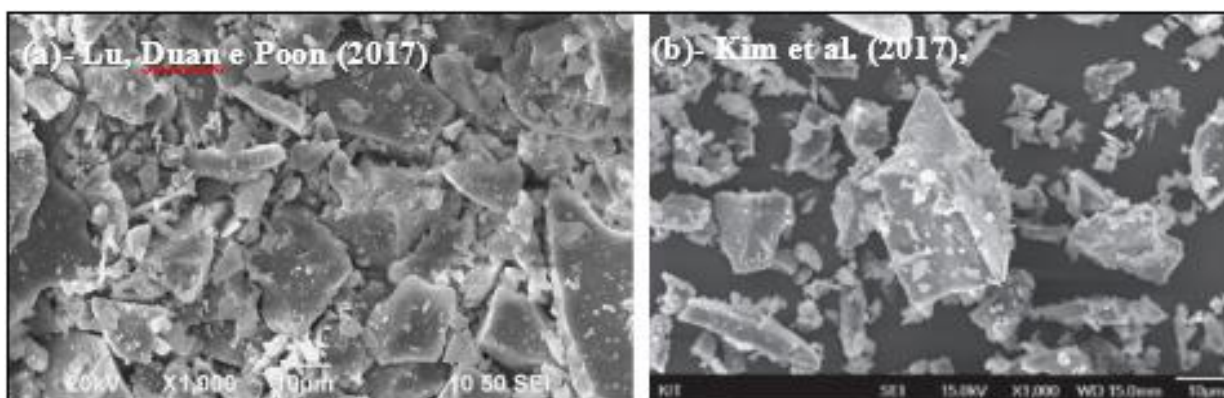
Fonte: Adaptação de Callister Júnior e Rethwisch (2018a).

Nota-se a existência do tetraedro de silício nas duas situações, porém fica evidente a desordenação da estrutura na condição amorfa (Callister Junior; Rethwisch, 2018a). A figura 11 apresenta um difratograma evidenciando a característica amorfa do vidro.

Figura 11 – Difratoograma de partículas de vidro.

Fonte: Adaptado de Du e Tan (2014) e Soliman e Tagnit-Hamou (2016).

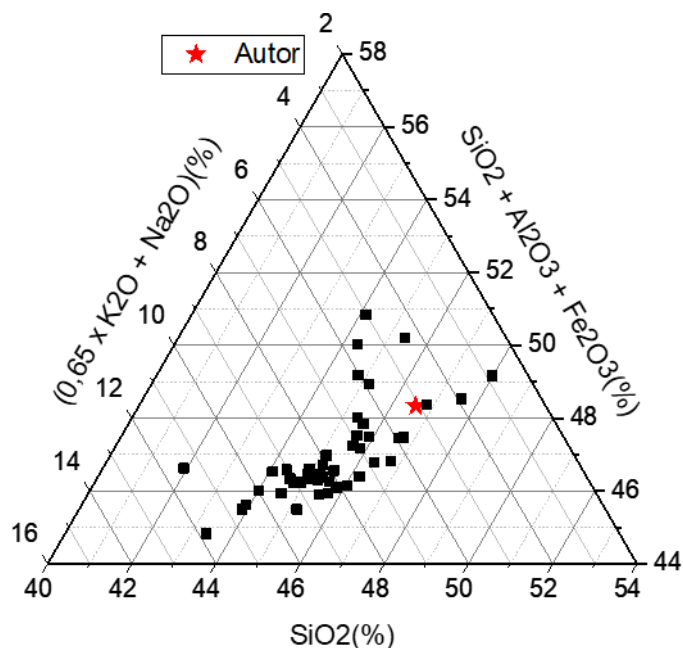
Já a figura 12 apresenta a micrografia de partículas de vidro destacando sua angularidade.

Figura 12 – Micrografias eletrônicas do pó de vidro com ampliações de 1000 x.

Fonte: Adaptado de Lu, Duan e Poon (2017a) e Kim *et al.*, (2017).

A figura 13 apresenta um gráfico ternário que contempla os constituintes óxidos pozolânicos SiO_2 e $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ e equivalente alcalino ($\text{Na}_2\text{O} + 0,65 \times \text{K}_2\text{O}$), a partir de dados coletados em 30 publicações entre 2001 e 2018 que utilizaram diversos tipos de vidro em compósitos cimentícios. Estes trabalhos estão presentes nas tabelas que constam nos apêndices. Os indicadores do autor também constam no gráfico. Observa-se que o material utilizado nessa pesquisa se destaca pelo baixo teor de equivalente alcalino, e elevado teores de SiO_2 e $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, quando comparados com outros tipos de vidros utilizados.

Figura 13 – Teores de constituintes pozolânicos e equivalente alcalino.



Fonte: Adaptado dos autores presentes no apêndice.

Em síntese observamos que o vidro está entre os cinco resíduos sólidos domésticos com potenciais de reciclagens mais produzidos pela população Brasileira, e entre os seis resíduos mais presentes nos Estados Unidos. Outra informação importante é que o resíduo de vidro apresenta menor valor de reciclagem dentre os presentes na coleta seletiva além de ser o que apresenta menor quantidade de organizações que comercializam esse tipo de material. A soma desses fatores justifica a continuidade desse, estudo visando contribuir para uma maior utilização do resíduo de vidro, incorporando valor e consequentemente maior estímulo à comercialização.

2.2 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

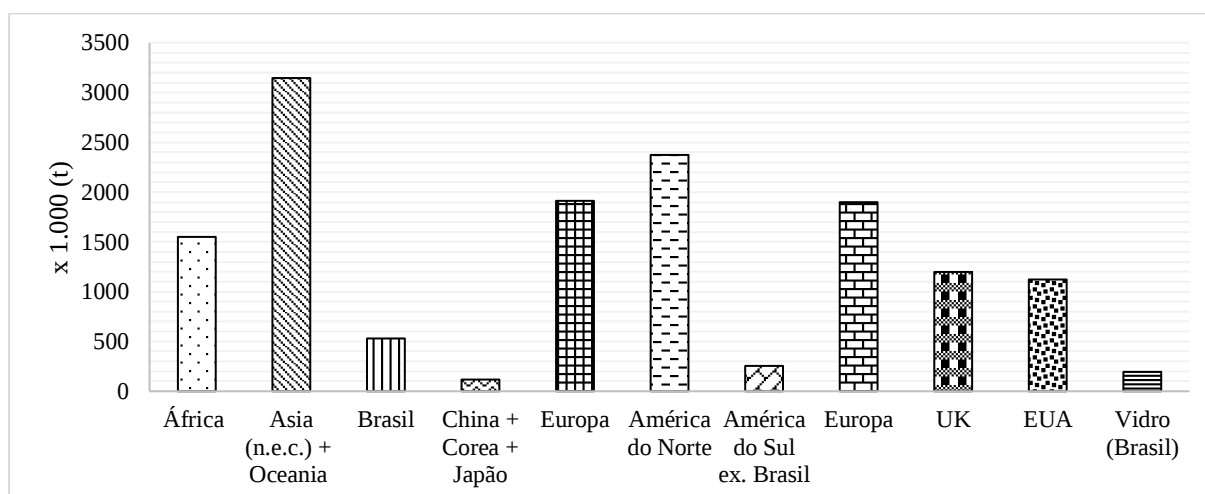
Os materiais cimentícios suplementares podem ser oriundos de resíduos industriais como a sílica ativa, cinza volante e a escória de alto forno, ou ser resultante do tratamento de uma matéria prima natural como o caso do metacaulim. Geralmente são utilizados em substituição ao clínquer na produção de cimento ou em substituição ao cimento na produção de concreto. As vantagens de utilização desses materiais estão relacionadas à redução da emissão de CO_2 na fabricação do cimento e melhorias das características macro e microestruturais de concretos. Larrard (2011) considera que os materiais cimentícios suplementares abrangem as adições pozolânicas como sílica ativa, metacaulim, cinza volante, materiais cimentantes como a escória e o fíler calcário. A tabela 2 apresenta a classificação geral das adições suplementares.

Tabela 2 – Classificação dos materiais cimentícios suplementares.

CLASSIFICAÇÃO	MATERIAIS
Cimentantes	Escória de alto forno
Cimentantes / Pozolânicos	Cinza volante com alto teor de cálcio
Pozolanas altamente reativas	Sílica ativa / cinza da casca de arroz
Pozolanas comuns	Metacaulim / cinza volante de alto teor de cálcio
Pozolanas naturais	Vidros vulcânicos / Tufos vulcânicos / folheados calcinados / terras diatomáceas

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014b).

Metha e Monteiro (2014b) consideram as adições minerais como materiais silicosos que podem ser utilizados no concreto em teores que variam de 6 até 70% da massa total de cimento do material cimentício. A figura 14 apresenta o total de adições minerais utilizados em substituição ao cimento em diversas regiões no mundo entre 1990 e 2018. Observa-se que o Brasil gerou apenas em 2017 195.000,00 t de vidro equivalente de 1/3 da massa de adições minerais.

Figura 14 – Total de adições utilizados como substituto do cimento entre 1990 e 2018.

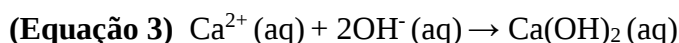
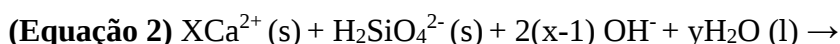
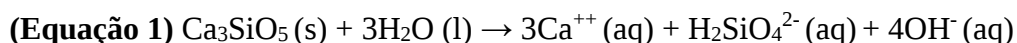
Fonte: Adaptado do GNR Project Reporting CO₂ (2018).

Odler (2000), define materiais pozolânicos como materiais siliciosos ou siliciosos e aluminosos que não apresentam propriedades de cimentação se misturados com água pura possuindo capacidade de reagir à temperatura ambiente em meio aquoso com $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ produzindo silicato de cálcio hidratos de aluminato de desenvolvimento de força. Xincheng (2013) explica que a mistura mineral ativa é uma substância que contém grandes quantidades de SiO_2 e Al_2O_3 amorfo, sendo o conteúdo de CaO , SiO_2 e Al_2O_3 os fatores que mais influenciam a reatividade.

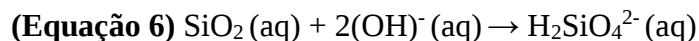
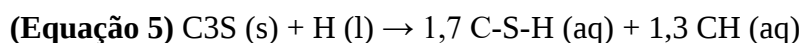
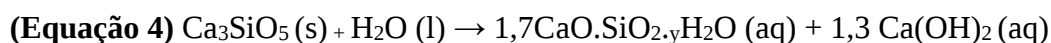
O termo “pozolana” é alusivo à cidade Italiana Pozzvali, onde os Romanos encontraram um material reativo de origem vulcânica a mais de 2.000 anos (Lohlia; Joshi, 1995). Kurdowski (2014) relata uma breve dinâmica da utilização das adições, segundo o autor a utilização das

adições minerais tem origem tão antiga quanto a do cimento. Ainda segundo o autor as argamassas de cal já eram utilizadas cerca de 300 anos antes de Cristo, a produção de cimento de escória ativado com cal e a produção de cimento de escória começaram na Alemanha em 1865 e 1892 respectivamente, enquanto na França este cimento é fabricado desde 1880 (Kurdowski, 2014).

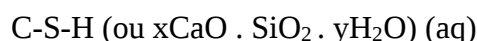
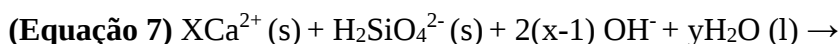
O consumo de portlandita proveniente da reação pozolânica está diretamente associado a gênese da hidratação do silicato tricálcico Ca_3SiO_5 (C3S, alita) e do silicato bicálcico Ca_2SiO_4 (C2S, belita). A hidratação do C3S é descrita através das reações 1 a 5. Nonat (2014) explica a hidratação dos silicatos de cálcio através das reações 1,2 e 3. A reação 1 explica a dissolução do C3S em contato com a água. A reação 2 explica a formação do C-S-H. A reação 3 apresenta a precipitação da portlandita.

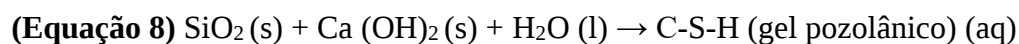


Ainda segundo Nonat (2014), a hidratação do C3S e precipitação do C-S-H + portlandita podem ser apresentados de forma resumida e em notação cimentícia conforme as reações 4 e 5. Por fim, a formação pozolânica se inicia com a dissolução da sílica em meio alcalino conforme a reação 6.



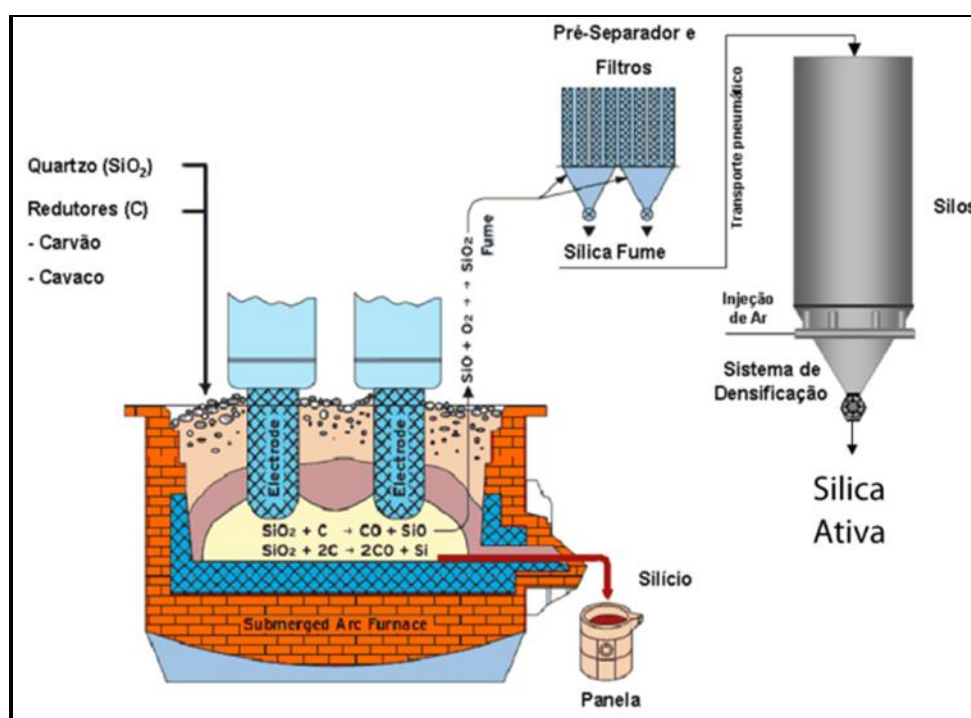
Em continuidade a precipitação do C-S-H pozolânico vai ocorrer após interação com íons cálcio presentes na solução. A precipitação do C-S-H ocorre de modo similar a hidratação dos silicatos, conforme reação 7 (Nonat, 2014). Por fim, a reação 8 representa a reação pozolânica convencional.





A sílica ativa é um dos materiais pozolânicos mais utilizados no Brasil, proporcionando ganhos de resistência mecânica consideráveis. De acordo com Bye (1999) e Mehta e Monteiro (2014b), a sílica ativa é um subproduto de fornos de indução a arco utilizados nas indústrias de fabricação do silício metálico. Ainda segundo o autor são vapores de SiO oriundos da redução do quartzo em silício à 2000°C. Esses vapores se oxidam e se condensam em baixas temperaturas constituídas essencialmente em sílica amorfa em formato de esferas sólidas de 0,1 µm. Bye (1999) afirma que essas partículas podem ter dimensões variando de 100-500 nm e área superficial específica 20000m²/kg. A figura 15 ilustra o processo de produção da sílica ativa.

Figura 15 – Ilustração do processo de produção da sílica ativa.

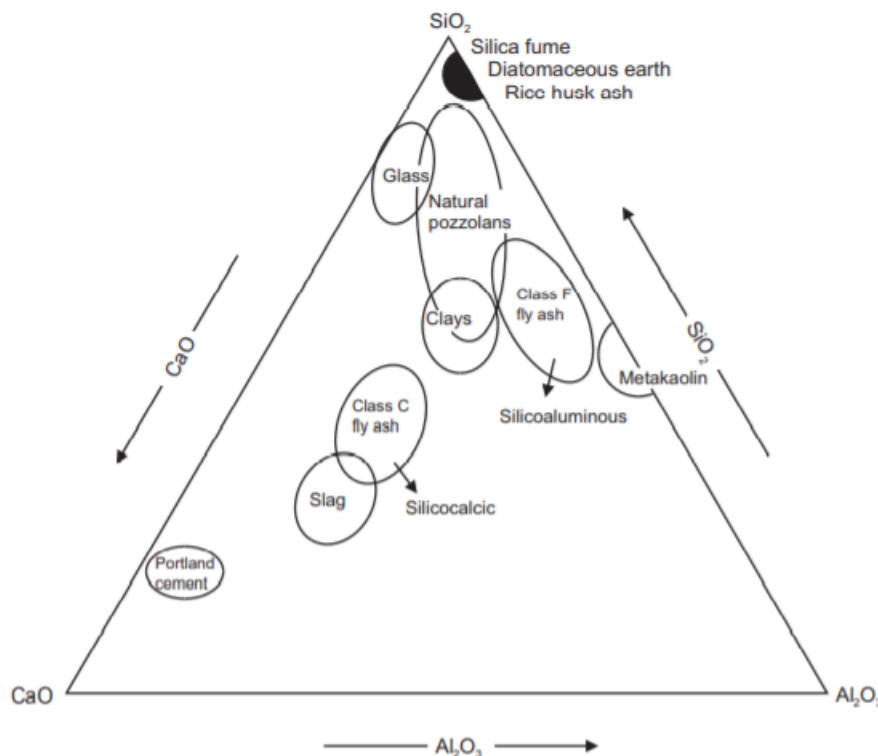


Fonte: Adaptado de Tecnosil (2023).

Por sua vez, metacaulim é um dos materiais cimentícios mais utilizados no Brasil, tendo contribuição relacionada ao aumento de resistência e na durabilidade dos materiais. De acordo com Molin (2011), o metacaulim é um aluminossilicato obtido da calcinação de argilominerais entre 600°C e 900°C. Conforme Aitcin (2016) o metacaulim é uma argila calcinada obtida pela calcinação da caulinita (2SiO₂. Al₂O₃.2H₂O) entre 450°C e 750°C. Em continuidade a definição do autor, é um aluminossilicato composto por uma camada de tetraedro de silício SiO₂ e íons octaedro Al(OH)₃. Os íons Si₄⁺ reagem com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do C3S e C2S para formar C-S-H. A figura 16 por Aitcin (2016), apresenta um enquadramento dos

materiais cimentícios suplementares binários em função dos componentes reativos SiO_2 , Al_2O_3 e CaO .figu

Figura 16 – Enquadramento dos principais materiais cimentícios suplementares em função dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e CaO .



Fonte: Adaptação de Aitcin (2016).

A utilização de SCM estão associadas à produção do cimento ou à produção de concreto, pois esses materiais podem ser inseridos no processo de fabricação do cimento Portland substituído parte do clínquer ou no ato da produção do concreto substituindo o cimento parcialmente. O cimento Portland é o principal insumo para produção de concreto. Várias pesquisas indicam que as adições minerais podem contribuir para o meio ambiente quando são utilizadas substituindo o clínquer, na produção do cimento ou o cimento para na produção do concreto. Para Isaia (2011), utilizar adições minerais sejam ativas ou inertes em substituição ao clínquer é uma solução eficiente do ponto de vista econômico, além de ser uma solução técnica para transformar o cimento num material mais sustentável e reduzir o impacto do cimento ao meio ambiente.

Além de reduzirem o consumo de clínquer, produtos de cimento binário e ternário melhoram a durabilidade propriedades mecânicas do concreto e contribuem para a reciclagem de subprodutos industriais (Dave *et al*, 2018). Já para Juenger e Siddique (2015), o uso de materiais cimentícios suplementares em concretos em quantidades de 5% a 20% é relacionado frequentemente à melhoria da durabilidade de propriedades mecânicas de longo prazo, já quando

esses materiais atuam substituindo o clínquer estão relacionados à redução de emissões de CO₂ na preparação de concretos.

Substituir uma massa de clínquer por uma parcela equivalente de pozolana ou material cimentício suplementar é muito importante pois contribui para redução de CO₂, para reciclagem de resíduos industriais, além de contribuir para uma melhor durabilidade do concreto, em funções de reações pozolânicas (Aïtcin, 2016). O autor ainda comenta que vários materiais cimentícios suplementares são misturados ao clínquer de cimento Portland visando a produção de matrizes cimentícias mais sustentáveis, podendo ser classificados como ligantes binários, ternários ou quaternários, sendo a fabricação desses cimentos dependente da disponibilidade local dos SCM.

Esses cimentos misturados podem ser identificados como ligantes binários, ternários e até quaternários, sem mencionar a natureza dos diferentes componentes das misturas. Os cimentos binários podem ser cimento de escória, cimento de cinza volante ou cimento de sílica ativa. Os cimentos ternários podem conter escória e sílica ativa ou cinza volante e sílica ativa. Finalmente, o uso de cimento quaternário contendo escória, cinza volante e sílica ativa tem se mostrado muito interessante devido ao efeito sinérgico obtido na mistura de escória e cinza volante em concretos com baixo teor de água (Nkinamubanzi; Aïtcin, 1999).

Pesquisas apresentam a viabilidade de utilização concomitante dessas adições em sistemas binários, ternários e quaternários em conjunto com o cimento Portland, visando a sinergia deste sistema, como por exemplo o trabalho de Gesoğlu, Güneyisi e Özbay (2009) que analisaram propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos alto adensáveis produzidos com composições binárias, ternárias e quaternárias constituídas por cimento, sílica ativa, cinza volante e escória de alto forno.

Esse efeito sinérgico combinado das adições também foi relatado por Radlinski e Olek (2012) que produziram compósitos cimentícios utilizando cimento, cinza volante e sílica ativa, visando analisar e quantificar o efeito sinérgico do produto ternário. Em suas conclusões os autores afirmaram que as deficiências observadas quando a cinza volante e a sílica ativa são utilizadas unicamente com o cimento, são compensadas de modo mútuo dentro do sistema ternário.

Nochaiya, Wongkeo e Chaipanich (2010) analisaram características no estado fresco e endurecido de composições ternárias contendo cimento, cinza volante e sílica ativa, observando a trabalhabilidade, consistência e resistência à compressão. Entre outras, os autores concluíram que além de contribuírem para a resistência mecânica do concreto e oferecer benefícios ecológicos, a utilização de cinza volante com sílica ativa contribuem com benefícios individuais de cada material e como combinação.

Visando produzir um concreto verde, Dave *et al.* (2018) prepararam misturas binárias e quaternárias de concreto, analisando a sinergia de misturas com cimento Portland, cinza volante, sílica ativa, escória de alto forno e metacaulim, em proporções variáveis. O autor comenta em seus resultados que o concreto quaternário apresentou excelente desempenho de resistência e durabilidade, além de uma microestrutura densa, podendo ser utilizado de modo seguro em aplicações na construção civil.

Em síntese os trabalhos apresentados resumem a possibilidade de sinergia entre diferentes tipos de adições, porém ainda existem lacunas referentes ao modo de como esses materiais interagem entre si e ausência de método pré-determinado e específico para formulação de adições binárias e ternárias.

2.3 PRESENÇA DE ÁLCALIS NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Os álcalis estão presentes no cimento e nos materiais cimentícios suplementares utilizados em compósitos cimentícios, sendo os compostos óxidos de Na_2O , K_2O , MgO e CaO os mais frequentes. A presença desses compostos óxidos em conjunto com outros fatores físicos pode desencadear reações deletérias nos compósitos, podendo resultar em danos nas estruturas. Existem várias restrições normalizadas nacionais e internacionais relacionadas ao teor de Na_2O , K_2O e MgO nas adições minerais, no cimento e no concreto. Os teores de sódio e potássio geralmente são expressos em álcalis equivalente, determinado pela expressão Na_2O_e (Equivalente Alcalino) = $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \text{K}_2\text{O}$ (fator de conversão estequiométrica de potássio em sódio).

A limitação dos teores de álcalis no cimento Portland já é discutida há várias décadas, como por exemplo os teores de K_2O , Na_2O entre 0,5% e 1,3% para cimento indicados por Soroka (1979), teores de Na_2O_e inferiores à 1,5% para pozolanas naturais e cinzas volantes indicados por Lohlia e Joshi (1995) e Teor de Na_2O_e em 0,6% conforme indicado por Taylor (1997). No Brasil a quantidade álcalis é limitada pela norma ABNT NBR 12653:2014, que limita em 1,5% a teor álcalis em Na_2O nos materiais pozolânicos, assim como a ASTM C 618:2008 que apresenta a mesma limitação (ABNT, 2014). Segundo Mehta e Monteiro (2014a), a ASTM C 150 classifica o cimento como de baixa alcalinidade quando apresentar teores de Na_2O inferior a 0,6% e alta alcalinidade quando superior a 0,6% (ASTM, 2019).

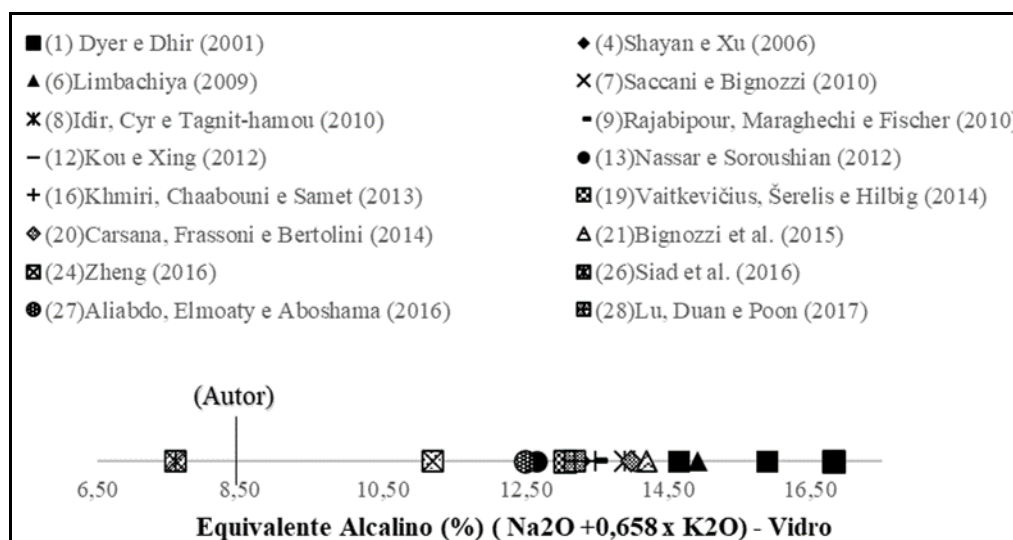
Odler (2000) reportou que geralmente convencionou-se que uma reação álcali agregado (RAA) em concreto feito com cimento Portland não ocorrerá se o conteúdo de Na_2O_e não exceder um limite entre 3kg/m^3 ou 4kg/m^3 . Ainda segundo o autor, baixas concentrações de álcalis podem ser alcançadas utilizando um cimento Portland especial com baixo teor alcalino, nesse tipo o teor

de Na_2O equivalente não deve exceder 0,6% (Odler, 2000). Na Inglaterra e na Alemanha algumas pesquisas apontaram que não ocorre expansão deletéria no concreto quando o teor de álcalis totais for inferior a 3 kg/m^3 (Mehta; Monteiro, 2014a). Carles-Gibergues e Hornain (2014) indicaram que o teor de álcalis se torna prejudiciais quando estão acima de 4 kg/m^3 .

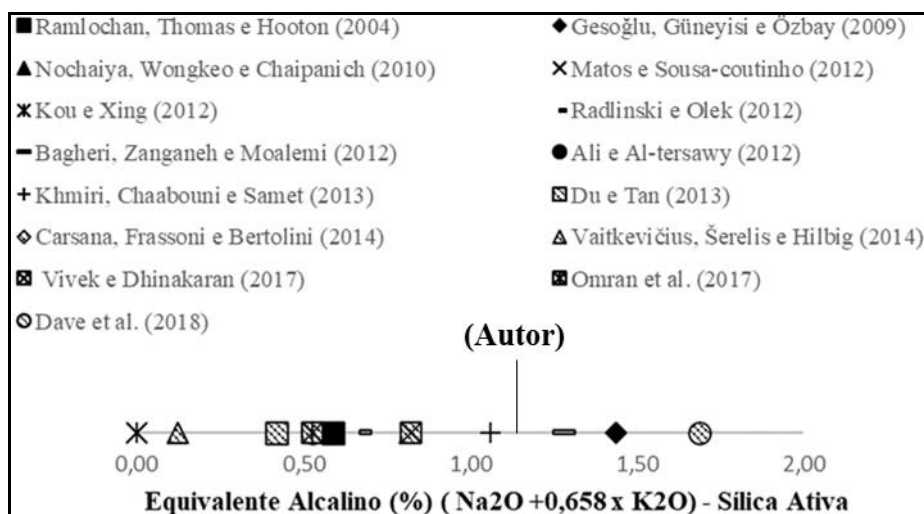
A ABNT NBR 15577-1:2018 recomenda como medida mitigatória da expansão devida à expansão oriunda da RAA, utilizar o teor de álcalis no concreto menores que $2,4 \text{ kg/m}^3$ de Na_2O equivalente (ABNT, 2018a). Essa mesma norma determina que seja utilizado cimento com equivalente alcalino variando entre $0,9\% \pm 0,1\%$ para avaliar a potencialidade reativa de um agregado, indicando que teores de álcalis entre 0,8% e 1% são suficientes para desencadear expansões deletérias em análises laboratoriais. Já a ASTM C1778-20 sugere que um teor de 1,25% de Na_2Oeq já seria suficiente para simular uma expansão real de prismas de concreto (ASTM, 2020).

As figuras 17, 18, 19, 20 e 21 apresentam o teor de álcalis presentes em diversos tipos de vidros, sílica ativa, metacaulim, cinza volante e escória de alto forno, de acordo com a literatura. Também estão destacados os teores de álcalis dos materiais utilizados neste trabalho.

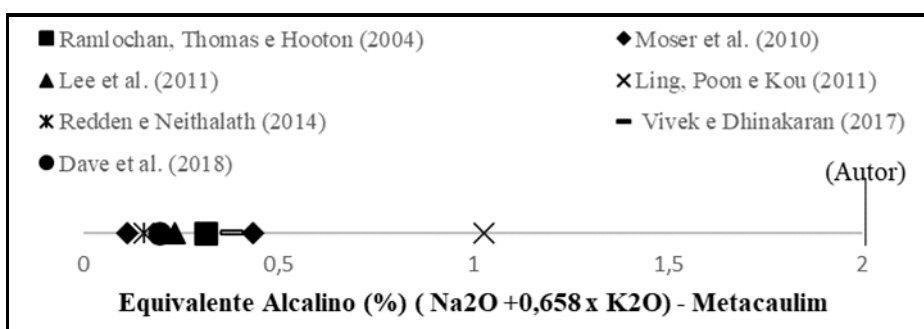
Figura 17 – Equivalente alcalino de diversos tipos de vidro.



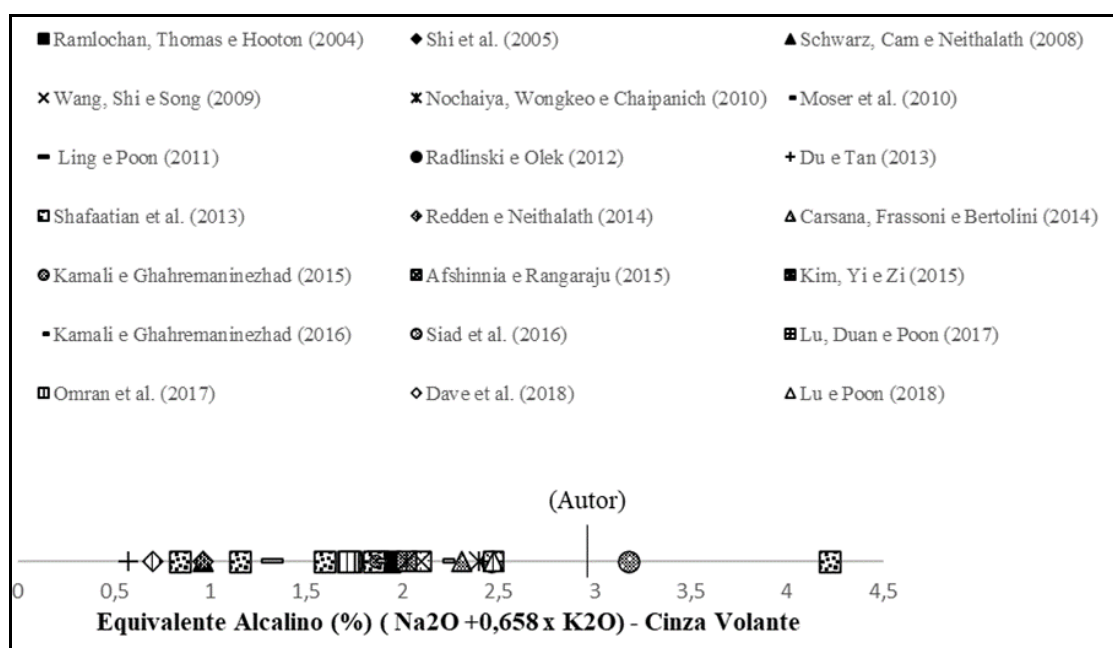
Fonte: Adaptado de autores.

Figura 18 – Equivalente alcalino: sílica sativa.

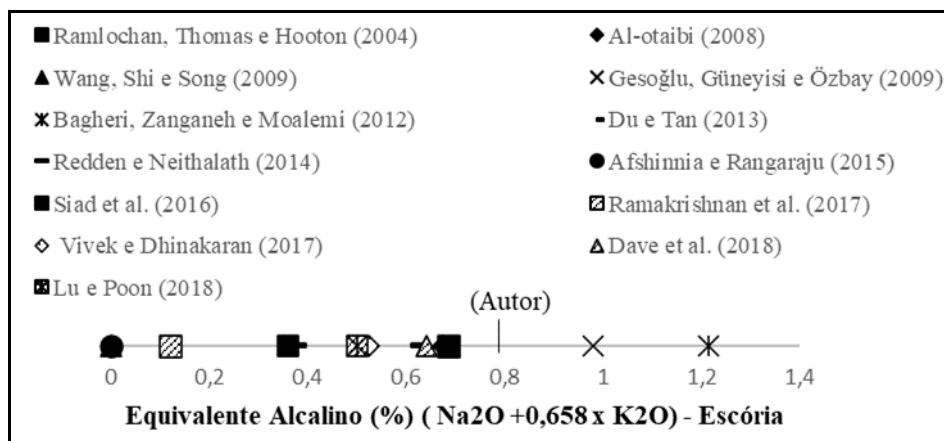
Fonte: Adaptado de autores.

Figura 19 – Equivalente alcalino: metacaulim.

Fonte: Adaptado de autores.

Figura 20 – Equivalente Alcalino - cinza volante.

Fonte: Adaptado de autores.

Figura 21 – Equivalente alcalino – escória.

Fonte: Adaptado de Autores

2.4 UTILIZAÇÃO DE VIDRO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

2.4.1 Como material cimentício suplementar

Nesta seção serão apresentados estudos que analisaram o pó de vidro como material cimentício suplementar em substituição ao cimento para produção de pastas, argamassas e concretos.

O estudo realizado por Dyer e Dhir (2001) que analisou argamassas desenvolvidas a partir de pó de vidro moído, obtidas a partir de resíduos de vidros incolores, verdes e âmbar, em substituição até 40% da massa do cimento para cada tipo de vidro, em intervalos de 10%. O objetivo era comparar as características físicas, reações químicas e reação álcali sílica dessas argamassas em relação à referência. Os resultados mostraram que as argamassas que utilizaram vidro transparente apresentaram melhor desempenho relacionado à resistência à compressão, e que a adição de pó de vidro moído pode influenciar significativamente a resistência da argamassa, dependendo do tipo de vidro e do teor de substituição.

Resíduos de vidro de cores distintas também foi estudado por Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011), que analisaram o comportamento pozolânico desses resíduos de vidro em diversos tamanhos de partículas variando de 2,5 mm até partículas inferiores 41 µm. Os resultados mostraram que partículas mais finas apresentaram maiores resistências que de modo geral a resistência reduziu com o aumento do teor de substituição. Os autores concluíram que a atividade pozolânica aumenta com o aumento da finura do vidro, e que é possível alcançar resistências superiores ou equivalentes à referência utilizando vidros de cores mistas com finura de 540 m²/kg até 40% de substituição.

Mirzahosseini e Riding (2015) que analisaram a influência do tamanho da partícula de resíduos de vidro verde como material cimentício suplementar em faixas de tamanho de 63 - 75 μm , 25 - 38 μm , e entre 0 - 25 μm , com o objetivo de estudar o comportamento pozolânico, características mecânicas, cinética da hidratação e índices físicos. As misturas com partículas mais finas apresentaram menor percentual de Portlandita e consequentemente maior reatividade e resistência à compressão. Os autores concluíram que o pó de vidro sofre influência da temperatura e a reatividade é influenciada pela área superficial específica.

Zheng (2016) estudou a reação pozolânica do pó de vidro de cores mistas na proporção de 40% de vidro verde, 30% de vidro claro e 30% de vidro âmbar, com objetivo de analisar sua influência na mitigação da reação álcali-sílica. Os resultados mostraram maior atividade pozolânica das partículas mais finas e menores expansões das argamassas preparadas com esse vidro ao longo do tempo. Entre outras conclusões os autores apontaram que as partículas de vidro sodocálcicos contribuem para redução de monossulfatos, além de consumir portlandita para formar C-S-H.

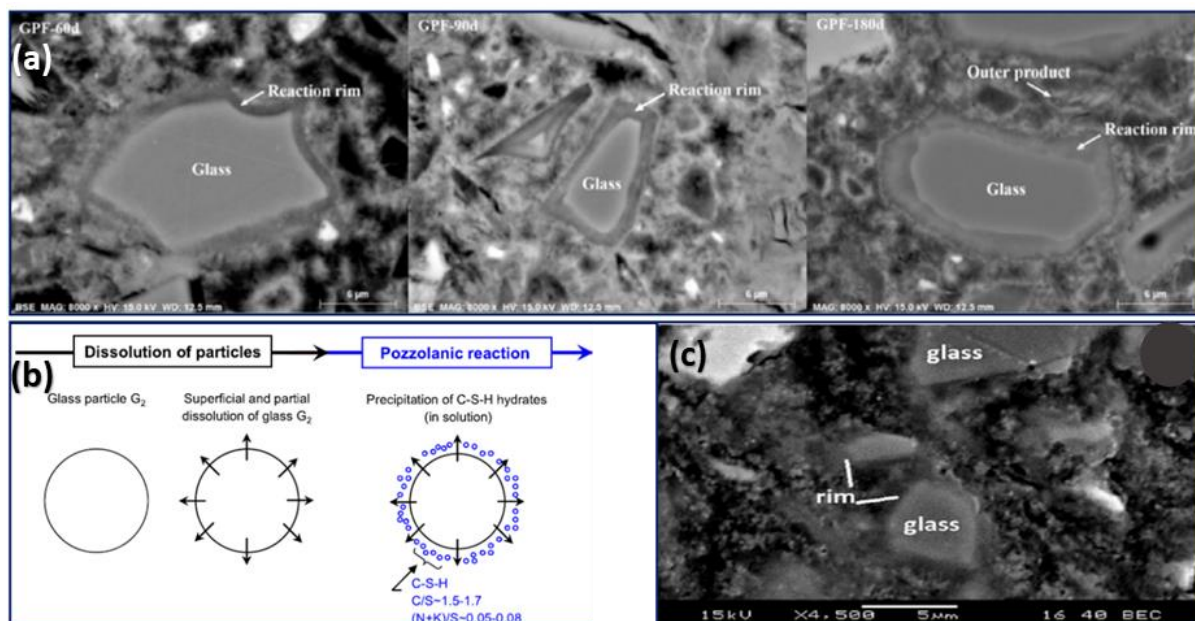
Kamali e Ghahremaninezhad (2016) analisaram a microestrutura e hidratação de pastas de cimento que utilizaram dois tipos de pó de resíduos com tamanho médio de 10 μm . As substituições foram de 5% até 20% graduadas a cada 5%. Os autores concluíram que as partículas finas e o aumento proporcional da relação água / cimento em função da substituição do vidro pelo cimento, contribuíram positivamente para a hidratação e que análise por microscopia eletrônica de varredura indicou o refinamento de poros em pastas de cimento modificadas com pós de vidro em comparação com a pasta de referência.

Ibrahim e Meawad (2018) analisaram e caracterizaram resíduos de embalagens de vidros de cores e origens distintas com dimensões entre 1,6 e 5 μm , substituindo a massa de cimento em 20%, com a finalidade de avaliar seu emprego como material cimentício suplementar, observando características mecânicas e de durabilidade. De modo semelhante ao trabalho de Dyer e Dhir (2001), as partículas incolores apresentaram maior resistência. Os autores concluíram que o pó de vidro oriundo de embalagens, independentemente da cor apresentaram bom comportamento mecânico e pozolânico, sendo indicados para utilização como material cimentício suplementar.

Em síntese, as conclusões dos trabalhos supracitados apontam vários pontos positivos relacionados à utilização do vidro, como melhoria na hidratação e consequente melhoria na textura da matriz cimentícia. Outro ponto que se destaca é o que o tamanho da partícula de vidro tem relação direta com o aumento da pozolanicidade e da resistência à compressão. Todos os trabalhos concorrem para o entendimento que o vidro sodocálcico quando tem finura suficiente para que ocorram as reações pozolânicas, tem indicação de utilização como material cimentício

suplementar. A figura 22 apresenta o processo de dissolução das partículas de vidro em meio ao processo de reação pozolânica e o respectivo aspecto da partícula remanescente. Observa-se nas figuras 22 (a) e 22 (c) a perda da angularidade das partículas de vidro e descontinuidade de suas arestas após reação pozolânica parcial. Já a figura 22 (b) ilustra o processo de dissolução da partícula e o modo de ocorrência da reação pozolânica, podendo concluir que é um processo que ocorre das extremidades para o interior da partícula.

Figura 22 – Processo da reação pozolânica do vidro.



Fonte: Figura adaptado de Zheng (2016); Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011) e Du e Tan (2015).

Várias pesquisas mostram que o vidro atende aos requisitos de pozolanicidade associados à resistência mecânica, apresentando desempenho similar a outros materiais cimentícios suplementares como por exemplo a escória de alto forno e cinza volante. Como mostram o estudo de Wang, Shi e Song (2009), que analisaram características mecânicas e de durabilidade de concretos leves que utilizaram pó de vidro em substituição ao cimento em comparação com outros materiais cimentícios suplementares, mostrou desempenho mecânico similar aos materiais produzidos com escória e levemente superior as que utilizaram cinza volante.

Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012), analisaram a utilização de resíduos de recipientes de vidro com dimensões entre 75 – 150 μm , 45 – 75 μm e < 45 μm , e de cerâmicas vermelhas como material cimentício em substituição ao cimento para produzir argamassas e concretos. Foi analisada a morfologia das partículas, características no estado fresco e mecânicas e durabilidade com o objetivo de avaliar a reutilização desses resíduos. Através de micrografia eletrônica de varredura verificou-se que as partículas do vidro tinham formato angular. Os resultados apontaram maior pozolanicidade e resistência dos materiais produzidos com vidros

mais finos. Os autores concluíram que o pó de vidro tem indicação para ser utilizado como uma pozolana, podendo substituir materiais de maior valor agregado como a sílica ativa e a cinza volante mesmo o vidro apresentando teor de álcalis acima do recomendado.

Os trabalhos apresentados apontam vários exemplos de utilização de pó de vidro em substituição ao cimento em vários teores, apresentando contribuições para várias características no estado fresco anidro e endurecido, assim como a influência do tamanho da partícula nas propriedades pozolânicas e de resistência mecânica. No entanto as informações sobre a produção das partículas de vidro não são suficientes para ratificar um procedimento específico de produção de partículas ultrafinas.

2.4.2 Utilização de pó de vidro em sistemas binários e ternários

De acordo com os trabalhos reportados é possível dizer que já está pacificada a contribuição positiva das partículas de vidro quando é utilizado como material cimentício suplementar em substituição ao cimento. Outras pesquisas foram realizadas investigando a utilização do vidro em concomitância com outras adições, constituindo um sistema cimentício ternário ou quaternário, quando ocorre utilização de duas ou três adições concomitantemente, como os trabalhos de Kim, Yi e Zi (2015) e Dave *et al.* (2018).

A sinergia de sistema mistos de materiais cimentícios, a partir de dois tipos distintos de adições, pode ser mais benéfico e eficiente que a utilização do sistema unitário ou binário, pois existe uma tendência de complementação das deficiências, mitigando os efeitos negativos de ambas, desde que sejam dosadas e selecionadas corretamente, impactando em critérios mecânicos, de custos e de durabilidade. Nos últimos anos um número crescente de pesquisas está analisando a incorporação de pozolanas artificiais como exemplo a cinza da casca de arroz, cinza do bagaço de cana e o pó de vidro, como materiais cimentícios suplementares em substituição cimento ou constituindo misturas cimentícias ternárias e até quaternárias na constituição de concretos.

Schwarz, Cam e Neithalath (2008) trabalharam na produção de concretos utilizando pó de vidro em substituição ao cimento, analisando seu desempenho mecânico e de durabilidade, comparando com exemplares de referência e com cinza volante. Também foram produzidas argamassas ternárias contendo pó de vidro e cinza volante para análise das expansões estimuladas. Os resultados mostraram que as argamassas que continham pó de vidro e cinza volante apresentaram maior redução da expansão que as produzidas apenas com pó de vidro ou cinza volante. Os autores concluíram que devido a resistência da substituição com 10% de pó de vidro ter sido pouco superior, substituições com esse mesmo teor de pó de vidro ou cinza volante podem

apresentar resultados de resistência mecânica semelhantes.

Kou e Xing (2012), utilizaram pó de vidro reciclado com diâmetro $< 45\mu\text{m}$ e resíduo de cinza volante na produção de concretos de ultra alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC) de vidro, observando seus efeitos nas características mecânicas e visando redução os custos para produção. Os autores concluíram que as amostras com pó de vidro apresentaram redução da resistência aos 7 dias, porém a resistência foi elevada após 28 dias.

Nassar e Soroushian (2012) utilizaram pó de resíduo de vidro com diâmetro médio de $13\mu\text{m}$ como material substituto ao cimento em concretos produzidos com agregados reciclados oriundos da demolição do concreto observando o efeito sinérgico, analisando características mecânicas e de durabilidade. Os resultados mostraram que as amostras com pó de vidro apresentaram melhor trabalhabilidade que as amostras sem vidro. Os autores concluíram que as partículas de vidro com dimensões de $13\mu\text{m}$ quando utilizadas como substituto ao cimento poderão contribuir para melhoria da contribuição da microestrutura de concretos que utilizam agregado reciclado por conta das reações pozolânicas.

Khmiri, Chaabouni e Samet (2013) analisaram a atividade pozolânica de resíduos de vidro em quatro faixas de tamanho específicas, 80 e $100\mu\text{m}$, 40 e $80\mu\text{m}$, $< 40\mu\text{m}$ e $< 20\mu\text{m}$, utilizados como material cimentícios em substituição ao cimento em argamassas. Também foi preparada uma argamassa contendo adição de sílica ativa e pó de vidro. Os resultados indicaram melhoria dos índices físicos e na resistência à compressão das argamassas que utilizaram vidro mais fino. As misturas com partículas $< 20\mu\text{m}$ e sílica ativa apresentaram maior atividade pozolânica e maior resistência à compressão. Os autores concluíram que resíduos de vidro com dimensões inferiores a $20\mu\text{m}$ apresenta comportamento pozolânico, sendo confirmado por análises de DRX e MEV.

O trabalho de Afshinnia e Rangaraju (2015) analisou misturas binárias e ternárias de argamassas contendo pó de vidro de garrafas com dimensão média de $17\mu\text{m}$, cinza volante classe C, meta caulim, escória de alto forno visando avaliar a sinergia destas misturas na mitigação da reação álcali agregado (RAA). Foram analisadas a trabalhabilidade, atividade pozolânica, além de ensaios de análise térmica, ensaio de barras de argamassa acelerada e análise microestrutural. Os resultados mostraram que o maior espalhamento foi obtido pela argamassa com 80% de cimento, 10% de pó de vidro e 10% de cinza volante. A atividade pozolânica da argamassa com 10% de vidro e 10% de metacaulim foi 11% superior a mistura composta nesta mesma proporção de vidro e cinza volante, indo de encontro com os teores de portlandita encontrados. As conclusões apontam para a contribuição positiva das misturas ternárias no estado fresco, endurecido e na redução das expansões.

Siad *et al.* (2016) estudaram o efeito do pó de vidro com diâmetro aproximado $d_{50} 15\mu\text{m}$,

na produção de argamassas separadamente ou em conjunto com outros materiais cimentício como substituto ao cimento em argamassas expostas à solução ácida de H_2SO_4 , analisando características mecânicas, pulsos de ondas ultrassônicas, resistividade elétrica, além análise microestrutural. As substituições foram de 15%, 30% e 45% de pó de vidro por cimento e ocorreram misturas binárias de 20% de vidro + 20% de pó de calcário, 20% de vidro + 20% de escória, 20% de vidro + 20% de cinza volante. Os resultados mostraram que a argamassa de referência apresentou maior resistência após 28 dias, e que as argamassas com 15% de vidro e com 20% de vidro + 20% de cinza volante, apresentaram resistência aproximadamente 6% inferior a referência. Os autores comentaram em suas conclusões que apesar da menor atividade pozolânica do vidro em comparação com a escória e com a cinza volante o pó de vidro utilizado pode ser considerado um bom material pozolânico.

O estudo de Soliman e Tagnit-Hamou (2016) teve como objetivo desenvolver concreto de ultra alto desempenho utilizando pó de vidro com d_{50} igual a 12 μm em substituição ao cimento e ao pó de quartzo, visando um produto sustentável e de custo inferior ao tradicional, analisando resistência mecânica, hidratação, propriedades no estado fresco e microestrutura. Foram produzidos concretos utilizando um sistema cimentício ternário com aproximadamente 27% de sílica em relação à massa de cimento e realizando substituições de vidro até 50%. Os resultados mostraram que após 91 dias todas os concretos apresentaram resistência superior à referência, sendo a maior resistência atingida pela proporção com 80% de cimento e 20% de pó de vidro. Os autores concluíram que o pó de vidro contribui positivamente para a trabalhabilidade e que a utilização do pó de vidro pode reduzir o custo do concreto de ultra alto desempenho.

Ramakrishnan *et al.* (2017), em sua pesquisa estudaram os efeitos da sinergia de misturas ternárias contendo pó de vidro e escória como materiais cimentícios suplementares em concretos, analisando características mecânicas e durabilidade. As substituições foram de 50% da massa de cimento, variando a os teores das misturas pozolânicas. O autor concluir que a sinergia mais eficiente foi obtida pela mistura com 35% de escória + 15% de pó de vidro apresentando bons resultados mecânicos e de durabilidade, sendo indicada como material cimentício suplementar.

