

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DE MATERIAIS CAMPUS DE
BAURU

BRUNO RODRIGUES DE BRITO

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE VIDRO DE GARRAFAS NÃO RETORNÁVEIS
EM MATRIZ CIMENTÍCIA

PRESIDENTE PRUDENTE

2021

BRUNO RODRIGUES DE BRITO

**EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE VIDRO DE GARRAFAS NÃO RETORNÁVEIS
EM MATRIZ CIMENTÍCIA**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia de Materiais, área de concentração Materiais Cerâmicos, sob a orientação do Prof^a. Dr^a. Agda Eunice de Souza Albas.

PRESIDENTE PRUDENTE

2021

B862e Brito, Bruno Rodrigues
Efeito da incorporação de vidro de garrafas não
retornáveis em matriz cimentícia / Bruno Rodrigues
Brito. -- Presidente Prudente, 2021
151 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e
Tecnologia, Presidente Prudente
Orientadora: Agda Eunice Souza

1. Resíduo de vidro. 2. Matriz cimentícia. 3.
Atividade pozolânica. 4. Argamassa. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE BRUNO RODRIGUES DE BRITO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 09 dias do mês de junho do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de BRUNO RODRIGUES DE BRITO, intitulada **Efeito da incorporação de vidro de garrafas não retornáveis em matriz cimentícia**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. AGDA EUNICE DE SOUZA ALBAS (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente, Prof. Dr. MAURO MITSUUCHI TASHIMA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Prof. Dr. SILVIO RAINHO TEIXEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - UNESP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Profa. Dra. AGDA EUNICE DE SOUZA ALBAS

*Dedico este trabalho aos meus pais, minha irmã e
minha namorada, os quais tiveram esperança e
sempre acreditaram no meu crescimento.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por iluminar e guiar o meu caminho, por ser a minha base e me fazer seguir em frente superando meus obstáculos.

À minha Família, meus pais Mauricio Brito e Cida Brito, minha irmã Beatriz Brito, por todo apoio, cuidado, incentivo e amor dado a mim, não só ao longo de toda minha formação acadêmica, mas também, ao longo de minha vida, por existirem e por serem responsáveis pela minha formação como homem.

À minha namorada e companheira de laboratório Ana Beatriz, por estar comigo em todos os momentos, por todo o carinho e amor, por toda ajuda e compreensão.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Agda Eunice de Souza Albas pela amizade e confiança, por todo o auxílio, paciência e dedicação em me orientar nesta dissertação.

Ao Prof. Dr. Silvio Rainho Teixeira, pelos ensinamentos, por todo auxílio nas horas questionáveis.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FCT UNESP e ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais – POSMAT, pelo amparo acadêmico durante todo o período de pós-graduação.

A todos os meus amigos e companheiros do Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos – LCGRS, em especial, aqueles que, de perto, acompanharam este trabalho: Renata Magalhães, José Augusto, Luis Fernando, Thariany Sanches, Sheila Barreto, Leila Sotocorno, Wagner Costa, Gleyson Tadeu, Yann Bonilha e Ana Beatriz.

À Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE, ao Coordenador do curso de Engenharia Civil Prof. Me. Amaro Dos Santos, e aos técnicos Isac, Luiz e Adriana, pelo fornecimento do laboratório e auxílio para o desenvolvimento dos ensaios tecnológicos.

A todos que direta ou indiretamente me ajudaram durante a realização deste trabalho, obrigado.

“A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”

Albert Einstein

RESUMO

Efeito da incorporação de vidro de garrafas não retornáveis em matriz cimentícia

A possibilidade de reutilizar resíduos sólidos em materiais de construção civil, buscando a melhora de suas propriedades, vem sendo estudada a fim de minimizar os impactos ambientais ocasionados pelo seu descarte incorreto. Propõe-se, neste sentido, avaliar a adição de vidro finamente moído, proveniente de garrafas não retornáveis do tipo long neck, na produção de argamassa. Após coleta e beneficiamento do resíduo, foram realizadas caracterizações químicas e físicas utilizando técnicas de difratometria de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX). Ensaio mecânicos foram realizados em diferentes idades de ruptura após moldagem de corpos de prova com teores de 3, 5, 10 e 15% de adição de pó de vidro em relação a massa de cimento, resultando em ganhos expressivos de até 97% de resistência à compressão axial em relação ao traço de referência. O aumento da resistência mecânica está diretamente relacionado ao aumento do índice de atividade pozolânica, provocado pela adição do pó de vidro na matriz cimentícia. O índice de atividade pozolânica foi determinado por ensaio normatizado e por análise térmica (TG/DSC) após reatividade entre o resíduo de vidro e hidróxido de cálcio (CH) produzido na hidratação do cimento. Micrografias realizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), em idades avançadas, indicam a presença de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), produto responsável pela resistência mecânica, após consumo de CH, característico de materiais pozolânicos. Como estudo adicional, foi avaliada a incorporação de pó de vidro de granulometria menor nas argamassas, verificando-se que houve um aumento da resistência de até 33,7%, quando comparadas às mesmas concentrações da granulometria maior, nas mesmas idades. Os resultados obtidos permitem concluir que é viável, do ponto de vista técnico e ambiental, a utilização de resíduos de vidro de garrafas long neck como aditivo pozolânico em matrizes cimentícias.