As pesquisas indicam a possibilidade de utilizar o pó de vidro em concomitância com outras adições, constituindo materiais cimentícios suplementares binários, ternários ou quaternários. Porém existem lacunas relacionadas aos teores das adições que devem ser utilizados, tomando por modelo teores utilizados convencionalmente, além de existir informações insuficientes de como o pó de vidro interagem com outras adições.

2.4.3 Concomitantemente como material cimentício e agregado

O trabalho desenvolvido por Shayan e Xu (2006) consistiu em utilizar resíduos de vidros sodo-cáusticos de embalagens coloridas para produção de material cimentício suplementar e agregado miúdo, a fim de verificar seu desempenho, isolado e simultaneamente, na utilização de concretos como substituição ao cimento e ao agregado miúdo. Os autores concluem que é possível desenvolver concretos com substituição parcial de cimento e areia, reduzindo o consumo de agregado natural, contribuindo para a reciclagem e proteção do meio ambiente.

Kim *et al.* (2017) analisaram a influência do tamanho da partícula do pó de vidro, como material de substituição parcial ao cimento. Produziram concretos utilizando pó de vidro de resíduo da produção de LCD com dimensões de 5 e 12 μm com substituições de 5%, 10%, 15%, 20 graduadas a cada 5%, analisando trabalhabilidade, resistência mecânica e a microestrutura. Todas as substituições apresentaram teor de ar incorporado inferior à mistura de controle. Os resultados mostraram o melhor desempenho dos materiais produzidos com partículas mais finas.

Lu, Duan e Poon (2017a) analisaram a ação simultânea da utilização de resíduos de vidro em substituição ao agregado e como material cimentício suplementar em substituição ao cimento na produção de argamassas arquitetônicas, analisando características no estado fresco, características mecânicas e de durabilidade. Foram utilizados pós de vidro com diâmetro de partícula igual a 204 μm , 88,5 μm , 47,9 μm e 28,3 μm , respectivamente. As substituições por cimento foram de 20% e de 100% para o agregado miúdo sendo comparadas com amostras de referência apenas com cimento e 100% de agregado de vidro, e uma mistura contendo 20% com cinza volante. Em síntese os autores concluíram que é possível a produção de argamassas arquitetônicas utilizando o vidro como agregado e como substituto ao cimento.

2.4.4 Utilizado como agregado

Limbachiya (2009) analisou concretos produzidos com areia de vidro oriunda de recipientes de bebidas de cor mistas em substituição parcial ao agregado natural, as substituições foram até 50% em massa. Foram analisadas a trabalhabilidade, características mecânicas e durabilidade. As amostras com 30%, e 50% de substituição apresentaram menor trabalhabilidade e índices de resistência à compressão inferiores que as misturas com menores teores de areia de vidro nas mesmas idades. Os resultados mostraram que as amostras com teores de substituição de 30% e 50%, apresentaram índices bem inferiores aos exemplares com até 20% de substituição.

Rajabipour, Maraghechi e Fischer (2010) analisaram minuciosamente o efeito do tamanho

da partícula de vidro na reação álcali agregado (RAA), substituindo areia natural por resíduos de vidro de cores mistas e âmbar, em faixas granulométricas específicas na produção de concretos. As manifestações de RAA das misturas foram analisadas utilizando MEV/EDS. Os autores concluíram através de análises com MEV/EDS que a RAA ocorre dentro das fissuras internas das partículas de vidro, hipoteticamente geradas no processo de cominuição das partículas, e não na interface do vidro com a pasta. Partículas de vidro maiores apresentam fissuras maiores e mais permeáveis facilitando a RAA, explicando porque partículas menores apresentaram menores expansões.

Saccani e Bignozzi (2010) investigaram a influência do tipo de vidro, sua composição química e seus efeitos nocivos quando utilizadas como materiais substituto ao agregado natural, em condições experimentais distintas. O vidro de silicato de cromo, obteve índices de expansão superiores aos limites normalizados, as misturas com maiores teores deste vidro alcançaram maiores expansões. Os autores concluíram que cada tipo de vidro apresenta uma resposta diferente para RAA.

Tan e Du (2013) analisaram propriedades do estado fresco, mecânicas e de durabilidade em argamassas produzidas com agregado fino oriundo de resíduos de vidros coloridos em substituição ao agregado fino natural. As substituições foram de 0% até 100% graduadas em 25%. Houve uma redução da trabalhabilidade com o aumento do teor de vidro, em função da superfície específica do vidro e a morfologia da partícula. Os autores concluíram que as menores densidades, redução da trabalhabilidade e aumento do teor de ar ocorreu em função da menor massa específica do vidro em comparação com o agregado natural e o formato angular da partícula.

Os Tabelas 3 e 4 apresentam um resumo de informações relacionadas aos Teores de vidros utilizados para produção de argamassas e concreto e suas respectivas resistências à compressão normalizadas pela amostra de referência de cada autor.

Tabela 3 - Teores de vidros e resistências à compressão de argamassas.

Autor	(%) Porcentagem utilizada / (%) resistência normalizada						
	10	15	20	25	30	40	45
Dyer e Dhir (2001)	128,9	-	86,3	-	80,2	75,5	-
	120,8	-	109,5	-	99,5	76,8	-
	100,5	-	99,96	-	90,3	64,9	-
Shi <i>et al.</i> (2005)	-	-	73,2	-	-	-	-
	-	-	91,8	-	-	-	-
	-	-	110,8	-	-	-	-
	-	-	114,2	-	-	-	-

Paiva (2009)	89,9	78,5	88,4	-	-	-	-
Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011)	96,3	-	80,9	-	67,5	51,2	-
	93,55	-	81,63	-	64,23	46,89	-
	91,94	-	76,77	-	61,94	42,47	-
	96,68	-	84,48	-	72,82	60,37	-
	95,68	-	89,68	-	85,48	76,94	-
Matos e Sousa-Coutinho (2012)	88,4	-	78,14	-	-	-	-
Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012)	95,4	-	89,1	77,8	61,0	58,8	-
	99,3	-	84	80,7	70,4	56,6	-
	91,7	-	83,9	69,3	63,7	53,3	-
	-	-	-	97,1	-	-	-
	-	-	-	101,2	-	-	-
Khmiri, Chaabouni e Samet (2013)	-	-	63,8	-	-	-	-
	-	-	65,6	-	-	-	-
	-	-	89,7	-	-	-	-
	-	-	94,5	-	-	-	-
Sales (2014)	111,3	-	95,9	-	-	-	-
	103,2	-	97,6	-	-	-	-
	96,1	-	80,4	-	-	-	-
Carsana, Frassoni e Bertolini (2014)	-	-	-	-	80,4	-	-
	-	-	-	-	86,5	-	-
Afshinnia e Rangaraju (2015)	103	-	-	-	-	-	-
	-	-	95	-	-	-	-
	-	-	-	-	83	-	-
Mirzahosseini e Riding (2015)	-	-	-	64,0	-	-	-
	-	-	-	77,4	-	-	-
	-	-	-	81,9	-	-	-
Siad <i>et al.</i> (2016)	-	94,2	-	-	86,7	-	75,1
Islam, Rahman e Kazi (2017)	98,2	96,5	95,2	88,4	-	-	-
Ibrahim e Meawad (2018)	-	-	96	-	-	-	-
	-	-	97,2	-	-	-	-
	-	-	95,1	-	-	-	-
	-	-	95,1	-	-	-	-
	-	-	84,9	-	-	-	-

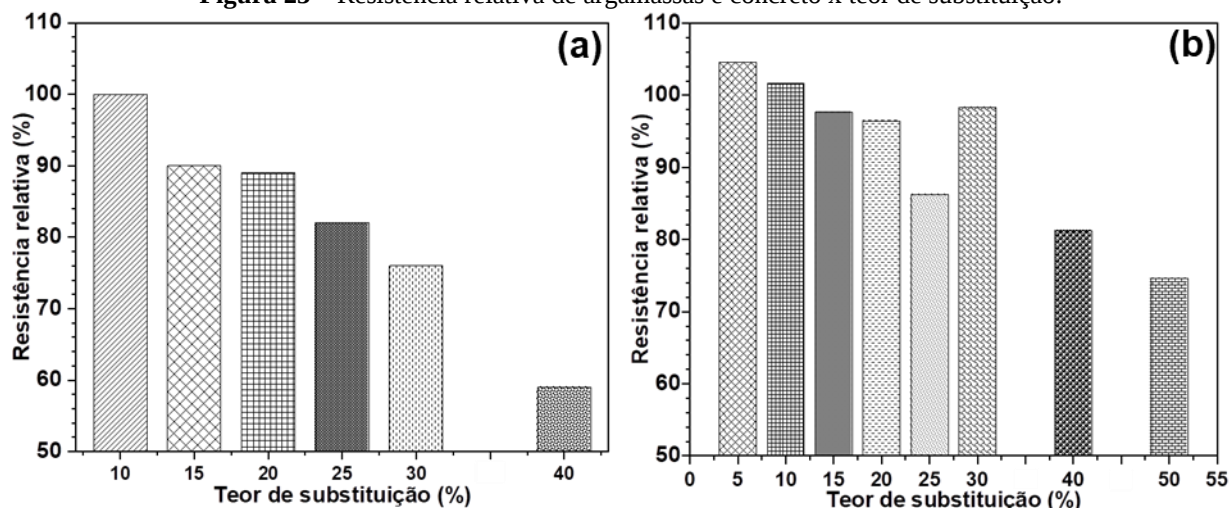
Fonte: Adaptado dos autores.

Tabela 4 - Teores de vidros e resistências à compressão em concretos.

Autor	(%) Porcentagem utilizada/ (%) resistência relativa									
	5	10	15	20	25	30	40	45	50	60
Schwarz, Cam e Neithalath (2008)	-	97,7	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	96,6	-	-	-	-	-	-	-	-
Wang, Shi e Song (2009)	-	-	-	-	93,4	-	-	-	64,5	-
Kara, Korjakins e Kovalenko (2012)	-	-	-	98,6	-	97,2	83,3	-	-	-
	-	-	-	98,6	-	90,3	70,8	-	-	-
Kou e Xing (2012)	-	-	107	-	-	102,2	-	-	-	-
Du e Tan (2014)	-	-	99,3	-	-	106,2	-	96,3	-	80,9
Sales (2014)	-	-	100,9	-	-	-	-	-	-	-
Kamali e Ghahremani nezhad (2015)	102	102,3	108,5	107,2	-	-	-	-	-	-
	95,6	103,1	90,4	91,6	-	-	-	-	-	-
Soliman e Tagnit-Hamou (2016)	-	100	-	98,9	-	95,8	89,4	84,7	-	-
Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016)	105	95,5	90,6	87,3	84,6	-	-	-	-	-
	103	104,8	90,6	88,9	85,9	-	-	-	-	-
Guignone (2017)	-	95,4	-	91,4	-	-	-	-	-	-
	-	101,6	-	97,6	-	-	-	-	-	-
Kim <i>et al.</i> (2017)	108	111,7	103,2	102,5	-	-	-	-	-	-
	113	115,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Islam, Rahman e Kazi (2017)	-	95,1	88,5	85,4	81,1	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado dos autores.

A figura 23 apresenta respectivamente as resistências relativas de argamassas 23 (a) e concretos 23 (b) produzidos com pó de vidro em substituição ao cimento, em função dos dados presentes nas tabelas 3 e 4. É notável a redução da resistência relativa com o aumento do teor de vidro nas argamassas e concretos.

Figura 23 – Resistência relativa de argamassas e concreto x teor de substituição.

Fonte: Adaptado dos autores.

Neste capítulo se discutiu a reciclagem do vidro e sua utilização como material cimentício suplementar. No Brasil está entre os cinco resíduos domésticos mais produzidos (CEMPRE, 2020). No entanto, dentre os itens presentes na coleta seletiva, apresenta menor valor de reciclagem além de ser o resíduo com menor quantidade de organizações que comercializam esse tipo de material, justificando mais estudos para promover sua utilização e estimular sua comercialização.

Também foi abordada a possibilidade de sinergia entre diferentes tipos de adições ao cimento, sendo destacado a falta de métodos pré-determinados para formulação de adições binárias e ternárias. Além disso, foi mencionado a presença de álcalis nos materiais cimentícios, enfatizando a importância de considerar os limites de álcalis nas misturas cimentícias.

Quanto à utilização do vidro como material cimentício suplementar, as pesquisas apresentadas mostram resultados positivos, como melhoria na hidratação e textura da matriz cimentícia, aumento da pozolanicidade e resistência à compressão, existindo uma tendência de redução da resistência à compressão com o aumento do teor de vidro. Também foram apresentadas pesquisas que utilizaram o pó de vidro em concomitância com outras adições, apontando efeitos positivos da sinergia entre as adições.

No entanto, existem lacunas nas pesquisas, como um método para formulação de misturas binárias de materiais cimentícios suplementares a fim de determinar teores adequados dessas adições, além de como essas partículas interagem. Também foi ressaltado a falta de informações sobre os procedimentos para produção de partículas de vidro ultrafinas e a ausência de métodos que considerem os teores de álcalis a serem utilizados.

Em suma, os estudos mostram a viabilidade e benefícios da utilização do vidro como material cimentício suplementar unitário e em conjunto com outras adições, porém são necessárias mais contribuições para otimizar operações de moagem do vidro, investigações sobre métodos

específicos de formulação de misturas binárias, além da interação entre essas partículas. Sendo assim se justifica o desenvolvimento do plano experimental proposto, planejado conforme lacunas presentes na literatura atual.

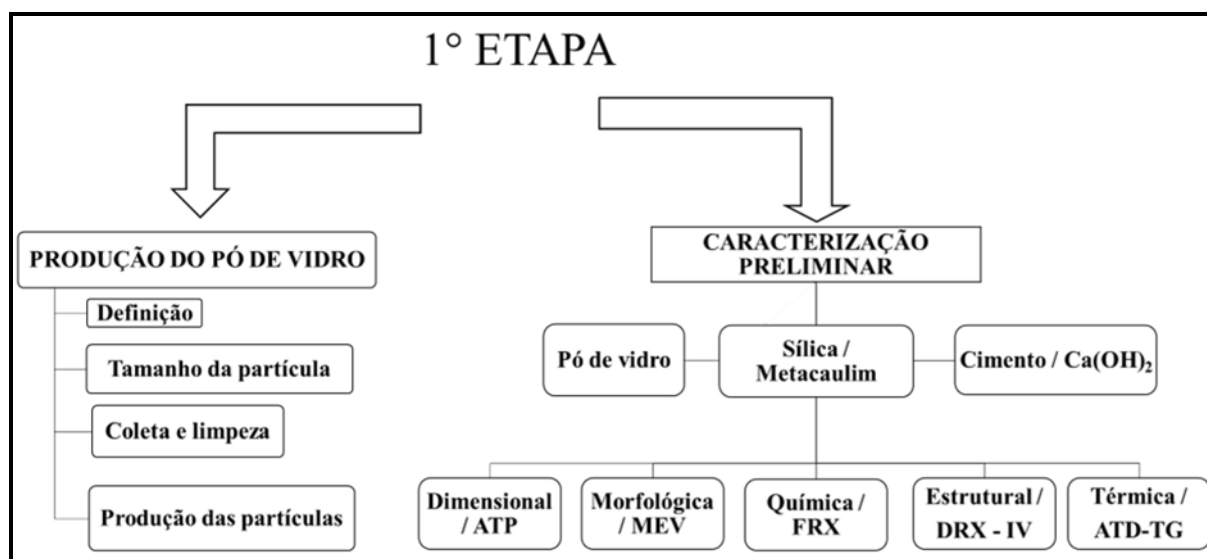
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os procedimentos para realização dos experimentos serão detalhados em duas partes. A primeira estão apresentadas a caracterização do pó de vidro, as adições primárias e os aglomerantes, contemplando as adições suplementares e dos aglomerantes contemplando análise granulométrica, composicional, estrutural, morfológica e térmica. A segunda parte descreve os procedimentos para realização de investigações no estado fresco, anidro e endurecido das pastas produzidas com as adições unitárias e binárias, contemplando ensaios físicos, mecânicos, estruturais, composicionais, térmicos e microestruturais.

3.1 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DO VIDRO E DAS ADIÇÕES PRIMÁRIAS

Nesta parte serão apresentados procedimentos para obtenção e produção das partículas de vidro, além de sua caracterização granulométrica, composicional e morfológica. Também serão discutidos de modo sucinto os resultados dessas análises. Os resultados da caracterização das adições primárias juntamente com os aglomerantes serão apresentados da mesma forma que as partículas de vidro. A figura 24 resume os procedimentos realizados para caracterização preliminar.

Figura 24 - Fluxograma da caracterização preliminar.



Fonte: O autor (2023).

Foram utilizadas como adições primárias sílica ativa (SA), metacaulim (MC) e como adições secundárias partículas de vidro em quatro faixas distintas com dimensões inferiores à 45µm (PV45) e 25µm (PV25), e duas faixas intermediárias entre 45 µm x 75µm (PV75x45) e 25

$\mu\text{m} \times 45\mu\text{m}$ (PV25x45). Para a produção das pastas e argamassas foi utilizado o cimento Portland tipo V de alta resistência inicial - CPV - ARI, com adição de 5% de calcário e hidróxido de cálcio P.A. 95%.

3.1.1 Vidro: Natureza, preparo e caracterização preliminar

3.1.1.1 Definição do tipo de vidro

A definição do tipo de vidro é importante para realização de estudos desta natureza pois deve ser levado em consideração a natureza química, agentes geradores e taxa de reciclagem do material. Os aterros sanitários são os maiores receptores de vidros sodocálcicos de consumo doméstico (garrafas de bebidas e utensílios). Porém a grande maioria não realiza tratamento, ocorrendo o descarte no solo. Logo foi definido que os vidros a serem utilizados fossem da mesma característica dos que ocorrem predominantemente nos aterros.

Após análise dos tipos de vidro de trabalhos anteriores foi constatado que os vidros sodocálcicos são os mais frequentes em pesquisas similares e que a composição química deles apresentam pequenas variações independentemente da coloração, conforme Tabela 9. Foi decidido utilizar vidros de recipientes de cores diversas de modo similar aos utilizados por Dyer e Dhir (2001), Shayan e Xu (2006), Limbachiya (2009), Saccani e Bignozzi (2010), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010, 2011), Nassar e Soroushian (2012), Tan e Du (2013), Zheng (2016), Lu, Duan e Poon (2017a), Ibrahim e Meawad (2018) que utilizaram vidros de recipientes diversos de cores mistas.

Devido à grande variedade de vidros de recipientes de bebidas descartados foi decidido que os percentuais da mistura deveriam ser iguais, optando por teores equivalentes de vidros âmbar, incolor e verde, pode-se destacar o trabalho de Rajabipour, Maraghechi e Fischer (2010) que utilizaram uma mistura de vidros sodocálcicos coloridos contendo 1/3 de vidro claro, 1/3 de vidro âmbar e 1/3 de vidro verde.

3.1.1.2 Definição do tamanho de partícula

O tamanho de partícula é um dos principais parâmetros restritivos para classificação de materiais pozolânicos, pois influenciam diretamente na reatividade no material. Verificou-se que distribuições de tamanho com diâmetros D_{90} e $D_{\text{máx}}$ entre 24 μm e 45 μm apresentaram superfície específica variando entre 354 m^2/kg e 756 m^2/kg , conforme os trabalhos presentes na Tabela 5. Tomando como fundamento os trabalhos apresentados na Tabela 12, foi decidido utilizar 2 faixas de tamanhos de partículas principais, com $D_{\text{máx}}$ igual a 45 μm e 25 μm . Como critério de

comparação também foi definido utilizar partículas em duas faixas intermediárias de tamanho, sendo elas 45 x 75 μm e 25 x 45 μm .

Tabela 5 - Diâmetro e área superficial específica do pó de vidro empregado na produção de compósitos cimentícios presentes na literatura.

Autor	Uso do material	Diâmetro da partícula (μm)		Área superficial específica m^2/kg – (S)
		D ₉₀	D _{máx}	
Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011)	Argamassas	-	41	540
Kou e Xing (2012)	Concretos	-	45	756
Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012)	Argamassas	-	45	354 – 443
Mirzahosseini e Riding (2015)	Argamassas	-	25	476
Omran e Tagnit-Hamou (2016)	Concreto	-	40	380
Soliman e Tagnit-Hamou (2016)	Concreto	24	-	380
Kim <i>et al.</i> (2017)	Concreto	24	-	446
Rodier e Savastano (2018)	Pastas	-	45	-

Fonte: O autor (2023).

3.1.1.3 Coleta e limpeza das embalagens de vidro

O vidro foi coletado e fornecido pela empresa Fausto Soluções Ambientais Ltda, localizada em Recife, Pernambuco. Inicialmente foram coletados 10 kg de cada tipo de vidro formando uma mistura de 30 kg de recipientes âmbar, incolor e verde. As embalagens foram coletadas manualmente das pilhas de estocagem. A figura 25 registra a disposição dos resíduos armazenados no pátio da Fausto Soluções Ambientais Ltda.

Figura 25 - Pilhas de estocagem dos recipientes de vidro - (a) Vidro âmbar, (b) Vidro verde e (c) Vidro incolor.



Fonte: O autor (2023).

Os vidros coletados passaram por um processo de limpeza visando a retirada dos rótulos e

resíduos orgânicos. Os recipientes passaram 08 horas imersos em solução de ácido nítrico a 10%, seguido por raspagem e escovação com auxílio de detergentes domésticos visando retirada dos rótulos, parasitas e outras impurezas orgânicas. Após o processo de lavagem as embalagens foram expostas ao ar livre para secagem por 08 horas. Os recipientes foram fragmentados manualmente, com auxílio de um pilão de aço, separado por cores, até obtenção de fragmentos com dimensões máximas de 45 mm. Os fragmentos produzidos foram misturados na proporção de 1/3 de cada coloração para obtenção da mistura. A figura 26 mostra o aspecto da mistura dos fragmentos de vidros antes do processo de fragmentação.

Figura 26 - Aspectos dos fragmentos de vidro.

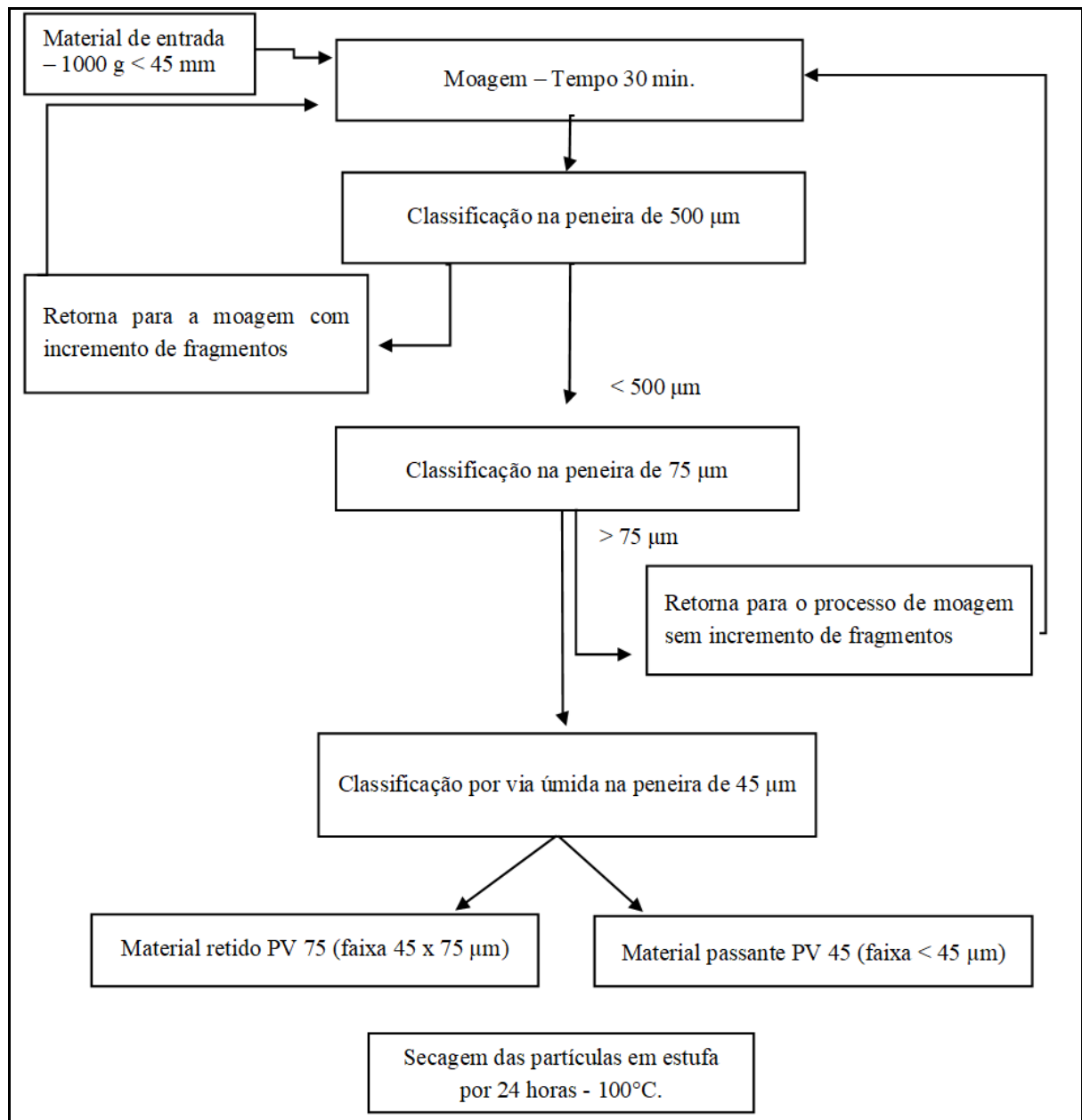


Fonte: O autor (2023).

3.1.1.4 Produção das partículas de vidro e caracterização granulométrica

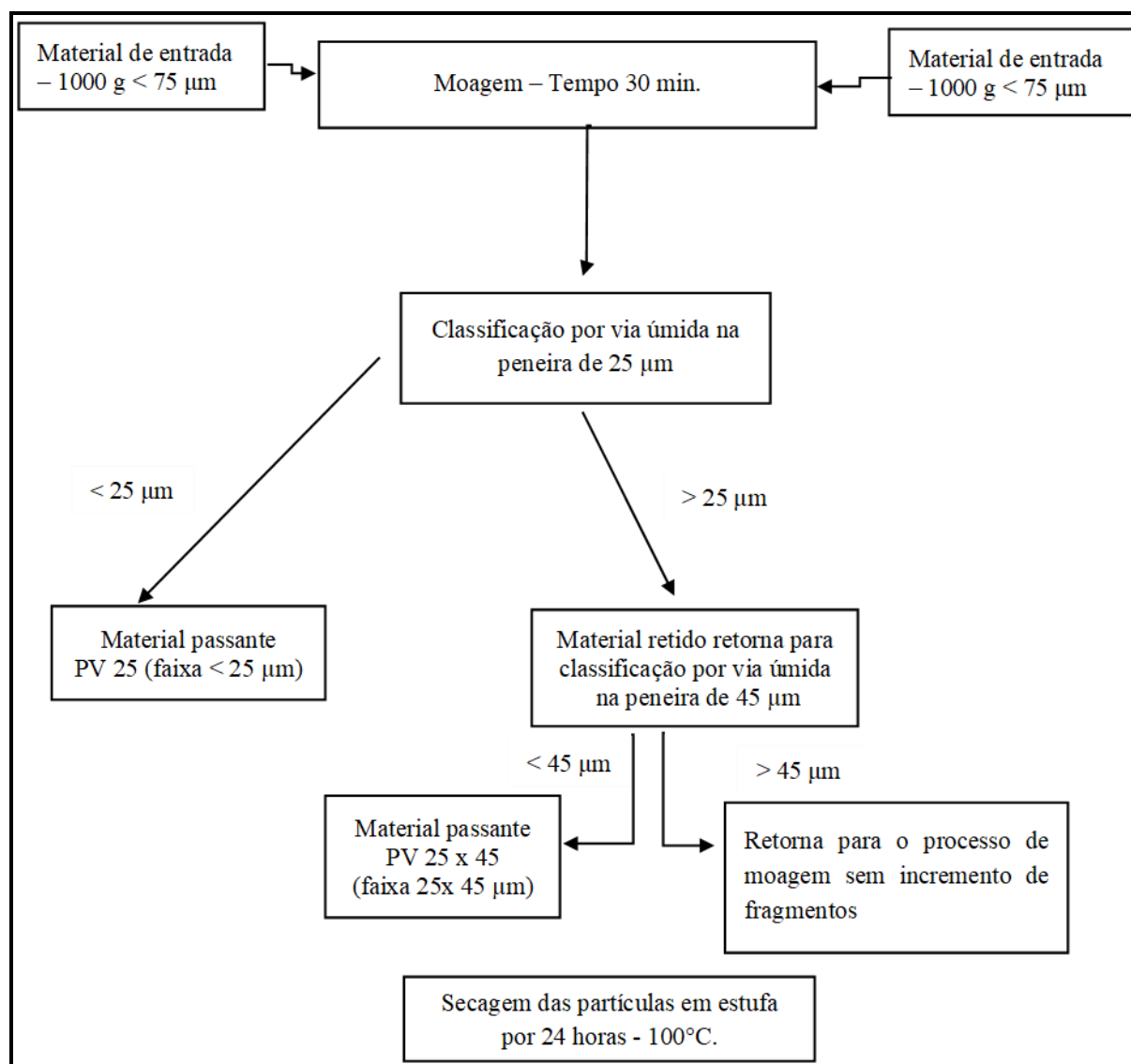
Após a etapa de coleta e limpeza das embalagens foi iniciado o processo de cominuição do material visando obtenção das partículas finas com tamanho $< 75 \mu\text{m}$. O processo de produção foi dividido em duas etapas: (1) produção das faixas $45 \times 75 \mu\text{m}$ e $< 45 \mu\text{m}$. (2) produção das faixas $25 \times 45 \mu\text{m}$ e $< 25 \mu\text{m}$. Os materiais foram produzidos no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM)/UFPE. Para produção das partículas foi utilizado um moinho de porcelana de 3 litros. O moinho foi acionado em uma pista cilíndrica conectada a um mancal, com rotação de 68 rpm e potência de 0,88 kW. A carga de corpos moedores é apresentada no Tabela 6. Para o processo de redução foi utilizado uma massa constante de 1 kg de vidro e carga de corpos moedores de 4650,5 g durante 30 minutos. A quantidade de partículas inferiores a $75 \mu\text{m}$ após 30 minutos de moagem variou entre 25% e 30%. O fluxograma para produção das partículas de vidro nas faixas $45 \times 75 \mu\text{m}$, $< 45 \mu\text{m}$, $25 \times 45 \mu\text{m}$ e $< 25 \mu\text{m}$, são apresentados nas figuras 27 e 28.

Figura 27 - Fluxograma do processo de moagem e classificação para obtenção de partículas de vidro nas faixas 45 x 75 μm e < 45 μm .



Fonte: O autor (2023).

Figura 28 - Fluxograma do processo de moagem e classificação para obtenção de partículas de vidro nas faixas 25 x 45 μm e < 25 μm .



Fonte: O autor (2023).

Tabela 6 - Carga de corpos moedores empregados na produção de pó de vidro em moinho de porcelana.

Corpo moedor	Diâmetro(mm)	Altura(mm)	Quantidade	Massa unitária (g)	Massa total (g)
Bola	35	-	12	101,0	1212,0
	25	-	28	54,0	1512,0
	15	-	15	7,5	127,5
	10	-	4	15,0	60,0
Cilindro	45	45	1	230,0	230,0
	30	30	16	86,5	1384,0
	10	10	25	5,0	125,0
Total (g)			101	-	4650,5

Fonte: O autor (2023).

Os materiais foram produzidos em duas etapas, sendo a primeira com finalidade exploratória. Na primeira etapa foi utilizado 1000g de fragmentos de vidro e na segunda 5000g e

na terceira etapa 10000g. A quantidade de material produzido em cada etapa nas faixas 45 x 75 μm , < 45 μm , < 25 x 45 μm e < 25 μm é apresentada no Tabela 7.

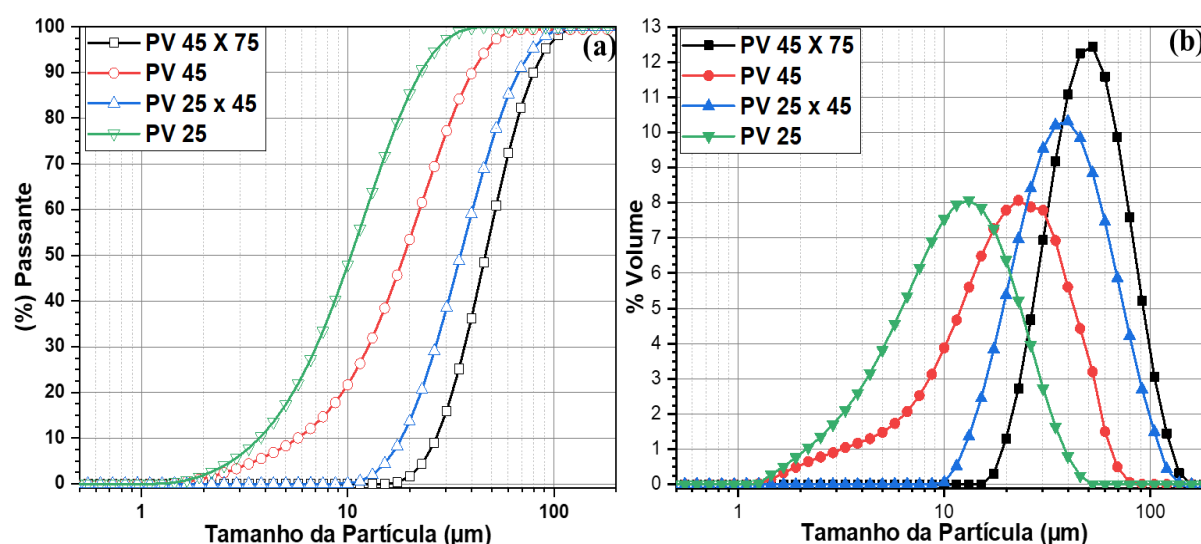
Tabela 7 - Quantidades de pó de vidro produzidas.

Etapa	Massa de partida (g)	Faixas produzidas (g)				Resíduo (g)
		45 x 75 μm	< 45 μm	< 25 μm	25 x 45 μm	
1	1000	320	480	-	-	200
2	5000	2150	2100	-	-	750
3	10000	1500	-	4000	2200	2300

Fonte: O autor (2023).

A caracterização da distribuição do tamanho de partícula das faixas produzidas foi realizada por espalhamento de luz laser. Foi utilizado o analisador de partículas Malvern - Mastersizer 2000, com capacidade de análise de partículas entre 0.01 μm e 2000 μm . A técnica para utilizada para a dispersão das partículas foi por via úmida, utilizando o acessório Hydro 2000MU, utilizando água destilada como dispersante. Os resultados apresentados correspondem a uma média de três leituras. Após as análises foram determinados os diâmetros característicos D_{10} , D_{50} e D_{90} , a área superficial específica (S) em m^2/kg e a razão D_{90}/D_{10} . As análises granulométricas foram feitas em triplicata, ou seja, os resultados analisados neste estudo correspondem à média de três medidas, onde cada medida é por sua vez a média de três leituras de uma mesma amostra. As curvas características referente à essa análise estão presentes na figura 29.

Figura 29 - Curvas de distribuição granulométrica das partículas dos pós de vidro produzidos –(a) fração passante, (b) fração retida.



Fonte: O autor (2023).

A Tabela 8 apresenta o resumo dos diâmetros característicos D_{10} , D_{50} , D_{90} e a relação D_{90} / D_{10} . Os materiais produzidos são similares aos materiais utilizados por Schwarz, Cam e Neithalath (2008), Nassar e Soroushian (2012), Kamali e Ghahremaninezhad (2015) e Siad *et al.*

(2016).

Tabela 8 - Diâmetros característicos (D_{10} , D_{50} , D_{90}), heterogeneidade (D_{90}/D_{10}) e área superficial específica (S), referentes às faixas granulométricas das partículas de vidro.

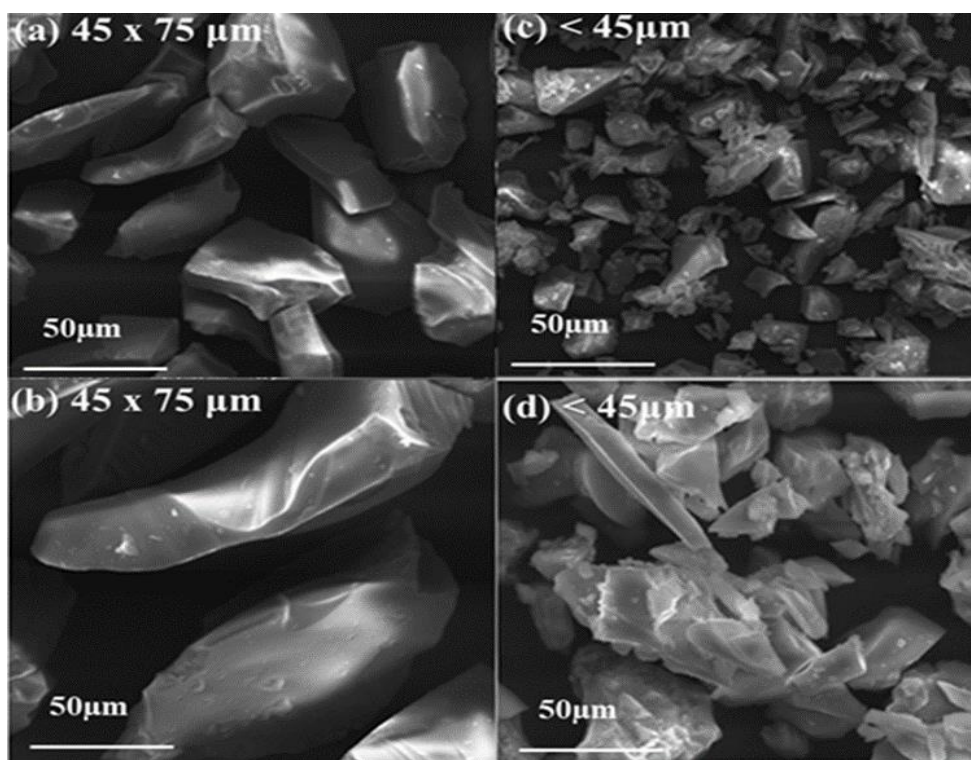
Material	D_{10} μm	D_{50} μm	D_{90} μm	D_{90}/D_{10}	S (m^2/kg)
Faixa 45 x 75 μm	36,30	56,20	86,90	2,40	110,00
Faixa < 45 μm	7,41	20,24	42,03	5,67	427,00
Faixa 25 x 45 μm	20,58	39,63	75,57	3,67	170,00
Faixa < 25 μm	4,28	11,92	25,82	6,02	694,00

Fonte: O autor (2023).

3.1.1.5 Análise morfológica das partículas de vidro

Para análise da morfologia das partículas de vidro foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6460 utilizando detector de elétrons secundários. O material pulverizado foi fixado em porta amostra com o auxílio de fita adesiva de carbono e metalizado com carbono. A figura 30 apresenta imagens das partículas nas faixas < 45 μm e 45x75 μm . É possível observar que as partículas de vidro da faixa 45x75 μm são ligeiramente alongados com faces bem definidos. Por sua vez, as partículas das faixas < 45 μm apresentam uma morfologia mais variada, com partículas finas recobrindo partículas mais grossas.

Figura 30 - Micrografias eletrônicas das partículas de vidro obtidas com aumentos de 1500 x (a,c), 4000 x (b) e 6000 x (d).

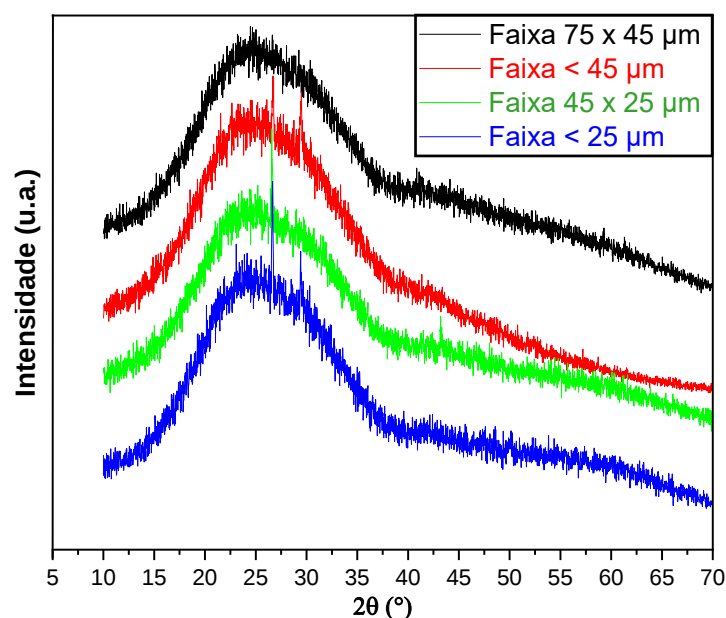


Fonte: O autor (2023).

3.1.1.6 Caracterização Estrutural e Composicional

A caracterização estrutural e composicional dos pós de vidro produzidos foi realizada por difração de raios (DRX) e espectrometria por fluorescência de raios-X (FRX). As análises de DRX no laboratório de tecnologia mineral – LTM – UFPE. Foi utilizado o equipamento Bruker D2 Phaser operando com 300 W (30 kV e 10 mA), radiação Cu-K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) e utilizando detector Bruker-Lynxeye. A faixa de varredura (2θ) foi de 5° a 80° , com passo do goniômetro de $0,002019^\circ$ e 0,5 segundo por passo. O resultado dessa análise é apresentado na figura 31. Fica claro que ambos os materiais são amorfos. Observa-se que todas as faixas apresentam halo amorfo em $2\theta = 25^\circ$, sendo similar ao difratograma apresentado por Soliman e Tagnit-Hamou (2016).

Figura 31 - Difratogramas de raios-X das partículas de vidro.



Fonte: O autor (2023).

As análises de espectrometria por fluorescência de raios-x (FRX) do pó de vidro e dos demais materiais foram realizadas utilizando a técnica da pérola fundida, visando maior precisão das análises. Para preparação das pérolas foram pesadas 1,5 g de cada amostra moída, inferior à $75 \mu\text{m}$, juntamente com os fundentes (6,0 g) de tetraborato e metaborato de lítio, mais (0,02 g) de iodeto de amônio. Após a pesagem dos materiais foi realizada uma homogeneização da mistura com o fundente. Em seguida a mistura é colocada no cadinho de Pt/Ag e levadas para a máquina de fusão. A amostra foi submetida a uma temperatura de 1080°C durante um período de aproximadamente 14 minutos. Após o processo de fundição ocorre a moldagem das pérolas e o resfriamento rápido. Para a análise de FRX foi utilizado o equipamento AXIOS mAX, PANalytical. O ensaio de perda ao fogo ocorreu em paralelo, consistindo em analisar a perda de massa de uma amostra de 1,0 g submetida a uma temperatura de 950°C , durante uma hora. A

Tabela 9 apresenta os compostos óxidos constituintes das faixas granulométricas do vidro estudado. Os materiais apresentam composição semelhante indicando que homogeneização foi bem executada.

Tabela 9 - Percentual dos compostos óxidos predominantes nas amostras de vidro por espectrometria FRX.

Óxidos Constituintes	Vidro < 45 µm	Vidro - 45 x 75 µm
SiO ₂	76,01	76,07
CaO	10,98	11,21
Na ₂ O	7,91	8,17
Al ₂ O ₃	2,36	2,19
MgO	0,81	0,84
K ₂ O	0,60	0,58
Fe ₂ O ₃	0,51	0,31
SO ₃	0,20	0,22
TiO ₂	0,05	0,06
Perda ao Fogo (P.F)	0,55	0,35

Fonte: O autor (2023).

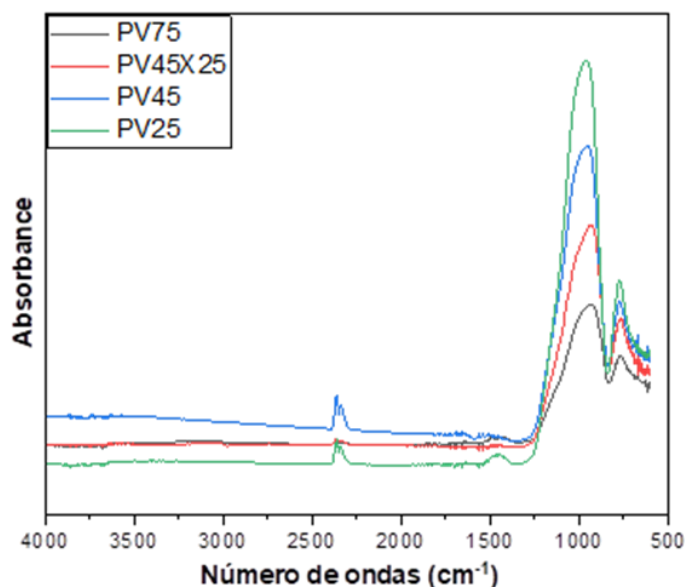
3.1.1.7 Espectroscopia IV por Refletância Total Atenuada - ATR

Para esta análise, foi utilizado o espectrômetro de IV por transformada de Fourier (FTIR) modelo Bruker, Vertex70, por meio de espectroscopia por refletância total atenuada (ATR). No acessório ATR, colocou-se uma quantidade suficiente de pó de vidro na faixa < 45 µm sobre o cristal de seleneto de zinco (ZnSe), garantindo que o cristal estivesse completamente coberto pela amostra. Foram realizadas 3 leituras para cada velocidade de revolução. A tabela 10 mostra as configurações utilizadas nos procedimentos de análise. A figura 32 apresenta o espectro IV obtido pela técnica ATR de amostras de pó de vidro. O tratamento dos espectros e a identificação das bandas foram realizados no aplicativo Bruker Opus 7.2.139.1294.

Tabela 10 - Configuração utilizada nas técnicas TR e ATR nas análises preliminares.

Configurações	ATR
Número de varreduras	64
Resolução (cm ⁻¹)	2
Intervalo de varredura (cm ⁻¹)	4000-500

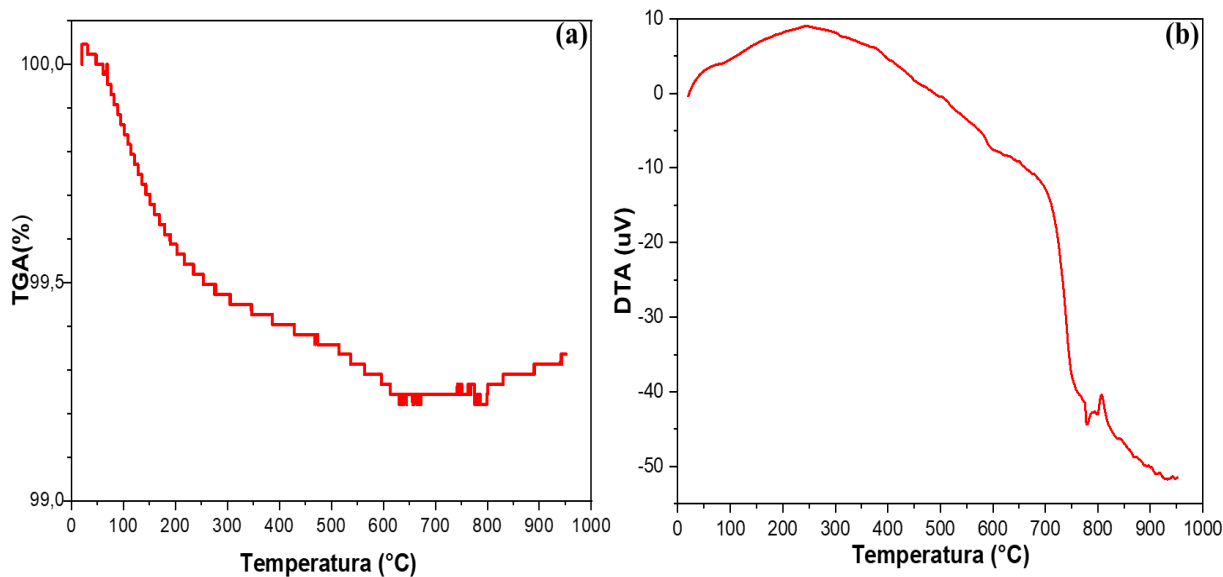
Fonte: O autor (2023).

Figura 32 - Espectro IV do pó de vidro PV45.

Fonte: O autor (2023).

3.1.1.8 Análises Térmicas

Para a análise das curvas ATD-TG foi utilizado o equipamento Shimadzu DTH 60, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. A temperatura máxima estabelecida foi de 1100 °C. A atmosfera para realização das análises foi (N₂), com uma taxa de fluxo constante de 50 mL/min. O porta-amostra utilizado foi um cadinho de alumina cilíndrico, com diâmetro de 5,0 mm e altura de 2,5 mm. As medidas foram realizadas com aproximadamente 50 mg de cada alíquota. A figura 33 apresenta as curvas ATD-TG do pó de vidro com atmosfera inerte (N₂). Observa-se que o vidro tem perda de massa inferior à 2%.

Figura 33 - Curvas características de TG (a) e ATD (b) do pó de vidro PV45.

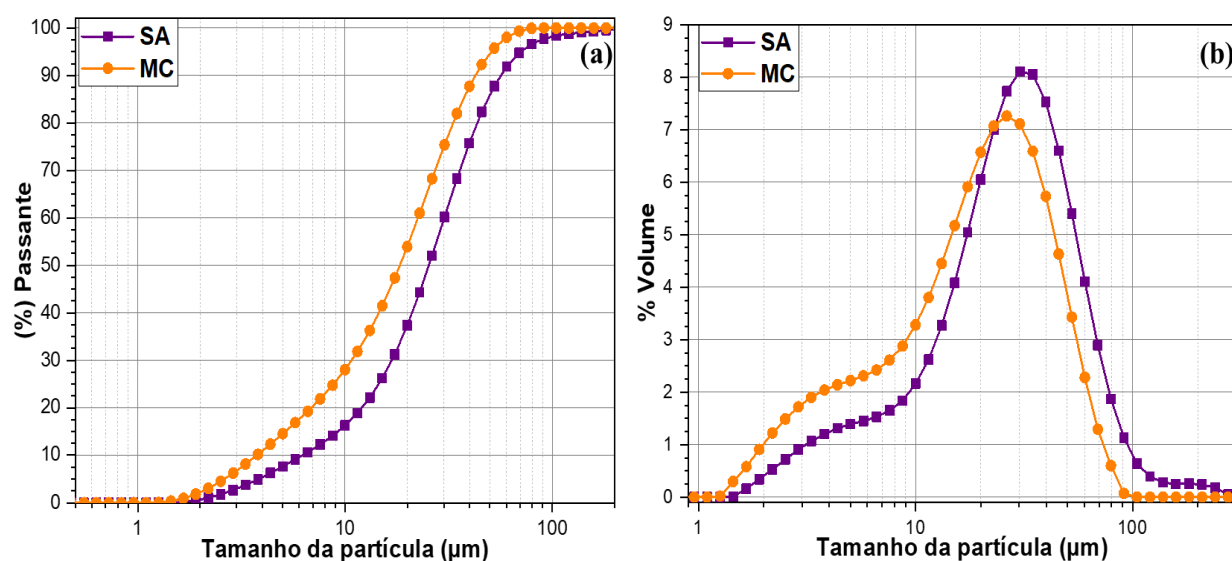
Fonte: O autor (2023).