Palavras-chave: Resíduo de vidro; Matriz cimentícia; Atividade pozolânica; Argamassa.

ABSTRACT

Effect of non-returnable bottles glass incorporation on cementitious matrix

The possibility of reusing solid waste in construction materials, seeking out to improve their properties, has been studied in order to minimize the environmental impacts caused by their incorrect disposal. In this sense, it is proposed to evaluate the addition of finely ground glass from non-returnable long neck bottles, in the mortar production. After waste collection and processing, chemical and physical characterizations were performed by using X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (FRX) methods. Mechanical tests were performed at different rupture ages, after molding specimens with 3, 5, 10 and 15wt% of glass powder addition in relation to cement mass, resulting in expressive gains of up to 97% of resistance to axial compression, in relation to the reference. The increase in mechanical strength is directly related to the increase in pozzolanic activity index, caused by the glass powder addition in the cementitious matrix. The pozzolanic activity index was determined by standardized test and thermal analysis (TG/DSC), after reactivity between the glass residue and calcium hydroxide (CH) produced in cement hydration. Micrographs performed by scanning electron microscopy (SEM), at advanced ages, indicate the increase of hydrated calcium silicates (C-S-H), a product responsible for mechanical resistance after CH consumption, characteristic of pozzolanic materials. As an additional study, it was evaluated the incorporation of smaller particle size glass grains in the mortars, verifying an increase of resistance of up to 33.7%, when compared to the same concentrations of larger particle size, at the same ages. The results show that it is technically and environmentally viable to use glass waste from long neck bottles as a pozzolanic additive in cementitious matrices.

Keywords: Glass waste; Cement matrix; Pozzolanic activity; Mortar.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Geração de RSU no Brasil.....	5
FIGURA 2 – Disposição final de RSU, por tipo de destinação (toneladas/ano)	6
FIGURA 3 – Geração de RSU per capita nas regiões do Brasil.....	7
FIGURA 4 – Colheita do vidro e o sopro	8
FIGURA 5 – Variação do volume em função da temperatura no processo de resfriamento	11
FIGURA 6 – Intervalo de transição vítrea (β : taxa de resfriamento onde $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$)	11
FIGURA 7 – Unidade básica rede de sílica	12
FIGURA 8 – Vidro soda-cálcico.....	13
FIGURA 9 – Composição química do vidro sodo-cálcico e da crosta terrestre	15
FIGURA 10 – Características obtidas pelos óxidos constituintes.....	16
FIGURA 11 – Curva Viscosidade x Temperatura de vidro sodo-cálcico	17
FIGURA 12 – Quantidade de sílica removida de um vidro em função do pH da solução.....	19
FIGURA 13 – Volume total coletado por material pelas cooperativas e associações em 2019 (em mil toneladas).....	23
FIGURA 14 – Participação de cada material no volume total coletado em 2019.	24
FIGURA 15 – Representação esquemática da liberação de calor e: (A) a concentração de Ca^{2+} em solução; (B) durante a hidratação do cimento Portland ..	32
FIGURA 16 – Diagrama esquemático do desenvolvimento microestrutural durante o período de hidratação do cimento Portland.....	34
FIGURA 17 - Desenvolvimento da estrutura morfológica do Cimento Portland	35
FIGURA 18 – Modelo de microestrutura (a) Pasta de cimento Portland Hidratada, (b) Pasta de cimento Portland Pozolânico.....	41
FIGURA 19 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão	46
FIGURA 20 – Distribuição granulométrica dos seguintes materiais utilizados no estudo: cimento, pó de vidro e cinzas volantes	47
FIGURA 21 – Índice de atividade pozolânica do vidro e cinzas volantes.....	47