3.2 CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DAS ADIÇÕES PRIMÁRIAS

3.2.1 Caracterização dimensional e morfológica

A análise granulométrica e as micrografias eletrônicas realizadas nos materiais cimentícios suplementares seguiu os mesmos procedimentos descritos para análise das partículas de vidro. A distribuição das partículas e os diâmetros característicos estão presentes na figura 34 e Tabela 11. A figura 35 apresenta os aspectos morfológicos da sílica ativa e do metacaulim.

Figura 34 - Curvas de distribuição granulométrica das partículas das adições minerais – (a) fração retida e (b) fração passante.



Fonte: O autor (2023).

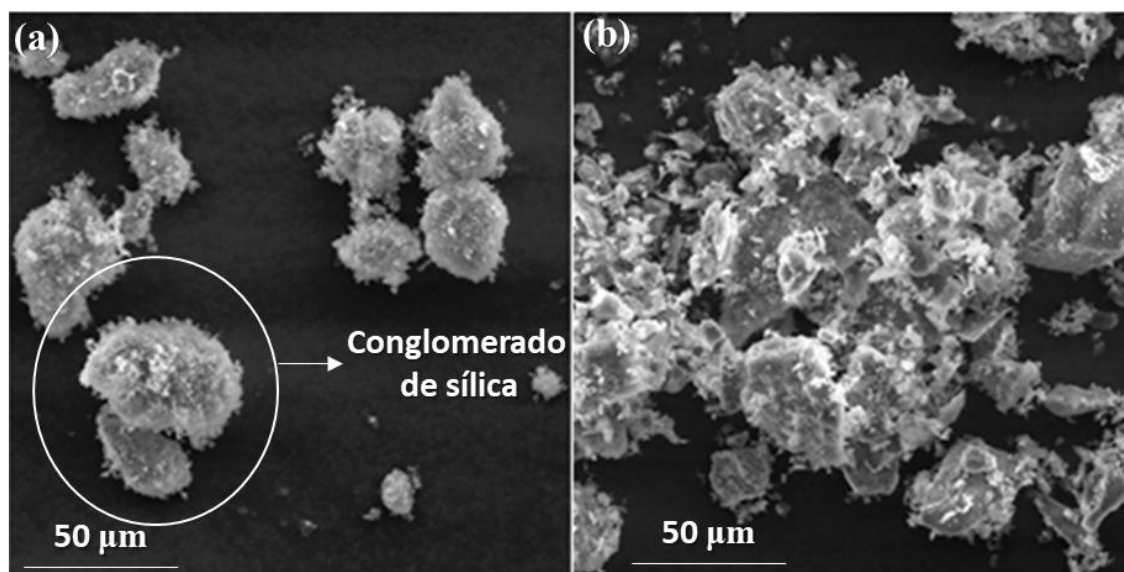
Tabela 11 - Diâmetro característicos das adições.

Material	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	D_{90}/D_{10}	Área superficial específica - S (m ² /kg)
Metacaulim	4,3	21,1	48,7	11,3	543
Sílica ativa	5,8	25,9	62,3	10,8	427
Faixa 45 x 75 μm	36,3	56,2	86,9	2,4	110
Faixa < 45 μm	7,41	20,24	42,03	5,67	427
Faixa 25 x 45 μm	20,58	39,63	75,57	3,67	170
Faixa < 25 μm	4,28	11,92	25,82	6,02	694

Fonte: O autor (2023).

A sílica ativa apresenta baixa área superficial específica, provavelmente pode ter ocorrido aglomeração das partículas, uma vez que é de conhecimento que a sílica é uma adição extremamente fina com área superficial específica superior a 5000 m²/kg.

Figura 35 - Micrografias eletrônicas das partículas de (a) sílica ativa (b) e metacaulim.



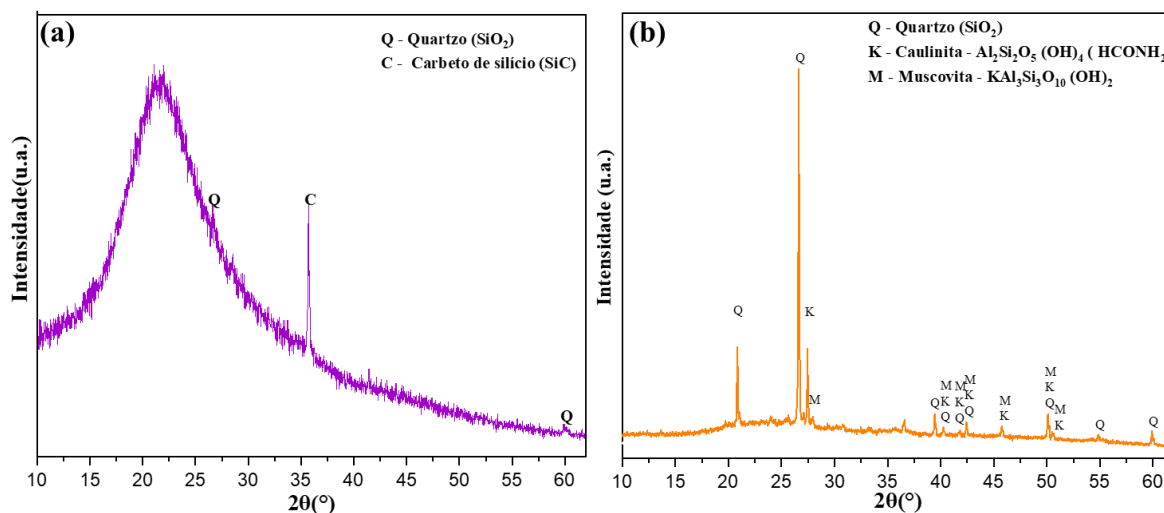
Fonte: O autor (2023).

Em ambas as micrografias é possível observar que a sílica ativa se encontra aglomerada. É notável a existência de cristais recobertos por partículas menores nas partículas de metacaulim, características semelhantes também são observadas nas micrografias da sílica e do metacaulim estudados por Andrade *et al.* (2019).

3.2.2 Caracterização estrutural e composicional

O procedimento para preparo das amostras para reação do ensaio de (DRX) e (FRX) seguiram os mesmos critérios utilizados para caracterização composicional das partículas de vidro. Os difratogramas e a quantificação dos óxidos das adições estão presentes na figura 36 e na Tabela 12.

Figura 36 - Difratogramas de raios-X dos materiais cimentícios suplementares – (a) sílica ativa, (b) metacaulim.



Fonte: O autor (2023).

Tabela 12 - Percentual dos óxidos predominantes nas adições primárias obtidas por espectrometria FRX.

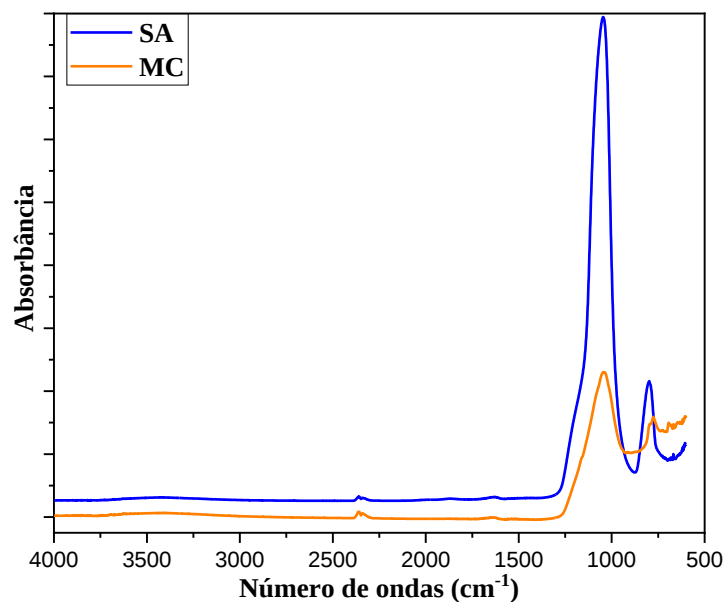
Óxidos Constituintes	Sílica ativa	Metacaulim
SiO ₂	92,70	57,93
CaO	1,03	1,67
Na ₂ O	0,75	0,81
Al ₂ O ₃	0,89	28,43
MgO	0,68	0,77
K ₂ O	0,58	1,8
Fe ₂ O ₃	0,17	4,56
SO ₃	0,16	0,19
TiO ₂	0,01	0,73
Perda ao Fogo (P.F)	3,03	3,10

Fonte: O autor (2023).

Os difratogramas das adições apresentaram os picos cristalinos clássicos e esperados para esses materiais. A análise dos compostos óxidos se destaca pelo elevado teor de K₂O e Na₂O presentes no metacaulim, visto que superior as ocorrências apresentadas na literatura.

3.2.3 Espectroscopia IV por Refletância Total Atenuada – ATR

O procedimento para realização da espectroscopia de IV na amostra de sílica ativa seguiram os mesmos critérios utilizados para caracterização das partículas de vidro. A figura 37 apresenta os espectros IV obtido pela técnica ATR de amostras de sílica ativa e metacaulim.

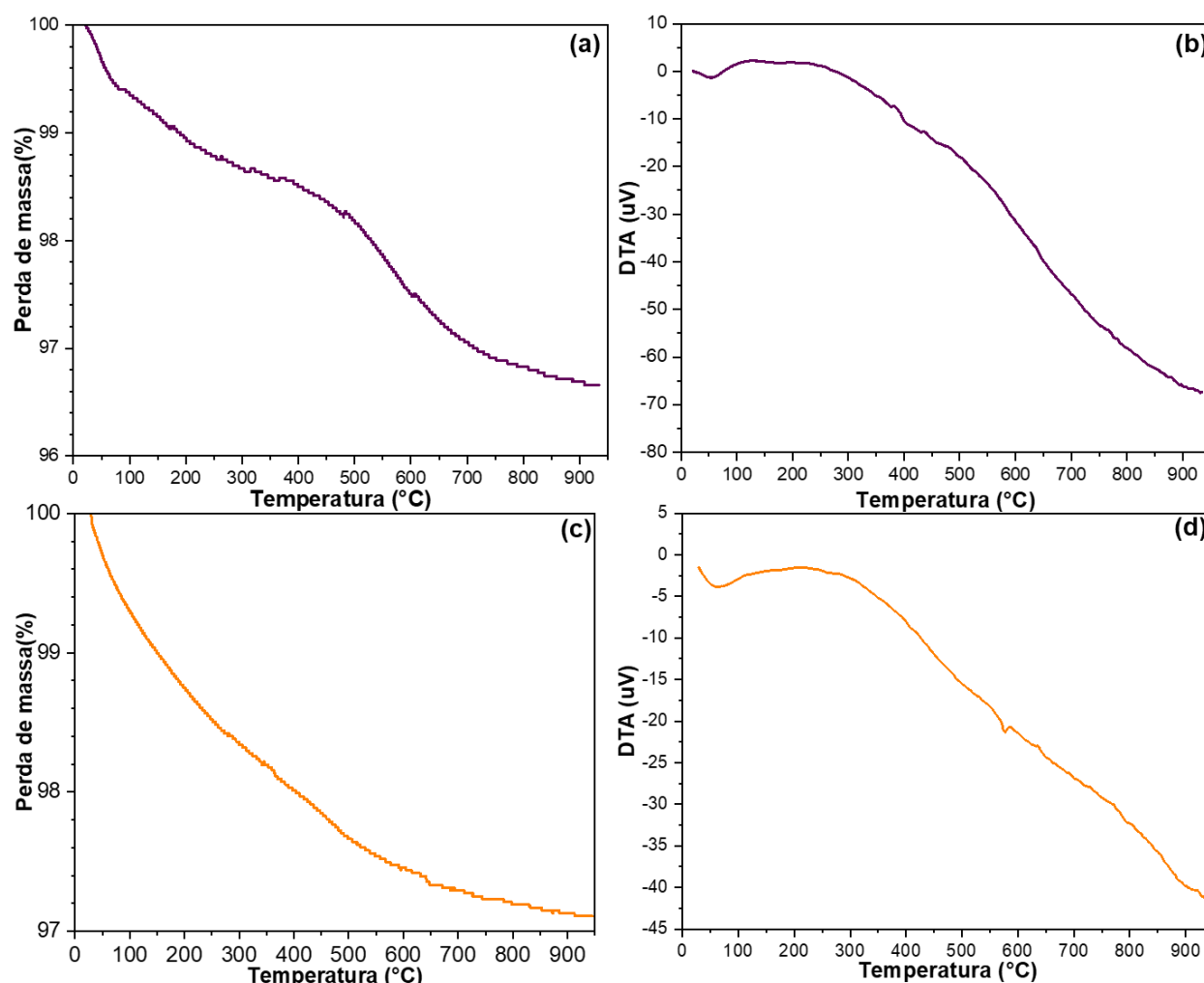
Figura 37 – Espectro IV da sílica ativa e do metacaulim.

Fonte: O autor (2023).

3.2.4 Análise Térmica

O procedimento para realização da análise térmica nas amostras de sílica ativa e metacaulim seguiu os mesmos critérios utilizados para caracterização das partículas de vidro. A figura 38 apresenta as curvas ATD-TG da sílica ativa e do metacaulim com atmosfera inerte (N_2). Observa-se que ambos os materiais apresentam perda de massa próxima de 3%.

Figura 38 – Curvas características de TG (a,c) e ATD (b,d) da sílica ativa e do metacaulim.



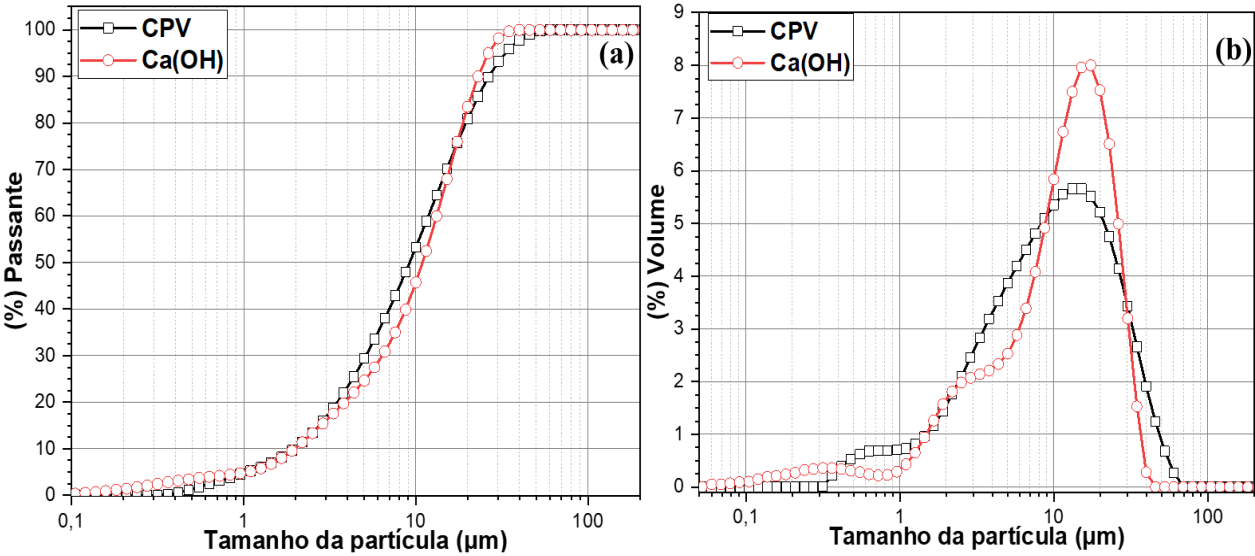
Fonte: O autor (2023).

3.3 CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DO CIMENTO CPV e $Ca(OH)_2$

3.3.1 Caracterização dimensional e morfológica

A análise granulométrica e as micrografias eletrônicas realizadas no cimento CPV e no $Ca(OH)_2$ materiais cimentícios suplementares seguiu os mesmos procedimentos descritos para análise das partículas de vidro. A distribuição das partículas e os diâmetros característicos estão presentes na figura 39 e Tabela 13.

Figura 39 – Curvas de distribuição granulométrica das partículas do cimento CPV e Ca(OH)_2 - (a) fração passante, (b) fração retida.



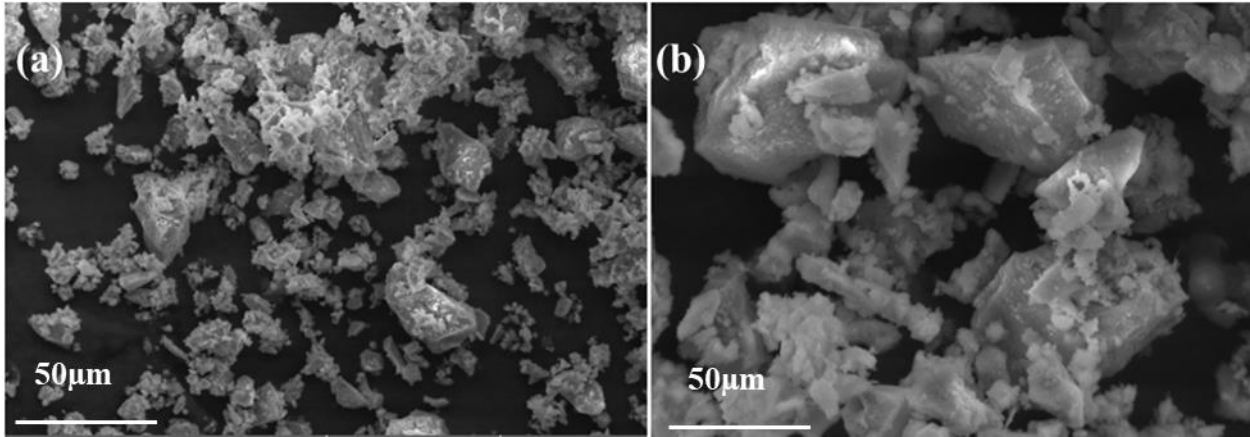
Fonte: O autor (2023).

Tabela 13 – Diâmetro característicos das partículas do cimento CPV e Ca(OH)_2 .

Material	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	D_{90}/D_{10}	Área superficial específica - S (m^2/kg)
Cimento CPV	2,2	10,5	30,4	14,7	1250
Ca(OH)_2	2,2	12,5	26,3	11,9	1820

Fonte: O autor (2023).

Figura 40 – Micrografias eletrônicas das partículas de cimento CPV obtidas com aumentos de 1500 x (a) e 6000 x (b).



Fonte: O autor (2023).

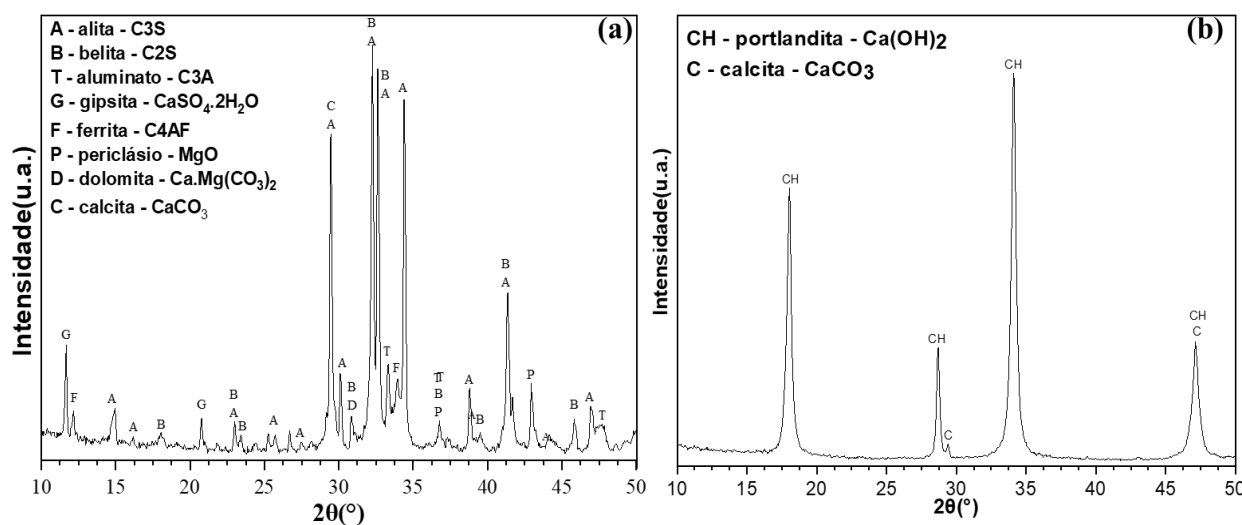
A curva de distribuição granulométrica do cimento e do Ca(OH)_2 mostram que o hidróxido de cálcio apresenta uma quantidade partículas finas, ligeiramente superior à do cimento. A micrografia eletrônica do cimento indica a predominância de partículas angulares e tamanho

variado, conforme a figura 40.

3.3.2 Caracterização estrutural e composicional

O procedimento para preparo das amostras para reação do ensaio de DRX e FRX seguiram os mesmos critérios utilizados para caracterização composicional das partículas de vidro. Os difratogramas e a quantificação dos óxidos do cimento CPV e Ca(OH)_2 estão presentes na figura 41 e Tabela 14.

Figura 41 – Difratogramas de raios-X do cimento CPV(a) e Ca(OH)_2 (b).



Fonte: O autor (2023).

Tabela 14 – Percentual dos óxidos predominantes nas amostras do cimento CPV e Ca(OH)_2 obtido por espectrometria FRX.

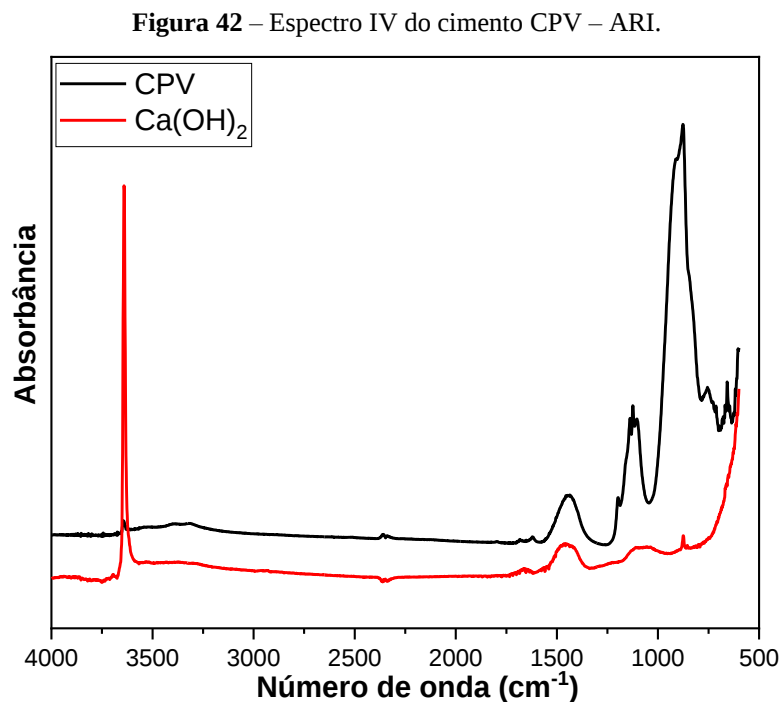
Óxidos Constituintes	CPV	Ca(OH)_2
SiO_2	18,44	0,49
CaO	60,16	72,45
Na_2O	0,18	-
Al_2O_3	4,46	0,32
MgO	5,19	0,58
K_2O	0,89	0,05
Fe_2O_3	2,43	0,09
SO_3	4,01	-
TiO_2	-	-
Perda ao Fogo (P.F)	3,79	25,76

Fonte: O autor (2023).

O difratograma dos aglomerantes apresentou os picos característicos de alita e belita para cimento CPV, com intensidades variadas. Como esperado os picos de Portlandita são predominantes no hidróxido de cálcio. O CaO foi o óxido predominante nas amostras de Ca(OH)_2 e cimento CPV.

3.3.3 Espectroscopia de IV por Refletância Total Atenuada – ATR

O procedimento para realização da espectroscopia IV na amostra de cimento CPV – ARI e do hidróxido de cálcio, seguiram os mesmos critérios utilizados para caracterização das partículas de vidro. A figura 42 apresenta os espectros IV obtido pela técnica ATR na amostra de cimento CPV - ARI.

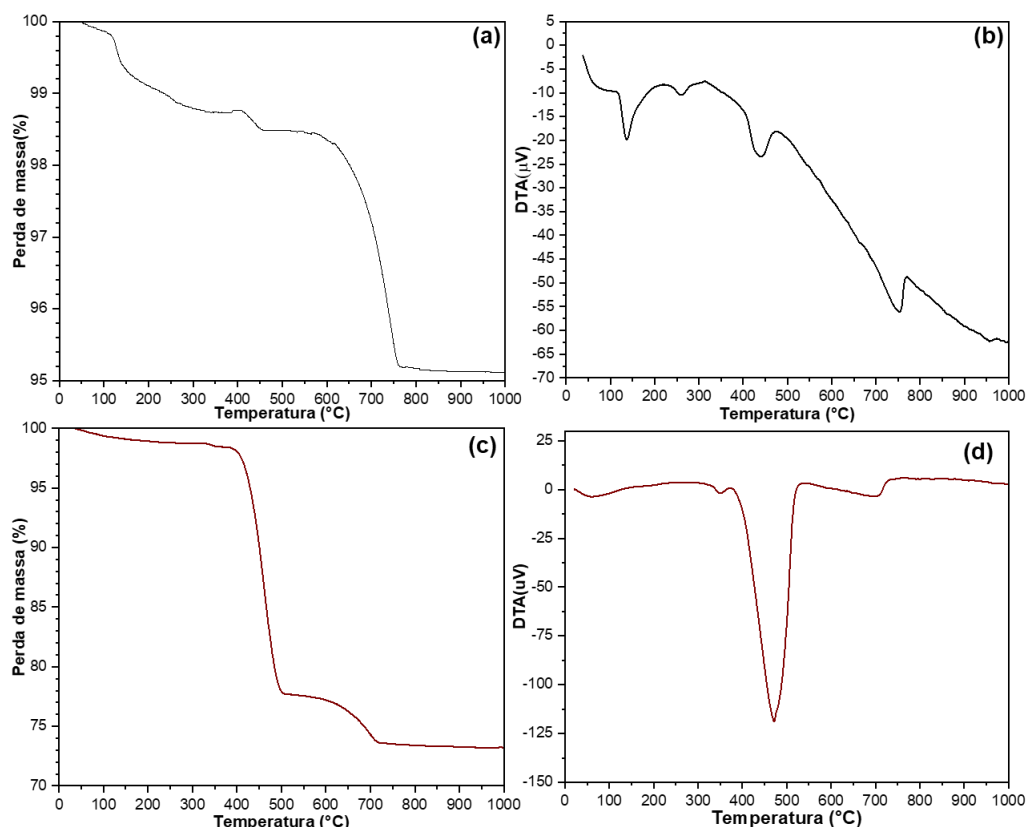


Fonte: O autor (2023).

3.3.4 Análise Térmica

O procedimento para realização da análise térmica nas amostras de cimento e hidróxido de cálcio seguiu os mesmos critérios utilizados para caracterização das partículas de vidro. A figura 43 apresenta as curvas ATD-TG do cimento Portland e do hidróxido de cálcio com atmosfera inerte (N₂). Observa-se que o Ca(OH)₂ apresenta perda de massa próxima de 75% enquanto o cimento de 95%.

Figura 43 – Curvas características de TG e ATD do cimento (a, b) do hidróxido de cálcio (c, d).



Fonte: O autor (2023).

3.4 ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS DAS COMPOSIÇÕES

Essa seção descreve os procedimentos utilizados para realização de análises no estado anidro, fresco e endurecido dos compósitos constituídos pelas adições unitárias e binárias. Nesta etapa foram realizados ensaios físico-químicos que permitiram investigar características reológicas, mecânicas e microestruturais das combinações estudadas. Na próxima etapa da pesquisa serão realizadas investigações microestruturais e macroestruturais, a fim de analisar o desempenho mecânico e de durabilidade das combinações propostas.

Visando analisar as características no estado anidro, fresco e endurecido das misturas produzidas, foram criados nove lotes de amostras. Cada lote foi composto por uma adição, quatro faixas de partículas de vidro e mais quatro combinações binárias, formada por cada material cimentício suplementar em conjunto com cada tipo de vidro. O teor de utilização de cada adição foi replicado para os dois tipos de pó de vidro e as misturas binárias, visando realizar análises horizontais. A figura 44 apresenta o resumo dos ensaios realizados. Já a tabela 15 apresenta o arranjo dos lotes.

Figura 44 – Resumo das análises no estado fresco anidro e endurecido.

Estado Anidro	• Densidade – ATP • Estruturais (DRX, IV) – Químicos (FRX) –Térmicos (ATD/TG) • Potencial de pozolanidade por condutividade elétrica
Estado Fresco	• Consistência normal da pasta – Flow table – Minicone • Determinação do tempo de pega por calorimetria semi-adiabática • Reologia
Estado endurecido	• Índice de atividade pozolânica – Índices físicos – Cinética da hidratação • Resistência à compressão – Módulo de elasticidade • Estruturais (DRX, IV) – Térmicos (ATD/TG) • Microestrutura (MEV/EDS)

Fonte: O autor (2023).

Tabela 15 - Arranjo e identificação dos grupos de misturas estudados.

Lote	Adição	Adição complementar	Identificação da mistura binária	
I	Sílica ativa (SA)	PV 45 x 75	SAPV45x75	SAPV25x45
		PV 45	SAPV45	SAPV25
II	Metacaulim (MC)	PV 25 x 45	MCPV45x75	MCPV25x45
		PV 25	MCPV45	MCPV25

Fonte: O autor (2023).

3.4.1 Determinação das misturas binárias

Para realização dos ensaios foi necessário estabelecer um método para formulação das composições binárias. As misturas binárias foram formuladas em função do equivalente alcalino disponível por cada material, sendo esperado que a contribuição dos equivalentes alcalinos dos materiais não ultrapassasse um limite pré-estabelecido. O método consiste em formular a mistura binária do material cimentício suplementar em função do percentual de equivalente alcalino ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \text{K}_2\text{O}$) de cada material. Primeiramente foi determinado por espectrometria FRX percentual de (Na_2O) e (K_2O) dos materiais que irão constituir a mistura binária e em seguida foi determinado o equivalente alcalino de cada material. Após determinar o equivalente alcalino de cada material, foi fixado o limite de álcalis equivalente disponível (LAD) resultante da contribuição dos materiais constituintes da mistura binária. Esse limite é variável em função da quantidade de álcalis dos materiais cimentícios suplementares envolvidos, uma vez que cada material apresenta uma quantidade distinta desses elementos e são utilizados em percentuais e de

modos específicos. A massa de vidro foi incorporada à mistura visando não ultrapassar o LAD. Para as misturas binárias formadas por sílica ativa e pó de vidro o LAD foi de 1,5%, mesmo limite para as misturas formadas por escória e vidro. Para a mistura com metacaulim e vidro o LAD foi de 2,5%. A mistura binária também deve satisfazer os critérios de uma tríplice restrição: (I) A mistura binária obtenha característica química predominante do material cimentício suplementar primário, sem haver prejuízo ao seu enquadramento químico. (II) Proporcionar desempenho mecânico e de durabilidade de modo similar ao material primário. (III) Ter de menor custo que o material primário. As equações 9 e 10 explicam a equação 11. Por fim, após conhecimento dos equivalentes alcalinos e definição do limite de álcalis equivalente da mistura binária, utiliza-se a equação 11 para determinar a massa de vidro e consequente percentual que será utilizada na constituição da mistura binária. Após formular a mistura binária, foi realizada análises de fluorescência de raios-X, com a finalidade de comparar os álcalis disponíveis estimados a partir da equação 11 e os álcalis encontrados. O Tabela 16 apresenta os teores das misturas binárias formuladas neste estudo.

$$\textbf{(Equação 9)} \text{ (I) } \textit{Massa do Vidro (mv)} + \textit{Massa do Material Cimentício Suplementar (mcs)} = \textit{Massa Total (mt)}$$

$$\textbf{(Equação 10)} \text{ (II) } (mcs \times EA_{mcs}) + (mv \times EA_v) = LAD \times mt$$

$$\text{De (I), } (mcs) = (mt) - (mv) \therefore \text{Substituindo em (II)}$$

$$EA_v \times mv + EA_{mcs} (mt - mv) = LAD \times mt \text{ . Resolvendo para mv:}$$

$$EA_v \times mv + EA_{mcs} \times mt - EA_{mcs} \times mv = LAD \times mt$$

$$\textbf{(Equação 11)} \text{ } mv = \frac{(LAD - EA_{mcs}) \times mt}{(EA_v - EA_{mcs})}$$

Onde:

mv – Massa de Vidro;

mcs – Material Cimentício Suplementar;

mt – Massa Total;

LAD – Limite de Álcalis Disponíveis;

EA – Equivalente Alcalino;

EA_v – Equivalente alcalino do vidro;

EA_{mcs} – Equivalente alcalino do material cimentício suplementar.

Tabela 16 - Composição das misturas binárias.

Adição mineral	Adição	Limite de álcalis disponível - LAD	Composição (%)	
			Adição mineral	Vidro
Sílica ativa EA: 1,13	Vidro - EA: 8,3	1,5	94,84	5,16
Metacaulim EA: 1,98		2,5	91,77	8,23

Fonte: O autor (2023).

3.4.2 Ensaio no estado anidro

3.4.2.1 Densidade

A massa específica foi determinada de acordo com os parâmetros prescritos na NBR 16605:2017 - Determinação da massa específica utilizando o frasco de Le Chatelier (ABNT, 2017). A densidade é determinada pela relação entre a massa do material e o volume do líquido existente no recipiente, medido através do deslocamento no frasco de Le Chatelier.

A massa unitária foi determinada conforme parâmetros presentes na NMR NN 45:2006 - Agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios (ABNT, 2006). O ensaio consiste em determinar a relação entre massa e volume do material no estado solto.

3.4.2.2 Caracterização dimensional

As curvas de distribuição granulométricas e seus respectivos diâmetros característicos das adições binárias foram determinados utilizando os mesmos procedimentos utilizados para caracterização das partículas de vidro e das adições unitárias, como descrito nos itens 3.1.1.4 e 3.2.1.

3.4.2.3 Análise composicional

Difração de raios-X

Visando analisar a influência das partículas de vidro na estrutura cristalina das adições binárias, foram realizados ensaios de difração de raios-X nas misturas binárias utilizando os mesmos procedimentos para análise composicional das partículas de vidro descritos no item 3.1.1.6.

Fluorescência de raios-X

Visando quantificar os álcalis totais e disponíveis foram realizadas análises de espectrometria FRX nas misturas cimentícias contendo cimento CPV e adições minerais simples e binárias. Primeiramente foram quantificados todos os óxidos presentes nos materiais cimentícios suplementares simples e binários e quantificando os álcalis disponíveis em cada material,

realizando um total de quatorze análises nessa fase. Em seguida foram realizadas análises FRX em todas as misturas constituídas por substituição em massa e em volume, e na mistura referência, totalizando quarenta e um ensaios. Ao todo foram realizadas cinquenta e cinco análises. O procedimento está descrito no item 3.1.1.6.

3.4.2.4 Análise da pozolanicidade por condutividade elétrica

Essa análise foi realizada no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes – LABTAG – UFPE, conforme os procedimentos utilizados por Basto (2018). O ensaio consistiu em analisar a condutividade elétrica de uma solução contendo adições unitárias e binárias em conjunto com o hidróxido de cálcio, durante um período de 1000 segundos. Conforme Basto (2018), o ensaio utilizou um béquer de vidro de 250 ml de volume, uma rolha de borracha com três furos, sendo estes designados: a célula de condutividade, termômetro controlador da temperatura do prato e o tubo para inserção da amostra. Além desses um agitador magnético com controle de agitação e temperatura da base. Foi utilizado o condutivímetro Digimed DM-32 v.2.0 com uma célula de condutividade da Digimed modelo DMC-001 XTX. Para o preparo da solução foi aquecido 1050 ml de água até atingir 60° C, em seguida foi adicionado 840 mg de Ca(OH)_2 P.A (95%). Para cada análise da condutividade foi utilizada 200 ml da solução de Ca(OH)_2 aquecida, sendo adicionado 4 g da adição unitária e binária. Ao todo foram realizadas 14 análises.

3.4.3 Ensaio no estado fresco

3.4.3.1 Determinação da consistência normal da pasta

Visando analisar a consistência das pastas produzidas com adições, pó de vidro e suas combinações binárias, foram realizados ensaios de consistência conforme os parâmetros prescritos pela ABNT NBR 16606:2018 – Cimento Portland – Determinação da água de consistência normal (ABNT, 2018b). Inicialmente foi determinada a quantidade de água de consistência normal para a amostra padrão que continha apenas cimento Portland CP-V. Visando analisar a influência da utilização do pó de vidro individualmente e presente nas misturas binárias, foram reproduzidas as pastas relativas as misturas de cada família, utilizando a relação água/aglomerante obtida a partir da pasta padrão, conseqüentemente variando a consistências das demais pastas. Para ensaio foi utilizado 500 g de material cimentício e relação água / aglomerante igual a 0,275. Para cada família foram produzidas 05 pastas substituindo a massa do cimento pela massa adição mineral. O Tabela 17 apresenta os percentuais utilizados para produção das pastas.

Tabela 17 - Composição das pastas utilizadas no ensaio de consistência.

Pasta	Cimento CPV	Relação água/ aglomerante	Adição primária	Adição secundária	
Referência	500	-	-	-	
Lote I – 95% CPV + 5% (SA, PV45, PV75, SAPV45, SAPV75)					
Pastas	Cimento CPV	Relação água/ aglomerante	Adição Primária	Adição Secundária	
			SA	Vidro < 45 µm	Vidro 45 x 75 µm
SA	475 g	0,275	25 g	-	-
PV45			-	25 g	-
PV75			-	-	25 g
SAPV45			23,7 g	1,3	-
SAPV75			23,7 g	-	1,3
Lote II – 90% CPV + 10% (MC, PV45, PV75, MCPV45, MCPV75)					
Pastas	Cimento CPV	Relação água/ aglomerante	Adição Primária	Adição Secundária	
			MC	Vidro < 45 µm	Vidro 45 x 75 µm
MC	450 g	0,275	50 g	-	-
PV45			-	50 g	-
PV75			-	-	50 g
MCPV45			45,88 g	4,12 g	-
MCPV75			45,88 g	-	4,12 g

Fonte: O autor (2023).

3.4.3.2 Flow table

A consistência das pastas foi medida utilizando a mesa de consistência de acordo com a norma ABNT NBR 13276:2016 (ABNT, 2016). Esta análise consiste em determinar o diâmetro de espalhamento de uma pasta moldada num artefato troncocônico, após a sequência de subida e descida durante 30 vezes durante 30 segundos de forma contínua. O resultado foi obtido a partir de duas medições perpendiculares do diâmetro de espalhamento da pasta utilizando um paquímetro.

3.4.3.3 Calorimetria semi-adiabática

Os tempos de início e fim de pega foram determinados através do ensaio de calorimetria semi-adiabática, conforme parâmetros presentes na ASTM C1753:2015 (ASTM, 2015). Essa técnica avalia a hidratação precoce de misturas cimentícias através de medições térmicas. Também foram determinados os picos de temperatura das pastas cimentícias analisadas durante o ensaio. Foi utilizado um calorímetro XATA 2.0 de oito canais. Ao todo foram analisadas 41 pastas, sendo uma referência, 20 pastas com substituições realizadas em massa e 20 pastas com as substituições ocorrendo em volume. As pastas foram misturadas em misturador mecânico por dois minutos em 720 rpm, sendo descansadas por 30 segundos após a mistura. Este procedimento foi repetido duas vezes. Após o preparo as amostras eram inseridas nos terminais do calorímetro, sendo analisadas

por lote de 05 pastas. As análises tiveram duração de 12 horas. As misturas em massa utilizaram as mesmas proporções das pastas utilizadas no ensaio de consistência, conforme Tabela 17.

3.4.3.4 Análise do espalhamento pelo método do minicone

O espalhamento pelo método do minicone consiste em determinar o diâmetro espalhado de uma pasta moldada em artefato tronco-cônico de acrílico e lançada numa placa de vidro. O resultado foi obtido a partir de duas medições perpendiculares do diâmetro espalhado da pasta, com auxílio do paquímetro. As pastas foram preparadas manualmente em recipiente de vidro com pistilo. Cada massa de amostra continha 100 g, sendo analisadas com relações água / cimento igual a 0,6, 0,7 e 0,8, detalhadas na tabela 18. Ao todo foram realizadas 120 análises.

Tabela 18 - Composição das pastas utilizadas no ensaio de minicone.

Pasta	Cimento CPV	Relação água/ aglomerante	Adição primária	Adição secundária	
Referência	100	-	-	-	
Lote I – 95% CPV + 5% (SA, PV45, PV75, SAPV45, SAPV75)					
Pastas	Cimento CPV	Relação água/ aglomerante	Adição Primária	Adição Secundária	
			SA	Vidro < 45 µm	Vidro 45 x 75 µm
SA	95 g	0,6	5 g	-	-
PV45			-	5 g	-
PV75			-	-	5 g
SAPV45			4,70 g	0,3 g	-
SAPV75			4,70 g	-	0,3 g
Lote II – 90% CPV + 10% (MC, PV45, PV75, MCPV45, MCPV75)					
Pastas	Cimento CPV	Relação água/ aglomerante	Adição Primária	Adição Secundária	
			MC	Vidro < 45 µm	Vidro 45 x 75 µm
MC	90 g	0,6	10 g	-	-
PV45			-	10 g	-
PV75			-	-	10 g
MCPV45			9,17 g	0,83 g	-
MCPV75			9,17 g	-	0,83 g

Fonte: O autor (2023).

3.4.3.5 Análise reológica das pastas

Com a finalidade analisar a resistência da pasta ao fluxo, foi analisada a viscosidade das pastas produzidas com adições minerais, micropartículas de vidro e adições binárias. Foi utilizado um reômetro Brookfield modelo DV-III capaz de medir a tensão de cisalhamento e a viscosidade em função da taxa de cisalhamento de um determinado fluido em fluxo. As pastas produzidas utilizaram relação água / aglomerante igual a 0,6, com massa de 100g. Para cada família foram produzidas 05 pastas. A tabela 19 apresenta os parâmetros de rede utilizados na programação do reômetro.

Tabela 19 - Configurações do reômetro.

Nº do spindle	31
Nº de leituras	15
Incremento de velocidade	0,2 rpm / leitura
Incremento da taxa de cisalhamento	0,068 / leitura

Fonte: O autor (2023).

3.4.4 Ensaio no estado endurecido

3.4.4.1 Atividade pozolânica

Índice de atividade pozolânica com o cimento

O índice de atividade pozolânica dos materiais estudados foram determinados de acordo com os procedimentos previstos na ABNT NBR 5752:2014 – Materiais pozolânicos: determinação do índice de desempenho aos 28 dias com cimento Portland (ABNT, 2015b). O procedimento consiste em comparar o desempenho de uma argamassa 1:3 preparada com 75% de cimento Portland e 25% do material pozolânico, com uma argamassa padrão 1:3 com cimento, areia normal e água. Conforme solicitado pela norma, foi realizado o teste de espalhamento da argamassa na mesa de consistência na argamassa padrão utilizando 1% de aditivo superplastificante, sendo utilizado o mesmo teor para as demais misturas, visando analisar a influência das micropartículas de vidro. O material será considerado pozolânico quando a resistência aos 28 dias da argamassa que contém este material for igual ou superior à 90% da resistência da argamassa de controle na mesma idade. Foi realizado um ensaio para cada material estudado totalizando 15 experimentos distintos. Para cada material foram preparados 03 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 05 cm x 10 cm, totalizando 45 provas. O Tabela 20 apresenta as medidas utilizadas para produção dos exemplares.

Tabela 20 - Argamassas produzidas para o ensaio de atividade pozolânica NBR 5752:2014.

Argamassa de Referência								
Argamassas	Cimento CPV (g)					Água	Areia	
REF	624					300 g	1872 g	
Argamassas com vidro PV45x75, PV25X45, PV45 e PV25								
Argamassas	Cimento CPV	PV45x75	PV25x45	PV45	PV25	Água	Areia	
PV45x75	468 g	156g	-	-	-	300 g	1872 g	
PV25x45		-	156g	-	-			
PV45		-	-	156g	-			
PV25		-	-	-	156g			
Argamassas compostas por sílica ativa, PV45x75, PV25X45, PV45 e PV25								
Argamassas	Cimento CPV	Adição primária	Adição secundária				Água	Areia
		SA	PV45x75	PV25x45	PV45	PV25		
SA	468 g	156g	-	-	-	-	300 g	1872 g
SAPV45x75		147,95 g	8,05 g	-	-	-		
SAPV25x45		147,95 g	-	8,05 g	-	-		
SAPV45		147,95 g	-	-	8,05 g	-		
SAPV25		147,95 g	-	-	-	8,05 g		
Argamassas compostas por metacaulim PV45x75, PV25X45, PV45 e PV25								
Argamassas	Cimento CPV	Adição primária	Adição secundária				Água	Areia
		MC	PV45x75	PV25x45	PV45	PV25		
MC	468 g	156g	-	-	-	-	300 g	1872 g
MCPV45x75		143,16 g	12,84 g	-	-	-		
MCPV25x45		143,16 g	-	12,84 g	-	-		
MCPV45		143,16 g	-	-	12,84g	-		
MCPV25		143,16 g	-	-	-	12,84g		

Fonte: O autor (2023) adaptado da NBR (2015b).

Índice de atividade pozolânica com Ca(OH)₂

A atividade pozolânica dos materiais estudados foram determinados de acordo com os procedimentos previstos na ABNT NBR 5751:2015 – Materiais pozolânicos: determinação da atividade pozolânica com a cal aos sete dias (ABNT, 2015a). O procedimento consiste em preparar uma argamassa contendo hidróxido de cálcio (P.A. 95%) e uma quantidade de material pozolânico relativa ao dobro do volume do hidróxido de cálcio e 04 frações de areia normal referente 234 g. A quantidade de água corresponde a necessária para resultar num espalhamento de (225 ± 5) mm da argamassa na mesa de consistência. Após 24 horas em temperatura ambiente as argamassas são submetidas a um processo de cura em estufa durante 06 dias a uma temperatura de 55° C. O material será considerado pozolânico quando a resistência após 07 dias for igual ou superior à 6 MPa. Foi realizado um ensaio para cada material estudado totalizando 14 experimentos distintos. Para cada material foram preparados 03 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 05 cm x 10 cm, totalizando 42 provas. O Tabela 21 apresenta as medidas utilizadas para produção dos exemplares.

Tabela 21 - Argamassas produzidas para o ensaio de atividade pozolânica NBR 5751:2015.

Argamassas com vidro PV45x75, PV25X45, PV45 e PV25								
Argamassas	Ca(OH) ₂	PV45x75	PV25x45	PV45	PV25	Água	Areia	
PV45x75	104 g	229,55 g	-	-	-	300 g	1872 g	
PV25x45		-	229,55 g	-	-			
PV45		-	-	229,55 g	-			
PV25		-	-	-	229,55 g			
Argamassas compostas por sílica ativa, PV45x75, PV25X45, PV45 e PV25								
Argamassas	Ca(OH) ₂	Adição primária	Adição secundária				Água	Areia
		SA	PV45x75	PV25x45	PV45	PV25		
SA	104 g	215,5 g	-	-	-	-	300 g	1872 g
SAPV45x75		204,38 g	11,12 g	-	-	-		
SAPV25x45		204,38 g		11,12 g				
SAPV45		204,38 g			11,12g			
SAPV25		204,38 g				11,12g		
Argamassas compostas por metacaulim, PV45x75, PV25X45, PV45 e PV25								
Argamassas	Ca(OH) ₂	Adição primária	Adição secundária				Água	Areia
		MC	PV45x75	PV25x45	PV45	PV25		
MC	104 g	234,23 g	-	-	-	-	300 g	1872 g
MCPV45x75		214,96 g	19,27 g	-	-	-		
MCPV25x45		214,96 g	-	19,27 g	-	-		
MCPV45		214,96 g	-	-	19,27 g	-		
MCPV25		214,96 g	-	-	-	19,27 g		

Fonte: O autor (2023) adaptado da NBR (2015a).

3.4.4.2 Pastas cimentícias: Preparação das amostras

Os espécimes foram produzidos de acordo com a norma da ABNT NBR 13276:2016 (ABNT, 2016). A relação água/cimento utilizada foi de 0,4. O detalhamento dos traços estão presentes nas tabelas 22 e 23. Cada pasta foi misturada utilizando um misturador mecânico em três fases: (i) 1 minuto de mistura; (ii) 2 minutos de repouso; (ii) 2 minutos de mistura. A pasta foi transferida para moldes cilíndricos de 50 x 100 mm, destinadas para os ensaios de índices físicos e resistência à compressão. Para a análise de controle da hidratação, foram as pastas foram moldadas em fôrmas cúbicas hermética de acrílico com 5 cm de aresta. Para cada grupo, foram moldados 12 espécimes, sendo 03 para o controle da hidratação, 03 para os índices físicos, 03 para a resistência à compressão após 7 dias e 03 após 56 dias. Os moldes preenchidos foram colocados sobre uma mesa vibratória durante 5 minutos. Após 24 horas, as amostras foram desmoldadas. Em seguida, as amostras foram transferidas para a cura por via húmida. O tempo de cura foi estabelecido de acordo com os ensaios realizados: (i) resistência à compressão, 7 dias (27 amostras) e 56 dias (27 amostras); (ii) absorção de água, índice de vazios e gravidade específica e módulo de elasticidade 28 dias (total de 27 amostras) de acordo com a ABNT NBR 9778:2005 (ABNT, 2005).

Tabela 22 – Composição de pastas unitárias e binárias com sílica ativa e pó de vidro para uma relação a/c de 0,4.

Pastas cimentícias	Constituintes (g)		
	Cimento	SA	PV
CPV	5000	-	-
SA	4750	250	-
PV45x75	4750	-	250
PV45	4750	-	250
PV25X45	4750	-	250
PV25	4750	-	250
SAPV45x75	4750	237,1	12,9
SAPV45	4750	237,1	12,9
SAPV25X45	4750	237,1	12,9
SAPV25	4750	237,1	12,9

Fonte: O autor (2023).

Tabela 23 - Composição de pastas unitárias e binárias com metacaulim e pó de vidro para uma relação a/c de 0,4.

Pastas cimentícias	Constituintes (g)		
	Cimento	MC	PV
CPV	5000	-	-
MC	4500	500	-
PV45x75	4500	-	500
PV45	4500	-	500
PV25X45	4500	-	500
PV25	4500	-	500
MCPV45x75	4500	458,86	41,14
MCPV45	4500	458,86	41,14
MCPV25X45	4500	458,86	41,14
MCPV25	4500	458,86	41,14

Fonte: O autor (2023).

3.4.4.3 Acompanhamento da hidratação

Para a análise de controle da hidratação foram utilizadas pastas do mesmo lote que as utilizadas para o ensaio de resistência mecânica. As amostras foram moldadas em fôrma cúbica hermética de acrílico com 5 cm de aresta, desmoldadas após 24 horas. Após a desmoldagem as amostras foram mantidas em cura úmida por um período de 28 dias. O processo de acompanhamento da hidratação foi acompanhado por meio de pesagem em balança de precisão. Durante os primeiros 15 dias as amostras eram pesadas a cada 24 horas. Após os 15 primeiros dias as amostras eram pesadas a cada 48 horas.

3.4.4.4 Análises mecânicas

Os testes de resistência à compressão uniaxial foram realizados utilizando uma prensa hidráulica modelo Shimadzu AGS-X300kN. A taxa de incremento de carga foi de 0,25 MPa/s. Foram realizados três testes para cada mistura. O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi determinado em função da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (V), mensurada utilizando o equipamento Proceq Pundit, da densidade aparente da pasta no estado seco (ρ), e do coeficiente de Poisson ($\nu = 0,1$), utilizando a equação 12, como se segue:

$$\text{(Equação 12)} \quad E_d = \rho \cdot V^2 \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{1-\nu} \quad [GPa]$$

3.4.4.5 Índices Físicos

Os testes de absorção de água, índice de vazios, e densidade aparente foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 9778:2005 (ABNT, 2005). Após 28 dias de cura, os espécimes foram pesados para obter a massa saturada e depois a massa submersa em água. Após a determinação da massa saturada e submersa, as amostras foram secas numa estufa a uma temperatura de 100 ± 5 °C durante 72 h para determinar a massa seca.

3.4.4.6 Análise de difração de raios-X (DRX)

Foram realizadas análises de difração de raios-X (DRX) em fragmentos de pastas após o ensaio de resistência à compressão após 56 dias de cura, nas amostras de referência, 5PV45, SAPV45, 5SA, 10PV45, MCPV45 e 10MC. Foram coletados fragmentos de cada amostra, extraído da região próxima ao terço médio do corpo de prova. Com a finalidade de interromper a hidratação, os fragmentos foram submersos em álcool isopropílico P.A durante 24 horas. Em seguida as amostras foram secas em estufa sob temperatura de 45°C durante 24 horas. Após a secagem os fragmentos foram cominuídos em almofariz de porcelana visando obtenção de partículas $< 75 \mu m$. O equipamento utilizado e os parâmetros de rede foram os mesmos apresentados no item 3.1.1.6.

3.4.4.7 Espectroscopia de IV por Refletância Total Atenuada – ATR

A análise de IV por ATR foi realizada nas mesmas amostras utilizadas no item 3.4.4.6 seguindo os mesmos procedimentos. Os parâmetros de entrada para realização do ensaio foram os mesmos utilizados no item 3.1.1.7.

3.4.4.8 Análise Térmica

A análise térmica para obtenção das curvas ATD-TG, foram realizadas em fragmentos de pastas após o ensaio de resistência à compressão após 7 e 56 dias de cura, em todas as pastas produzidas para este ensaio. Sendo realizado 11 análises nos fragmentos dos corpos de prova após 7 dias e 11 análises após 28 dias, totalizando 22 análises. O processo para obtenção do material para análise foi o mesmo utilizado no item 3.4.4.6. Os parâmetros de entrada para realização do ensaio foram os mesmos utilizados no item 3.1.1.8. O teor de portlandita foi obtido a partir da relação entre a massa molar do Ca(OH)_2 (74g/mol) e H_2O (18g/mol), ponderado pela perda de massa no intervalo de 400°C e 600°C do Ca(OH)_2 de cada pasta analisada, conforme a equação 13.

$$\text{(Equação 13) } (\% \text{ Portlandita}) = \left(\frac{\text{Ca(OH)}_2}{\text{H}_2\text{O}} \right) \times \text{perda de massa (400°C – 600°C)}$$

3.4.4.9 Microscopia Eletrônica

O processo de preparação das amostras consistia em preparar cilindros de resina epóxi com fragmentos da pasta cimentícia fixados no centro do molde. O processo de produção foi dividido em três etapas: 1 – Seleção, extração do fragmento da pasta de cimento e imersão em resina epóxi; 2 – Lixamento da superfície aparente da pasta; 3 – Polimento da superfície aparente com pasta diamantada. A seleção dos fragmentos seguiu os mesmos procedimentos relatados no item 3.2.6. Após esta etapa foram extraídos porções prismáticas com arestas próximas de 1 cm utilizando microretífica com potência de 170 w, 1000 rpm e disco de corte diamantado. A face analisada não recebeu contato com o disco de corte.

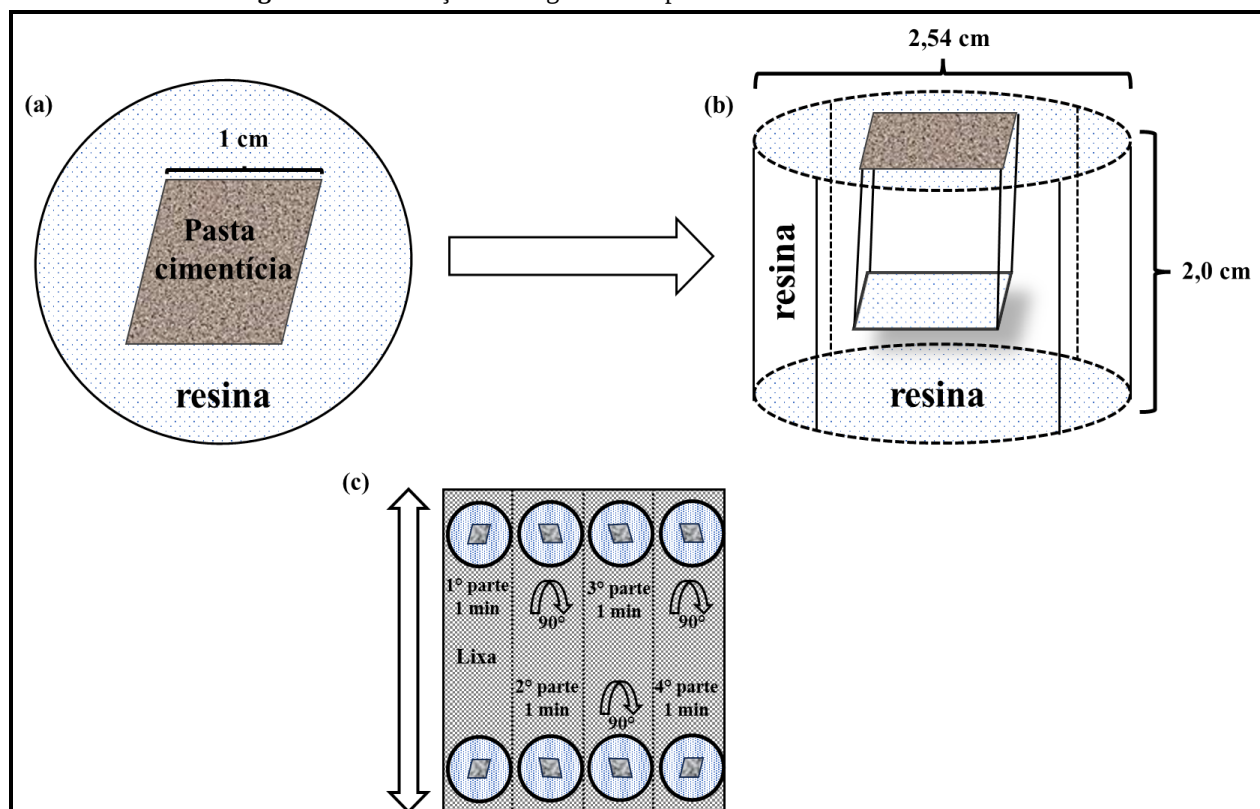
Após a etapa de extração os materiais foram condicionados em moldes cilíndricos de 2 cm1 cm x 2,54 cm e posteriormente imersos em resina EPÓXI MV ORG IBX incolor, viscosidade à 20° C – 2000 a 3000 cPs, densidade à 20° C 1,16 +/- 0,01 g/cm³. Foi utilizado endurecedor BACM viscosidade à 20° C – 200 máx. cPs, densidade à 20° C 1,005 +/- 0,015 g/cm³. A preparação da resina seguiu as instruções do fabricante utilizando a proporção 2:1 em massa de resina e endurecedor. Após 7 dias os fragmentos imersos na resina foram retirados dos moldes para dar início ao processo de lixamento. A figura 45 ilustra esse procedimento. As tabelas 24 e 25 apresentam as características do sistema não curado e curado. Primeiramente era retirada a primeira camada mais espessa de resina que excedia a face a ser lixada, deixando uma cama de aproximadamente 2 mm. Para o lixamento foram utilizadas as lixas de nº 280, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1600, 2000 e 2500.

O processo de lixamento teve finalidade de refinar e padronizar a textura da superfície da pasta. Esse procedimento consistiu em realizar movimentações repetidas de ida e volta em uma

única direção da face da amostra por 1 minuto. Após o encerramento do tempo, a face era girada em 90° e o lixamento era realizado por mais 1 minuto, sendo esse procedimento repetido duas vezes para cada amostra. Para cada mudança de lixa a superfície da amostra era lavada com álcool isopropílico e analisada com auxílio de microscópio óptico, com a finalidade de avaliar se as marcas de polimento da lixa anterior estavam superadas.

O processo de polimento tem como finalidade eliminar os riscos remanescentes do processo de lixamento e proporcionar uma superfície mais fina, límpida e ilustrada. O polimento em politriz modelo Arotec Aropol E, a 100 rpm, utilizando pano para polimento específico para pasta diamantada. Foi utilizada pasta de polimento diamantada na grana de 1 μm , aplicadas em filamentos a uma distância de $2/3R$ do centro, diluída em álcool isopropílico. Após o final do polimento as amostras eram submetidas ao banho ultrassônico em álcool isopropílico, por 5 min, com a finalidade de expelir resíduos da pasta. As amostras prontas foram guardadas em recipiente plástico à vácuo. As amostras foram metalizadas em carbono para realização da microscopia eletrônica de varredura. O equipamento utilizado para ambas as análises foi o mesmo descrito para as análises nas partículas de vidro, conforme o item 3.1.1.5.

Figura 45 – Ilustração do fragmento da pasta cimentícia imersa em resina.



Fonte: O autor (2023).

Tabela 24 - Propriedades do sistema não curado.

Proporção de mistura (resina : endurecedor)	100 – 50 partes em peso
Temperatura de manipulação (°C)	18 - 30
Tempo de utilização de mistura 100g (gel time) a 20°C	20 a 30 min.
Tempo de endurecimento de mistura (100g em película, 20°C)	3 a 4 horas
Cura total a 20°C	7 dias

Fonte: O autor (2023).

Tabela 25 - Propriedades do sistema curado.

Temperatura de deflexão térmica (HDT) (°C)	95 - 100
Força de compressão (psi)	5000
Força de tensão (psi)	3000 - 6200
Elongação (%)	3
Impacto Izod	0,1 – 0,5
Dureza Barcol	Min. 15

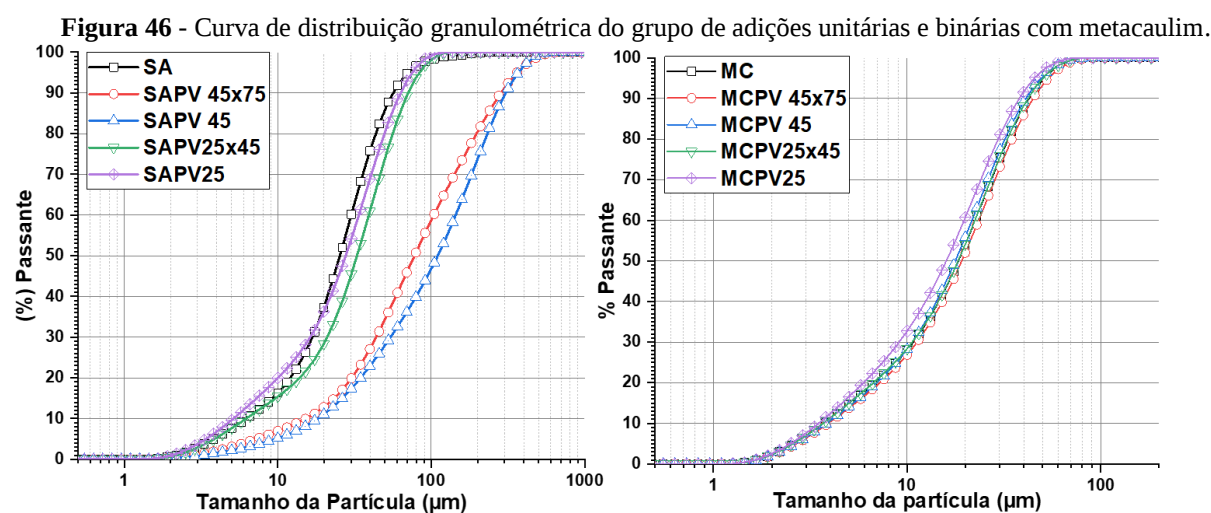
Fonte: O autor (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ADIÇÕES NO ESTADO ANIDRO

4.1.1 Caracterização dimensional

O resumo do ensaio de granulometria a laser realizado no grupo de amostras unitárias de sílica e metacaulim e binárias com pó de vidro, sílica ativa e metacaulim está presente na figura 46. Nota-se que as misturas binárias contendo sílica e partículas PV 45 μm e PV 25 μm apresentaram desenvolvimento de curva mais próximo de sua referência unitária. O grupo de misturas com metacaulim apresentou menor variação dentre os analisados, indicando que o vidro e o metacaulim apresentam características granulométricas semelhantes.



Fonte: O autor (2023).

A Tabela 26 apresenta o diâmetro característico D_{10} , D_{50} , D_{90} , a relação D_{90} / D_{10} e a área superficial específica das adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.

Tabela 26 - Diâmetros característicos (D_{10} , D_{50} , D_{90}), heterogeneidade (D_{90}/D_{10}) e área superficial específica (S), referentes às faixas granulométricas das adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.

Adições	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	D_{90}/D_{10}	Área Superficial específica - S (cm^2/g)
SAPV45x75	7,2	37,3	94	13,0	2365,2
SAPV25x45	7,15	30,8	87,1	12,9	2375,3
SAPV45	6,0	25,6	72	12	2429,3
SAPV25	5,8	20,1	63,0	11,8	2485,5
AS	5,8	18,8	62,3	10,8	2467,6
MCGP75x45	4,3	21,9	49,0	11,4	2063,3
MCGP25x45	4,2	21,1	48,2	11,4	2073,4
MCGP45	4,0	20,4	45,9	11,5	2127,5
MCGP25	4,0	18,3	43,47	10,9	2183,9
MC	4,3	21,1	48,7	11,6	2149,2

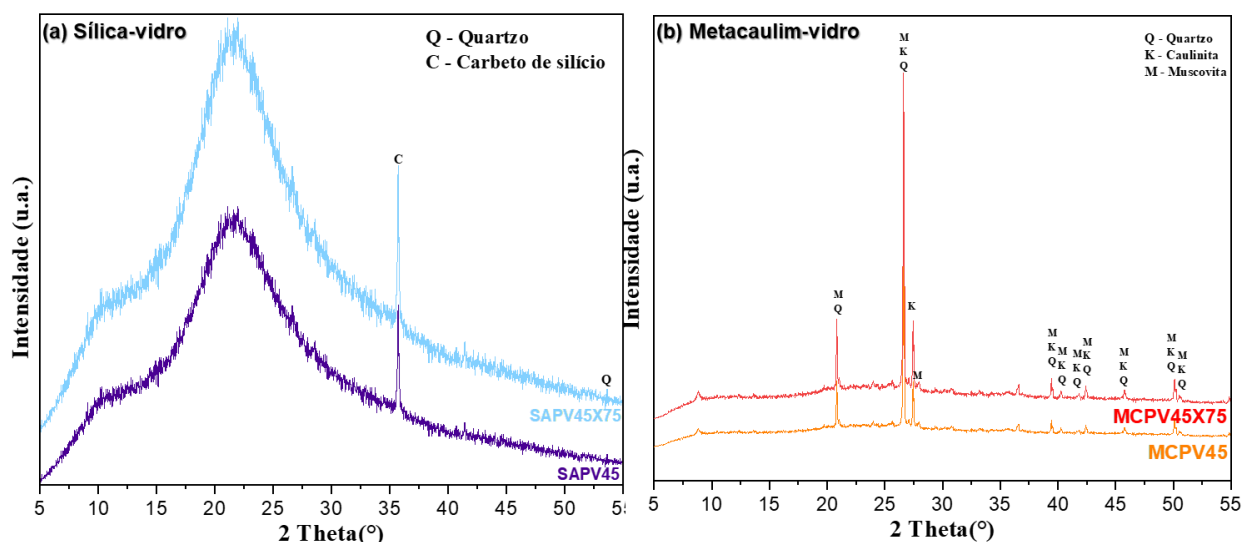
Fonte: O autor (2023).

De modo geral as misturas não apresentaram mudanças relevantes dos diâmetros característicos em comparação com seus respectivos pares unitários, sendo comprovado pela pouca variação da relação D_{90} / D_{10} , indicador de heterogeneidade das misturas. O efeito do tamanho da partícula ficou mais evidente nas misturas que utilizaram vidro PV45X75, indicando uma redução mais significativa da superfície específica e aumento da relação D_{90} / D_{10} , apontando maior heterogeneidade dessas misturas. A mistura MCPV25 apresentou área superficial específica 10% superior que a amostra apenas com metacaulim. Em ambos os lotes de misturas binárias observa-se que as partículas mais finas de vidro parecem contribuir, mesmo com pouca discrepância das outras amostras, para composições com características mais semelhantes que suas referências unitárias, indicando misturas mais eficientes.

4.1.2 Caracterização estrutural

Este item apresenta os resultados resultante da caracterização estrutural por DRX e espectroscopia de IV. A figura 47 apresenta os difratogramas das adições sílica-vidro e metacaulim-vidro. Em ambos os lotes as misturas binárias observassem as mesmas fases cristalinas presentes nas adições unitárias.

Figura 47 - Difratogramas de raios-X das adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.



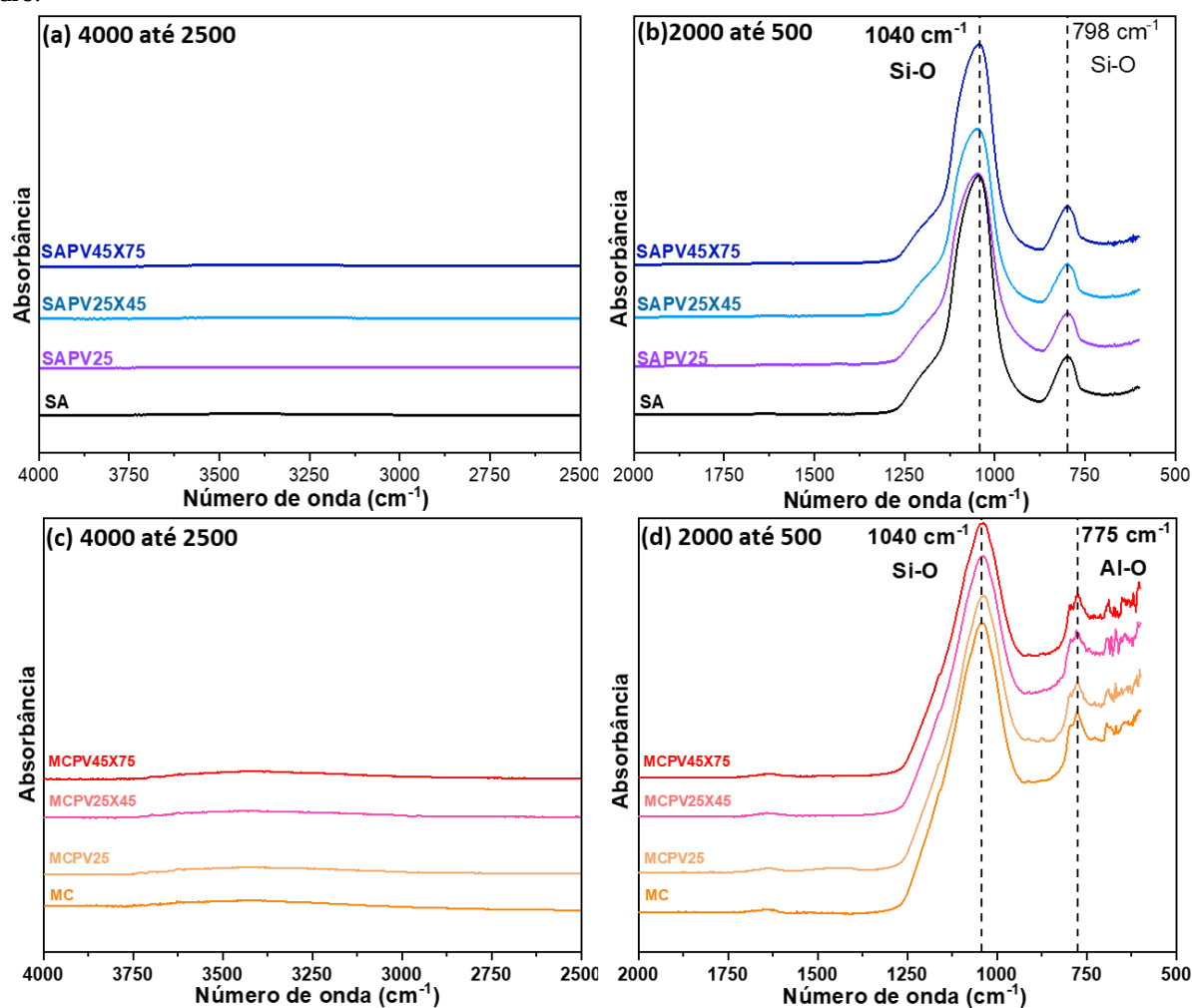
Fonte: O autor (2023).

Conforme figura 47 (a), as misturas SAPV45X75 e SAPV45 apresentam as mesmas fases que a sílica ativa, não sendo verificadas alterações do halo amorfo. O pico máximo na região do halo amorfo ocorreu em $2\theta = 23^\circ$. Os difratogramas da sílica ativa apresentados por Molin (2011), Andrade *et al.* (2019) e Boquera *et al.* (2021) também apontam existência do halo amorfo na mesma região.

De acordo com a figura 47 (b), não houve alterações relacionadas à presença de picos cristalinos no metacaulim e na mistura metacaulim-vidro. Observa-se que a adição de vidro não contribuiu para a amorfização da mistura binária com metacaulim. Picos característicos de quartzo e muscovita em $2\theta = 21,06^\circ$ e quartzo, caulinita e muscovita em $2\theta = 26,64^\circ$, permaneceram inalterados.

A figura 48 apresenta os espectros de infravermelho por ATR na faixa do IV médio do vidro, sílica e metacaulim, e suas respectivas combinações binárias. Em ambos os lotes da sílica e metacaulim não se observa nenhuma banda nas faixas entre 4000 cm^{-1} até 2500 cm^{-1} , sendo esperado por se tratar de materiais no estado anidro. Em observação as faixas entre 2000 cm^{-1} e 500 cm^{-1} existe uma banda em 1040 cm^{-1} , em ambos os lotes, relativo à banda do estiramento Si-O. No lote da sílica se destaca o pico em 798 cm^{-1} e no lote do metacaulim se destaca a banda em 775 cm^{-1} referente ao estiramento Al-O.

Figura 48 - Espectros IV das adições unitárias (vidro, sílica e metacaulim) e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.



Fonte: O autor (2023).

4.1.3 Caracterização composicional e equivalente alcalino

Neste item são apresentadas a caracterização composicional e o equivalente alcalino (E.A) das adições unitárias (vidro, sílica e metacaulim) e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro, das misturas cimentícias contendo 95% de cimento e 5% das adições do lote de vidro e sílica, e 90% de cimento e 10% das adições do lote de vidro e metacaulim. A tabela 27 apresenta os compostos óxidos presentes nas adições unitárias de vidro, sílica e metacaulim, e nas binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro. Visto que esses resultados apresentaram pequena dispersão entre si e considerando a dificuldade de acesso ao mesmo equipamento optou-se por considerá-los representativos para as demais amostras. Ressalta-se que a espectroscopia de FRX foi realizada para verificação da eficiência do método do equivalente alcalino, quantificação dos compostos óxidos, determinação das misturas binárias e álcalis disponíveis nas adições unitárias e binárias.

Informa-se que não foram encontrados na literatura análises que quantificassem o equivalente alcalino e teor de ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) de materiais cimentícios suplementares binários, assim como de misturas cimentícias binárias e ternárias.

Tabela 27 - Concentração dos óxidos presentes nas adições unitárias (vidro, sílica e metacaulim) e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.

Grupo de amostras	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Perda ao fogo	(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	Equivalente alcalino (%)
PV45	76,01	2,36	0,51	10,98	0,81	0,20	7,91	0,60	0,05	0,55	78,88	8,30
PV45x75	76,07	2,19	0,31	11,21	0,84	0,22	8,17	0,58	0,06	0,35	78,57	8,55
AS	92,70	0,89	0,17	1,03	0,68	0,16	0,75	0,58	0,01	3,03	93,76	1,13
SAPV45x75	91,00	1,09	0,20	1,65	0,70	0,18	1,15	0,57	0,01	3,45	92,29	1,52
SAPV45	91,20	1,04	0,18	1,42	0,69	0,18	1,13	0,59	0,01	3,57	92,42	1,51
MC	57,93	28,43	4,56	1,67	0,77	0,19	0,81	1,80	0,73	3,10	90,92	1,98
MCPV45	59,52	26,35	4,16	2,25	0,80	0,25	1,36	1,68	0,68	-	90,03	2,45
MCPV45X75	59,93	24,64	4,22	1,83	0,71	0,16	1,36	1,64	0,69	-	88,79	2,43

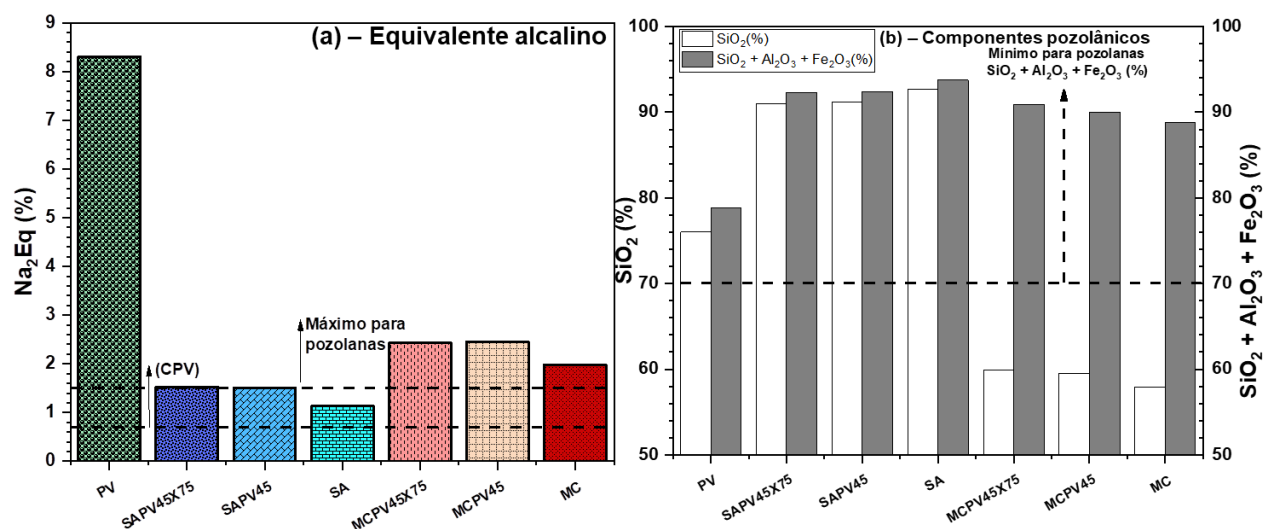
- não determinado

Fonte: O autor (2023).

O EA das misturas foi próximo do valor estimado para o limite de álcalis disponíveis (LAD) de cada composição binária. Nota-se que o tamanho da partícula não exerceu influência nesta análise, uma vez que os resultados não indicam variações do aumento ou redução da quantidade de álcalis quando variado o tipo de vidro. Os vidros utilizados nesta pesquisa apresentaram uma quantidade média de álcalis de 8,4%, relativamente baixo quando comparado com os valores da literatura conforme figura 17.

O equivalente alcalino das composições binárias SAPV45 e SAPV75 foi 1,51% e 1,52%, superando em 1% o LAD de 1,5% estimado para essa mistura. O EA da sílica e das composições binárias sílica-vidro estão próximos dos dados existentes na literatura conforme figura 18. A quantidade de álcalis disponíveis nas misturas binárias formadas por metacaulim e vidro foi 2,4% inferior à estimativa de 2,5% para essa combinação. O teor de álcalis equivalente das misturas MC, MCPV75X45 e MCPV45 estão acima de algumas referências da literatura conforme figura 19. A figura 49 (a) exibe uma comparação do teor de álcalis equivalente em comparação com o limite máximo para pozolanas, conforme as normas ABNT 15894:2010 e ABNT 12653:2014 (ABNT 2010, 2014). O teor de álcalis da sílica ativa e as misturas SAPV45X75 e SAPV45 não ultrapassou o limite máximo indicado para pozolanas de 1,5%. Já nas misturas do lote do metacaulim, o EA de todas as composições ultrapassou o limite de 1,5%.

Figura 49 - Equivalente alcalino e componentes pozolânicos das adições unitárias e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.



Fonte: O autor (2023).

Os teores de SiO₂ e (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) das adições unitárias e binárias estão presentes na figura 49 (b). Esses indicadores estão correlacionados com a pozolanicidade dos materiais. O teor de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ de todos os materiais foi superior à 70%. O teor de SiO₂ da adição SA ultrapassou o patamar de 90%, superando o mínimo de 85% para este material de acordo com a ABNT 15894:2010 (ABNT, 2010). O teor de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ das misturas binárias sílica-vidro foi de 92,3%, levemente inferior à sílica ativa, sendo próximos do índice da sílica utilizada por Vivek e Dhinakaran (2017) que foi de 94,3%, enquanto a utilizada por Vaitkevicius, Šerelis e Hilbig (2014) foi de 98,4%.

Em observação à figura 49 (b), o teor de SiO₂ aumentou nas composições binárias

metacaulim-vidro. Isso ocorre por que o teor de SiO_2 do vidro é aproximadamente 31% superior ao do metacaulim. Já o teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ dessas adições foi aproximadamente 90%, sendo próximo do teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ do metacaulim utilizado por Redden e Neithalath (2014) que foi aproximadamente 94%.

Fica evidente que o método do equivalente alcalino se apresenta eficiente quando se trata dos aspectos químicos, uma vez que foi possível controlar o teor de álcalis equivalente das misturas binárias, sendo o EA estimado para todas as misturas binárias foi precisamente alcançado. Além disso, os teores de SiO_2 , $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ se mantiveram próximos das adições de referências unitárias. A tabela 28 apresenta os compostos óxidos obtidos a partir da espectroscopia por fluorescência de raios-X, em observação à quantidade dos álcalis totais fornecidos pelas adições unitárias e binárias nas misturas cimentícias finais.

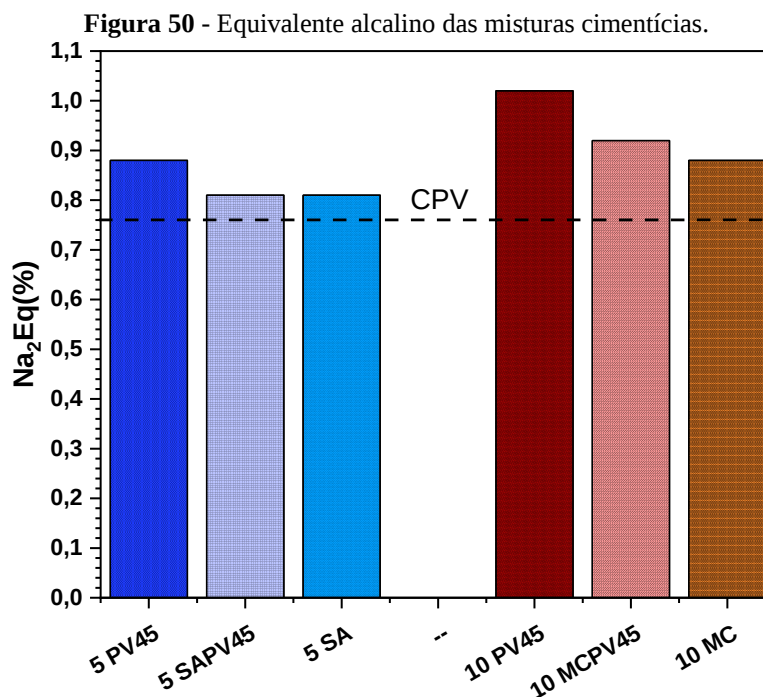
Tabela 28 - Concentração dos compostos óxidos presentes nas misturas cimentícias e para o cimento CPV.

Grupo de amostras	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Perda ao fogo	Equivalente alcalino
CPV	18,44	4,46	2,43	60,16	5,19	4,01	0,18	0,89	-	-	3,79	0,76
Lote das misturas sílica-vidro: 5% de substituição do cimento												
5% PV45X75	21,40	4,55	2,26	57,7	4,69	4,29	0,30	0,9	0,21	0,36	3,35	0,88
5% PV45	21,45	4,57	2,25	57,72	4,72	4,30	0,30	0,89	0,21	0,36	3,23	0,88
5% SAPV45X75	22,01	4,29	2,28	57,13	4,80	4,13	0,16	0,85	0,20	0,35	3,80	0,71
5% SAPV45	22,28	4,55	2,26	56,58	4,69	4,08	0,22	0,90	0,22	0,36	3,86	0,81
5% SA	22,57	4,49	2,24	56,63	4,69	4,19	0,22	0,90	0,20	0,36	3,50	0,81
Lote das misturas metacaulim-vidro: 10% de substituição do cimento												
10% PV45X75	24,31	4,43	2,18	55,43	4,56	4,13	0,46	0,88	0,21	0,35	3,00	1,03
10% PV45	24,12	4,45	2,13	55,64	4,53	4,11	0,45	0,89	0,21	0,35	3,12	1,02
10% MCPV45X75	23,10	7,05	2,49	53,34	4,46	3,95	0,27	1,00	0,28	-	3,70	0,92
10% MCPV45	23,17	6,95	2,56	54,45	4,55	4,02	0,26	1,02	0,28	-	3,36	0,92
10% MC	22,62	7,03	2,60	53,85	4,49	4,04	0,23	1,00	0,27	0,37	3,49	0,88

Fonte: O autor (2023).

De modo geral o percentual de SiO_2 e Al_2O_3 aumentou e os teores de MgO e CaO reduziram em todas as combinações, enquanto o Fe_2O_3 aumentou apenas nas composições com metacaulim. O teor de SO_3 aumentou para o grupo de amostras com sílica ativa e metacaulim.

A contribuição de álcalis em função do método de substituição está presente na figura 50. Analisando a contribuição da utilização de vidro para as misturas com substituição em massa, como esperado o aumento do teor de vidro resultou no aumento da quantidade de álcalis da mistura cimentícia. As composições formadas por cimento CPV e 5% e 10% de PV45X75 e PV45, obtiveram uma quantidade média de álcalis de 0,9% e 1,0%, respectivamente.



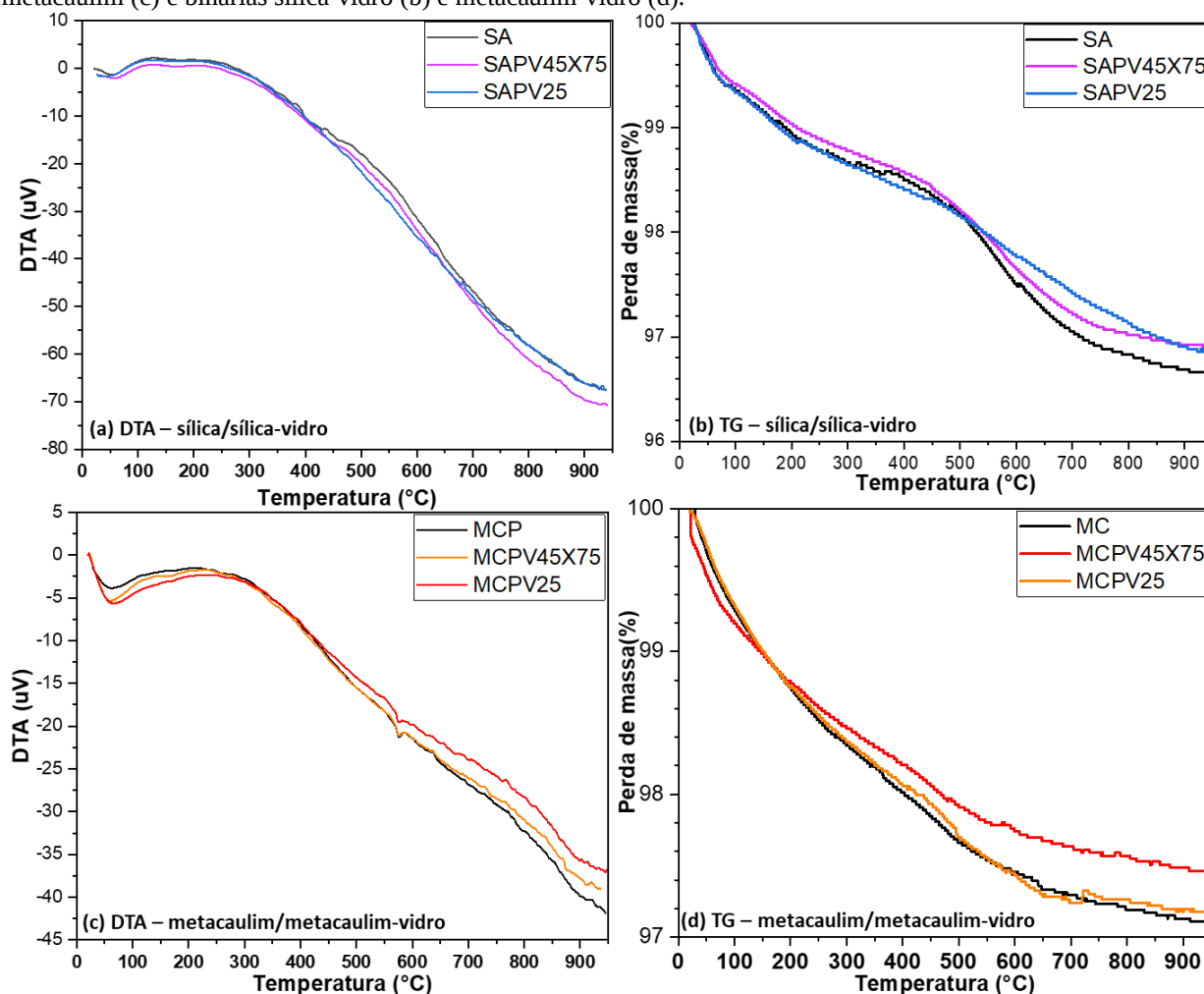
Fonte: O autor (2023).

Esse resultado era esperado uma vez que o vidro tem uma quantidade de álcalis superior que a do cimento. As composições binárias apresentaram quantidades de álcalis em patamares próximos das adições unitárias. É possível observar que as composições cimentícias com sílica, metacaulim e suas respectivas misturas binárias, apresentaram uma quantidade de álcalis superior à mistura que continha apenas cimento. Isso ocorre por conta da elevada quantidade de álcalis presentes nas adições minerais, superior a quantidade existente no cimento CPV.

4.1.4 Caracterização da decomposição térmica

A figura 51 apresenta as curvas ATD e TG das adições unitárias de sílica e metacaulim e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro. Observa-se no lote da sílica que as adições SA e SAPV25 apresentaram desenvolvimento similar da curva termogravimétrica, enquanto a adição SAPV45X75 obteve uma perda de massa levemente inferior, figura 51 (a). Evento semelhante é visível na termogravimetria das adições do lote metacaulim, em que a adição binária MCPV45X75 obteve perda de massa levemente inferior às misturas MC e MCPV25 Figura 51 (b). Tais eventos podem ser indicação da menor perda de massa das partículas de vidro mais grossas. Em observação às curvas termodiferenciais se destaca o evento exotérmico entre 550°C e 600°C, figura 51 (d) em decorrência da transformação de fase α - β - γ do quartzo (Branlund *et al.*, 2007; Periyasamy *et al.*, 2021).

Figura 51 - Curvas termodiferenciais (ATD) e termogravimétricas (TG) das adições unitárias de sílica (a) e metacaulim (c) e binárias sílica-vidro (b) e metacaulim-vidro (d).



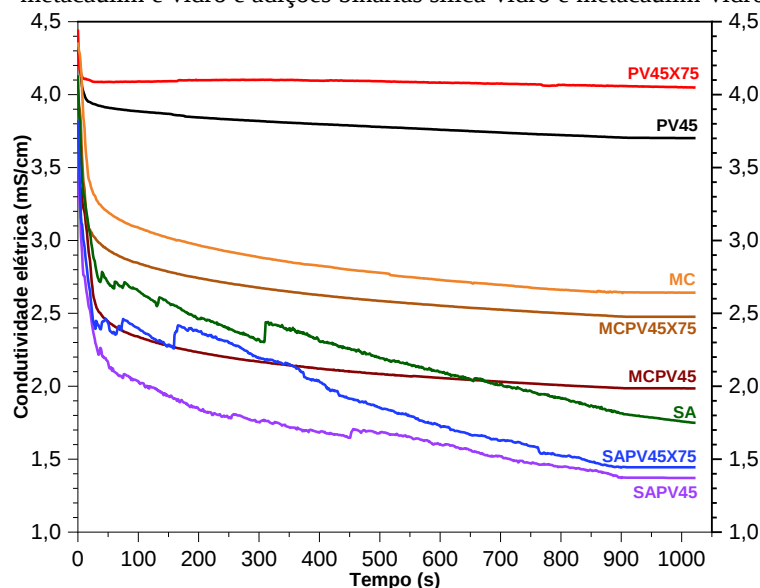
Fonte: O autor (2023).

4.1.5 Potencial de pozolanicidade das adições unitárias e binárias

O motivo desta análise ser realizada apenas nas adições presentes na tabela 4, e o mesmo relatado no item 4.1.3. A figura 52 apresenta a pozolanicidade dos materiais medida através da perda de condutividade ao longo de 1000 s (10 min). Analisando as amostras unitárias de pó de vidro há uma indicação de maior pozolanicidade para o pó PV45 uma vez que essa amostra apresentou maior perda de condutividade em todo tempo analisado. A perda de condutividade da solução com o vidro PV45X75 apresentou desenvolvimento constante, indicando a menor reatividade química entre os materiais analisados. Há uma indicação da influência do tamanho da partícula na perda de condutividade, uma vez que ambos possuem mesma composição química e diferem apenas em sua finura, apresentando área superficial específica de 400 m²/kg e 110 m²/kg respectivamente. Zheng (2016) indicou que o efeito da maior atividade pozolânica da atividade pozolânica é uma mera resposta da maior área superficial específica do vidro com maior área

superficial específica.

Figura 52 - Variação da perda de condutividade elétrica das soluções preparadas com as adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.



Fonte: O autor (2023).

Entre as adições unitárias a sílica ativa e o metacaulim apresentaram as maiores perdas de condutividade indicando materiais mais reativos. A tabela 29 apresenta a perda de condutividade relativa das adições unitárias e binárias em solução com o hidróxido de cálcio para os intervalos de tempo de 60 e 600 segundos. O valor de referência corresponde a condutividade medida no instante inicial (0 s). É possível observar que após 600 s de análise, a solução contendo sílica obteve uma redução da condutividade próximo de 97%, enquanto a solução apenas com metacaulim e hidróxido de cálcio obteve redução de 60% nesse mesmo intervalo. Entre as soluções compostas por misturas binárias, as soluções sílica-vidro SAPV45X75 e SAPV45 apresentaram as maiores perdas de condutividade após 60 e 600 segundos de análise, obtendo respectivamente, redução de 38% e 42% para o primeiro intervalo, e redução de 121% e 124% para o segundo intervalo, indicando a possibilidade de maior atividade pozolânica desses materiais. O ruído observado nas curvas das amostras com unitárias e binárias de vidro e sílica está devido a desagregação de partículas de sílica durante a realização do ensaio. É possível que as partículas de vidro sejam solubilizadas em meio aquoso-cáustico, reagindo quimicamente e aumento a alcalinidade do meio, contribuindo para a dispersão dos aglomerados de sílica e consequentemente sua maior reatividade.

A solução composta por MCPV45X75 e Ca(OH)_2 apresentou patamares próximos da solução unitária com metacaulim e hidróxido de cálcio. Já a mistura MCPV45 obteve perda de condutividade de 33% e 75% nos intervalos de 60 segundos e 600 segundos, superando as soluções

MCPV45X75 e MC. O comportamento observado para as adições MC também foi relatado por Basto (2018) após comparação direta entre adições de metacaulim e cinzas de lodo de esgoto. A perda de condutividade foi de 28% e 38% aos 100 s e 1000 s respectivamente, inferior ao analisado por Basto (2018) que obteve 36% e 43% no mesmo tempo analisado.

Tabela 29 - Perda de condutividade das soluções preparadas com adições unitárias (sílica, metacaulim e vidro) e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro para os intervalos 60 s e 600 s.

Adição	Condutividade inicial (µs/s)	Perda de condutividade relativa (%)	
		Após 60 s	Após 600 s
PV45X75	4,4	8	9
PV45	4,3	10	15
SA	4,2	35	97
SAPV45X75	3,8	38	121
SAPV45	3,6	42	124
MC	4,4	27	60
MCPV45X75	4,0	28	58
MCPV45	3,6	33	75

Fonte: O autor (2023).

Observa-se que existe uma influência do tamanho da partícula de vidro na perda de condutividade, sendo mais visível essa influência nas misturas binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro. Em função dos resultados apresentados que apontam um maior potencial pozolânico das misturas binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro, espera-se que dentre as misturas em estudo, SAPV45 e MCPV45, alcancem melhores desempenhos de resistência mecânica.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ADIÇÕES NO ESTADO ENDURECIDO

Nesta parte estão apresentados os resultados dos ensaios de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com o hidróxido de cálcio e com o cimento. O IAP da adição com o cimento foi determinado de acordo com os parâmetros prescritos na ABNT NBR 5752:2015 (ABNT, 2015b). A Figura 53 apresenta a atividade pozolânica das argamassas preparadas com adições unitárias e binárias de vidro, sílica, metacaulim, produzidas com cimento e Ca(OH)_2 . Os resultados das argamassas preparadas com cimento estão representados na figura 53 (a). Essa análise recebe influência da composição química do material analisado, das características físicas relacionadas à compacidade e homogeneidade da mistura. Analisando as argamassas compostas apenas com as adições unitárias, as amostras PV45X75, PV25X45 e PV45 obtiveram índice de 61%, 82% e 86% respectivamente, inferiores ao limite de 90%. Já a amostra PV25 atingiu índice 102% superior à referência. O tamanho da partícula influenciou na menor pozolanicidade da mistura PV45X75, tais efeitos também foram analisados por Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011), Pereira-de-Oliveira, Castro Gomes e Santos (2012), Khmiri, Chaabouni e Samet (2013), Carsana, Frassoni e Bertolini (2014),

Mirzahosseini e Riding (2015) e Kim *et al.* (2017). O PV45 obteve índice próximo alcançado por Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016), igual a 87,5%, sendo também superior ao índice médio de concretos que utilizaram 25% de substituição de pó de vidro pela massa de cimento em argamassas que foi de 82%. Ainda assim, os maiores IAPs para as adições unitárias foram observados para a SA (141 %) e o MC (155 %).

O lote das argamassas binárias metacaulim-vidro apresentou patamares próximos de resistência, com exceção da argamassa MCPV25 que obteve resistência superior. Para o grupo de amostras com metacaulim, as misturas binárias MCPV45 e MCPV45X75, obtiveram indicadores de pozolanicidade inferiores à referência, atingindo 92% e 87% em comparação com a MC. A amostra MCPV25 superou em 165% a amostra de referência e em 106% a amostra de apenas com metacaulim. Parece ficar claro o efeito negativo das partículas mais grossas e da contribuição da reatividade individual de cada material, uma vez que o teor de ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) para o MC e MCPV45X75, é de 90,9% e 89%, e que os diâmetros característicos e área superficial específica destes materiais são semelhantes, observar tabela 25, sendo esperado valores mais próximos para este indicador de pozolanicidade em função desses critérios.

Analisando a tabela 30 as argamassas binárias sílica-vidro apresentaram resistência superior as argamassas de referência e apenas com sílica, destacam-se as argamassas SAPV45 e SAPV25, sendo 159% e 172% superior que a argamassa de referência e 113% e 122% superior que a argamassa apenas com sílica ativa, respectivamente.

Tabela 30 - Resistência à compressão das argamassas compostas pelas adições, cimento CPV e Ca(OH)_2 .

Argamassas	Resistência à compressão das adições com o cimento – NBR 5752		Resistência à compressão das adições com o Ca(OH)_2 – NBR 5751
	Valor absoluto (MPa)	Valor relativo (%)	Valor absoluto (MPa)
CPV	37,90	-	-
PV45X75	23,18	61	3,03
PV25X45	31,67	84	3,76
PV45	32,42	86	5,11
PV25	41,33	109	6,36
SA	53,34	141	10,27
SAPV45X75	54,10	143	4,16
SAPV25X45	56,12	148	5,36
SAPV45	60,55	156	7,55
SAPV25	65,48	173	8,16
MC	58,77	155	15,10
MCPV45X75	50,94	134	14,97
MXPV25X45	53,69	142	15,02
MCPV45	54,34	143	15,97
MCPV25	62,49	165	15,25

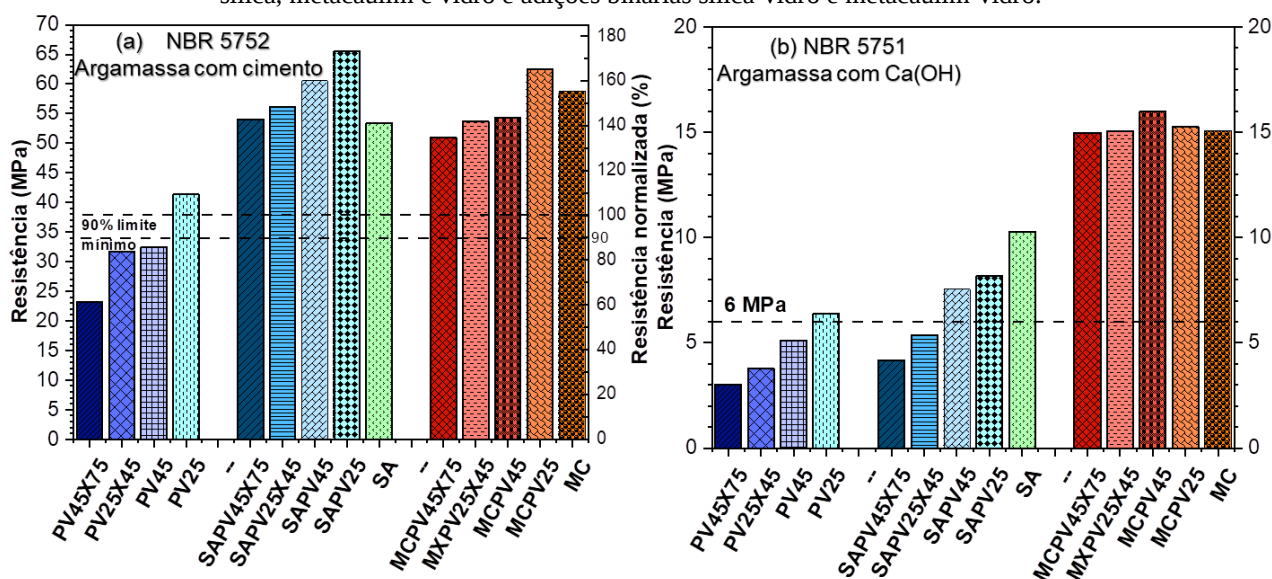
Fonte: O autor (2023).