FIGURA 22 - Diagrama de blocos esquematizando o programa experimental	50
FIGURA 23 – Fornecimento de garrafas Long Neck	51
FIGURA 24 – Triturador de mandíbulas, primeira moagem do vidro	52
FIGURA 25 – Moinho de bolas, segunda moagem	53
FIGURA 26 – Moinho de bolas, terceira moagem	54
FIGURA 27 – Secagem em estufa do resíduo de vidro após terceira moagem	54
FIGURA 28 – Distribuição granulométrica da areia normal	56
FIGURA 29 – Misturador mecânico	59
FIGURA 30 – Cura inicial na câmara úmida	60
FIGURA 31 – Corpos de prova desmoldados	60
FIGURA 32 – Cura submersa com água e cal	60
FIGURA 33 – Capeamento dos corpos de prova	62
FIGURA 34 – Ensaio de compressão axial	63
FIGURA 35 – Tira de madeira para ensaio de tração por compressão diametral	64
FIGURA 36 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	64
FIGURA 37 – Índice de consistência (Mesa para abatimento troncocônico)	66
FIGURA 38 – Capeamento dos corpos de prova – IAP Cimento 28 dias	66
FIGURA 39 – Ensaio de compressão axial – IAP Cimento 28 dias	67
FIGURA 40 – Determinação da massa específica, frasco de Le Chatelier (à direita, nível em cm ³ do querosene; à esquerda, nível em cm ³ do querosene com adição de vidro moído)	68
FIGURA 41 – Corpos de provas para cura térmica	69
FIGURA 42 – Estufa para cura térmica dos corpos de prova em estufa	70
FIGURA 43 – Equipamento de Difração de Raios X	73
FIGURA 44 – Equipamento de Fluorescência de raios X	74
FIGURA 45 – Equipamento de Análise Térmica	75
FIGURA 46 – Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	76
FIGURA 47 – Equipamento Sputtering Quorum para metalização	76
FIGURA 48 – Difratoograma de raios X do vidro moído (long neck)	78
FIGURA 49 – Difratoograma de raios X do cimento Portland (CP II F32)	79
FIGURA 50 – Resistência a compressão axial média das argamassas A (0%) e B (25%) – Cimento aos 28 dias	85
FIGURA 51 – Resistência a compressão das argamassas com desvio padrão	89

FIGURA 52 – Resistência à compressão das argamassas.....	90
FIGURA 53 – Resistência à tração por compressão diametral das argamassas com desvio padrão.....	93
FIGURA 54 – Resistência à tração por compressão diametral das argamassas	93
FIGURA 55 – Absorção de água por imersão e índice de vazios dos corpos de prova após 28 dias de cura (valores médios).....	96
FIGURA 56 – Massa específica seca, saturada e real dos corpos de prova após 28 dias de cura (valores médios)	96
FIGURA 57 - Produtos de hidratação da argamassa de referência V0 aos 7,14, 28 e 91 dias de cura.....	98
FIGURA 58 - Produtos das de hidratação da argamassa V3 aos 7, 14, 28 e 91 dias de cura	99
FIGURA 59 - Produto de hidratação da argamassa V5 aos 14, 28 e 91 dias de cura	99
Figura 60 - Produto de hidratação da argamassa V10 aos 7, 14, 28 e 91 dias de cura	100
Figura 61 - Produtos de hidratação da argamassa V15 aos 7,14, 28 e 91 dias de cura	100
FIGURA 62 – Resistência a compressão axial dos corpos de prova de argamassas aos 28 dias (53 a 38 μ m).....	103
FIGURA 63 - TG e DSC da argamassa V0 - 7 dias	130
FIGURA 64 - TG e DSC da argamassa V3 - 7 dias	130
FIGURA 65 - TG e DSC da argamassa V5 - 7 dias	131
FIGURA 66 - TG e DSC da argamassa V10 - 7 dias	131
FIGURA 67 - TG e DSC da argamassa V15 - 7 dias	132
FIGURA 68 - TG e DSC da argamassa V0 - 14 dias	132
FIGURA 69 - TG e DSC da argamassa V3 - 14 dias	133
FIGURA 70 - TG e DSC da argamassa V5 - 14 dias	133
FIGURA 71 - TG e DSC da argamassa V10 - 14 dias	134
FIGURA 72 - TG e DSC da argamassa V15 - 14 dias	134
FIGURA 73 - TG e DSC da argamassa V0 - 28 dias	135
FIGURA 74 - TG e DSC da argamassa V3 - 28 dias	135
FIGURA 75 - TG e DSC da argamassa V5 - 28 dias	136