A baixa absorção de água das partículas de vidro relatadas por Schwarz, Cam e Neithalath

(2008) e Lu, Duan e Poon (2017a), além da redução de partículas presentes na mistura em função da menor área superficial específica das partículas de vidro, contribuíram para um aumento da água de amassamento contribuindo para melhor homogeneização das misturas SAPV45 e SAPV25 e hidratação do sistema.

A figura 53 (b) apresenta os resultados obtidos após a ruptura das argamassas com hidróxido de cálcio aos 7 dias. O índice de atividade pozolânica com o Ca(OH)_2 foi determinado de acordo com os parâmetros prescritos na ABNT NBR 5751:2015 (ABNT, 2015a). Esta análise recebe influência da capacidade química do potencial material pozolânico de reagir com o hidróxido de cálcio e da homogeneização da argamassa analisada. para determinação da atividade pozolânica. Entre as argamassas com pó de vidro e Ca(OH)_2 , apenas o vidro PV25 apresentou resistência superior à 6 MPa, mínima para materiais pozolânicos. Observando a tabela 29 as misturas PV45 e PV45X75 atingiram resistência de 5,85 MPa e 3,0 MPa respectivamente, ficando abaixo de 6MPa, indicando a influência do tamanho da partícula. Efeito semelhante foi relatado por Guignone (2017), que analisou a atividade pozolânica de resíduos de lapidação de vidros sodo-cálcicos, sem moagem e após 02 horas de moagem, os vidros obtiveram resistência de 4,14 MPa e 6,28 MPa respectivamente. O resíduo de vidro laminado analisado por Sauer (2013) obteve resistência de 4,77 MPa. As argamassas apenas com metacaulim e sílica alcançaram as maiores resistências sendo 10,3 MPa e 14,98 MPa respectivamente. O metacaulim analisado por Guignone (2017) e Basto (2018) obteve resistência de 11,53 MPa e 18,28 MPa nessa sequência.

Figura 53 - Resistência mecânica para análise da pozolanicidade das argamassas contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.



Fonte: O autor (2023).

No lote das argamassas binárias com sílica-vidro apenas as amostras SAPV45 e SAPV25

superaram o patamar de 6 MPa, excedendo esse limite em 125% e 133%. Essas amostras apresentaram resistência 26% e 20% inferior a argamassa apenas com sílica e Ca(OH)_2 . No lote das argamassas metacaulim-sílica, todas superaram o limite mínimo de 6 MPa, observando um patamar próximo nos resultados alcançados, com exceção da amostra MCPV45 que apresentou resistência ligeiramente superior. As argamassas MCPV45 e MCPV25 apresentaram resistência 6% e 1% superior a argamassa apenas com metacaulim e Ca(OH)_2 . De modo geral, observa-se uma tendência do aumento da pozolanicidade quando a partícula mais fina de vidro é utilizada.

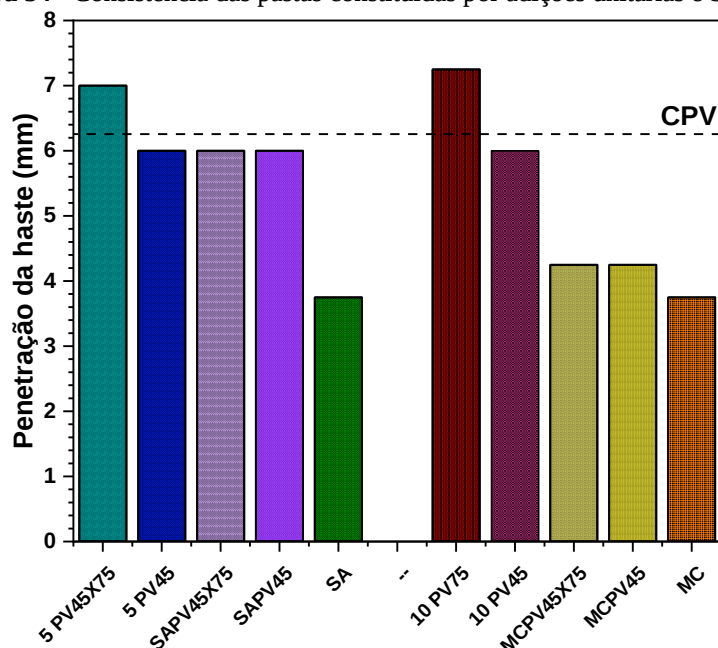
A partir da análise conjunta entre o potencial de pozolanicidade e as resistências a compressão é possível observar uma tendência de maior reatividade química das partículas de vidro mais finas, sendo mais intensas nas amostras binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro. Além da possibilidade que as partículas de vidro contribuam para a dispersão dos aglomerados de sílica ativa, também é possível que possam contribuir para a hidratação da matriz cimentícia em função de possíveis implicações físicas como por exemplo a baixa absorção de água das partículas de vidro, justificando a continuidade das investigações físicas e mecânicas em análises mais aprofundadas.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS PASTAS

4.3.1 Estado fresco

4.3.1.1 Estudo da consistência

Os resultados do ensaio de consistência normal dos lotes constituídos por sílica ativa, metacaulim, e pó de vidro estão representados na figura 54. É notável que as pastas constituídas por adições binárias apresentaram menor consistência que seus respectivos pares unitários. As misturas com 5% de SAPV45 e 5% de SAPV75, apresentaram redução da consistência de 60% em comparação com a pasta apenas com sílica ativa. As pastas com 5% de sílica, 10% de metacaulim, apresentaram consistência 40% e 40% respectivamente inferiores à referência com cimento CPV. A elevada área superficial específica da sílica ativa e o formato das partículas do metacaulim contribuíram para redução da consistência dessas pastas. Ficou evidente a influência do tamanho da partícula de vidro na consistência, as pastas com 5%, 10% de PV75 obtiveram consistência 12% e 16% superior à referência CPV, enquanto as pastas com PV45 tiveram a consistência reduzida em 4%. A baixa absorção em conjunto com a menor superfície específica das partículas do vidro PV75, resultou no aumento de água livre para mistura, tornando-a menos consistente.

Figura 54 - Consistência das pastas constituídas por adições unitárias e binárias.

Fonte: O autor (2023).

4.3.1.2 Calorimetria semi-adiabática

Os resultados das análises dos tempos de início de fim de pega obtidos por calorimetria semi-adiabática obtidas através das pastas unitárias com adições de vidro, sílica e metacaulim e das pastas binárias contendo adições sílica-vidro e metacaulim-vidro estão presentes na figura 55. Observa-se que o vidro influencia no comportamento do tempo de pega, observando um comportamento diferente para os teores de 5% e 10% em comparação com o grupo de amostras com 15% e 20% de substituição, uma vez que houve uma redução do tempo de fim de pega para o grupo de amostras com metacaulim. A influência do tamanho da partícula ficou mais evidente para o grupo de amostras que utilizaram substituições com 15% e 20% em massa, onde é possível observar que as misturas com 15% e 20% de PV45X75 retardaram o tempo de fim de pega em 7,7% e 23% respectivamente, enquanto as amostras com PV45, retardaram em 3,8% e 7% respectivamente. O efeito do tamanho da partícula foi analisado por Lu, Duan e Poon (2017b), apontando que partículas mais grossas retardaram o início e fim da pega. Segundo o autor esse efeito pode ser resultante do maior tamanho da partícula, sua superfície lisa e a baixa absorção de água, resultando numa maior quantidade de água livre para o sistema.

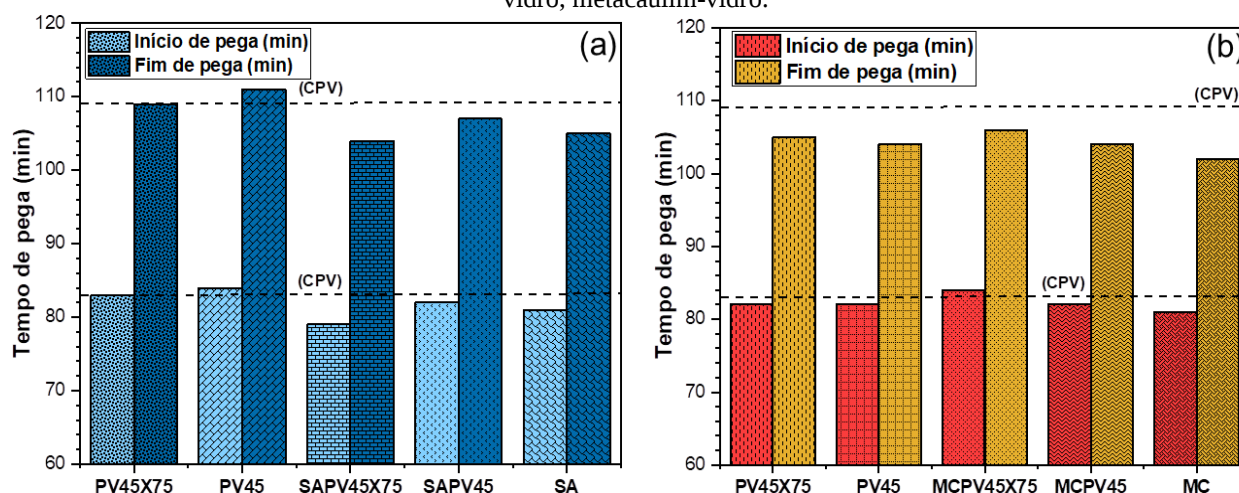
De modo geral o aumento do teor de vidro retardou levemente o início da pega e fim de pega, ficando mais evidente o retardo do fim de pega, quando comparadas com a amostra de referência – CPV. Efeito similar foi relatado por Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016), em que tempo inicial de pega aumentou ligeiramente com o aumento gradual do teor de vidro, porém o

tempo de fim de pega apresentou patamares próximos. Já no trabalho de Elaqra e Rustom (2018), que analisou esse indicador em pastas com vidro e dois tipos de cimento, as misturas com 10% de substituição aumentaram o tempo de início de pega e as misturas com 20% obtiveram uma leve redução para os dois tipos de cimento.

Para o grupo de amostras com sílica ativa fica evidente a contribuição do vidro para o retardamento do tempo de início e fim de pega das misturas binárias em relação à amostra unitária. Com exceção da amostra SAPV45X75, as demais misturas obtiveram um maior retardo do início e fim da pega quando comparadas com a mistura que continha apenas sílica ativa. Esse efeito está correlacionado diretamente com a hidratação da pasta. A substituição do cimento por sílica ativa, em massa ou em volume, resulta numa maior quantidade de partículas e consequentemente tornando a mistura com uma maior necessidade de água. A melhora na hidratação do cimento com incorporação de vidro relatado por Kamali e Ghahremaninezhad (2016) conjuntamente com a baixa absorção do vidro apontado por Lu, Duan e Poon (2017a), indicam a influência positiva do vidro nessa situação.

O grupo de amostras com metacaulim obtiveram uma redução nos tempos analisados, principalmente no fim da pega. Os tempos de início e fim de pega em média foram reduzidos em 1,2% e 4,5% em comparação com as misturas que continham apenas cimento. Esse resultado não era esperado uma vez que houve aumento na quantidade de pó de vidro, indo em desconcontro com os resultados apresentados por Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016) e Elaqra e Rustom (2018). Todas as amostras que apresentaram pó de vidro em sua composição apresentaram desempenho ligeiramente superior que a amostra apenas com metacaulim. Para as amostras que utilizaram substituição em volume os resultados foram mais coerentes com os existentes na literatura, resultaram no retardo dos tempos de início e fim de pega, porém cabe destacar que neste método as substituições ocorrem em função da densidade da de cada adição, resultando em amostras com massas distintas, não existindo uma correlação linear.

Figura 55 - Tempo de início e fim de pega das pastas unitárias de vidro, sílica e metacaulim e pastas binárias sílica-vidro, metacaulim-vidro.

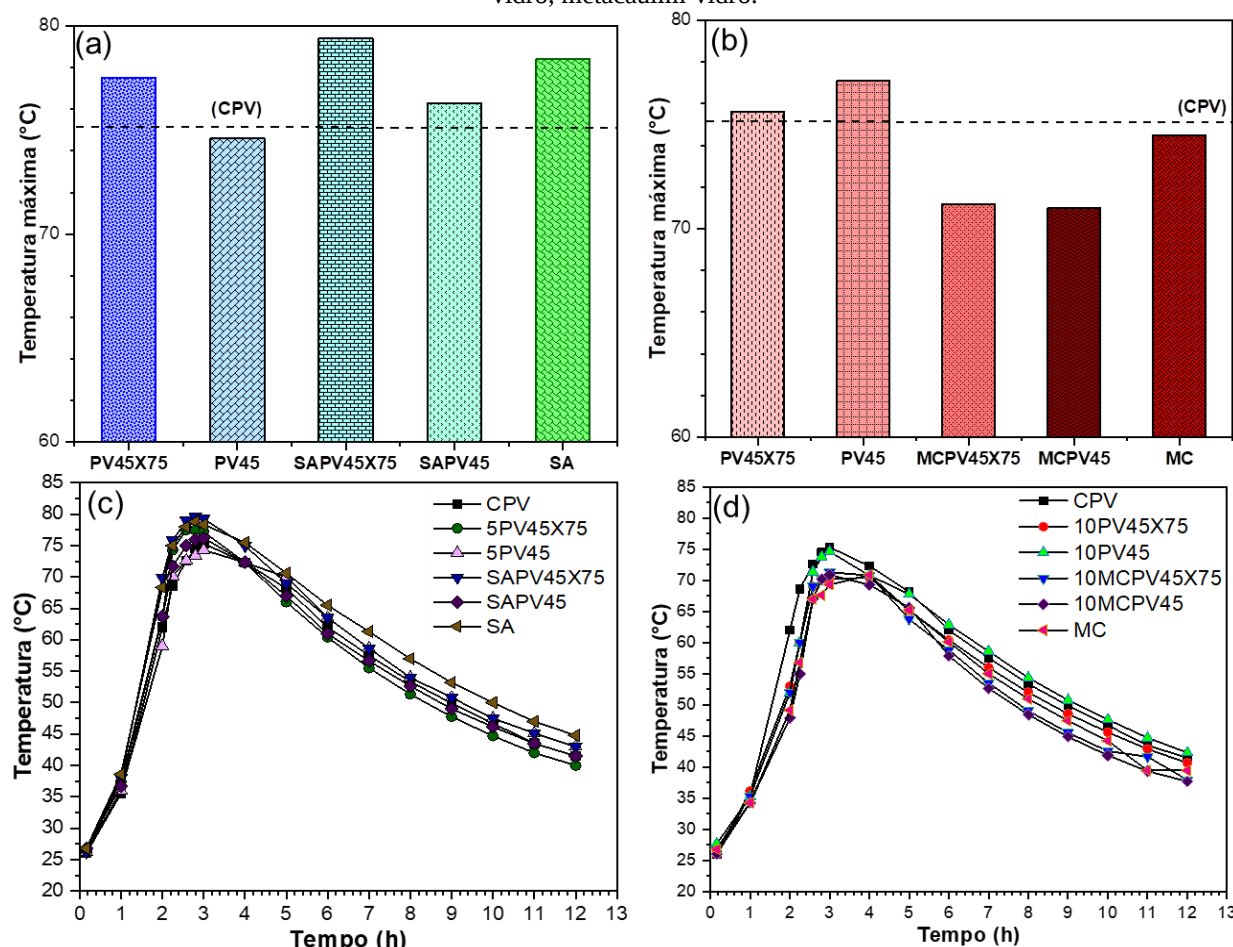


Fonte: O autor (2023).

O pico e cinética da temperatura das pastas unitárias de vidro, sílica e metacaulim e pastas binárias sílica-vidro, metacaulim-vidro, estão presentes na figura 56. De modo geral o aumento do teor de substituição do cimento pelas adições minerais, resultou no aumento do pico de temperatura para as misturas sílica-vidro e metacaulim-vidro.

Os trabalhos de Dyer e Dhir (2001), Du e Tan (2014), Mirzahosseini e Riding (2015), Soliman e Tagnit-Hamou (2016), mostraram que o aumento do teor de vidro resultou na redução do calor liberado. A influência do tamanho da partícula de vidro na liberação de calor foi analisada por Mirzahosseini e Riding (2015), Zheng (2016) e Lu, Duan e Poon (2017a). Seus resultados apontaram uma maior liberação de calor nas amostras compostas por partículas de vidro mais finas. Para o grupo de amostras com sílica ativa, a mistura SAPV45X75 apresentou maior pico de calor liberado, seguido amostra SA, sendo superior em 5% e 4% com relação à mistura CPV. A baixa absorção do PV45X75 em sinergia com a menor superfície específica, resultou numa maior oferta de água e melhor condição de hidratação para a amostra SAPV45X75 e consequentemente uma maior temperatura. Esse efeito não foi identificado para as misturas SAPV45, 5% PV45 e 5% PV45X75. A amostra SAPV45 é constituída por um vidro mais fino, aumentando a superfície específica, resultando numa menor oferta de água para a hidratação. As misturas com 5% de PV45 e PV45X75, apresentaram menor pico de temperatura devido ao fato desses materiais apresentarem menor atividade pozolânica em comparação com a sílica ativa.

Figura 56 - Pico e cinética da temperatura das pastas unitárias de vidro, sílica e metacaulim e pastas binárias sílica-vidro, metacaulim-vidro.



Fonte: O autor (2023).

Analisando o grupo de amostras com metacaulim, figura 56 (b) nota-se que apenas a mistura com 10% de PV45 alcançou temperatura superior à mistura de referência CPV, sendo 2% superior. Misturas que utilizaram substituição em massa alcançaram maiores temperaturas. Uma comparação similar foi realizada por Sales (2014), que realizou análises de calorimetria diferencial exploratória em pastas com 10% e 20% de pó de vidro, âmbar e incolor, realizando comparações com uma pasta padrão constituída apenas com cimento. Os resultados mostraram que a pasta com 10% de cimento obteve um pico de temperatura 4,5% superior às amostras com vidros. As amostras MCPV45 e MCPV45X75 obtiveram as menores temperaturas, em média foram 4% e 5% inferior à mistura MC.

4.3.1.3 Análise da plasticidade

A figura 57 apresenta o índice de consistência obtido por meio da mesa de fluxo das pastas unitárias formadas por cimento, sílica, metacaulim e frações de vidro e pelo sistema binário sílica-vidro figura 57 (a) e metacaulim-vidro figura 57 (b). Ambos os lotes apresentam uma redução da

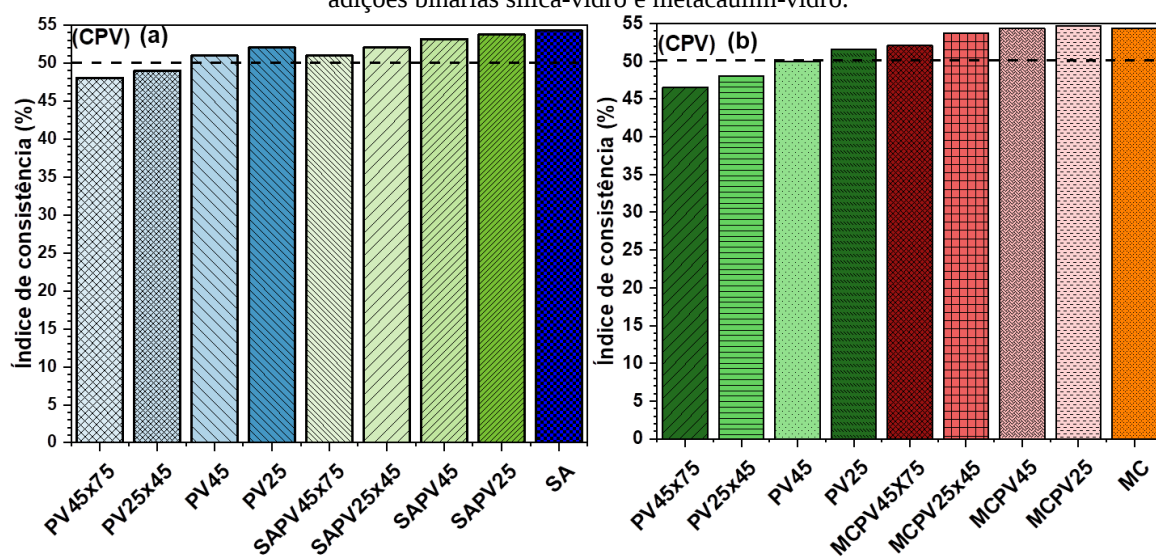
plasticidade na medida que partículas mais finas de vidro são utilizadas. As amostras com 5% e 10% de PV45X75 e PV25X45 apresentaram os maiores diâmetros de espalhamento. As pastas SAPV45 e SAPV25 apresentaram plasticidade ligeiramente inferior as demais e em patamar próximo da amostra apenas com sílica. Comportamento similar foi encontrado no lote das pastas com binárias metacaulim-vidro, observando que as pastas MCPV45 e MCPV25 apresentaram plasticidade no mesmo nível da pasta apenas com metacaulim e ligeiramente inferior as demais pastas do mesmo grupo. Esses resultados podem estar indicando uma concomitância dos efeitos do aumento da área superficial específica das partículas mais grossas de vidro e pela baixa absorção de água das partículas de vidro, que é uma característica intrínseca deste material. A tabela 31 apresenta o resumo do diâmetro de espalhamento obtido através de flow table e do método do minicone.

Tabela 31 - Diâmetro de espalhamento obtidos por flow table e minicone das pastas compostas pelas adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.

Pastas	Espalhamento - Flow table	Espalhamento – Minicone		
	Diâmetro (cm)	a/c 0,5	a/c 0,55	a/c 0,6
CPV	25	6,5	8	9
5PV45X75	26	7,25	8,5	11
5PV25X45	25,5	7	8,4	10,5
5PV45	24,5	6	8,1	9,45
5PV25	24	5,5	7,5	8,45
5SA	23	6	7,5	8,5
SAPV45X75	24,5	6	8,5	9,5
SAPV25X45	24	6	8	9,15
SAPV45	23,5	5,5	7,7	8,35
SAPV25	23,25	5,35	7,5	8,5
10PV45X75	26,85	7,5	8,7	11,2
10PV25X45	26	7	8,5	10,4
10PV45	25	5,6	7,15	8,85
10PV25	24,25	5,15	7	8,5
10MC	23	4,65	6,1	7,6
10MCPV45X75	24	5,5	6,85	8,15
10MXPV25X45	23,25	5,2	6,45	7,85
10MCPV45	23	4,75	5,9	7,5
10MCPV25	22,85	4,5	5,8	7,3

Fonte: O autor (2023).

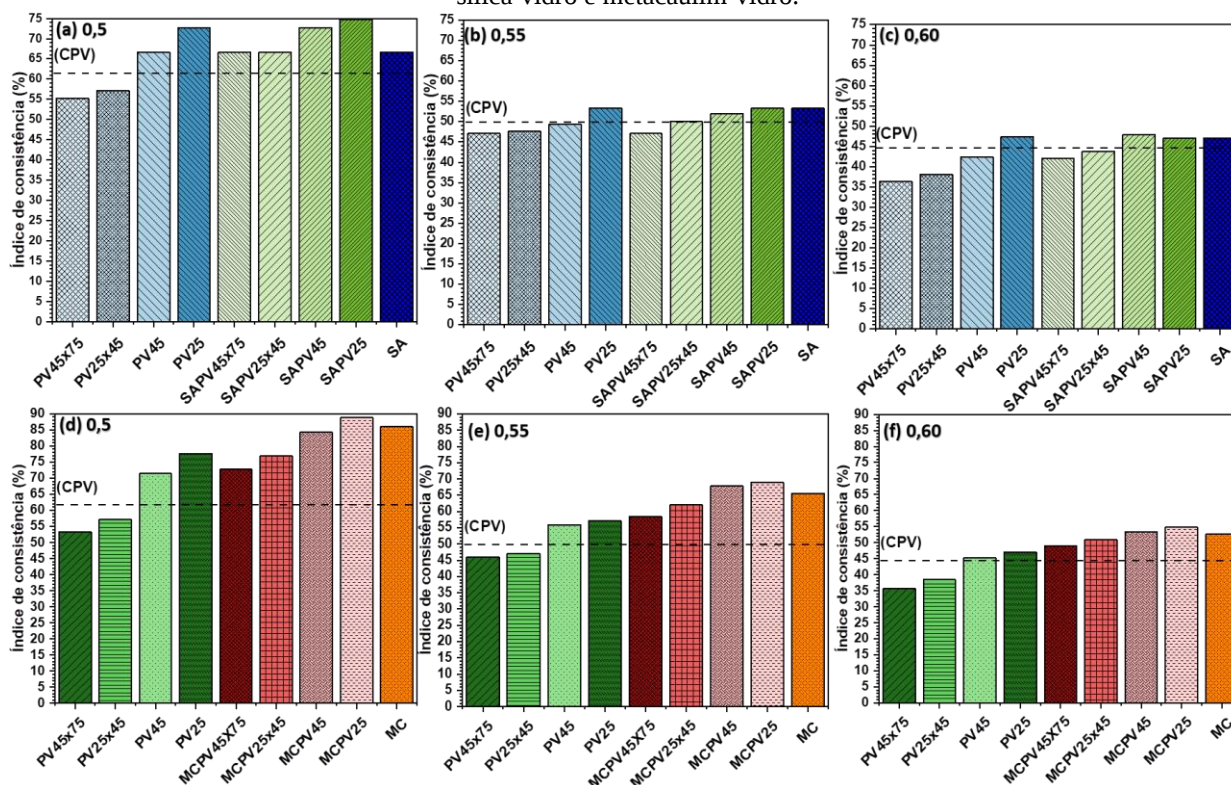
Figura 57 - Índice de consistência das pastas compostas pelas adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.



Fonte: O autor (2023).

O estudo realizado por Pereira-de-Oliveira, Castro Gomes e Santos (2012), mostrou que a trabalhabilidade das argamassas teve pouca variação com o aumento do teor de substituição de vidro. Já os trabalhos de Matos e Sousa-Coutinho (2012), Afshinnia e Rangaraju (2015), Soliman e Tagnit-hamou (2016) e Islam, Rahman e Kazi (2017) relataram o aumento da trabalhabilidade com o aumento do teor de vidro.

Figura 58 - Índice de consistência das pastas compostas pelas adições unitárias (sílica, metacaulim, vidro) e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.



Fonte: O autor (2023).

A figura 58 apresenta o índice de consistência obtidos através do minicone das pastas com adições unitárias de vidro, sílica e metacaulim e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro. Analisando primeiramente as misturas que utilizaram 5% e 10% de pó de vidro, observou-se uma redução da plasticidade com a redução do tamanho da partícula. Também é observável que a trabalhabilidade das pastas com 5% e 10% de pó de vidro em substituição ao cimento alcançaram patamares próximos, indicando que o tamanho da partícula exerceu maior influência que o percentual de substituição. Essa situação fica evidente observando o comportamento das pastas formadas com 5% e 10% de PV45x75 que apresentaram espalhamentos em patamares próximos com os mesmos teores de água. A baixa área superficial específica em conjunto com a baixa absorção de água das partículas de vidro, contribuem para esse efeito. Esse efeito não é estendido para as partículas mais finas por conta de fatores concorrentes como a elevada área superficial específica, formato e a baixa taxa de dissolução das partículas de vidro. Mesmo que as partículas de vidro tenham absorção de água próximo de zero, contribuindo para o aumento da relação água/cimento, provocando uma maior dissolução da matriz cimentícia. Porém as partículas de vidro não são consumidas quimicamente no momento da mistura, ficando presente em grande quantidade, resultando na redução do espalhamento em função do formato angular das partículas e elevada área superficial específica.

Analisando o espalhamento das pastas as binárias SAPV45X75, SAPV25X45, obtiveram maior espalhamento que a mistura apenas com sílica ativa em todas as relações água cimento analisadas. Esse resultado é similar ao obtido por Matos e Sousa-Coutinho (2012), no qual sua argamassa produzida com 10% de sílica ativa em substituição à massa de cimento obteve espalhamento 1% inferior à referência e 3,9% inferior à argamassa com 10% de vidro em substituição ao cimento. A baixa absorção de água e a menor área superficial específica das partículas de vidro, tornaram as pastas com as adições SAPV45X75 e SAPV25X45 com menor necessidade de água, contribuindo para a hidratação da pasta. As misturas SAPV45 e SAPV45X75 obtiveram um espalhamento médio 3% superior que a pastas apenas com cimento e sílica ativa. Já as misturas SAPV45 e SAPV25 apresentaram espalhamento em patamares próximos da amostra apenas com sílica, o formato das partículas e a elevada área superficial específica contribuíram para esse resultado.

As pastas MCP45X75 e MCPV25X45 apresentaram espalhamento superior à amostra apenas com metacaulim. A investigação de Afshinnia e Rangaraju (2015), mostrou o aumento significativo do espalhamento de uma amostra com 80% de cimento, 10% de metacaulim e 10% de vidro, em comparação com o exemplar composto por 80% de cimento e 20% de metacaulim. As pastas com as adições MCPV45 e MCPV25 obtiveram espalhamento próximo das pastas

compostas apenas por metacaulim, em todos os teores de água analisados. A morfologia e coesão proporcionada pelo metacaulim em sinergia com a morfologia das partículas de cimento, contribuem para uma pasta coesa, mesmo levando em consideração a menor absorção de água do vidro.

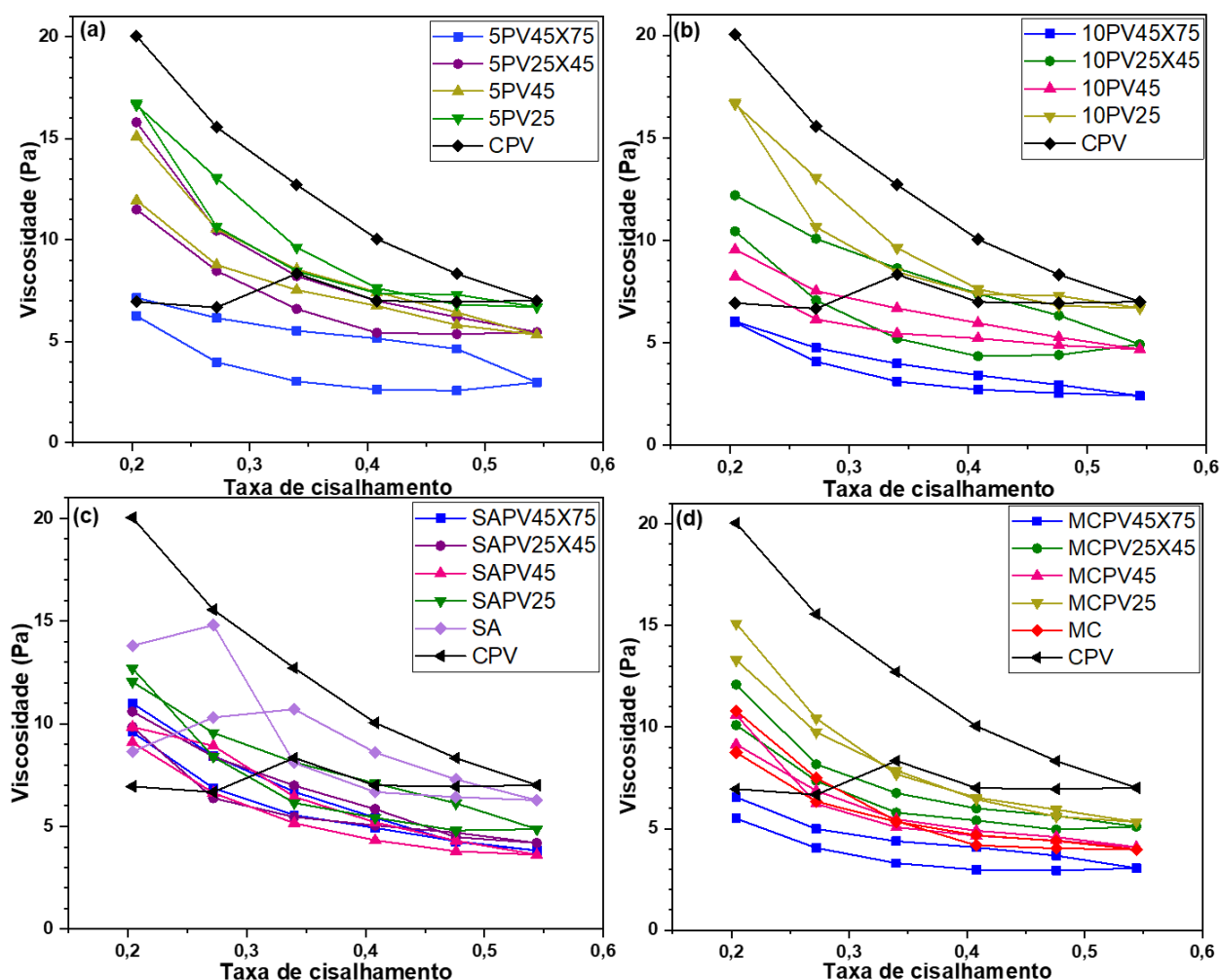
4.3.1.4 Viscosidade

A figura 59 apresenta a viscosidade das pastas compostas adições unitárias de vidro, sílica e binárias sílica-vidro, preparadas com relação a/c 0,6. A viscosidade da pasta PV45x75 foi inferior às demais para as duas relações água/cimento. O fato da área superficial específica do vidro PV45x75 ser de 110 m²/kg, enquanto o vidro PV25 é de 694 m²/kg, somado ao fato do vidro ter baixa absorção de água, contribui para mais água livre, resultando numa mistura com menor viscosidade. Isso pode explicar as misturas com 5% de sílica apresentaram maior viscosidade. As adições unitárias e binárias que contém vidro apresentam menor área superficial específica que as misturas apenas com sílica, resultando numa menor necessidade de água para homogeneização das misturas e resultando em mais água livre para a mistura e consequentemente na redução da viscosidade.

Em análise similar, Du e Tan (2014) apresentaram que o aumento do teor de substituição de vidro resultou em menor tensão de cisalhamento que a referência apenas com cimento. Segundo o autor esse efeito está relacionado a pouca absorção de água das partículas de vidro, que quando aumenta o teor de pó de vidro na pasta resulta em menor estresse no escoamento e viscosidade.

No grupo de misturas com metacaulim as amostras que continham apenas metacaulim apresentaram a maior viscosidade. Apenas a amostra com 10% de MCPV45 apresentou menor viscosidade que a referência apenas com cimento. As misturas binárias de metacaulim e vidro apresentaram menor viscosidade que a mistura apenas com metacaulim, ficando evidente o efeito do tamanho da partícula na redução da viscosidade.

Figura 59 - Viscosidade das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro (a, b) e adições binárias sílica-vidro (c) e metacaulim-vidro (d).

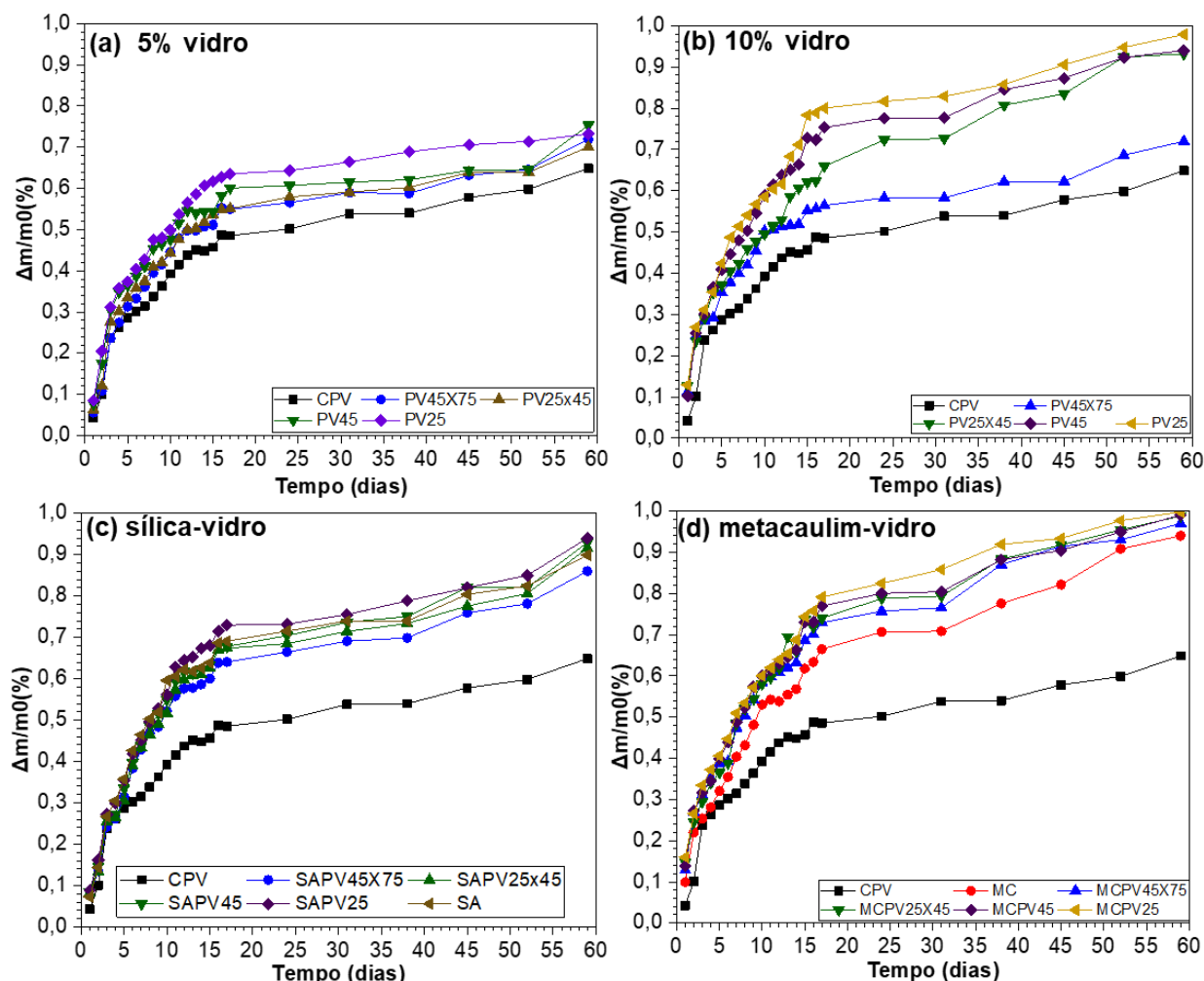


4.3.2 Estado endurecido

4.3.2.1 Cinética da hidratação

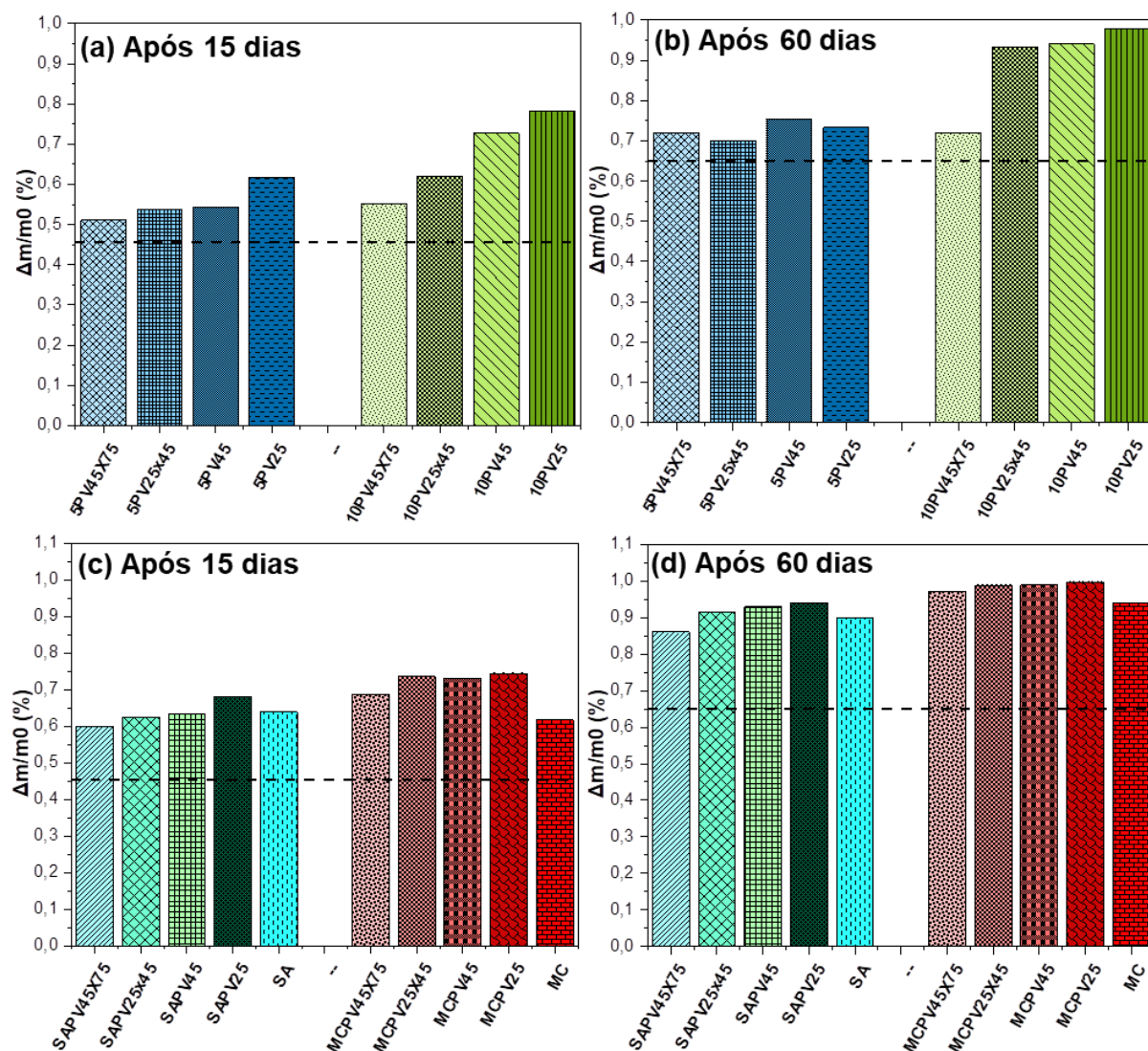
A figura 60 apresenta a evolução da hidratação através do ganho de massa durante 60 dias de pastas unitárias e binárias de vidro e sílica e vidro e metacaulim. Já a figura 60 apresenta o ganho de massa aos 15 dias e após 60 dias dessas pastas. É notável que as pastas contendo 5% e 10% de vidro, figuras 60 (a) e 60 (b), apresentam ganho de massa superior a pasta de referência, indicando o comportamento mais pozolânico da pasta PV25. Observa-se no lote das misturas de vidro e sílica que essas amostras apresentam ganho de massa ligeiramente superior que as pastas formadas apenas por vidro. Em observação as misturas constituídas por sílica e vidro, a pasta SAPV25 apresentou maior ganho de massa indicando maior pozolanicidade.

Figura 60 - Evolução do processo de hidratação das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.



Em observação ao lote das pastas unitárias e binárias formadas por vidro e metacaulim, figuras 60 (c) 60 (d), todas apresentaram maior ganho de massa que a pasta de referência, sendo possível perceber a influência do tamanho da partícula de vidro, uma vez que as pastas que contém partícula mais finas apresentaram maior ganho de massa. Nota-se uma tendência de aumento do ganho de massa ao utilizar partículas de vidro mais finas. As pastas 10PV25 e MCPV25 foram as alcançaram os maiores ganho de massa ao longo do tempo, enquanto as 10PV45X75 e as pastas 10MCPV45x75 tiveram o menor ganho de massa entre as pastas compostas, havendo uma indicação da influência do tamanho da partícula.

Figura 61 - Ganho de massa por hidratação das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.



Fonte: O autor (2023).

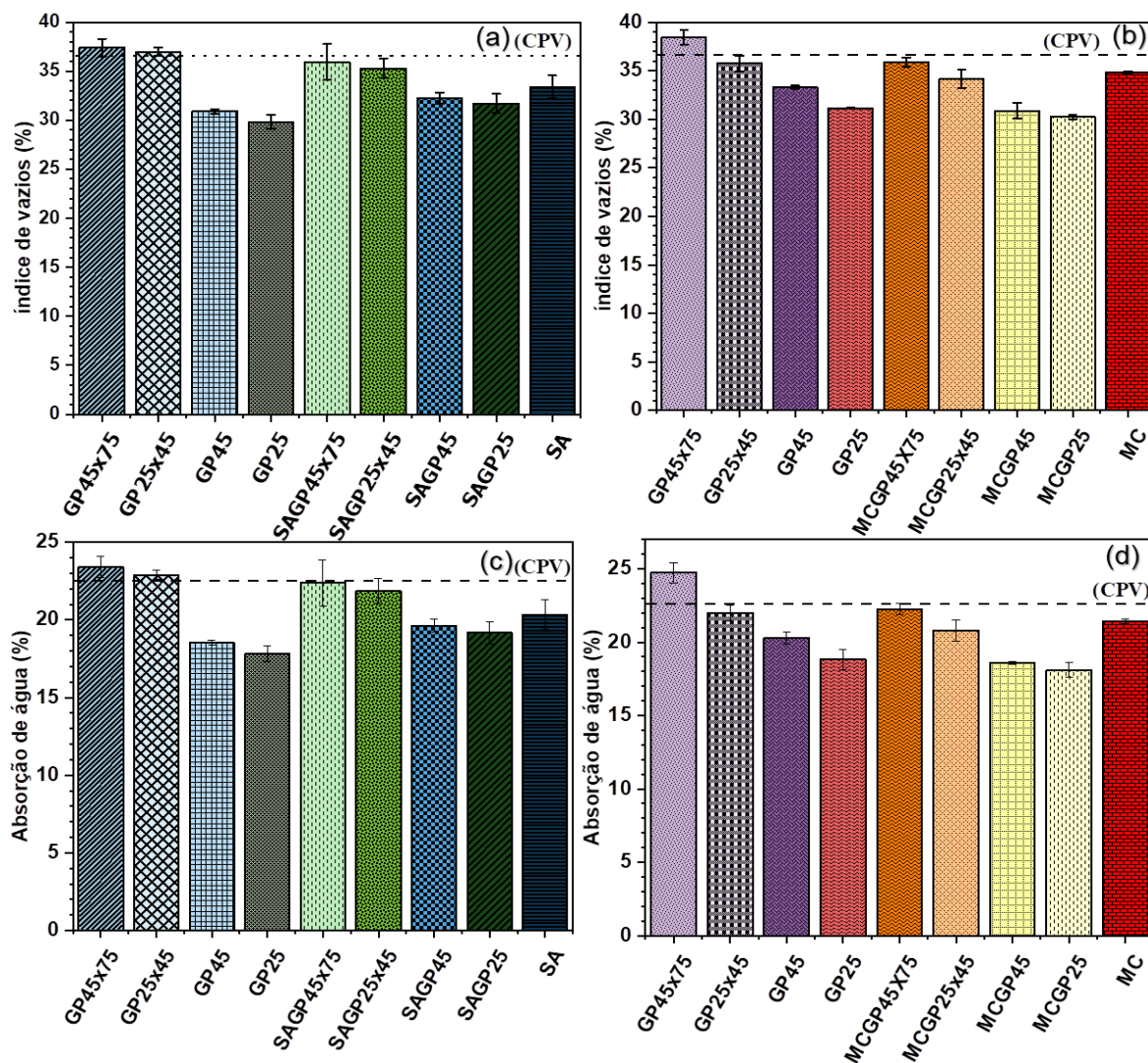
Em análise a figura 61, existe uma tendência de maior estabilidade no ganho de massa no lote das pastas das pastas binárias de sílica-vidro e metacaulim-vidro conforme figura 61 (d). Também se observa uma estabilidade no ganho de massas nas patas com 5% de vidro após 56 dias figura 61 (b). As pastas unitárias compostas por 10% de pó de vidro apresentaram ganho de massa ligeiramente superior as pastas com 5% de vidro, figuras 61 (a) e 61 (b).

4.3.2.2 Absorção de água e índice de vazios

A figura 62 apresenta o resultado da absorção de água e índice de vazios das pastas contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro. Observa-se uma tendência similar nos lotes a influência do tamanho da partícula

de vidro nesses indicadores. As pastas unitárias e binárias que produzidas com as partículas mais grossas, apresentaram maior absorção de água figura 62 (a), estando na mesma faixa da referência considerando o desvio padrão.

Figura 62 - Índice de vazios e percentual de absorção de água das pastas unitárias e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro determinados após 28 dias.



Fonte: O autor (2023).

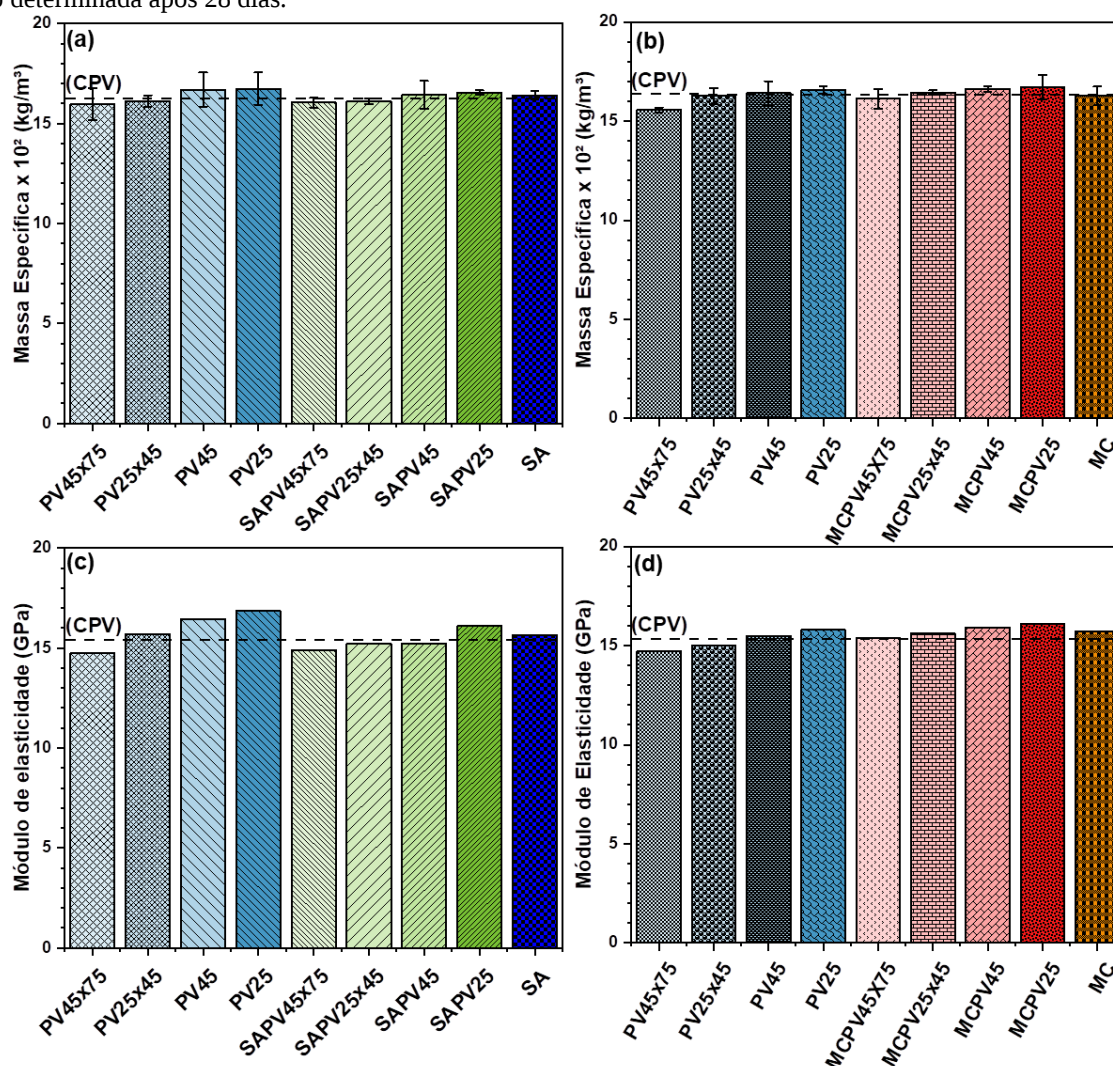
Já a pastas que possuem as partículas mais finas de vidro, apresentam menor absorção que as demais mesmo levando em consideração os intervalos dos desvios. A mesma tendência ocorre com o índice de vazios figura 62 (b). Assim como no lote das amostras com vidro e sílica, observa-se a influência do tamanho da partícula de vidro nos índices físicos, a amostra PV45X75 apresentam maior absorção e índice de vazios.

4.3.2.3 Massa específica e módulo de elasticidade

A figura 63 apresenta os valores referentes as massas específicas das pastas unitárias e

binárias sílica-vidro figura 63 (a), e metacaulim-vidro figura 63 (b). É possível que as pastas estão no mesmo intervalo de desvio padrão da pasta de referência, com exceção da pasta com 10% de PV45X75, não sendo possível identificar a presença de uma tendência linear deste indicador com o tamanho da partícula de vidro. Durante o período de cura as partículas de vidro mais finas tendem a promoverem reações pozolânicas mais intensas que as partículas mais grossas. Essas reações resultam na produção de silicatos de cálcio hidratados, que consequentemente auxiliam na redução da porosidade, índice de vazios e absorção de água. Os silicatos de cálcio resultantes das reações pozolânicas possuem densidade maior que a água e menor que outros materiais presentes no cimento, existindo menor contribuição para a variação da massa específica. Existindo a possibilidade de ser uma limitação do método utilizado, é necessário indicar outro método de obtenção desse indicador, como por exemplo por picnometria.

Figura 63 - Massa específica e módulo de elasticidade das pastas unitárias e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro determinada após 28 dias.



Fonte: O autor (2023).

O módulo de elasticidade das pastas compostas por vidro e sílica e vidro e metacaulim

estão apresentados nas figuras 63 (c) e 63 (d). O efeito do tamanho da partícula de vidro parece mais evidente no lote das amostras unitárias com 5% de vidro, indicando um leve crescimento do módulo de elasticidade nas pastas que utilizaram partículas de vidro mais finas, figura 63 (a).

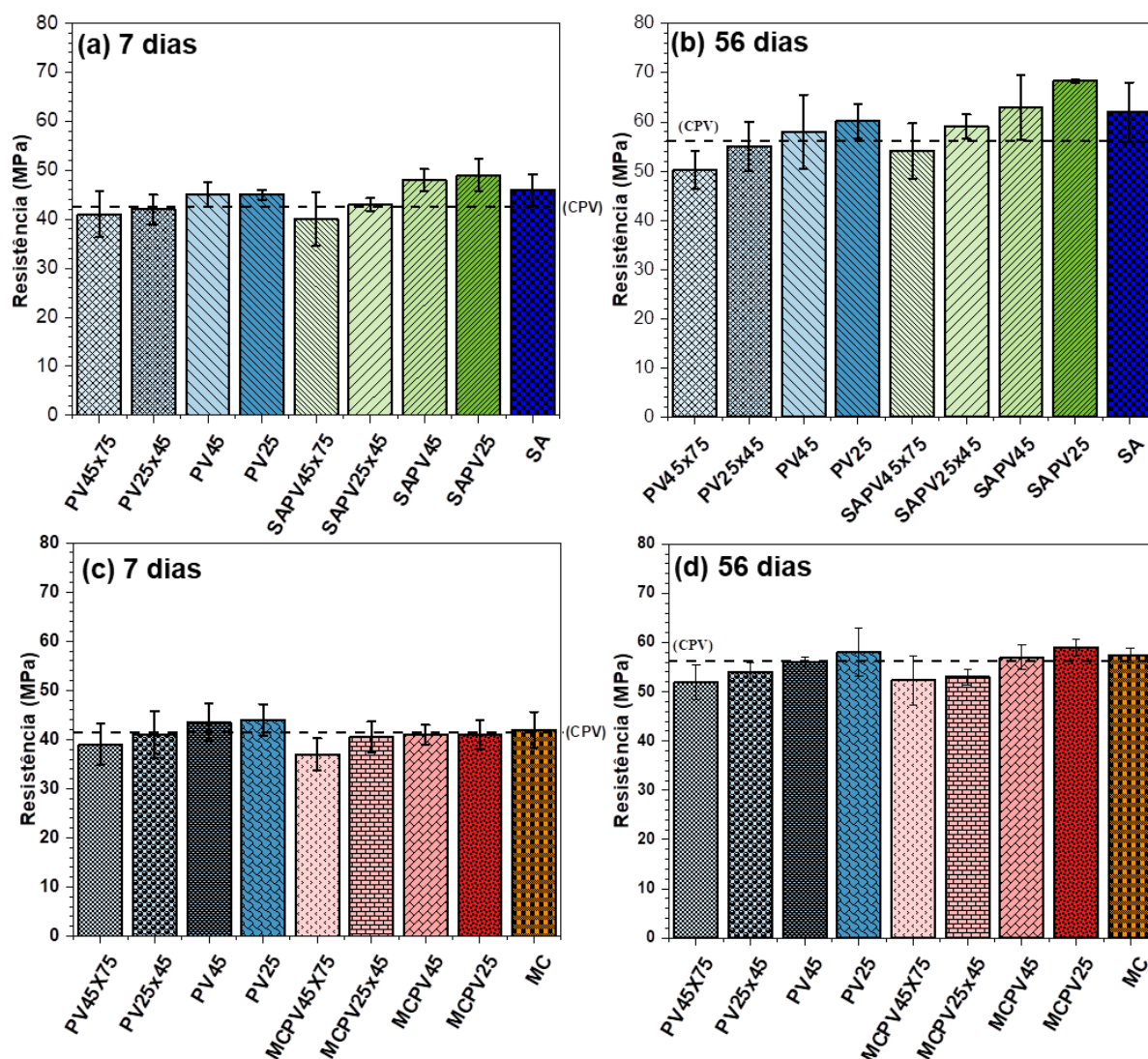
4.3.2.4 Resistência à Compressão

A figura 64 apresenta o resultado da resistência à compressão após 7 e 56 dias, das pastas unitárias e binárias com pó de vidro e sílica, e vidro e metacaulim. Em observação à figura 64 (a) aos sete dias as pastas unitárias com 5% de PV45 e PV25 apresentaram resistência de 45 MPa, praticamente no mesmo patamar das amostras com 10% desse mesmo tipo de vidro, observar figura 64 (b). As argamassas analisadas por Idir *et al.* (2011) com 10% de pó de vidro com área superficial específica de 540 m²/kg e 200m²/kg foi aproximadamente 3% inferior à referência após sete dias, enquanto após 90 dias, a resistência do vidro mais fino foi igual à referência e o vidro mais grosso 3% inferior. Matos e Sousa-Coutinho (2012) produziram uma argamassa com 10% de vidro obtendo resistência 19% inferior à referência aos 7 dias e 8% inferior após 90 dias. Esses resultados são ligeiramente superiores as pastas contendo 10% de pó de vidro verde em substituição ao cimento, estudadas por Nahi *et al.* (2020), que obtiveram resistência de 39,7MPa.

Em analogia as pastas com 5% de sílica após 7 e 56 dias, alguns estudos obtiveram resultados semelhantes como por exemplo Gesoğlu, Güneyisi e Özbay (2009) entre outras argamassas produziram uma com 5% de sílica ativa em substituição ao cimento obtendo resistência 3% inferior à referência após 50 dias. Já Bagheri *et al.* (2012) produziram concreto com 5% de sílica ativa alcançou resistência aproximadamente 4% superior a referência após 7 dias e aproximadamente 12% após 90 dias. A resistência da argamassa com 5% de sílica ativa analisada por Vivek e Dhinakaran (2017) foi 7,5% inferior a referência após 28 dias. Matos e Sousa-Coutinho (2012) produziram uma argamassa com 10% de sílica apresentando resistência aproximadamente 10% inferior à referência, já aos 90 dias foi 10% superior. Em análise a pastas binárias sílica-vidro após 7 dias a resistência média das pastas SAPV25 e SAPV45 foi 6% e 4% superior à referência, enquanto as pastas SAPV25x45 e SAPV45x75 foi 4% e 13% inferior, porém ambas as pastas se encontram no mesmo intervalo do desvio padrão. Após 56 dias essa tendência foi mantida. Uma composição binária em um concreto com 20% de pó de vidro e 5% de sílica ativa foi analisada por Omran *et al.* (2017), apresentando uma resistência aproximadamente 28% superior a outro concreto sem sílica ativa, após 28 e 91 dias. A concomitância da maior pozolanicidade das partículas mais finas juntamente com a insignificante absorção de água das partículas de vidro, já relatadas por Schwarz, Cam e Neithalath (2008) e Lu, Duan e Poon (2017a),

contribuem para uma melhor hidratação da matriz cimentícia.

Figura 64 - Resistência à compressão das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro. Barra de erro corresponde a 1σ (3 medidas).



Fonte: O autor (2023).

As figuras 64 (c) e 64 (d) apresentam os resultados das resistências das pastas binárias metacaulim-vidro após 7 e 56 dias respectivamente. Com exceção da mistura binária MCPV45X75 as demais desse lote se apresentaram em patamares próximos de resistência, figura 64 (d). Como esperado as pastas após 56 dias de cura apresentaram maiores resistências para os dois lotes de vidro e sílica e vidro e metacaulim. Em observação as pastas com cimento e metacaulim, a resistência em ambas as idades ficaram no patamar da resistência de seus pares binários e da referência. A resistência da argamassa com 10% de metacaulim analisada por Vivek e Dhinakaran (2017) foi 28% inferior a referência após 28 dias. O efeito do tamanho da partícula de vidro é mais destacado também aos 56 dias nas amostras constituídas por vidro e sílica ativa, uma vez que as pastas com menores partículas de vidro apresentaram maior resistência. Essa tendência parece ser

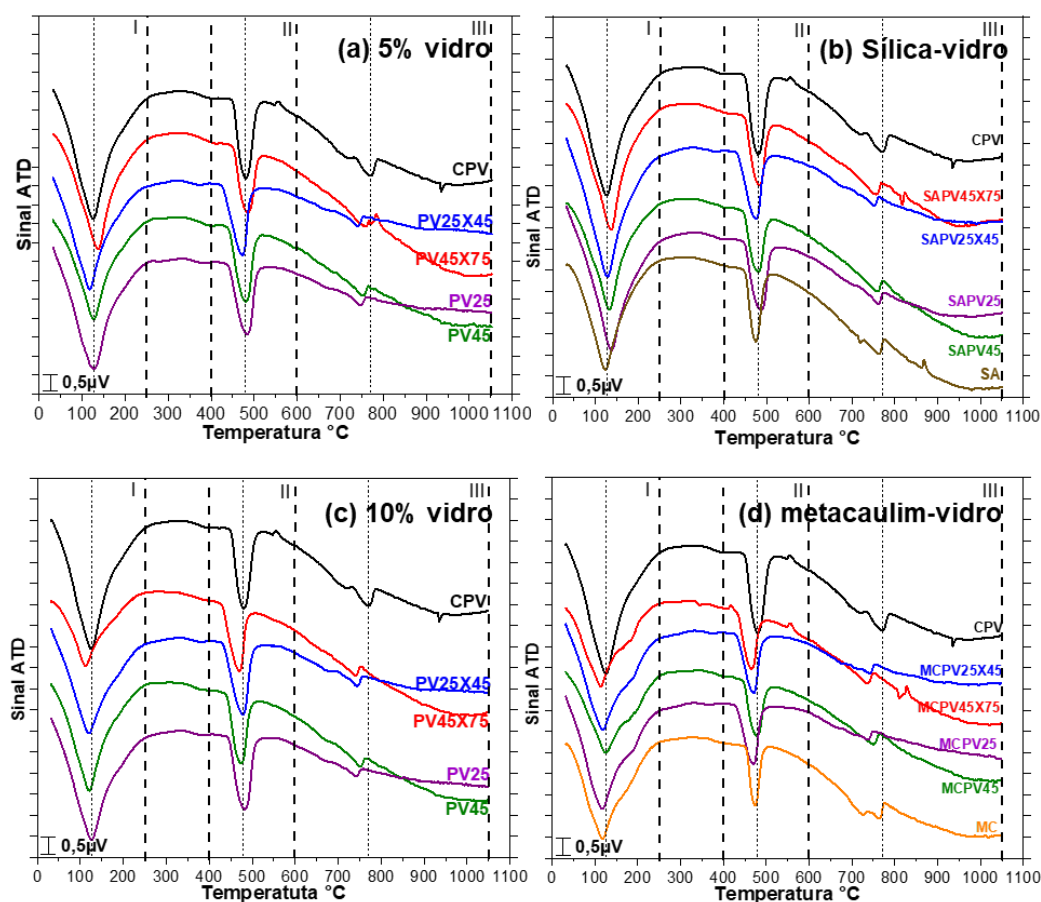
mais clara nas misturas binárias de vidro e sílica do que nas amostras com vidro e metacaulim. É possível que ocorra uma ratificação do efeito observado na análise de potencial de pozolanicidade, corroborando para a contribuição das partículas de vidro para uma maior dissolução dos conglomerados de sílica, aumentando sua reatividade, e consequentemente maior resistência. As partículas de metacaulim naturalmente são mais fáceis de se dispersarem na pasta de cimento, não sendo evidente a mesma contribuição das partículas de vidro para o metacaulim.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA DAS PASTAS

4.4.1 Identificação dos eventos térmicos

As figuras 65 e 66 apresentam as curvas termogravimétricas diferenciais das pastas com vidro e sílica e vidro e metacaulim após 7 dias e 56 dias de cura respectivamente. Em observância a figura 65, de modo geral após 7 dias as curvas TD apresentaram os eventos endotérmicos entre 50°C e 200°C referente a perda de água livre, e entre 350°C e 550°C referente a portlandita, além de apresentarem áreas similares do pico endotérmico.

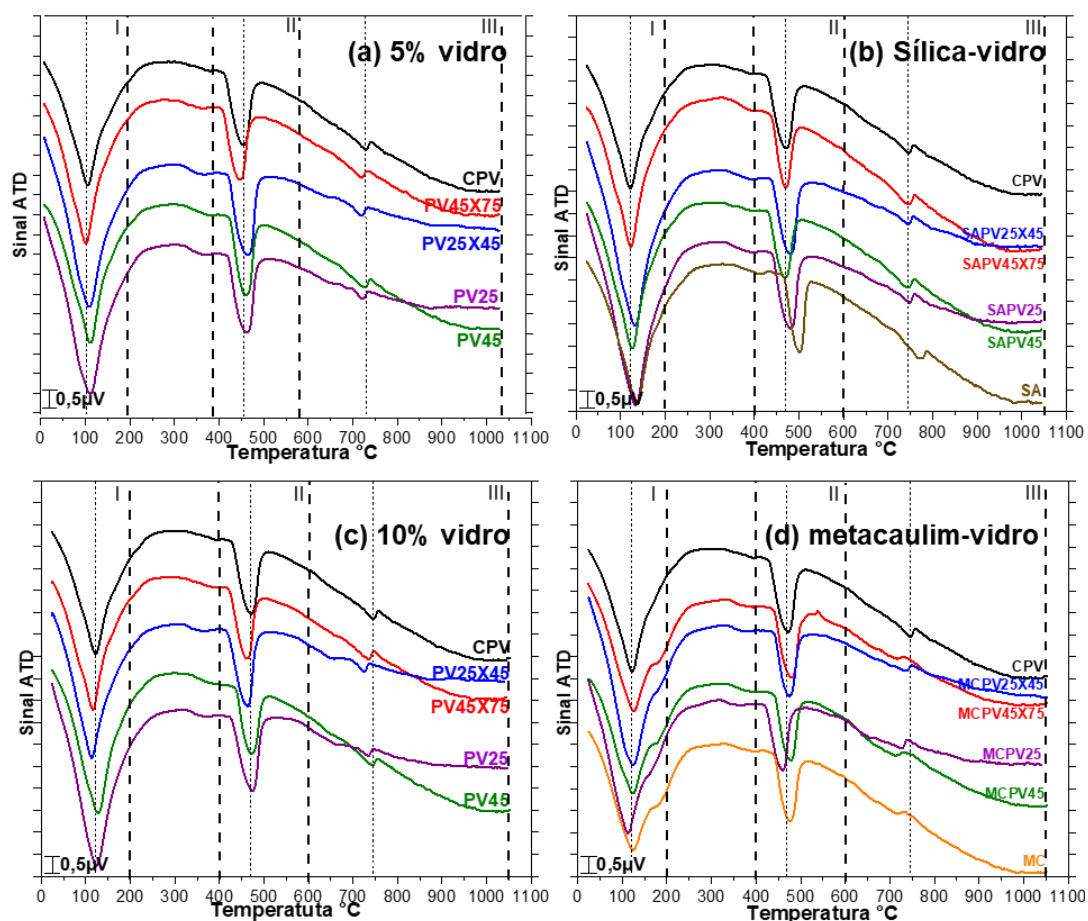
Figura 65 - Curvas TD após 7 dias, das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.



Fonte: O autor (2023).

O evento exotérmico referente a decomposição térmica da calcita é visível em todas as pastas. Em observação à figura 66, após 56 dias de cura as mesmas reações podem ser observadas, sendo visível um leve deslocamento à direita da pasta com sílica ativa, apresentando pico endotérmico próximo de 500°C, enquanto as demais se aproximam de 450°C. Comportamento similar pode ser observado nas pastas analisada por Chhaiba *et al.* (2018).

Figura 66 - Curvas TD após 56 dias, das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.



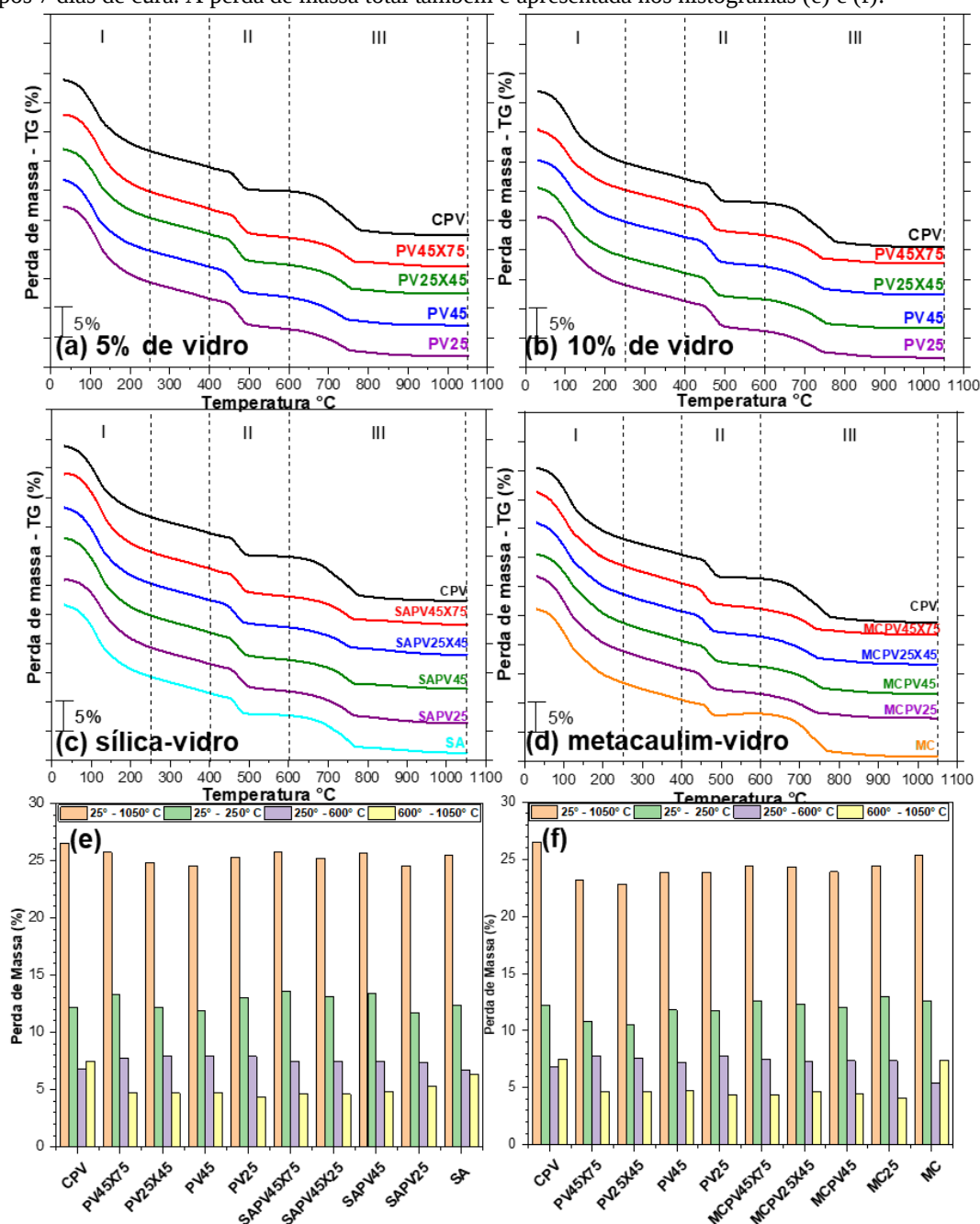
Fonte: O autor (2023).

4.4.2 Perda de massa e estimativa da concentração de portlandita

As figuras 67 e 68 apresentam as curvas termogravimétricas, as perdas de massa nas faixas de temperatura que contemplam a perda de massa total e os principais eventos térmicos das pastas unitárias das pastas unitárias (sílica, metacaulim, vidro) e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro, após 7 dias e 56 dias de cura respectivamente. Em ambas as figuras são destacados três faixas de temperaturas onde ocorrem os principais eventos térmicos, como se segue: 1 – dessorção, início da desidratação do silicato de cálcio hidratado e da etringita; 2 – decomposição térmica da portlandita; 3 – decomposição térmica da calcita. Conforme as figuras 67 (a) e 67 (c), as curvas

termogravimétricas das pastas com 5% e 10% de pó de vidro de diferentes granulometrias apresentaram desenvolvimento semelhante, após sete dias de cura. As pastas de referência e com metacaulim apresentaram comportamento distinto entre 450°C e 750°C, figuras 67 (b) e 67 (d) nesta mesma idade. Aos sete dias as pastas compostas por vidro em todas as faixas granulométricas apresentaram menor perda de massa de material carbonático, enquanto a pasta de referência apresentou maior perda, indicando maior quantidade desses materiais.

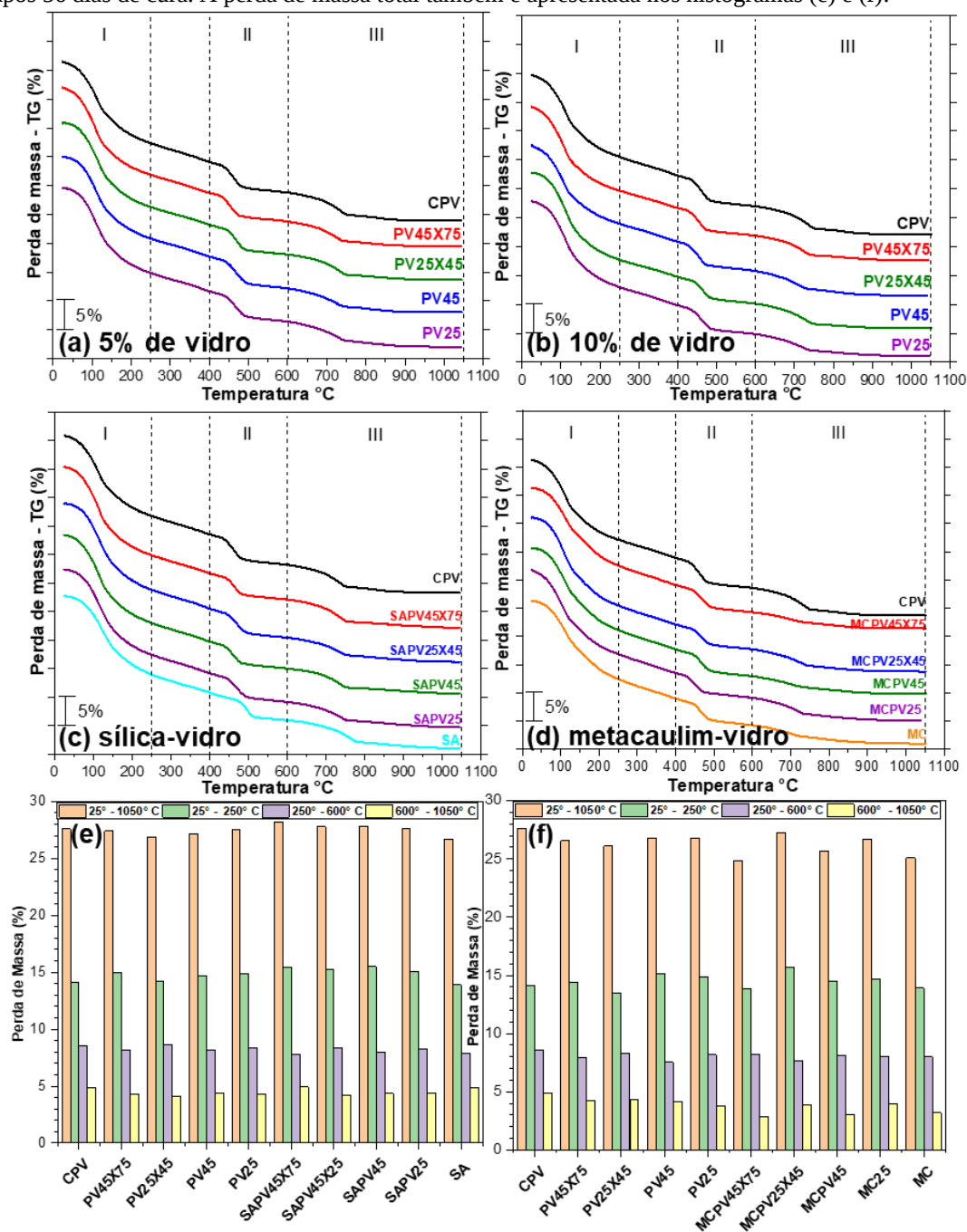
Figura 67 - Curvas termogravimétricas (TG) e respectivas perdas de massa durante as etapas de decomposição térmica (1: desorção da água, início da desidratação do C-S-H e da etringita; 2: decomposição térmica da portlandita; 3: decomposição térmica da calcita) das pastas unitárias (sílica, metacaulim, vidro) e binárias (sílica-vidro, metacaulim-vidro) após 7 dias de cura. A perda de massa total também é apresentada nos histogramas (e) e (f).



Fonte: O autor (2023).

De acordo com a figura 68, após 56 dias de cura as curvas termogravimétricas das pastas unitárias e binárias apresentaram se desenvolverem de modo semelhante. Não foi observado comportamento distinto nas pastas de referência e metacaulim sendo mais observado entre 450°C e 750°C.

Figura 68 - Curvas termogravimétricas (TG) e respectivas perdas de massa durante as etapas de decomposição térmica (1: dessorção da água, início da desidratação do C-S-H e da etringita; 2: decomposição térmica da portlandita; 3: decomposição térmica da calcita) das pastas unitárias (sílica, metacaulim, vidro) e binárias (sílica-vidro, metacaulim-vidro) após 56 dias de cura. A perda de massa total também é apresentada nos histogramas (e) e (f).

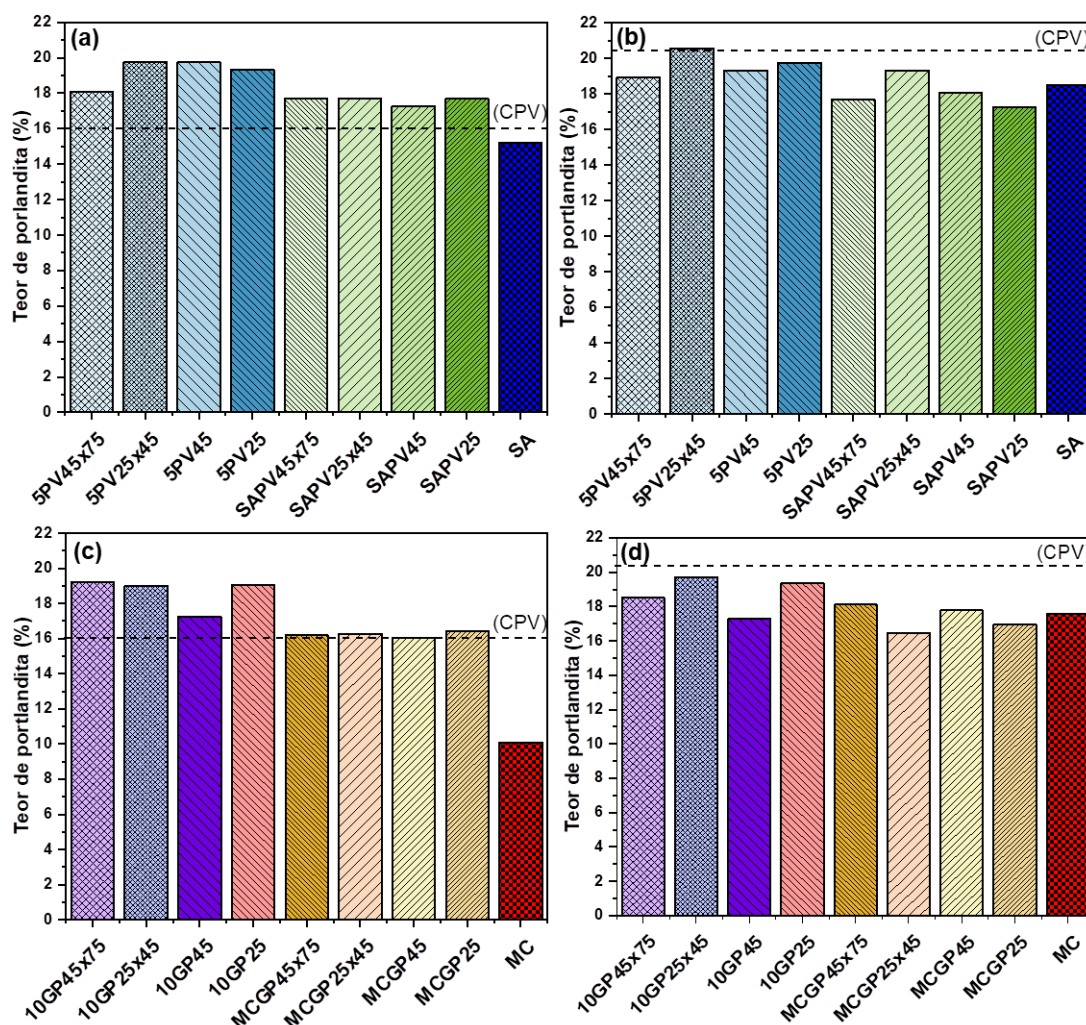


Fonte: O autor (2023).

Nota-se que após 56 dias as curvas TG de todas as pastas se apresentam mais uniformes indicando maior maturação dessas matrizes cimentícias. Analisando a perda de massa total observa-se que após 56 dias ocorre uma maior perda para todas as pastas analisadas, indicando uma matriz cimentícia mais hidratada e consequentemente com uma maior quantidade de produtos hidratados, quando comparadas as amostras após 7 dias. É possível destacar que em todas as pastas ocorrem os três principais eventos térmicos de perda de massa, ocorrendo primeiramente até 250°C a perda de água adsorvida, início da desidratação do silicato de cálcio hidratado e da etringita, tais eventos também foram observados nas pastas estudadas por Kabay *et al.* (2021). O segundo evento é caracterizado pela decomposição térmica da portlandita entre 420°C e 550°C. A pasta ternária analisada por Astoveza *et al.* (2022), apresentou decomposição térmica da portlandita entre 400°C e 500°C. O terceiro evento térmico é a decomposição térmica da calcita iniciando em 600°C. Em observação à perda de massa na primeira faixa em todos os lotes são observadas pequenas variações após 7 dias, ocorrendo um leve aumento da perda após 56 dias, sendo esperado por conta da maturação das pastas. Na segunda faixa de temperatura, que abarca principalmente a decomposição térmica do Ca(OH)_2 parecem estar em patamares próximos de perda aos 7 dias, com um leve crescimento da perda de massa após 56 dias, resultado esperado devido ao amadurecimento das pastas. Esse aumento da perda de massa também foi observado nos trabalhos. A perda de massa na faixa entre 600°C e 1050°C corresponde a descarbonatação da calcita. Esse resultado vai de encontro com os percentuais de materiais carbonáticos indicados na tabela 3.

O teor de portlandita das pastas com vidro e sílica e vidro e metacaulim após 7 dias e 56 dias de cura obtidos através de termogravimetria (TG), está apresentado na figura 69. Analisando as pastas com 5% e 10% de pó de vidro em ambas as idades, o teor de portlandita foi próximo de variou entre 18,5% e 20%, enquanto o teor da pasta de referência nesta idade foi de 16% e 20,5%. O teor de portlandita nas pastas com 5% e 10% de vidro após 7 dias é superior à referência, devida a baixa absorção de água das partículas de vidro, contribuindo para uma maior hidratação do sistema, contribuindo para um maior teor de portlandita, figuras 69 (a) e 69 (b). A pasta analisada por Du e Tan (2014) com 30% de pó de vidro, após 7 dias, apresentou 16% de Ca(OH)_2 . A pasta com 25% de pó de vidro analisada por Bignosi (2015) apresentou 13% de portlandita após 60 dias. Já Zheng (2016) encontrou teores de Ca(OH)_2 21% e 22% em pastas com 30% de pó de vidro após 7 e 60 dias. O teor de portlandita das pastas de referência estudadas por Mirzahosseini e Riding (2015) após 7 dias e Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016), após 28 dias foi respectivamente 19% e 17%.

Figura 69 - Teor de portlandita das pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.



Fonte: O autor (2023).

Em observação as pastas binárias com sílica e pó de vidro é notável um leve crescimento aumento do teor de portlandita das pastas com 56 dias em comparação com as pastas com 7 dias. Isso ocorre por conta da maior maturidade das pastas em idades mais avançadas, resultando maiores teores de produtos hidratados. Aos 7 dias as pastas sílica-vidro apresentaram teor de Ca(OH)_2 em patamares próximos, aproximadamente 11% superior a pasta de referência e 18% superior a pasta apenas com sílica, indicando uma contribuição das partículas de vidro nas composições binárias. Não fica evidente a contribuição do tamanho da partícula de vidro na pozolanicidade da mistura binárias nesta idade. A pasta SA apresentou o menor teor de portlandita aos 7 dias, próximo de 15%, indicando a maior pozolanicidade da sílica ativa. Este resultado é similar ao da pasta com 5% de sílica ativa após 7 dias utilizada por Radlinski e Olek (2012), que apresentou teor de portlandita próxima de 14,5%.

Após 56 dias observa-se uma tendência de redução do teor de Ca(OH)_2 das pastas sílica-vidro constituídas por vidros mais finos. Os menores teores de portlandita foram encontrados nas pastas SAPV25 e SAPV45 respectivamente igual a 17,3% e 18,1%, sendo 15,8% e 12,1% inferior ao teor de Ca(OH)_2 da referência e ao mesmo tempo, 6% e 1,6% menor que a pasta apenas com sílica. Esses resultados estão próximos dos encontrados por Sousa e Rêgo (2021), ao qual o teor de portlandita das pastas com 2,5% de nano sílica foi aproximadamente 18% inferior à referência. O teor de portlandita da pasta com 5% de sílica analisada por Tang *et al.* (2022), após 28 dias foi de 21%.

Para as pastas binárias metacaulim-vidro, figuras 69 (c) e 69 (d), observa-se que o teor de portlandita permaneceu em patamar próximo de 16%, assim a referência, enquanto a pastas apenas com metacaulim após sete dias foi próximo de 10%, sendo inconclusivo a contribuição do tamanho da partícula de vidro nesta idade e indicando a contribuição das partículas de vidro para hidratação das pastas. Resultado similar foi obtido por Wild e Khatib (1996) ao qual a pasta analisada com 10% de metacaulim apresentou teor de Ca(OH)_2 próximo de 11,5%. Já o teor de portlandita da pasta estudadas por Moser *et al.* (2010) com 8% de metacaulim após sete dias foi de 6%. Após 56 dias a pasta MCPV25 apresentou o menor teor de portlandita 17% inferior que a referência e 5% inferior a pasta apenas com metacaulim. O teor de portlandita das pastas binárias MCPV25 e MCPV25X45 ficaram no mesmo patamar que a pasta apenas com metacaulim, indicando a contribuição do vidro para a pozolanicidade. já as pastas MCPV45X75 apresentaram teor de Ca(OH)_2 5% inferior que a referência. Resultados similares foram apresentados por Afshinnia e Rangaraju (2015), que analisou o teor de portlandita de diversas pastas binárias, entre elas uma pasta com 80% de cimento Portland, 10% de pó de vidro e 10% de metacaulim com teor de portlandita próximo de 8,5% após 56 dias. Ainda no mesmo estudo os autores apresentaram o teor de portlandita de uma pasta com 20% de pó de vidro e outra com 20% de metacaulim após 56 dias, aproximadamente de 11% e 7% respectivamente. Esses resultados corroboram a contribuição das partículas de vidro para a hidratação da matriz.

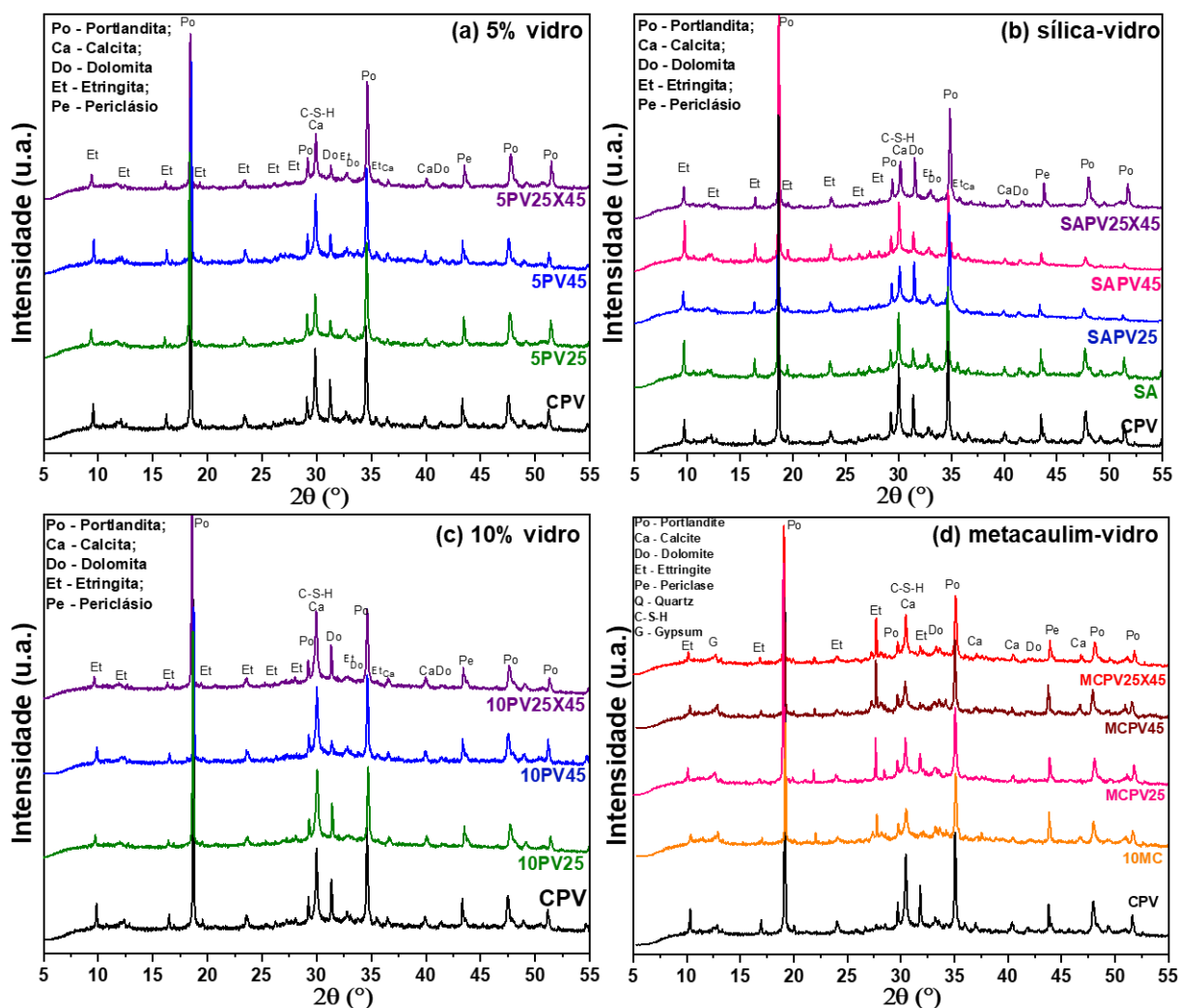
4.5 COMPOSIÇÃO E MICROESTRUTURA DAS PASTAS

4.5.1 Identificação das fases cimentícias

A figura 70 apresenta os difratogramas de raios-X das pastas unitárias constituídas por vidro, sílica e metacaulim, e binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro. Não é possível observar presença de halo amorfo oriundos do pó de vidro. Os picos de etringitas são os mais recorrentes, ocorrendo o primeiro na posição $2\theta = 9,9^\circ$. Os picos de calcita e dolomita estão presentes em $2^\circ =$

39,8°. Os picos de portlandita são recorrentes em todas as pastas em $2\theta = 18^\circ, 34^\circ, 47,5^\circ$ e 51° . Os picos de C-S-H também são observados em todas as pastas na posição $2\theta = 29,6^\circ$. O difratograma das pastas estudadas por Mendes *et al.* (2011), também apresentou pico de etringita na posição $2\theta = 9,9$ e C-S-H em $2\theta = 29,6$.

Figura 70 - Difratogramas de raios-X para as pastas cimentícias contendo adições unitárias de sílica, metacaulim e vidro e adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.

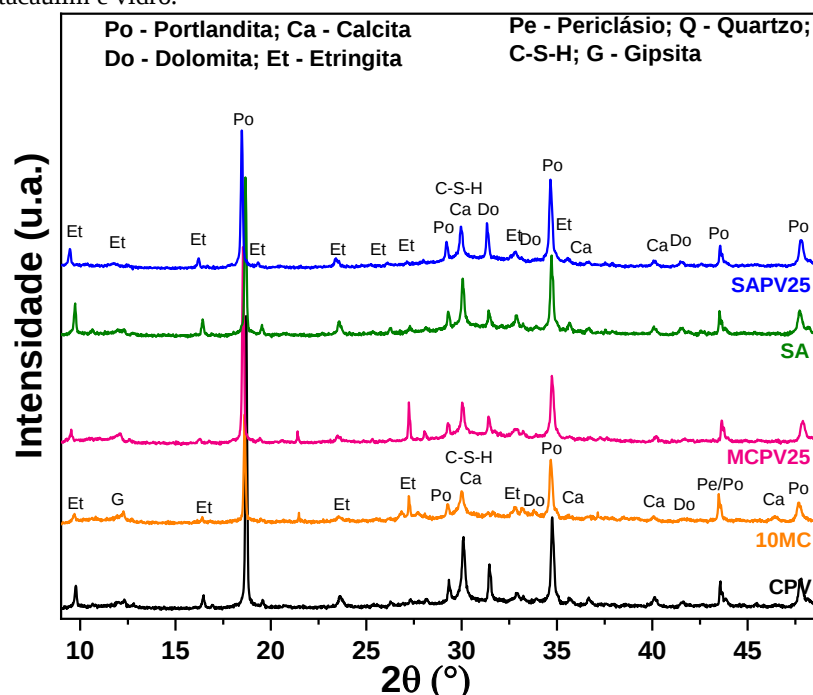


Fonte: O autor (2023).

As pastas cimentícias apresentaram as mesmas fases cristalinas, há uma leve redução das intensidades nas pastas contendo SCMs quando comparadas com a pasta de referência. As fases de portlandita se destacam como produtos da hidratação, ocorrendo em $2\theta = 18^\circ, 28,8^\circ, 34^\circ, 47^\circ$ e $52,7^\circ$. Picos de etringita foram os mais frequentes, sendo os de maior intensidade presentes em $2\theta = 9,9^\circ$ e $15,8^\circ$. É notável menor intensidade nas fases da portlandita, principalmente em $2\theta = 52,7^\circ$ das pastas de pastas 5GP45, 5GP25, SFGP45, SFGP25 e SA em comparação com a referência. Ocorrências similares foram observadas nos trabalhos de Du e Tan (2014) e Kamali e

Ghahremaninezhad (2016), sendo explicadas por Vaitkevičius, Šerelis e Hilbig (2014), pela razão da reação pozolânica da sílica ativa e do pó de vidro consumirem a portlandita. Os autores ainda explicam que o pó de vidro pode aumentar a solubilidade das fases do clinker, resultando na aceleração do processo de hidratação, podendo explicar a redução das intensidades destas fases.

Figura 71 – Parte central dos difratogramas de raios-X para as pastas cimentícias contendo adições unitárias e binárias com sílica, metacaulim e vidro.



Fonte: O autor (2023).

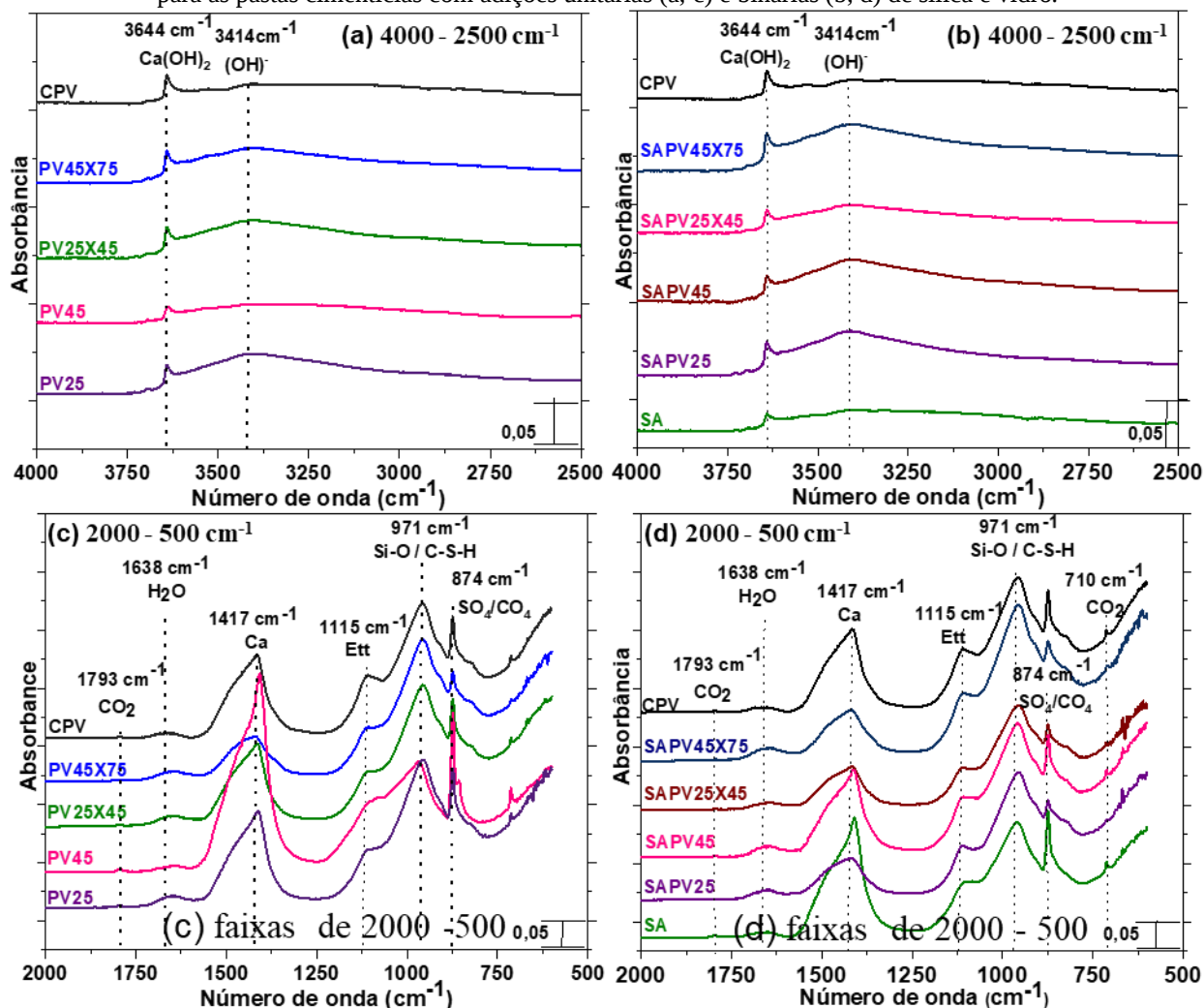
A figura 71 apresenta os difratogramas das pastas de referência, SA, SAPV25, MC e MCPV25. Observa-se que a adição de vidro nas misturas binárias não ocasionou alterações nas fases cristalinas de suas respectivas misturas unitárias, apenas leves variações nas intensidades de alguns picos. As pastas SA e SAPV25 apresentam as mesmas fases cristalinas presentes na pasta de referência, enquanto as pastas MC e MCPV25 apresentam diferentemente das demais o pico de gipsita próximo de $2\theta = 12,5^\circ$ e um pico de etringita próximo de $2\theta = 27,5^\circ$.

4.5.2 Fases cimentícias: uma análise localizada

Estão presentes na figura 72 os espectros na faixa do IV médio e distante para as pastas unitárias e binárias de vidro e sílica, nas faixas $4000\text{ cm}^{-1} - 2500\text{ cm}^{-1}$ e $2000\text{ cm}^{-1} - 500\text{ cm}^{-1}$. Em observação a figura 72 (a), não há diferenças notáveis entre as intensidades da banda relativa a portlandita em 3644 cm^{-1} , das pastas com 5% de vidro. A banda relativa à portlandita em 3644 cm^{-1} , são relatadas nos trabalhos de Stepkowska *et al.* (2005) e Andrade *et al.* (2019). Em observação a figura 72 (b), nota-se um ligeiro aumento da intensidade da banda de absorção de portlandita da

pasta SAPV25 em relação a pasta apenas com sílica.

Figura 72 – Espectros de IV por refletância total atenuada (ATR) nas faixas do IV médio (a, b) e IV distante (c, d) para as pastas cimentícias com adições unitárias (a, c) e binárias (b, d) de sílica e vidro.



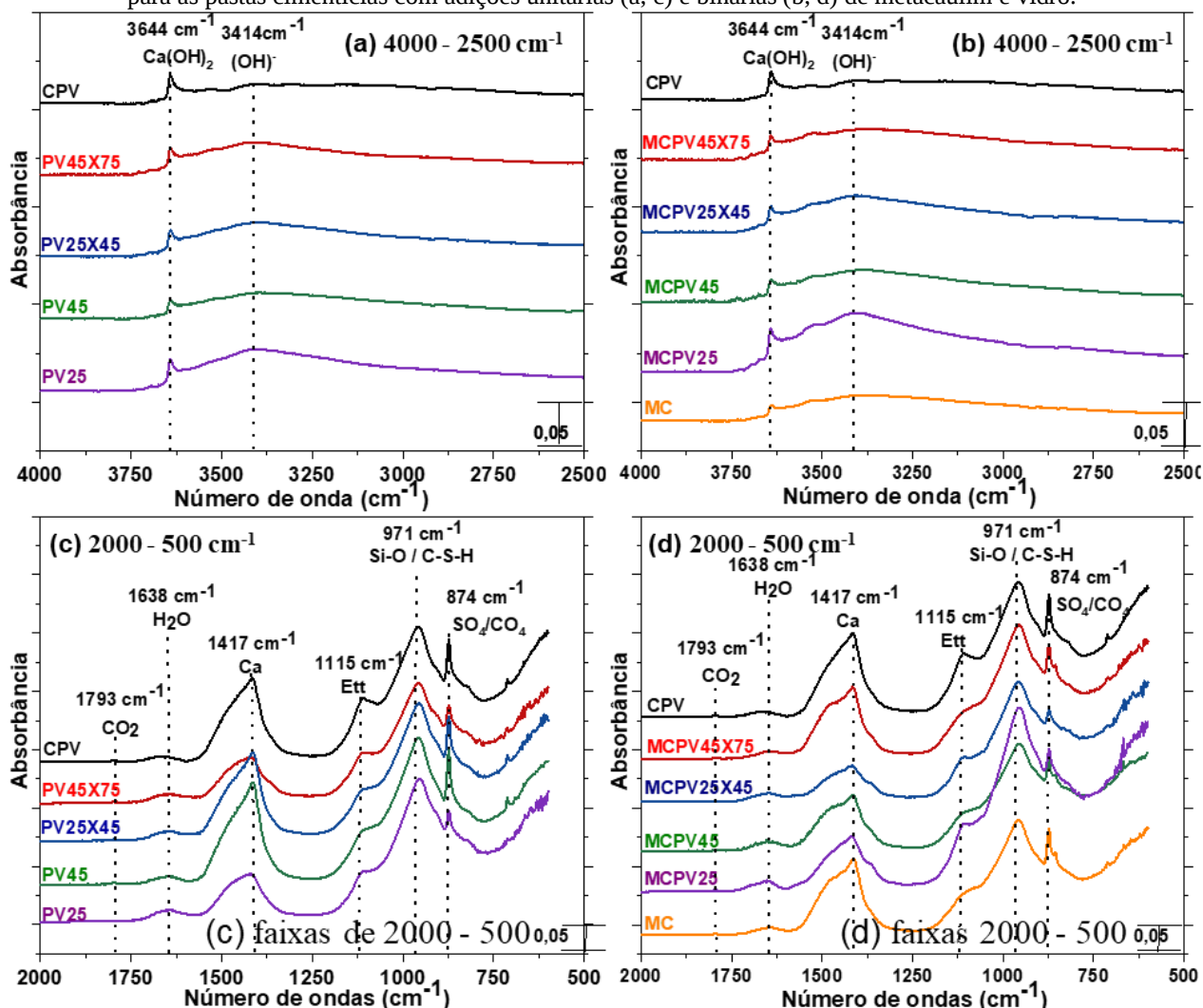
Fonte: O autor (2023).

Nas figuras 72 (c) e 72 (d), que abrange a faixa entre 2000 cm⁻¹ e 500 cm⁻¹, em ambos os grupos das pastas unitárias e binárias são encontrados os picos do CO₂ em 1793 cm⁻¹, H₂O em 1638 cm⁻¹ e do Si pertencente ao C-S-H em 971 cm⁻¹. É notável a maior intensidade da pasta PV25 em 1422 cm⁻¹, figura 72 (c), e das pastas SAPV45 e SA, figura 72 (d). O trabalho de Stepkowska *et al.* (2005) aponta uma banda de Ca, em 1427cm⁻¹ oriunda do C-S-H. O pico em 1115cm⁻¹ é relativo à etringita, conforme Astoveza *et al.* (2022).

A figura 73 apresenta os espectros na faixa do IV médio e distante para as pastas unitárias e binárias de vidro e metacaulim, nas faixas 4000 – 2500 cm⁻¹ e 2000 – 500 cm⁻¹. Pode-se observar a intensidade no pico da banda relativa a portlandita em 3644 cm⁻¹ da pasta MCPV25 ligeiramente superior as demais amostras, conforme figura 73 (b). Os trabalhos de Pan *et al.* (2016), Kledyński *et al.* (2017), Andrade *et al.* (2019) e Astoveza *et al.* (2022), indicam a banda do Si em

970 cm^{-1} presentes no C-S-H.

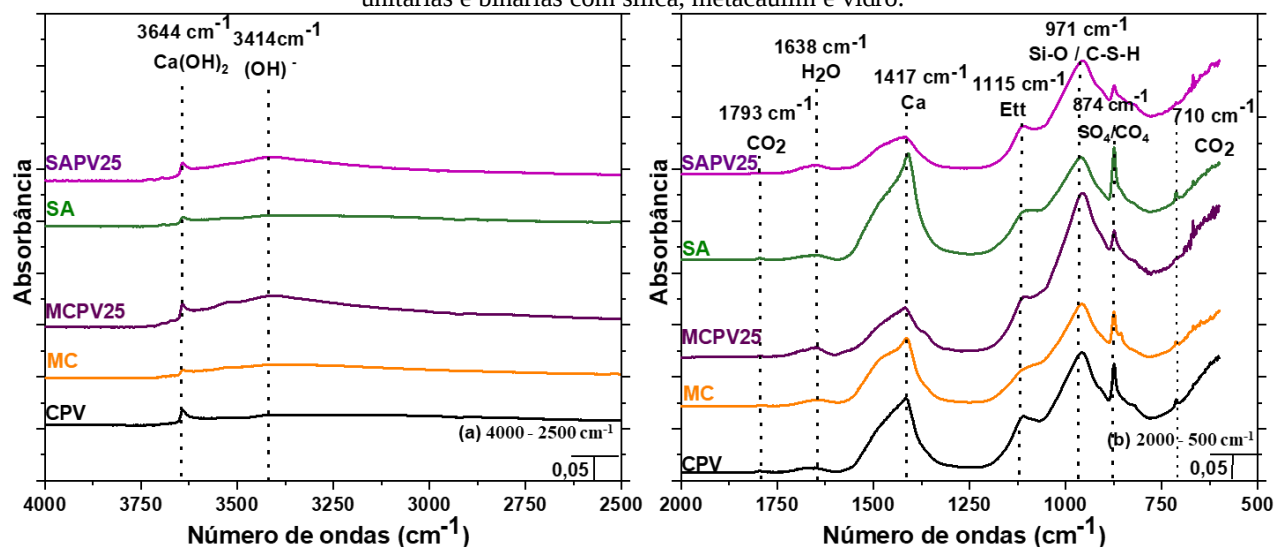
Figura 73 – Espectros de IV por refletância total atenuada (ATR) nas faixas do IV médio (a, b) e IV distante (c, d) para as pastas cimentícias com adições unitárias (a, c) e binárias (b, d) de metacaulim e vidro.



Fonte: O autor (2023).

Estão presentes na figura 74 os espectros nas faixas do IV médio e distante nas faixas 4000 cm^{-1} – 2500 cm^{-1} e 2000 cm^{-1} – 500 cm^{-1} , para as pastas unitárias e binárias com vidro, metacaulim e vidro. De modo geral observa-se a ocorrência das bandas em todas as pastas analisadas nas faixas do IV médio e distante. Há uma tendência na redução da banda relativa a portlandita em 3644 cm^{-1} com a utilização do vidro mais fino na faixa do IV médio. Ainda na faixa do IV médio, observa-se maior intensidade no pico relativo à água livre em 3414 cm^{-1} nas pastas binárias que contém vidros mais finos, estando relacionado com uma maior disponibilidade de água para hidratação, devido à baixa absorção de água das partículas de vidro. Já no IV mais distante há uma tendência de crescimento do pico relativo ao C-S-H na banda 971 cm^{-1} nas pastas que utilizam vidro mais fino.

Figura 74 – Espectros conjuntos ATR-IV nas faixas do IV médio (a), e IV distante (b), para as pastas com adições unitárias e binárias com sílica, metacaulim e vidro.



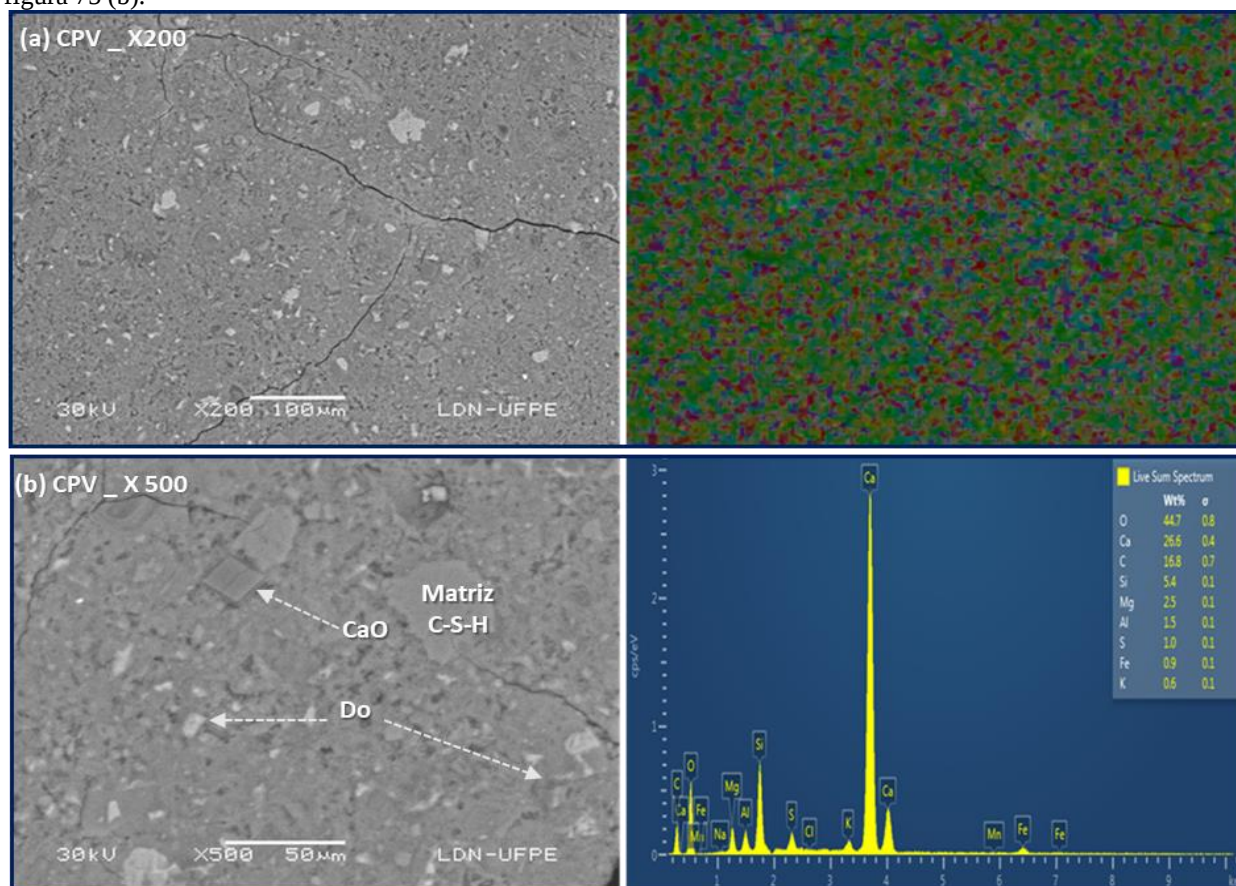
Fonte: O autor (2023).

4.5.3 Análise microestrutural

A figura 75 apresenta a micrografia eletrônica da pasta de referência após 56 dias de cura. A figura 75 (a) apresenta uma parcela da matriz cimentícia consolidada, não sendo visível aglomerações de materiais anidros, conforme o mapa geral. A figura 75 (b) em maior ampliação observa-se dolomitos e uma matriz de C-S-H bem definida, corroborado pelo sinal de Mg e elevada relação Ca/Si conforme o espectro EDS. Análises mais detalhadas das matrizes cimentícias dos outros lotes de amostras serão apresentadas nas micrografias posteriores.

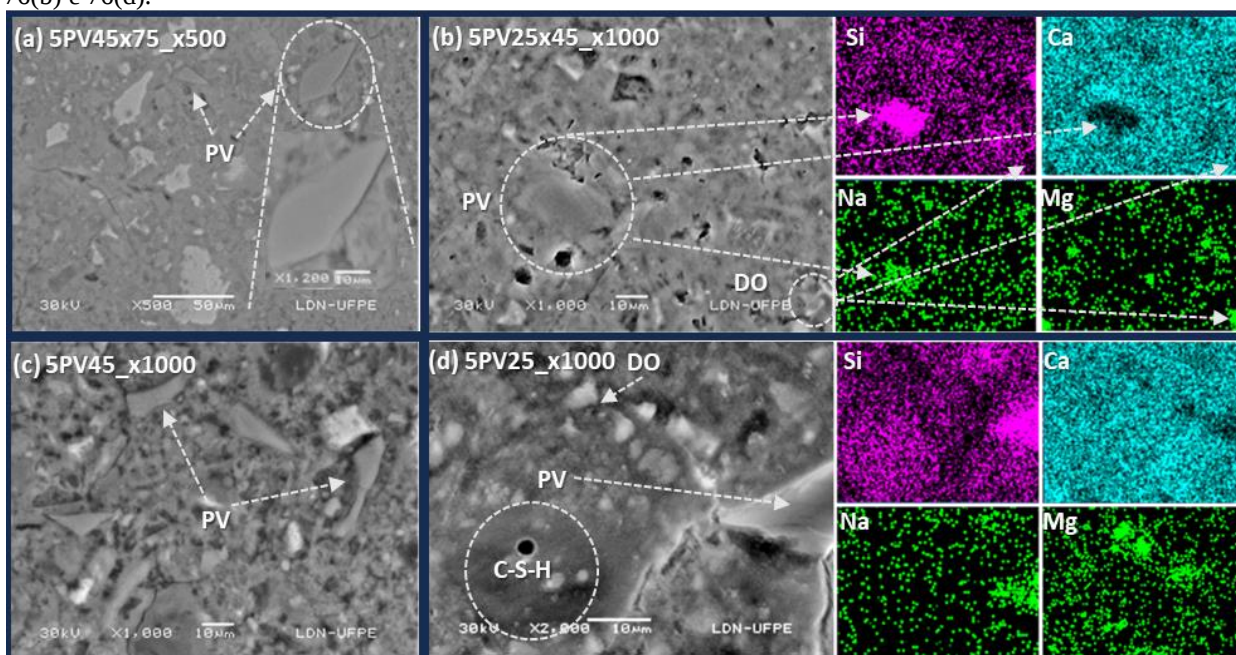
As figuras 76 e 77 exibem as micrografias das pastas unitárias com 5% e 10% de pó de vidro em substituição à massa de cimento, após 56 dias de cura. As figuras 76 (a) e 77 (a) exibem micrografias das pastas produzidas com 5% e 10% de PV45x75 em substituição à massa de cimento. É possível verificar a presença de partículas angulares de vidro com arestas e vértices preservados, indicando a não ocorrência de reação pozolânica nesses fragmentos. Grãos anidros de cimento são apresentados na figura 77 (b).

Figura 75 - Micrografia eletrônica obtida a partir de elétrons secundários, mapa geral e espectros EDS da pasta de referência após 56 dias de cura. O mapa geral EDS é referente à figura 75 (a) e os espectros EDS são referentes à figura 75 (b).



Fonte: O autor (2023).

Figura 76 - Micrografias eletrônicas obtidas a partir de elétrons secundários e sinal EDS dos elementos Si, Ca, Na e Mg das pastas unitárias constituídas com 5% de vidro após 56 dias de cura. Os mapas EDS são referentes às figuras 76(b) e 76(d).

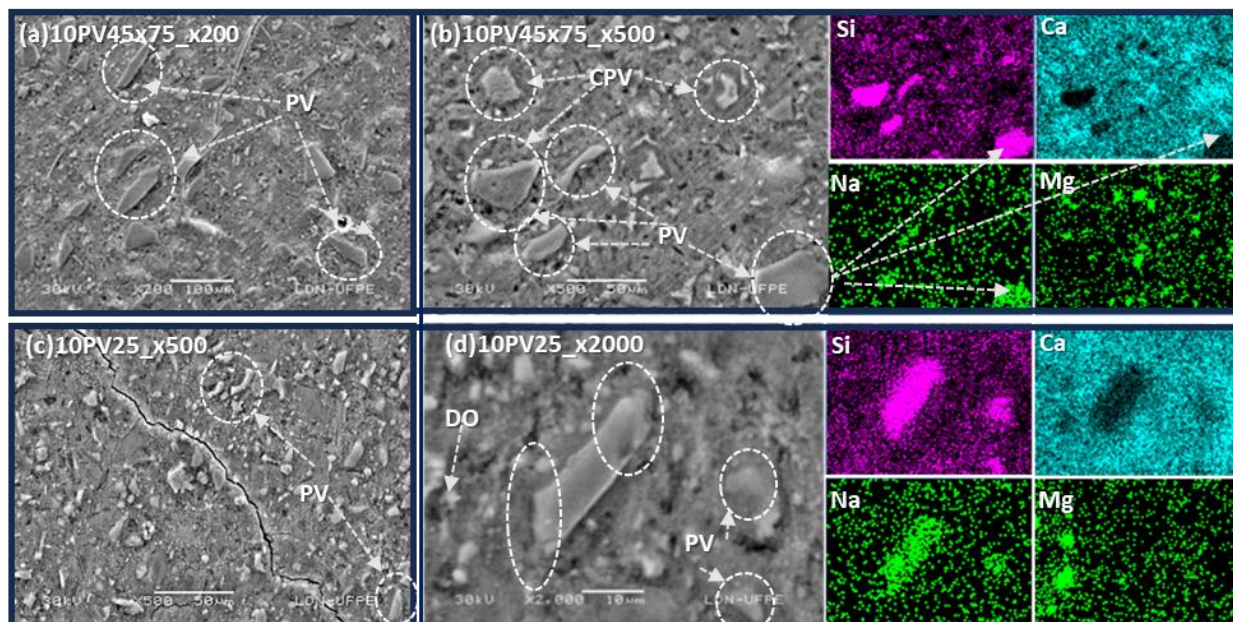


Fonte: O autor (2023).

Uma porção da superfície da pasta produzida com 5% de PV 25x45 está apresentada na figura 76 (b). A existência da partícula de vidro em destaque é ratificada através da concentração de Si e Na e da presença de nimbo de baixa concentração de cálcio, dos pontos destacados. O formato da partícula com ausência de angularidades indica o processo de pozolanicidade. A presença do dolomito é ratificada pela concentração de Mg e baixa concentração de Ca e Si nos locais destacados. A figura 76 (c) apresenta a superfície da pasta produzida com 5% de vidro PV45. É possível evidenciar duas partículas de vidro com arestas arredondadas e formato mais delgado, resultante da reação pozolânica.

As micrografias da superfície das pastas composta por 5% e 10% de pó de vidro PV25 estão presentes nas figuras 76 (d), 77 (c) e 77 (d). Observa-se na figura 76 (d) uma matriz de C-S-H límpida e coesa, ratificada pela concentração de Ca e Si observada na mesma região do mapa do EDS. A concomitante concentração de Si e Na e existência de nimbo de baixa concentração de cálcio indicam a presença da partícula de vidro. Em observação as figuras 76 (d) e 77 (d) é possível observar várias partículas de vidro estão passando por um processo de pozolanicidade na parte inferior, existindo descontinuidades na aresta inferior e existindo uma interface com C-S-H pozolânico.

Figura 77 - Micrografias eletrônicas obtidas a partir de elétrons secundários e sinal EDS dos elementos Si, Ca, Na e Mg das pastas unitárias constituídas com 10% de vidro após 56 dias de cura. Os mapas EDS são referentes às figuras 77(b) e 77(d).

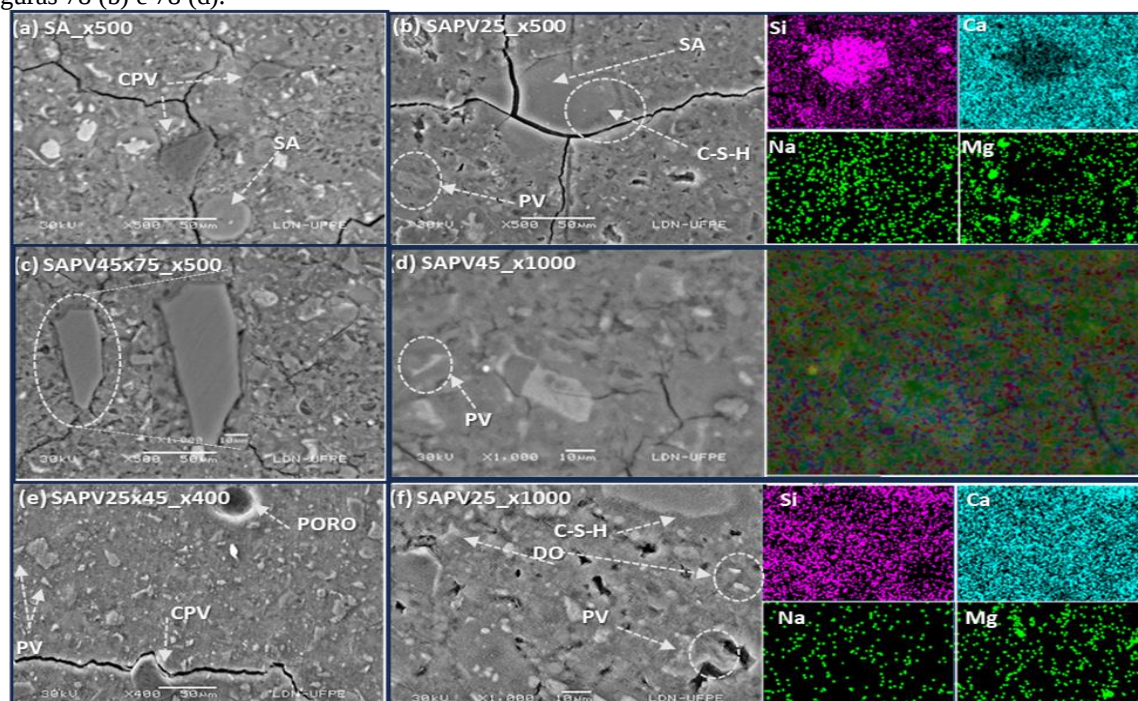


Fonte: O autor (2023).

A figura 78 (a) apresenta uma parte da superfície da pasta com sílica. É possível destacar a presença de dois grãos anidros de cimento e um nódulo de sílica aglomerada, além de uma textura

mais grosseira em comparação as pastas apenas com vidro. Tais aspectos podem ser atribuídos ao fato da pasta composta por 5% de sílica apresentar elevada consistência e viscosidade devido a elevada área superficial específica das partículas, reduzindo a quantidade de água para mistura, resultando em materiais não hidratados. Também foi possível observar nódulos de sílica na pasta com 20% de cinza volante e 10% de sílica ativa estudada por Nochaiya *et al.* (2010). A micrografia da pasta binária SAPV25 com ampliação de 500X está presente na figura 78 (b). Nota-se a existência de um nódulo de sílica aglomerada, ocorrendo reação pozolânica nas bordas. A existência dessa aglomeração é justificada pela concentração do Si e existência de nimbo de baixa concentração de Ca. Também é possível observar a existência de uma partícula de vidro com aproximadamente 25 μm de diâmetro, em processo de redução devido à reação pozolânica. A figura 78 (c) apresenta a micrografia de uma porção da superfície da pasta SAPV45x75, destacando-se uma partícula de vidro com diâmetro aproximado de 80 μm . É notável que o fragmento se encontra com as arestas preservadas e com as quinas angulares, indicando a baixa reatividade. A micrografia da pasta SAPV25 está presente na figura 78 (d). É possível observar um fragmento residual de vidro após reação pozolânica, sendo comprovado pelo nimbo de baixa concentração de Si e Na. Também é possível observar a presença de dolomito. Destaca-se a formação de uma matriz cimentícia nítida com a presença de C-S-H nas bordas.

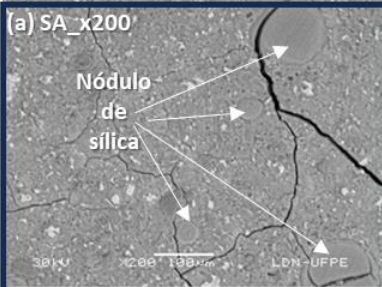
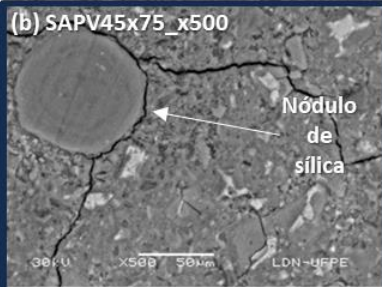
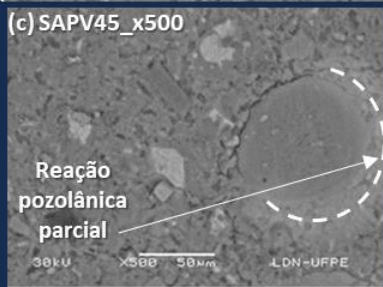
Figura 78 - Micrografias eletrônicas obtidas a partir de elétrons secundários e sinal EDS dos elementos Si, Ca, Na e Mg da pasta unitária constituída por sílica e binárias sílica-vidro, após 56 dias de cura. Os mapas EDS são referentes às figuras 78 (b) e 78 (d).



Fonte: O autor (2023).

É de conhecimento que a pozolanicidade recebe influência do tamanho da partícula, conforme relatado por Shi *et al.* (2005), Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012), Carsana, Frassoni e Bertolini (2014), Mirzahosseini e Riding (2015), Zheng (2016) e, Kamali e Ghahremaninezhad (2016). A dinâmica da reação pozolânica ocorrida nas partículas de vidro foram semelhantes aos registros presentes nas micrografias nos trabalhos de Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011), Zheng *et al.* (2016), Du e Tan (2014), conforme figura 22. Observa-se que o vidro pode contribuir para uma melhor hidratação da matriz cimentícia, seja apenas pelo fato da baixa absorção de água ou pela concomitância da pozolanicidade das partículas mais finas e a baixa absorção de água. No caso das misturas binárias o vidro contribui para uma melhor hidratação reduzindo a formação de nódulos não-hidratados de sílica. Em suas conclusões, Omran *et al.* (2017) afirmaram que a utilização de pó de vidro como material cimentício suplementar resulta numa densa borda de gel C-S-H no contorno das partículas vidro densificando a matriz cimentícia.

Figura 79 - Micrografias eletrônicas de pastas binárias sílica-vidro destacando a interface de nódulos de sílica e matriz e respectivas perda de condutividade e relações entre óxidos alcalinos dos materiais cimentícios no estado anidro.

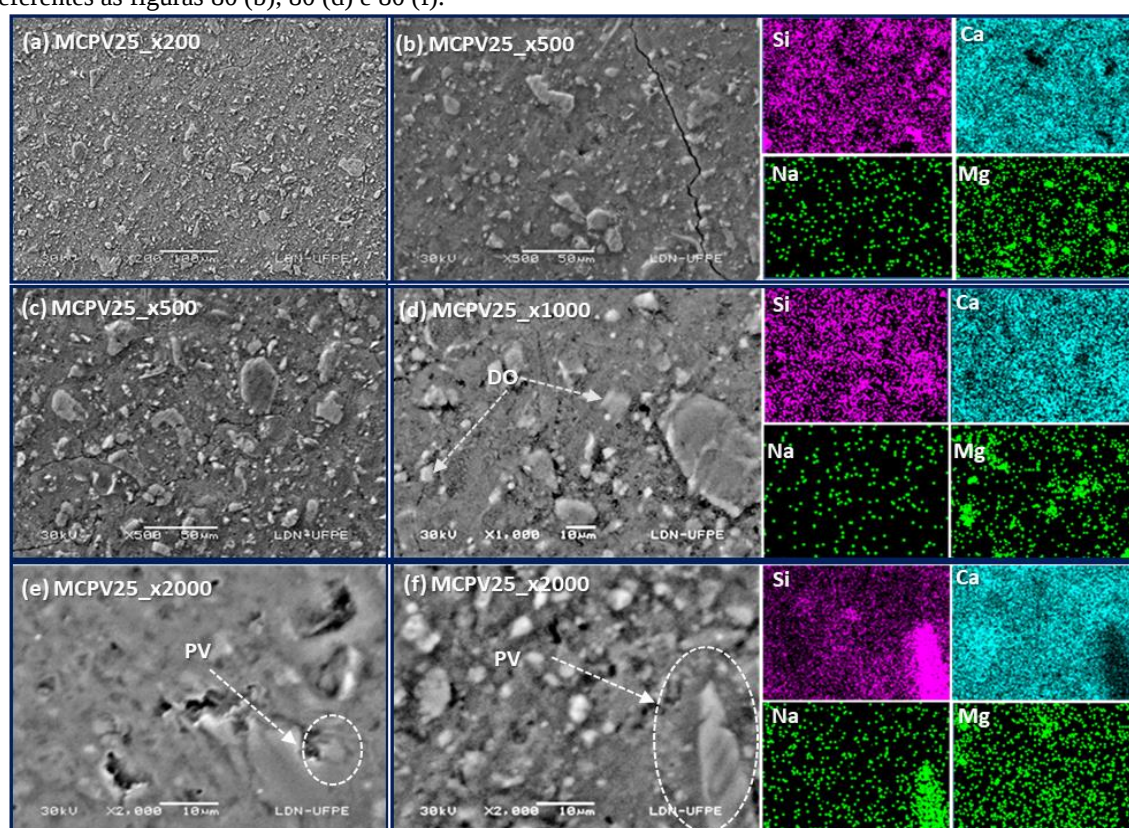
					
PCE (%)	97	PCE (%)	121	PCE (%)	124
Na ₂ O / SiO ₂	0,008	Na ₂ O / SiO ₂	0,013	Na ₂ O / SiO ₂	0,012
K ₂ O / SiO ₂	0,006	K ₂ O / SiO ₂	0,006	K ₂ O / SiO ₂	0,006
CaO / SiO ₂	0,01	CaO / SiO ₂	0,018	CaO / SiO ₂	0,018
*PCE – Perda de condutividade após 600 s		Na ₂ O _[SAPv45x75] / Na ₂ O _[SA]	1,53	Na ₂ O _[SAPv45] / Na ₂ O _[SA]	1,51
		CaO _[SAPv45x75] / CaO _[SA]	1,60	CaO _[SAPv45] / CaO _[SA]	1,40

Fonte: O autor (2023).

A figura 79 apresenta as micrografias das pastas SA, SAPV45x75 e SAPV45, a perda de condutividade, observar a seção do potencial de pozolanicidade, e as respectivas relações entre os óxidos dos respectivos materiais cimentícios suplementares no estado anidro, obtidos por

fluorescência de raios-X. A figura 79 (a) apresenta uma parte da superfície da pasta SA, se destaca a presença de vários nódulos de aglomerados de sílica ativa. A figura 79 (b) apresenta parcialmente a superfície da pasta SAPV45x75, destacando-se um nódulo de aglomerados de sílica. Em ambas as micrografias, é notável que os nódulos não apresentam sinais de reações pozolânicas. É possível observar na figura 79 (c) além da presença de uma matriz cimentícia mais coesa, a presença de um nódulo de sílica com uma aureola oriunda de reação pozolânica. A maior perda de condutividade da adição binária, aproximadamente 27% superior a perda obtida pela sílica, indica que esse sistema binário é mais reativo. A adição do vidro aumentou em 50% a relação $\text{Na}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ e em 80% a relação CaO/SiO_2 da adição binária SAPV45 em relação à sílica ativa. O aumento da relação $\text{Na}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ e CaO/SiO_2 tem correlação direta com o aumento da perda de condutividade e aumento da reatividade da sílica. Como é de conhecimento a pasta fresca tem PH próximo de 12, auxiliando na dissolução das partículas de vidro, rico em óxidos alcalinos, que por sua vez podem aumentar a alcalinidade do meio contribuindo para a dispersão das partículas de sílica, tornando o material mais reativo. Esse efeito é mais visível na presença de partículas mais finas de vidro uma vez que são mais solúveis, podendo explicar a ausência de reação pozolânica no nódulo de sílica presente na figura 79 (b).

Figura 80 – Micrografias eletrônicas obtidas a partir de elétrons secundários e sinal EDS dos elementos Si, Ca, Na e Mg da pasta unitária constituída por metacaulim e binárias metacaulim-vidro, após 56 dias de cura. Os mapas EDS são referentes às figuras 80 (b), 80 (d) e 80 (f).



Fonte: O autor (2023).

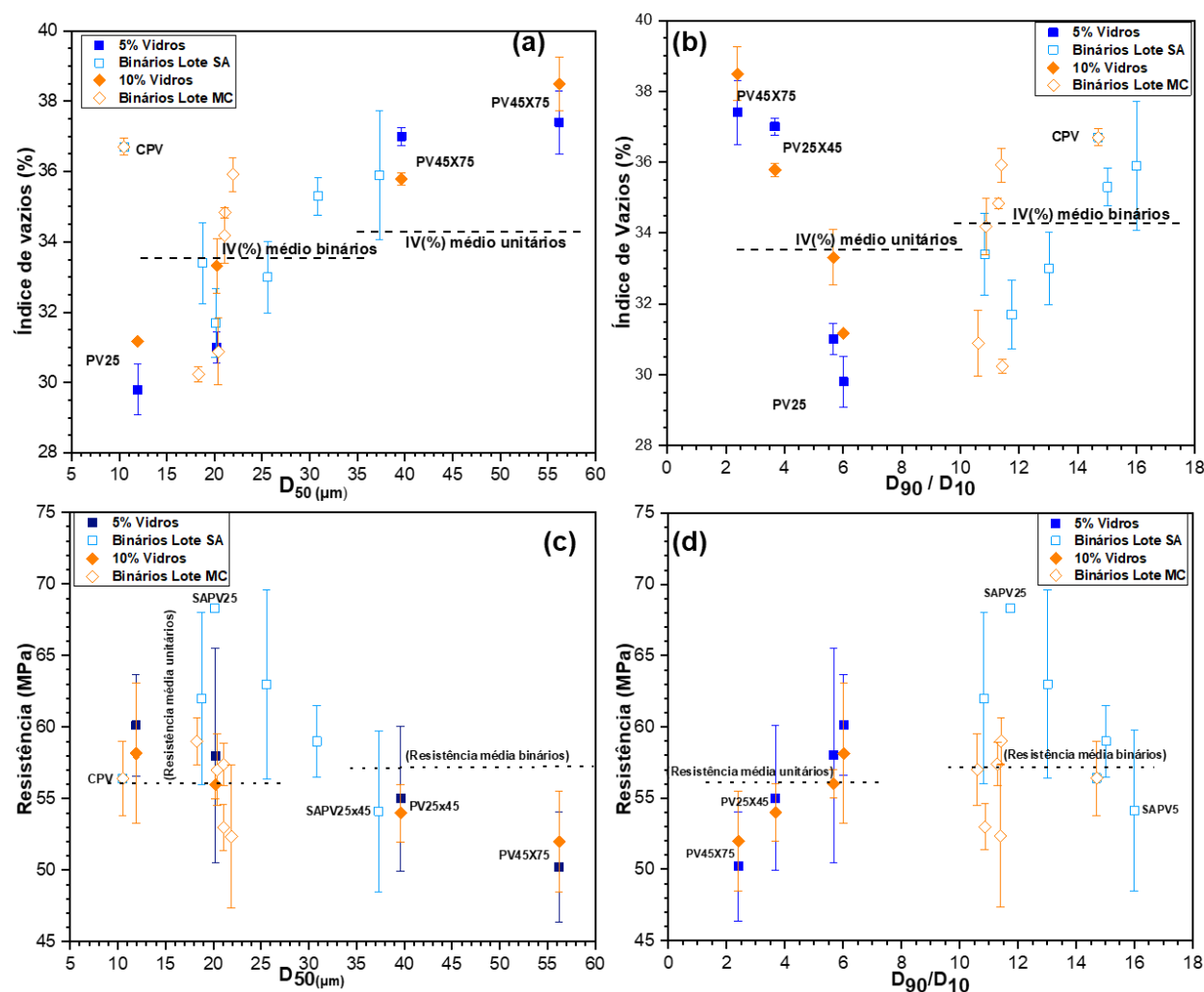
As micrografias eletrônicas da pasta binária MCPV25 estão presentes na figura 80. A figura 80 (a) apresenta uma visão geral da pasta MCPV25 sendo observado uma superfície homogênea e coesa. Esse aspecto também é notado na figura 80 (c). O mapa EDS das figuras 80 (b) e 80 (d) indicam uma dissolução homogênea do Si, Ca e Na, na matriz cimentícia, destacando-se o sinal de dolomito. Em ambas as imagens não foi possível visualizar partículas de vidro. Se destaca na figura 80 (e) uma partícula de vidro em estágio avançado de dissolução devido a reação pozolânica, sendo ratificado pela ausência de angularidades e arestas descontínuas. É possível destacar na figura 80 (f) uma partícula de vidro em processo de reação pozolânica. A presença de uma zona de dissolução devido a reação pozolânica nas bordas da partícula, e a concentração de Si e Na e da presença de nimbo de baixa concentração de cálcio, na posição da partícula de vidro, indicam a reação pozolânica.

4.6 RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MICROESTRUTURAIS

4.6.1 Efeito do tamanho de partícula no índice de vazios e na resistência à compressão

A figura 81 apresenta a variação da resistência e do índice de vazios em função da heterogeneidade de distribuição e do diâmetro característico, das pastas unitárias e binárias de vidro e sílica e vidro e metacaulim, após 56 dias. Em observação a figura 81 (a), correlação entre índice de vazios e D_{50} confirma-se a tendência de redução dos vazios quando se utiliza partículas mais finas. É notável a segregação das pastas unitárias e binárias de vidro e sílica e vidro e metacaulim nas figuras 81 (b) e 81 (d) em função da heterogeneidade de distribuição. As pastas unitárias apresentam variação do D_{90}/D_{10} entre 2 e 6, enquanto as pastas binárias entre 10 e 16. Em relação a correlação entre índice de vazios e a heterogeneidade, figura 81 (b), observa-se uma tendência em que as pastas com menor heterogeneidade apresentam maior índice de vazios.

Figura 81 – Variação do índice de vazios e da resistência à compressão (56 dias) em função do diâmetro característico (D_{50}) e da heterogeneidade de distribuição (D_{90}/D_{10}).



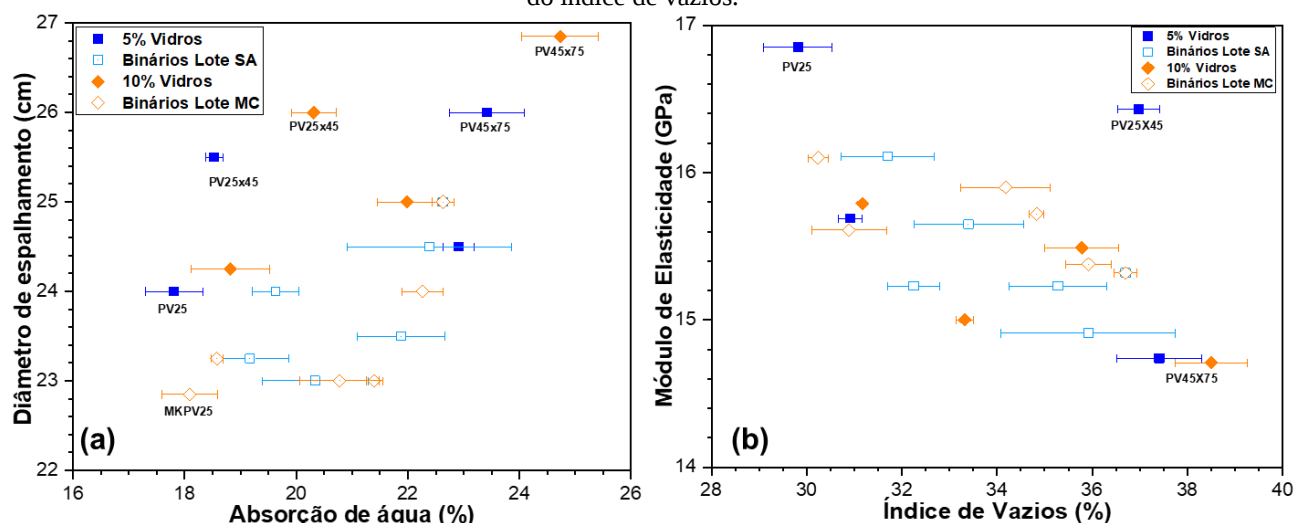
Fonte: O autor (2023).

Em observação da correlação entre resistência e o diâmetro característico D_{50} , figura 81 (c), nota-se que as pastas mais que apresentam partículas mais finas se apresentam como as mais resistentes.

4.6.2 Efeito da absorção de água no diâmetro de espalhamento e módulo de elasticidade

A figura 82 apresenta o efeito entre diâmetro de espalhamento e absorção de água, figura 82 (a) e do módulo de elasticidade e índice de vazios, figura 82 (b). Observa-se uma tendência de aumento do diâmetro de espalhamento com o aumento da absorção de água, figura 82 (a). Na figura 82 (b) há uma tendência de redução do módulo de elasticidade com o aumento do índice de vazios.

Figura 82 – Variação do diâmetro de espalhamento e do módulo de elasticidade em função da absorção de água e do índice de vazios.

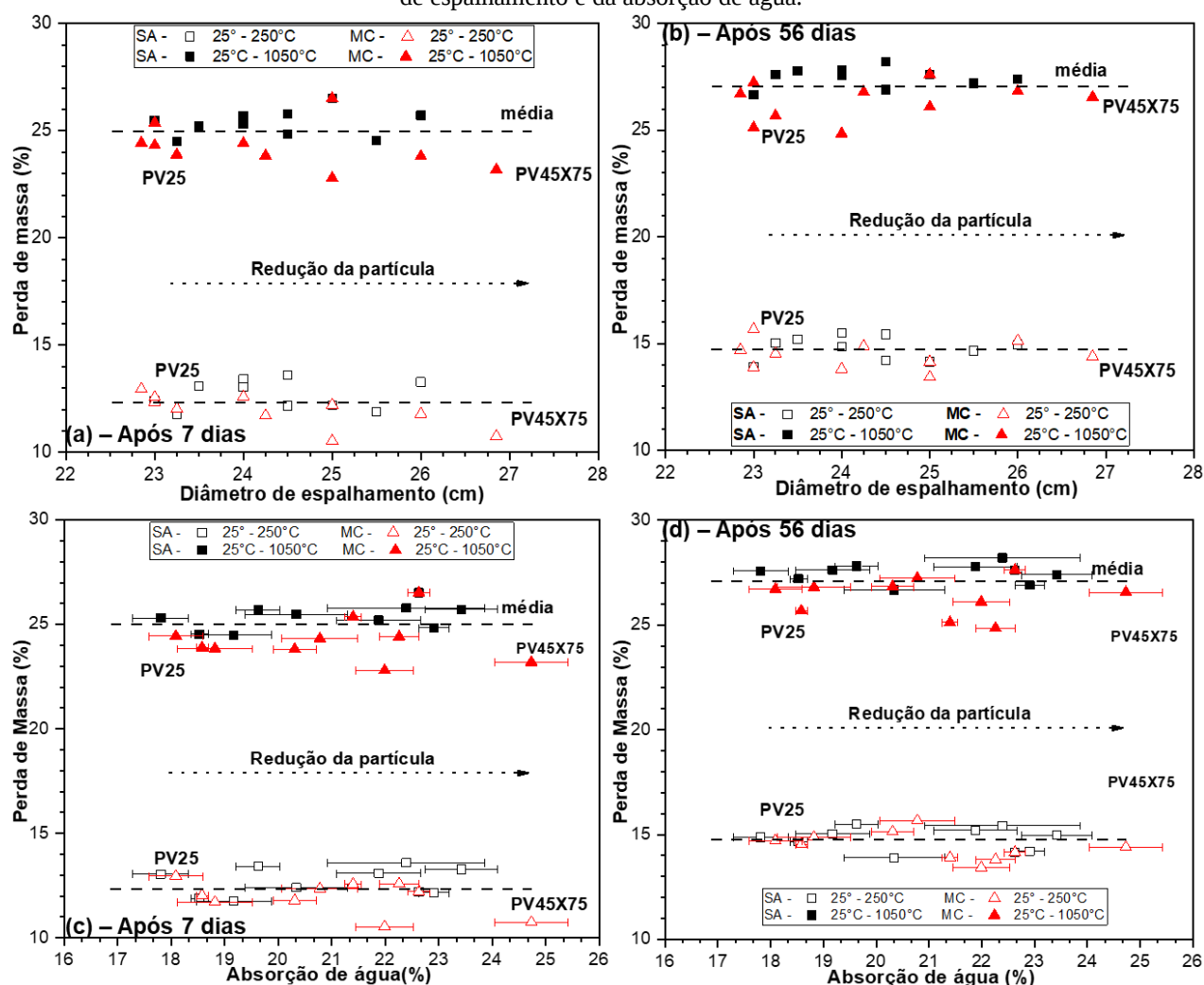


Fonte: O autor (2023).

4.6.3 Relações entre diâmetro de espalhamento, absorção de água e perda de massa

A figura 83 apresenta a correlação entre perda de massa parcial e diâmetro de espalhamento e perda de massa e absorção de água das pastas formadas por vidro e sílica e vidro e metacaulim, após sete e 56 dias de cura. Em análise das figuras 83 (a) e 83 (b) observa-se que as perdas de massa estão próximas da linha que representa a média do grupo. Também se destaca o aumento da perda de massa aos 56 dias, indicando a maturação dos produtos da hidratação na idade mais avançada. Não fica evidente uma correlação direta entre perda de massa e diâmetro de espalhamento.

Figura 83 – Variação da perda de massa parcial (25°C – 250°C) e total (250°C – 1050°C), em função do diâmetro de espalhamento e da absorção de água.



Fonte: O autor (2023).

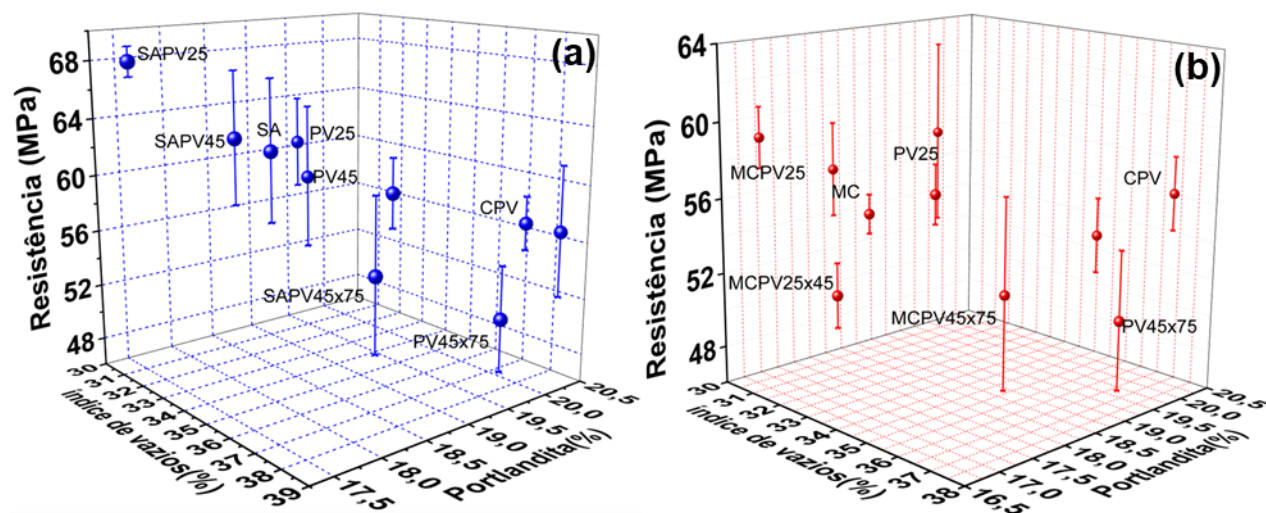
Nas figuras 83 (c) e 83 (d), é possível observar que as pastas PV45X75 apresentam maior absorção, porém apresentam perda de massa inferior à média de todas as pastas, indicando a não existência de correlação entre essas variáveis.

4.6.4 Correlação da resistência à compressão com o índice de vazios e a concentração de portlandita

A figura 84 apresenta a correlação entre a resistência à compressão, índice de vazios e teor de portlandita das pastas unitárias com 5% e 10% de vidro e das pastas sílica-vidro e metacaulim vidro. Em análise geral é observada o efeito pozolânico das partículas de vidro nas pastas com 5% e 10% de vidro em comparação com a pasta de referência, uma vez que existe a tendência do aumento da resistência à compressão e a redução conjunta do índice de vazios com o teor de portlandita. É evidente que essa tendência é mais observada nas pastas com partículas mais finas

de vidros.

Figura 84 – Correlação entre resistência, índice de vazios e teor de portlandita. Figura 84 (a) lote sílica-vidro, figura 84 (b) lote metacaulim-vidro.



Fonte: O autor (2023).

Analisando as pastas com adições binárias observa-se uma maior eficiência das pastas com adições binárias sílica-vidro. De todo modo em ambos os lotes se nota uma clara dependência da resistência à compressão com a diminuição do índice de vazios e do teor de portlandita. Essa análise confirma o efeito pozolânico de todas as adições isoladamente e de suas respectivas composições binárias.

5 CONCLUSÃO

Após realização das análises no estado anidro, fresco e endurecido das adições unitárias de vidro, sílica e metacaulim e das adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro, e da mesma forma das pastas cimentícias constituídas por essas adições, as seguintes conclusões foram assuntadas:

- (1). O método do equivalente alcalino para dosagem de materiais cimentícios suplementares binários, se apresenta como um método eficiente e seguro para o controle do teor de álcalis das adições, podendo ser classificado como uma técnica para formulação de adições binárias de baixo álcalis. Essa pesquisa mostrou através das misturas binárias, que baixos teores de pó de vidro são suficientes para proporcionar contribuições positivas para as misturas cimentícias, uma vez que apenas 6% e 9% de pó de vidro compuseram as adições binárias sílica-vidro e metacaulim-vidro.
- (2). A investigação realizada utilizando 4 faixas de tamanho de partícula proporcionou entendimento assertivo de como o vidro pode influenciar nas características do estado anidro, fresco e endurecido dos compósito cimentício, confirmando que as partículas mais grossas contribuem mais para a plasticidade enquanto as partículas mais finas contribuem mais a pozolanicidade.
- (3). Os estudos realizados no estado fresco levam a conclusão de que a característica de baixa absorção de água das partículas de vidro são transmitidas para as misturas binárias. Também é possível concluir que o tamanho da partícula influencia na plasticidade e consistência das pastas. O estudo da consistência através da penetração da haste do aparelho de Vicat, aponta a contribuição do vidro para redução da consistência das pastas binárias.
- (4). O ensaio de calorimetria semi-adiabática mostrou que a utilização do pó de vidro contribui para o retardo do início e fim de pega e para o aumento do pico de temperatura no processo de hidratação das pastas com vidro quando comparadas as pastas com sílica e metacaulim. Isso corrobora com a afirmação que as partículas de vidro absorvem pouca água, deixando mais água livre para o sistema, e consequentemente provocando o retardo do endurecimento.
- (5). A análise da plasticidade também ratificou que as partículas de vidro contribuem para uma maior disponibilidade de água para a mistura cimentícia, recebendo influência direta do tamanho da partícula, contribuindo para o aumento da plasticidade e redução da consistência e da viscosidade. Essas contribuições do vidro também são presentes nas pastas com adições binárias, mesmo em teores menores de pó de vidro.

- (6). O estudo da cinética da hidratação ratificou a contribuição positiva do pó de vidro no processo de hidratação das pastas, por conta da maior quantidade de água disponível para as reações de hidratação, recebendo influência do teor de vidro utilizado e do tamanho da partícula. O acompanhamento da hidratação mostra a concomitante contribuição positiva das partículas de vidro, uma vez que elas podem contribuir para um melhor processo de hidratação e para a reação pozolânica. O processo de hidratação mais eficiente nas pastas binárias com partículas de vidro mais finas ratifica essa contribuição concomitante.
- (7). A concomitante contribuição benéfica do pó de vidro para a hidratação das pastas, também foi confirmada através dos índices físicos, redução da absorção de água e do índice de vazios. Uma vez que uma matriz melhor hidratada resulta numa maior quantidade de produtos hidratados e conseqüentemente menor porosidade e absorção de água. Esse efeito ocorre com menor intensidade com a massa específica, uma vez que o balanço da massa dos produtos hidratados oriundos de reações pozolânicas tem valores muito semelhantes aos da hidratação natural da pasta cimentícia.
- (8). A análise do potencial de pozolanicidade dos materiais cimentícios suplementares unitários e binários, submetidos ao ensaio de condutividade elétrica, leva a conclusão que a adição do vidro contribui positivamente para o potencial de pozolanicidade das misturas binárias. As adições binárias praticamente apresentam as mesmas características químicas e pozolânicas das adições unitárias, mantendo a tendência da perda de condutividade, existindo uma tendência de redução do potencial de pozolanicidade quando se utilizada partículas mais grossas.
- (9). Os ensaios de índices de atividade pozolânica com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e com o cimento ratificaram o potencial de pozolanicidade das misturas binárias, deixando mais evidente a influência do tamanho da partícula de vidro, uma vez que as partículas mais grossas tendem a não permanecerem em condição pozolânica. A dinâmica específica do ensaio com o hidróxido de cálcio, de caráter químico-mecânico, corrobora para o entendimento da estabilidade química das misturas binárias. As misturas binárias metacaulim-vidro não apresentaram grandes variações da resistência à compressão, devido ao fato do metacaulim e suas respectivas misturas binárias apresentarem componentes pozolânicos mais diversificados que a sílica ativa, constituída predominantemente por SiO_2 . A atividade pozolânica com o cimento indicou uma tendência relacionada a influência do tamanho da partícula de vidro, uma vez que partículas mais grossas são menos reativas e resultando em menor interação química com hidróxido de cálcio para geração de C-S-H, sendo mais visível que as misturas que possuem vidros mais finos apresentassem resistência maiores.

- (10). Através da resistência à compressão foi possível concluir que as misturas binárias sílica vidro foram mais eficientes que as metacaulim-vidro, recebendo bastante influência do tamanho da partícula. Além de todas as contribuições benéficas intrínsecas da partícula de vidro, as reações químicas que ocorrem dentro da pasta com sílica e vidro podem contribuir para a desaglomeração das partículas da sílica ativa. A alcalinidade da pasta do cimento e a elevada temperatura pode solubilizar partículas de vidro, podendo liberar íons alcalinos hidróxidos em contato com a água, aumentando a alcalinidade do meio. O aumento da alcalinidade pode gerar efeitos tensoativos, reduzindo a força de atração das partículas aglomeradas, resultando numa melhor dispersão da sílica na pasta, aumentando a reatividade da sílica. Esse efeito também recebe influência do tamanho da partícula de vidro.
- (11). O metacaulim é um material fino que dificilmente se encontra em estado de aglomeração, não tendo sua reatividade prejudicada por esses efeitos. Como foi constatado através das fluorescências de raios-X, as adições binárias metacaulim vidro apresentaram grande semelhança química devido a composição de cada material isolado, gerando pouca variação química dos compostos pozolânicos. Devido a essa semelhança química as resistências alcançaram índices próximos no estado endurecido.
- (12). A caracterização da decomposição térmica através da análise termodiferencial confirma que as pastas binárias apresentam os mesmos eventos endotérmicos e exotérmicos que seus respectivos pares unitários. A análise termogravimétrica confirma a contribuição do tamanho partículas de vidro para uma maior liberação de água para o sistema. O teor de portlandita das pastas após 56 dias corrobora para o entendimento que o pó de vidro contribui mais efetivamente do ponto de vista mecânico para a sílica ativa, auxiliando na desaglomeração das partículas, uma vez que as pastas binárias SAPV45 e SAPV25 apresentaram menor teor portlandita, indicando maior reatividade desses materiais cimentícios suplementares binários. De maneira similar ao ocorrido no ensaio de resistência à compressão, o teor de portlandita das pastas com metacaulim e metacaulim-vidro obtiveram patamares próximos, indicando que as adições binárias mantiveram as características pozolânicas do metacaulim.
- (13). As micrografias eletrônicas das pastas contendo pó de vidro e cimento comprovam que as partículas menores são mais reativas e consequentemente mais solúveis em meio alcalino concorrendo para uma maior dissolução pozolânica, contribuindo concomitantemente para a pozolanicidade e para o aumento da água para mistura e consequentemente uma matriz melhor hidratada. As partículas com dimensões próximas de 75µm praticamente não

reagem pozolanicamente, tendo maior contribuição para o aumento da água livre e hidratação do cimento.

- (14). As micrografias eletrônicas das pastas binárias sílica-vidro corroboram para o entendimento que as partículas de vidro contribuem para o aumento da alcalinidade do meio, resultando em efeitos tensoativos que contribuem para a dispersão da sílica ativa na pasta cimentícia, uma vez que houve uma redução da presença de conglomerados de sílica anidra, quando comparados a pasta apenas com sílica. Outro fato que concorre para este entendimento é a presença de reações pozolânicas nas bordas dos nódulos de sílica da pasta SAPV25, indicando dispersão e consequentemente aumento da reatividade.
- (15). As micrografias das pastas do lote metacaulim-vidro confirmam a contribuição das partículas de vidro para uma melhor hidratação da matriz cimentícia, uma vez que os mapas gerados pelo EDS apresentam os elementos mais bem distribuídos, indicando uma melhor dissolução e precipitação de produtos hidratados.
- (16). O efeito sinérgico entre as partículas de sílica e vidro concorre para o aumento do desempenho da sílica, sendo assim, a mistura binária sílica vidro, contribuiu para uma melhor hidratação da pasta e concomitantemente para a dispersão da sílica na matriz cimentícia, aumentando sua eficiência.
- (17). Não ficou evidente a contribuição do pó de vidro para o aumento da resistência do metacaulim nas misturas binárias. Entretanto, o fato das adições binárias metacaulim-vidro apresentarem características físico-químicas semelhantes ao metacaulim, e das pastas constituídas por elas apresentarem resistência em mesmo patamar, indica que a superior eficiência da mistura metacaulim-vidro em comparação com o metacaulim. Sendo assim a mistura binária metacaulim-vidro se apresenta como alternativa viável e sustentável uma vez que foi constituída de aproximadamente 9% de pó de vidro, gerando economia na utilização do metacaulim puro, fato relevante uma vez o metacaulim é a adição mais de maior valor de aquisição podendo custar até 5 vezes o valor do cimento.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seria de grande contribuição a investigação de maneiras de aumentar a eficiência da sílica ativa, através da combinação com outras adições em que a sinergia proporcionasse desaglomeração das partículas de sílica e consequente aumento sua eficiência, resultando numa utilização mais econômica.

É importante que investigações sejam realizadas entre as partículas de vidro com outros materiais cimentícios suplementares, utilizando as contribuições deste trabalho, buscando misturas mais eficientes através da sinergia dos materiais.

Uma vez que o método equivalente alcalino foi considerado eficiente e preciso, também seria de grande contribuição trabalhos que realizassem o preparo de pastas cimento-vidro em função do equivalente alcalino, investigando a quantidade de álcalis suficiente para contribuição positiva do pó de vidro para a hidratação da pasta cimentícia.

É importante que sejam realizadas investigações relacionadas à durabilidade de compósitos cimentícios constituídos por materiais cimentícios suplementares binários, sílica-vidro e metacaulim-vidro.

Investigações sobre pegada de carbono relacionadas a compósitos constituídos por adições binárias contendo adições diversas e vidro, iriam contribuir para um maior entendimento sobre questões de sustentabilidade relacionadas a utilização do vidro.

REFERÊNCIAS

- ABIVIDRO. **Guia: Reciclagem do Vidro**. 2019. Disponível em: <https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2019/01/Abividro-Guia-Reciclagem-do-Vidro.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2019.
- AFSHINNIA, Kaveh; RANGARAJU, Prasada Rao. Efficiency of ternary blends containing fine glass powder in mitigating alkali-silica reaction. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 100, p. 234-245, 2015.
- AITCIN, Pierre Claud. Supplementary cementitious materials and blended cements. In: AÏTCIN, Pierre-Claude; FLATT, Robert J. (ed.). **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Aïtcin Université de Sherbrooke: Woodhead Publishing, 2016. p. 53-73.
- ALEX, Josephin; DHANALAKSHMI, J.; AMBEDKAR, B. Experimental investigation on rice husk ash as cement replacement on concrete production. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 127, p. 353-362, 2016.
- ALIABDO, Ali A.; ELMOATY, Abd Elmoaty M.; ABOSHAMA, Ahmed Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 124, p. 866-877, 2016.
- ALI, Esraa Emam *et al.* Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 35, p. 785-791, 2012.
- AL-OTAIBI, Saud. Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 22, n. 10, p. 2059-2067, 2008.
- ANSARI, Nastaran; SEIFI, Abbas. A system dynamics model for analyzing energy consumption and CO2 emission in Iranian cement industry under various production and export scenarios. **Energy Policy**, [s.l.], v. 58, p. 75-89, 2013.
- APRIANTI S., E. A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production – a review part II. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 142, p. 4178-4194, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for evaluating early hydration of hydraulic cementitious mixtures using thermal measurements**. ASTM C1753 / C1753M-15e1. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1778 – 20: Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**. United States: ASTM, 2020. 11 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C0150_C0150M-19A: Standard Specification for Portland Cement**. United States: ASTM, 2019. 10 p.
- 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**, [s.l.], v. 198, p. 445-455, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 12 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b. 4 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577**: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a. 15 p.

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

ASTOVEZA, Jennifer *et al.* Iron-rich slag addition in ternary binders of Portland cement, aluminated cement and calcium sulfate. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 153, p. 106689, 2022.

BAGHERI, Ali Reza; ZANGANEH, Hamed; MOALEMI, Mohamad Mehdi. Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 34, n. 5, p.663-670, 2012.

BASTO, Priscilla Elisa de Azevedo. **Determinação da pozolanidade por condutividade elétrica do lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) para adição ao cimento portland**. 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

BIGNOZZI, M. *et al.* Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 55, p. 45-52, 2015.

BRANLUND, Joy M. *et al.* Thermal diffusivity of quartz to 1,000°C: effects of impurities and the α - β phase transition. **Physics and chemistry of minerals**, [s.l.], v. 34, n. 8, p. 581-595, 2007.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução Conama nº 307, de 05 de julho de 2002. **Estabelece Diretrizes, Critérios e procedimentos para a gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Brasília, 17 jul. 2002. n. 136, Seção 1, p. 95-96.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2012. 106 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos - SINIR. **Painel de Resíduos Sólidos Urbanos**: indicadores Brasil e regiões. Indicadores Brasil e Regiões. 2020. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2020. Disponível em: <https://sinir.gov.br/>. Acesso em: 10 set. 2020.

BAZHUNI, Marcelo Frota; KAMALI, Mahsa; GHahremaninezhad, Ali. An investigation into the properties of ternary and binary cement pastes containing glass powder. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, [s.l.], v. 13, n. 3, p. 741-750, 2018.

BYE, G. C. **Portland cement**: composition, production and properties. 2. ed. Londres: Thomas Telford, 1999. p. 163-197.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. A estrutura dos sólidos cristalinos. *In*: CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2018a. p. 46-94.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. Aplicações e Processamento das Cerâmicas. *In*: CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2018b. p. 467-497.

CAPMAS, Alain. Prólogo: Concreto e Desenvolvimento Sustentável. *In*: OLLIVIER, Jean-pierre; VICHOT, Angélique (Ed.). **Durabilidade do Concreto**: Bases Científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: Ibracon, 2014. p. 3-13. 1.

CARLES-GIBERGUES, A.; HORNAIN, H. A durabilidade do concreto frente às reações expansivas de origem endógena. *In*: OLLIVIER, Jean-pierre; VICHOT, Angélique. **Durabilidade do concreto**: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: Ibracon, 2014. p. 327-432.

CARSANA, Maddalena; FRASSONI, Massimiliano; BERTOLINI, Luca. Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials. **Cement and concrete composites**, [s.l.], v. 45, p. 39-45, 2014.

CASSAR, Josmar; CAMILLERI, Josette. Utilisation of imploded glass in structural concrete. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 29, p. 299-307, 2012.

CASTRO, Sara de; BRITO, Jorge de. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 41, p.7-14, 2013.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CICLOSOFT**: coleta seletiva pesquisa CEMPRE. São Paulo: CEMPRE, 2004.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CICLOSOFT**: coleta seletiva pesquisa CEMPRE. São Paulo: CEMPRE, 2006.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CICLOSOFT**: coleta seletiva pesquisa CEMPRE. São Paulo: CEMPRE, 2008.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CICLOSOFT**: coleta seletiva pesquisa CEMPRE. São Paulo: CEMPRE, 2010.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CICLOSOFT**: coleta seletiva pesquisa CEMPRE. São Paulo: CEMPRE, 2012.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CICLOSOFT**: coleta seletiva pesquisa CEMPRE. São Paulo: CEMPRE, 2014.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CICLOSOFT**: coleta seletiva pesquisa CEMPRE. São Paulo: CEMPRE, 2016.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CICLOSOFT**: coleta seletiva pesquisa CEMPRE. São Paulo: CEMPRE, 2018.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 133 janeiro/fevereiro**: preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2014.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 134 março/abril**: preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2014.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 136 julho/agosto**: preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2014.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 137 setembro/outubro**: preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2014.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 138 novembro/dezembro**: preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2014.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 139 janeiro/fevereiro**: preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2015.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 140 março/abril**: preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2015.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 141 maio/junho**: preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2015.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 142 julho/agosto**: preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2015.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 143 setembro/outubro**: preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2015.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 144**

novembro/dezembro: preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2015.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 145 janeiro/fevereiro:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2016.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 146 março/abril:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2016.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 147 maio/junho:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2016.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 148 julho/agosto:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2016.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 149 setembro/outubro:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2016.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 150 novembro/dezembro:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2016.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 151 janeiro/fevereiro:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2017.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 152 março/abril:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2017.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 153 maio/junho:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2017.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 154 julho/agosto:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2017.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE informa número 157:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2018.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2019.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE Mercado:** preço do material reciclável. São Paulo: CEMPRE, 2020.

CORDEIRO, Guilherme C.; KURTIS, Kimberly E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 97, p. 41-49, 2017.

CHEN, C. H. *et al.* Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 36, n. 3, p. 449-456, 2006.

CHEN, Guohua *et al.* Glass recycling in cement production - an innovative approach. **Waste Management**, [s.l.], v. 22, n. 7, p. 747-753, 2002.

CHHAIBA, S. *et al.* Characterization and hydration of cements and pastes obtained from raw mix containing Moroccan oil shale and coal waste as a raw material. **Construction and**

Building Materials, [s.l.], v. 189, p. 539-549, 2018.

DAVE, Niragi *et al.* Green quaternary concrete composites: Characterization and evaluation of the mechanical properties. **Structural Concrete**, [s.l.], v. 19, n. 5, p. 1280-1289, 2018.

DU, Hongjian; TAN, Kiang Hwee. Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali–silica reaction and mitigation methods. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 35, n. 1, p. 118-126, 2013.

DU, Hongjian; TAN, Kiang Hwee. Waste Glass Powder as Cement Replacement in Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, [s.l.], v. 12, n. 11, p. 468-477, 2014.

DU, Hongjian; TAN, Kiang Hwee. Transport Properties of Concrete with Glass Powder as Supplementary Cementitious Material. **Aci Materials Journal**, [s.l.], v. 112, n. 3, p. 429-437, 2015.

DU, Hongjian; TAN, Kiang Hwee. Properties of high volume glass powder concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 75, p. 22-29, 2017.

DYER, Thomas D.; DHIR, Ravindra K. Chemical Reactions of Glass Cullet Used as Cement Component. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s.l.], v. 13, n. 6, p. 412-417, 2001.

ELAQRA, Hossam; RUSTOM, Rifat. Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 179, p. 326-335, 2018.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: facts and figures for 2012.** Assessing Trends in Material Generation, Recycling and Disposal in the United States. USA: EPA, 2014. 14 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Advancing Sustainable Materials Management: 2013 fact sheet.** Assessing Trends in Material Generation, Recycling and Disposal in the United States. USA: EPA, 2015. 22 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Advancing Sustainable Materials Management: facts and figures 2013.** Assessing Trends in Material Generation, Recycling and Disposal in the United States. USA: EPA, 2015. 186 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Advancing Sustainable Materials Management: 2014 fact sheet.** Assessing Trends in Material Generation, Recycling, Composting, Combustion with Energy Recovery and Landfilling in the United States. USA: EPA, 2016. 22 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Advancing Sustainable Materials Management: 2014 tables and figures.** Assessing Trends in Material Generation, Recycling, Composting, Combustion with Energy Recovery and Landfilling in the United States. USA: EPA, 2016. 69 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Advancing Sustainable Materials Management: 2015 fact sheet.** Assessing Trends in Material Generation, Recycling, Composting, Combustion with Energy Recovery and Landfilling in the United States.

USA: EPA, 2018. 23 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Advancing Sustainable Materials Management**: 2015 tables and figures. Assessing Trends in Material Generation, Recycling, Composting, Combustion with Energy Recovery and Landfilling in the United States. USA: EPA, 2018. 67 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Advancing Sustainable Materials Management**: 2016 and 2017 tables and figures. Assessing Trends in Material Generation, Recycling, Composting, Combustion with Energy Recovery and Landfilling in the United States. USA: EPA, 2018. 95 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Advancing Sustainable Materials Management**: 2017 fact sheet. Assessing Trends in Material Generation, Recycling, Composting, Combustion with Energy Recovery and Landfilling in the United States. USA: EPA, 2019. 95 p.

FEDERICO, L. M; CHIDIAC, S.E. Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – Critical review of treatment methods. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 31, n. 8, p. 606-610, 2009.

FEVE. The European Container Glass Federation. **Recycling**: Why glass always has a happy CO2 ending. Brussels: FEVE, 2010. p. 1-9.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION – GCCA. **O concreto é mais que um material**. É sobre a vida. London: GCCA, 2023. Disponível em: <https://gccassociation.org/>. Acesso em: 06 mar. 2023.

GESOĞLU, Mehmet; GÜNEYISI, Erhan; ÖZBAY, Erdoğan. Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 5, p. 1847-1854, 2009.

GUIGNONE, Guilherme Cunha. **Desempenho de concretos com a utilização de resíduos da lapidação do vidro como substitutos parciais ao cimento**. 2017. 286 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Materiais Compósitos de Aglomerantes Minerais: Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. p. 945-984.

IBRAHIM, Saber; MEAWAD, Amr. Assessment of waste packaging glass bottles as supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 182, p. 451-458, 2018.

IDIR, Rachida; CYR, Martin; TAGNIT-HAMOU, Arezki. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 7, p. 1309-1312, 2010.

IDIR, Rachida; CYR, Martin; TAGNIT-HAMOU, Arezki. Pozzolan properties of fine and

coarse color-mixed glass cullet. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 33, n. 1, p. 19-29, 2011.

ISLAM, G. M. Sadiqul; RAHMAN, M. H.; KAZI, Nayem. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. **International Journal of Sustainable Built Environment**, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 37-44, 2017.

ISAIA, Geraldo Cechella. A evolução do concreto estrutural. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 1-55.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO - ITEP. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade - Governo do Estado de Pernambuco. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos - PERS**. Pernambuco: ITEP, 2012. 306 p.

JUENGER, Maria C. G.; SIDDIQUE, Rafat. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 78, p. 71-80, 2015.

KABAY, Nihat *et al.* Utilization of pumice powder and glass microspheres in cement mortar using paste replacement methodology. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 282, p. 122691, 2021.

KAMALI, Mahsa; GHahremaninezhad, Ali. Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 98, p. 407-416, 2015.

KAMALI, Mahsa; GHahremaninezhad, Ali. An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 112, p. 915-924, 2016.

KARA, Patricija; KORJAKINS, Aleksandrs; KOVALENKO, Kirils. The usage of fluorescent waste glass powder in concrete. **Construction Science**, [s.l.], v. 13, p. 26-32, 2012.

KHMIRI, A.; CHAABOUNI, M.; SAMET, B. Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 44, p. 74-80, 2013.

KIM, Jihwan; YI, Chongku; ZI, Goangseup. Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 75, p. 242-246, 2015.

KIM, Seong Kyum *et al.* Effects of particle size and cement replacement of LCD Glass Powder in Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s.l.], v. 2017, p. 1-12, 2017.

KOU, Shi Cong; XING, Feng. The effect of recycled glass powder and reject fly ash on the mechanical properties of fibre-reinforced ultrahigh performance concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s.l.], v. 2012, p. 1-8, 2012.

KURDOWSKI, Wieslaw. **Cement and Concrete Chemistry**. Polônia: Springer, 2014. 705 p.

LARRARD, François de. Concrete constituents: relevant parameters: mineral admixtures (supplementary cementitious materials). In: LARRARD, François de (Ed.). **Concrete Mixture Proportioning: a scientific approach**. 2. ed. London: Taylor & Francis E-Library, 2011. p. 440.

LAM, Chi Sing; POON, Chi Sun; CHAN, Dixon. Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass – ASR consideration. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 29, n. 8, p. 616-625, 2007.

LIMBACHIYA, Mukesh C. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 2, p.1078-1083, 2009.

LIU, Miao. Incorporating ground glass in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 2, p. 919-925, 2011.

LOHLIA, R. Paul; JOSHI, Ramesh C. Mineral Admixtures: natural pozzolanic materials. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). **Concrete Admixtures Handbook**: properties, science, and technology. 2. ed. New Jersey: Noyes Publications, 1995. p. 657-740.

LU, Jian-xin; DUAN, Zhen-hua; POON, Chi Sun. Combined use of waste glass powder and cullet in architectural mortar. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 82, p. 34-44, 2017a.

LU, Jian-xin; DUAN, Zhen-hua; POON, Chi Sun. Fresh properties of cement pastes or mortars incorporating waste glass powder and cullet. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 131, p. 793-799, 2017b.

MATOS, Ana Mafalda; SOUSA-COUTINHO, Joana. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 36, p. 205-215, 2012.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Durabilidade: Reação álcali-agregado. In: MEHTA, P. Kuhmar; MONTEIRO, Paulo J. M. (Orgs.). **Concreto**: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014a. p. 175-179.

MEHTA, P. Kuhmar; MONTEIRO, Paulo J. M. Aditivos e Adições: adições minerais. In: MEHTA, P. Kuhmar; MONTEIRO, Paulo J. M. (Orgs.). **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014b. p. 327-350.

MENDES, Alessandra *et al.* NMR, XRD, IR and synchrotron NEXAFS spectroscopic studies of OPC and OPC/slag cement paste hydrates. **Materials and Structures**, [s.l.], v. 44, n. 10, p. 1773-1791, 2011.

MIRZAHOSSEINI, Mohammadreza; RIDING, Kyle A. Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM). **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 56, p. 95-105, 2015.

MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Adições Minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto**: Ciência e Tecnologia. 2. ed. São Paulo: Arte Interativa, 2011. p. 261-309.

MOSER, Robert D. *et al.* Assessment of binary and ternary blends of metakaolin and Class C fly ash for alkali-silica reaction mitigation in concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 40, n. 12, p. 1664-1672, 2010.

NASSAR, Rozuddin; SOROUSHIAN, Parviz. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 29, p. 368-377, 2012.

NEWELL, James. Cerâmicas e Materiais à Base de Carbono: Vidros. In: NEWELL, James (Ed.). **Fundamentos da moderna Engenharia e Ciência dos Materiais**. Rio de Janeiro: Ltc, 2015. p. 172-175.

NONAT, André. Hidratação dos cimentos: hidratação dos silicatos de cálcio. In: OLLIVIER, Jean-Pierre; VICHOT, Angélique (Orgs.). **Durabilidade do concreto**: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: Ibracon, 2014. p. 17-39.

NOCHAIYA, Thanongsak; WONGKEO, Watcharapong; CHAIPANICH, Arnon. Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete. **Fuel**, [s.l.], v. 89, n. 3, p. 768-774, 2010.

ODLER, Ivan. **Special Inorganic Cements**: Modern Concrete Technology. London: E & FN Spon, 2000.

OMRAN, Ahmed F. *et al.* Long-term performance of glass-powder concrete in large-scale field applications. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 135, p. 43-58, 2017.

OMRAN, Ahmed; TAGNIT-HAMOU, Arezki. Performance of glass-powder concrete in field applications. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 109, p. 84-95, 2016.

PAIVA, Otávio Augusto. **Resíduo industrial de vidro moído em argamassa de cimento portland**. 2009. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

PARIS, Jerry M. *et al.* A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 121, p. 1-18, 2016.

PARLAMENTO EUROPEU. Câmara dos Deputados. **Diretiva Europeia nº 852, de 30 de maio de 2018**. Altera a diretiva 94/62/CE relativa a embalagens e resíduos de embalagens. 4. ed. UE: Jornal Oficial da União Europeia, 2018. p. 150-154.

PETER, Lee. **Recycling DRS in Scotland**: a report to provide the glass packaging industry with the evidence to inform debate on the potential impact of the introduction of a recycling drs for beverage containers in scotland that includes glass beverage bottles. 1. ed. UK: Oakdene, 2019. 150 p.

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

PERNAMBUCO, Secretaria das Cidades – SEDIC. **Plano de resíduos sólidos**: região de desenvolvimento metropolitana de Pernambuco - RDM/PE. 2. ed. Recife: SEDIC, 2018. 108 p.

PERIYASAMY, Muthaimanoj *et al.* An Investigation into the Influence of α – β Quartz Phase Transition on Banded Iron Ore Comminution. **Jom**, [s.l.], v. 74, n. 1, p. 222-233, 2021.

RADLINSKI, Mateusz; OLEK, Jan. Investigation into the synergistic effects in ternary cementitious systems containing portland cement, fly ash and silica fume. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 34, n. 4, p. 451-459, 2012.

RAMAKRISHNAN, K. *et al.* Experimental study on the mechanical and durability properties of

concrete with waste glass powder and ground granulated blast furnace slag as supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 156, p. 739-749, 2017.

RAJABIPOUR, Farshad; MARAGHECHI, Hamed; FISCHER, Gregor. Investigating the Alkali-Silica Reaction of Recycled Glass Aggregates in Concrete Materials. **Journal of materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 12, p. 1201-1208, 2010.

REDDEN, Rachel; NEITHALATH, Narayanan. Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 45, p. 46-56, 2014.

RODIER, Loïc; SAVASTANO, Holmer. Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 184, p. 333-341, 2018.

SACCANI, Andrea; BIGNOZZI, Maria Chiara. ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 40, n. 4, p. 531-536, 2010.

SALES, Fernando Augusto. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**. 2014. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SAUER, Aline Silva. **Estudo do potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado em argamassas de recuperação estrutural**. 2013. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

SCHWARZ, Nathan; CAM, Hieu; NEITHALATH, Narayanan. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 30, n. 6, p. 486-496, 2008.

SECID, Secretaria das Cidades. **Plano De Resíduos Sólidos - PRS: região de desenvolvimento metropolitana de Pernambuco - RDM/PE**. 2. Ed. Recife: Secretaria das Cidades, 2018.

SHARIFI, Yasser; HOUSHIAR, Mahmoud; AGHEBATI, Behnam. Recycled glass replacement as fine aggregate in self-compacting concrete. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, [s.l.], v. 7, n. 4, p. 419-428, 2013.

SHAYAN, Ahmad; XU, Aimin. Value-added utilisation of waste glass in concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 34, n. 1, p. 81-89, 2004.

SHAYAN, Ahmad; XU, Aimin. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 36, n. 3, p. 457-468, 2006.

SHI, Caijun *et al.* Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 35, n. 5, p. 987-993, 2005.

SIAD, Hocine *et al.* Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 113, p. 163-173, 2016.

SICHIERI, Eduvaldo Paulo; CARAM, Rosana; SANTOS, Joaquim C. Pizzutti dos. Vidros na

construção civil. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Materiais de construção civil e Princípios de ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. p. 657-693.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Números da Indústria**: produção nacional de cimento por regiões e estados (t) 2016. SNIC, 2016. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>. Acesso em: 09 nov. 2022.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Números da Indústria**: produção nacional de cimento por regiões e estados (t) 2017. SNIC, 2017. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>. Acesso em: 09 nov. 2022.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Números da Indústria**: produção nacional de cimento por regiões e estados (t) 2018. SNIC, 2018. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>. Acesso em: 09 nov. 2022.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Números da Indústria**: produção nacional de cimento por regiões e estados (t) 2019. SNIC, 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>. Acesso em: 09 nov. 2022.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Números da Indústria**: Produção nacional de cimento por regiões e estados (t) 2020. SNIC, 2020. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>. Acesso em: 09 nov. 2022.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Dados do Setor**. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. SNIC, 2023. Acesso em: 09 nov. 2020.

SMITH, Willian F.; HASHEMI, Javad. Vidros. In: SMITH, Willian F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2012a. p. 435-443.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. Cerâmica: Vidros. In: HASHEMI, Javad; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2012b. p. 435-447.

SUN, Xiao *et al.* Microstructure characterization of alkali-glass particle and alkali-glass powder reacted gels with neutron scattering and imaging techniques. **Materials Characterization**, [s.l.], v. 131, p. 98-107, 2017.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 125, p. 600-612, 2016.

SOROKA, Itzhak. **Portland cement paste and concrete**.: chemical and mineralogical composition. 4. ed. London: The Macmillan Press LTDA, 1979. 353 p.

SOUSA, Matheus Ian Castro; RÊGO, João Henrique da Silva. Effect of nanosilica/metakaolin ratio on the calcium alumina silicate hydrate (C-A-S-H) formed in ternary cement pastes. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 38, p. 102226, 2021.

TAN, Kiang Hwee; DU, Hongjian. Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.

109-117, 2013.

TANG, Yanjie *et al.* Re-cementation effects by carbonation and the pozzolanic reaction on LWAs produced by hydrated cement paste powder. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 377, p. 134529, 2022.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997. 478 p.

TECNOSIL. **Sílica Ativa**: por que usá-la na sua construção? Por que usá-la na sua construção? Tecnosil soluções especiais, 2023. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa-por-que-usa-la-na-sua-construcao-2/>. Acesso em: 03 fev. 2023.

UK. Government. Department for Environment Food & Rural Affairs. **Consultation on reforming the UK packaging producer responsibility system**. UK: OGL, 2019. 125.

VAITKEVIČIUS, Vitoldas; HERELIS, Evaldas; HILBIG, Harald. The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 68, p. 102-109, 2014.

VIVEK, S.; DHINAKARAN, G. Durability characteristics of binary blend high strength SCC. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 146, p. 1-8, 2017.

WANG, Zhi; SHI, Caijun; SONG, Jianming. Effect of glass powder on chloride ion transport and alkali-aggregate reaction expansion of lightweight aggregate concrete. **Journal of Wuhan University of Technology-mater**, [s.l.], v. 24, n. 2, p. 312-317, 2009.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. Global Cement & Concrete Association. **GNR Project Reporting CO2: Total Mineral Components Used to Produce Portland Cement**. 2016. Geneva: WBCSD, 2016. Disponível em: https://www.wbcscement.org/GNR-2016/Brazil/GNR-Indicator_12TGW-Brazil.html. Acesso em: 06 mar. 2023.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. Global Cement & Concrete Association. **GNR Project Reporting CO2: Total gross CO2 emissions excluding CO2 from on-site power generation - Grey and white cement**. 2016. Geneva: WBCSD, 2016. Disponível em: https://www.wbcscement.org/GNR-2016/Brazil/GNR-Indicator_59cTGW-Brazil.html. Acesso em: 06 mar. 2023.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. Global Cement & Concrete Association. **GNR Project Reporting CO2: Total production volumes of clinker Grey** 2016. Geneva: WBCSD, 2016. Disponível em: https://www.wbcscement.org/GNR-2016/Brazil/GNR-Indicator_8TG-Brazil.html. Acesso em: 06 mar. 2023.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. Global Cement & Concrete Association. **GNR Project Reporting CO2: Total production volumes of cement Grey and white cement**. 2016. Geneva: WBCSD, 2016. Disponível em: https://www.wbcscement.org/GNR-2016/Brazil/GNR-Indicator_8TG-Brazil.html. Acesso em: 06 mar. 2023.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **GNR Project Reporting CO2: Total gross CO2 emissions excluding CO2 from on-site power**

generation - Grey and white cement. 2016. Geneva: WBCSD, 2016. Disponível em: https://www.wbcsdcement.org/GNR-2016/world/GNR-Indicator_59cTGW-world.html. Acesso em: 06 mar. 2023.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **GNR Project Reporting CO2:** Total mineral components used to produce Portland cement Grey and white cement. 2016. Geneva: WBCSD, 2016. Disponível em: https://www.wbcsdcement.org/GNR-2016/world/GNR-Indicator_12TGW-world.html. Acesso em: 06 mar. 2023.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **GNR Project Reporting CO2:** Total production volumes of cement Grey and white cement. 2016. Geneva: WBCSD, 2016. Disponível em: https://www.wbcsdcement.org/GNR-2016/Brazil/GNR-Indicator_21TGWcm-Brazil.html. Acesso em: 06 mar. 2023.

WILD, S.; KHATIB, J. M. Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, [s. l], v. 27, n. 1, p. 137-146, 1996.

ZHENG, Keren. Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali–silica reaction. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 67, p. 30-38, 2016.

APÊNDICE A: Composição química de vidros diversos

A composição química dos resíduos de vidro oriundos de diversas fontes utilizados em pesquisas como material cimentício, como agregado e simultaneamente como material cimentício e agregado estão representados nas tabelas 31 a 38. Nota-se que os diversos resíduos de vidros sodocálcicos apresentam elevada quantidade de SiO_2 , sendo o óxido mais presente, seguido pelo Na_2O , CaO o segundo e terceiro elementos mais presentes.

Tabela 1 - Composição química de vidros diversos (2001 a 2006).

(%) Óxidos Presentes em diversos tipos de vidro	Autores					
	⁽¹⁾ Dyer e Dhir (2001)			⁽²⁾ Shi <i>et al.</i> (2005)	⁽³⁾ Chen <i>et al.</i> (2006)	⁽⁴⁾ Shayan e Xu (2006)
	Branco	Verde	Âmbar			
SiO_2	70,39	72,05	70,01	72,5	54	72,4
Al_2O_3	2,41	2,81	3,2	0,16	15	1,45
Fe_2O_3	0,32	0	0	0,2	0	0,48
CaO	6,43	10,26	10	9,18	17	11,5
K_2O	0,23	0,52	0,82	0,12	0,8	0,43
Na_2O	16,66	14,31	15,35	13,2		13
MgO	2,59	0,9	1,46	3,65	4,5	0,65
TiO_2	0,08	0,11	0,11	-	-	-
Mn_2O_3	0,04	0,04	0,04	-	-	-
SO_3	0,19	0,07	0,06	0,39	-	0,09
Equivalente Alcalino (0,65 x K_2O + Na_2O)	16,81	14,65	15,88	13,28	-	13,27
(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)	73,12	74,86	73,21	72,86	69	74,33

(1) – Vidros branco, verde e âmbar obtidos de empresas de reciclagem de vidro cascos.

(2) – Resíduos oriundos da fabricação de esferas de vidro.

(3) – Resíduos de vidros eletrônicos (E-glass).

(4) – Resíduo de vidros sodo cálcicos oriundos de embalagens de cores mistas.

Fonte: Adaptado dos Autores.

Tabela 2 - Composição química de vidros diversos (referências de 2008 a 2010).

(%) Óxidos Presentes em diversos tipos de vidro	Autores					
	⁽⁵⁾ Schwarz, Cam e Neithalath (2008)	⁽⁶⁾ Limbachiya (2009)	⁽⁷⁾ Saccani e Bignozzi (2010)			
			BS-U	BS-A	SL	CR
SiO_2	72,5	70,13	68,1	65,3	70,2	61,7
Al_2O_3	0,4	1,76	5,64	5,64	2,06	0,04
Fe_2O_3	0,2	0,37	0,02	0,78	0,02	0,03
CaO	9,7	12,08	1,53	1,42	11,1	0,01
K_2O	0,1	0,55	1,24	1,16	1,21	6,96
Na_2O	13,7	14,56	8,06	8,02	13,1	3,96
MgO	3,3	1,55	0,003	0,004	1,47	0,03
TiO_2	-	-	-	2,89	0,01	-
Mn_2O_3	-	0,01	-	-	-	-
Cr_2O_3	-	0,01	-	-	-	-
PbO	-	-	-	-	-	25,3
B_2O_3	-	-	11,6	10,7	0,69	0,72
BaO	-	-	2,95	2,86	0,12	0,005

ZnO	-	-	0,82	0,78	0,01	0,9
Sb₂O₃	-	-	-	-	-	0,26
Equivalente Alcalino (0,65 x K₂O + Na₂O)	13,765	14,917	8,866	8,774	13,886	8,484
(SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃)	73,1	72,26	73,76	71,72	72,28	61,77

(5) – O pó de vidro oriundo do subproduto da fabricação de pós-industriais e vidros de placa de janela pós-consumidor.

(6) – Vidros oriundos de recipientes de bebidas de cores mistas coletados em materiais instalações de recuperação, instalações licenciadas, restaurantes e clubes.

(7) – Vidro boro silicato (BS-U, BS-A), sodocálcicos (SL), e silicato de chumbo (CR) –provenientes de recipientes de produtos farmacêuticos, recipientes de bebidas e produtos decorativos de casas.

Fonte: Adaptado dos Autores.

Tabela 3 - Composição química de vidros diversos (referências de 2010 a 2012).

(%) Óxidos Presentes em diversos tipos de vidro	Autores							
	(8)Idir, Cyr e Tagnit- Hamou (2010)	(9)Rajabipour, Maraghechi e Fischer (2010)		(10)Kara, Korjamins e Kovalenko (2012)		(11)Pereira-de-Oliveira, Castro- Gomes e Santos (2012)		
		Mix	Âmbar	DRL	LB	Âmbar	Verde	*(FG)
SiO₂	68,6	71,4	70,66	74,2	69,07	73,27	72,25	74,07
Al₂O₃	2	1,74	6,53	1,65	1,03	3,09	2,54	2,57
Fe₂O₃	0,3	0,93	2,52	0,16	0,19	-	-	-
CaO	12,3	10,9	9,12	2,09	1,39	11,36	12,35	11,53
K₂O	0,6	0,73	1,03	0,93	1,17	1,1	1,15	1,14
Na₂O	13,5	13	8,32	3,82	8,02	10,37	10,54	9,94
MgO	1	0,8	1,45	0	0	0,81	1,18	0,75
TiO₂	-	0,09	0,27	-	-	-	-	-
P₂O₅	-	0,01	0,07	-	-	-	-	-
MnO₂	-	0,03	0,04	-	-	-	-	-
SO₃	0,2	-	-	-	-	-	-	-
PbO	-	-	-	0	20,02	-	-	-
B₂O₃	-	-	-	16,63	0	-	-	-
Equivalente Alcalino (0,65 x K₂O + Na₂O)	13,89	13,47	8,98	4,42	8,78	11,08	11,28	10,68
(SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃)	70,9	74,07	79,71	76,01	70,29	76,36	74,79	76,64

(8) – Vidros sodocálcicos de garrafas de cores mistas.

(9) – 9.1 Mix colorido de vidros sodocálcicos contendo 29% de vidro claro, 30% de vidro âmbar, 39% de vidro verde e 2% de outras cores. 9.2 Vidro âmbar.

(10) – Resíduos de vidro borosilicato (DRL) e lascas vidro de silicato de chumbo (LB) oriundos de lâmpadas fluorescentes.

(11) – *(FG = Flint Glass = Vidro de Sílex) Resíduos obtidos na gestão local de resíduos e serviço de descarte da Associação Municipal Cova da Beira, da região interior de Portugal.

Fonte: Adaptado dos Autores.

Tabela 4- Composição química de vidros diversos (referências de 2012 a 2013).

(%) Óxidos Presentes em diversos tipos de vidro	Autores				
	(12) Kou e Xing (2012)	(13) Nassar e Soroushian (2012)	(14) Sharifi, Houshiar e Aghebati (2013)	(15) Sauer 2013	(16) Khmiri, Chaabouni e Samet (2013)
SiO ₂	71,4	68	70,5	56,77	71,44
Al ₂ O ₃	1,4	7	2,6	6,07	1,7
Fe ₂ O ₃	0,2	<1	-	0,29	0,37
CaO	10,6	11	5,7	5,64	10,81
K ₂ O	0,5	<1	1,2	0,16	0,36
Na ₂ O	12,7	12	16,3	15,41	13,24
MgO	2,5	1	2,9	3,67	1,65
TiO ₂	-	-	-	-	0,024
P ₂ O ₃ outros	-	<1	-	-	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0,19
SO ₃	0,1	-	0,2	0,16	0,16
Equivalente Alcalino (0,65 x K ₂ O + Na ₂ O)	13,025	-	17,08	15,51	13,474
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	73	-	73,1	63,13	73,51

(12) – Resíduo de garrafas de vidro reciclado; (13) – Resíduo de vidro moído de cor mista;

(14) – Resíduo de vidro plano moído; (15) – Resíduo de vidro laminado (RVL);

(16) – Resíduo de vidro sodo-cálcico de recipientes reciclados

Fonte: Adaptado dos Autores.

Tabela 5 - Composição química de vidros diversos (referências de 2013 a 2014).

(%) Óxidos Presentes em diversos tipos de vidros	Autores						
	⁽¹⁷⁾ Tan e Du (2013)			⁽¹⁸⁾ Sales (2014)		⁽¹⁹⁾ Vaitkevičius, Šerelis e Hilbig (2014)	⁽²⁰⁾ Carsana, Frassoni e Bertolini (2014)
	*V	*M	*C	*I	*Â		
SiO ₂	71,22	72,08	72,14	73,93	72,95	72,76	68,67
Al ₂ O ₃	1,63	2,19	1,56	0,25	0,82	1,67	2,73
Fe ₂ O ₃	0,32	0,22	0,06	0,92	0,66	0,79	0,66
CaO	10,79	10,45	10,93	9,18	9,28	9,74	11,35
K ₂ O	0,64	0,16	0,62	0,02	0,02	0,76	1,11
Na ₂ O	13,12	13,71	13,04	9,18	5,99	12,56	13,25
MgO	1,57	0,72	1,48	3,75	3,58	2,09	1,41
TiO ₂	0,07	0,1	0,05	-	-	0,04	-
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	0,02	-
Cr ₂ O ₃	0,22	0,01	-	-	-	-	-
SO ₃	-	-	-	0,23	0,25	0,1	0,13
MnO	-	-	-	-	-	0,02	-
Equivalente Alcalino (0,65 x K ₂ O + Na ₂ O)	13,53	13,81	13,44	9,19	6,00	13,06	13,97
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	73,17	74,49	73,76	75,1	74,43	75,22	72,06

(17) - Vidros sodocálcicos oriundos de recipientes de bebidas como vinhos, cervejas e azeites, coletados num reciclador local. *V = Verde, *M = Marrom, *C = Claro; (18) - Vidros sodocálcicos oriundos de recipientes de bebidas como vinhos, cervejas e azeites, coletados num reciclador local. *I = Incolor, *Â = Âmbar;

(19) - Vidros reciclados de cores mistas oriundos de garrafas; (20) - Resíduos de garrafas verdes esmagadas;

Fonte: Adaptado dos Autores.

Tabela 6 - Composição química de vidros diversos (Referências de 2015 a 2016).

(%) Óxidos Presentes em diversos tipos de vidro	Autores						
	(21)Bignozzi <i>et al.</i> (2015)				(22)Kim, Yi e Zi (2015)	(23)Mirzahosseini e Riding (2015)	(24)Zheng (2016)
	*SL	*LMP	*FNL	*CR			
SiO ₂	70,4	68,47	56,11	58,64	68,2	73,1	73,3
Al ₂ O ₃	2,06	2,26	3,02	0,02	10,1	1,65	1,8
Fe ₂ O ₃	< 0,01	0,08	0,09	0,21	0,242	-	0,3
CaO	11,13	5,13	2,56	0,12	9,9	10,55	10,7
K ₂ O	1,21	1,61	10,01	7,27	0,229	0,58	0,6
Na ₂ O	13,4	17,65	5,46	4,67	7,62	12,34	10,8
MgO	1,47	2,98	1,86	0,29	2,94	-	1,9
TiO ₂	< 0,01	< 0,01	0,08	< 0,01	-	-	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	0,24	-
SO ₃	-	-	-	-	0,367	-	-
PbO	<0,01	0,79	18,34	27,43	-	-	-
BaO	0,12	0,95	2,2	<0,01	-	-	-
ZnO	< 0,01	< 0,01	0,14	1,18	-	-	-
Sb ₂ O ₃	< 0,01	0,08	0,17	0,22	-	-	-
Equivalente Alcalino (0,65 x K ₂ O + Na ₂ O)	13,90	18,69	11,96	9,39	7,76	12,717	11,19
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	72,5	70,81	59,22	58,87	78,54	74,75	75,4

Fonte: Adaptado dos Autores.

Tabela 7 - Composição química de vidros diversos (referências de 2016 a 2017).

(%) Óxidos Presentes em diversos tipos de vidro	Autores				
	(25)Kamali e Ghahremaninezhad(2016)		(26)Siad <i>et al.</i> (2016)	(27)Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016)	(28)Lu, Duan e Poon (2017)
	*GP1	*GP2			
SiO ₂	57,5	63,3	74,07	71,40	73,5
Al ₂ O ₃	12,7	6,4	1,97	2,54	0,73
Fe ₂ O ₃	0,06	0,31	0,44	0,37	0,38
CaO	22,7	17,1	13,56	11,20	10,48
K ₂ O	0,06	0,07	0,62	0,36	0,69
Na ₂ O	0,62	6,1	7,19	12,25	12,74
MgO	3,6	4,5	1,26	1,60	1,25
TiO ₂	0,98	0,44	-	-	0,087
SO ₃	0,22	0,19	-	0,16	-
B ₂ O ₃	0-6	0-5	-	-	-
Equivalente Alcalino (0,65 x K ₂ O + Na ₂ O)	0,65	6,14	7,60	12,48	13,1885
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	70,26	70,01	76,48	74,31	74,61

(25) – *GP1 - Aluminossilicato de cálcio vítreo oriundo do resíduo de fibra de vidro, *GP2 – Subproduto do vidro reciclado; (26) – Mistura de vidro de garrafa reciclado fornecido por centro de triagem. (27) – Resíduo de vidro obtido da moagem de recipientes esmagados e demolição de edifícios; (28) – Vidro de garrafa de bebida pós-consumo obtidos de uma instalação de reciclagem de resíduos de vidros.

Fonte: Adaptado dos Autores.

Tabela 8 - Composição química de vidros diversos (referências de 2018).

(%) Óxidos Presentes em diversos tipos de vidro	Autores					⁽³⁰⁾ Elaqla e Rustom (2018)
	⁽²⁹⁾ Ibrahim e Meawad (2018)					
	*USL1	*USL2	*GSL	*BSL	*UBs	
SiO ₂	74,11	75,2	71,78	73,08	77,29	64,64
Al ₂ O ₃	0,01	0,63	0,01	0,03	3,76	1,81
Fe ₂ O ₃	0,12	0,04	0,5	0,41	0,1	1,97
CaO	10,01	12,55	10,83	11,77	4,79	18,55
K ₂ O	0,25	0,04	0,35	0,23	2,06	0,44
Na ₂ O	12,4	11,1	14,61	12,76	9,83	9,16
MgO	2,6	0,01	1,3	0,91	0,41	3,12
TiO ₂	0,03	0,03	0,16	0,1	0,04	-
Cr ₂ O ₃	0,0003	0,0003	1,462	0,0131	0,0007	-
B ₂ O ₃	-	-	0,032	0,009	3,61	-
BaO	0,088	0,084	0,086	0,088	0,795	-
Equivalente Alcalino (0,65 x K ₂ O + Na ₂ O)	12,56	11,12	14,83	12,90	11,16	9,44
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	74,24	75,87	72,29	73,52	81,15	68,42

(29) – Garrafas e frascos de vidro coletados de vidros domésticos. *USL 1, *USL 2 – Vidros sem cor sodocálcicos, *GSL – Vidros verdes sodocálcicos * BSL – Vidros marrom sodocálcico, BSL – Vidro borosilicato sem cor.

(30) – Obtido a partir de folhas de vidro quebradas e pedaços quebrados recolhidos em aterro.

Fonte: Adaptado dos Autores.