FIGURA 76 - TG e DSC da argamassa V10 - 28 dias	136
FIGURA 77 - TG e DSC da argamassa V15 - 28 dias	137
FIGURA 78 - Curva TG/DSC amostra piloto (7, 14 e 28 dias)	137
FIGURA 79 - Curva TG/DSC amostra 3% vidro (7, 14 e 28 dias)	138
FIGURA 80 - Curva TG/DSC amostra 5% vidro (7, 14 e 28 dias)	138
FIGURA 81 - Curva TG/DSC amostra 10% vidro (7, 14 e 28 dias)	139
FIGURA 82 - Curva TG/DSC amostra 15% vidro (7, 14 e 28 dias)	139
Figura 83 - DSC endothermic peak intensity for V0 sample	140
Figura 84 - DSC endothermic peak intensity for V3 sample	140
Figura 85 - DSC endothermic peak intensity for V5 sample	141
Figura 86 - DSC endothermic peak intensity for V10 sample	141
Figura 87 - DSC endothermic peak intensity for V15 sample	141
FIGURA 88 - TG e DSC da argamassa V0 - 7 dias	142
FIGURA 89 - TG e DSC da argamassa V3 - 7 dias	143
FIGURA 90 - TG e DSC da argamassa V5 - 7 dias	143
FIGURA 91 - TG e DSC da argamassa V10 - 7 dias	143
FIGURA 92 - TG e DSC da argamassa V15 - 7 dias	144
FIGURA 93 - TG e DSC da argamassa V0 - 14 dias	144
FIGURA 94 - TG e DSC da argamassa V3 - 14 dias	145
FIGURA 95 - TG e DSC da argamassa V5 - 14 dias	145
FIGURA 96 - TG e DSC da argamassa V10 - 14 dias	146
FIGURA 97 - TG e DSC da argamassa V15 - 14 dias	147
FIGURA 98 - TG e DSC da argamassa V0 - 28 dias	147
FIGURA 99 - TG e DSC da argamassa V3 - 28 dias	147
FIGURA 100 - TG e DSC da argamassa V5 - 28 dias	148
FIGURA 101 - TG e DSC da argamassa V10 - 28 dias	148
FIGURA 102 - TG e DSC da argamassa V15 - 28 dias	149

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Classificação dos óxidos conforme sua atuação na rede vítrea	14
TABELA 2 – Condutividade térmica do vidro e de outros materiais	20
TABELA 3 – Resistência mecânica real do vidro em diversas situações	21
TABELA 4 – Óxidos compostos do clínquer e suas abreviações.....	29
TABELA 5 – Propriedades dos principais componentes do cimento.....	31
TABELA 6 – Análise química de materiais pozolânicos conhecidos	38
TABELA 7 – Requisitos químicos (Pozolanas).....	39
TABELA 8 – Requisitos físicos (Pozolanas).....	39
TABELA 9 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão (em MPa) nas diferentes idades de ruptura.....	45
TABELA 10 – Tamanho das partículas de vidro e índice de atividade pozolânica....	48
TABELA 11 - Publicações de pesquisas referentes a incorporação de vidro em matriz cimentícia com análises de atividade pozolânica nos últimos anos.	48
TABELA 12 – Distribuição granulométrica da areia Normal	55
TABELA 13 – Quantidade de vidro moído e água conforme concentrações para produção da argamassa.....	58
TABELA 14 - Quantidade de materiais para produção das pastas Cimento / Material Pozolânico.....	61
TABELA 15 – Distribuição granulométrica do vidro moído.....	77
TABELA 16 - Análise química do vidro (óxidos).....	80
TABELA 17 – Análise química do cimento Portland – II F 32 (óxidos).....	80
Tabela 18 - Quantificação do Heat Flow no pico de DSC das amostras (J/g)*	81
TABELA 19 - Fixação da Cal para identificação de atividade pozolânica	82
TABELA 20 – Índice de consistência das argamassas A e B – Cimento 28 dias.....	84
TABELA 21 – Índice de Atividade Pozolânica – Cimento aos 28 dias	85
TABELA 22 – Quantidade de materiais, Massa Específica e Índice de Consistência da argamassa – Cal aos 7 dias	86
TABELA 23 – Índice de Atividade Pozolânica – Cal aos 7 dias	87
TABELA 24 – Resistência à compressão axial dos corpos de prova	88

TABELA 25 – Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova	92
TABELA 26 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão NBR 9778:2009	
Corpos de prova após 28 dias de cura.....	95
TABELA 27 – Resistência à compressão axial dos corpos de prova de argamassas	
aos 28 dias (53 a 38 μm).....	102
TABELA 28 – Resistência a compressão argamassa referência – V0.....	123
TABELA 29 – Resistência a compressão argamassa 3% – V3.....	123
TABELA 30 – Resistência a compressão argamassa 5% – V5.....	124
TABELA 31 – Resistência a compressão argamassa 5% – V5.....	124
TABELA 32 – Resistência a compressão argamassa 15% – V105.....	124
TABELA 33 – Resistência a tração por compressão diametral argamassa referência –	
V0.....	125
TABELA 34 – Resistência a tração por compressão diametral argamassa 3% – V3	
.....	126
TABELA 35 – Resistência a tração por compressão diametral argamassa 5% – V5	
.....	127
TABELA 36 – Resistência a tração por compressão diametral argamassa 10% – V10	
.....	128
TABELA 37 – Resistência a tração por compressão diametral argamassa 15% – V15	
.....	129

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Definições de vidro encontradas em livro-texto na década de 90.....	9
QUADRO 2 – Tempo de decomposição do vidro.....	24
QUADRO 3 – Colorantes utilizados na fabricação de vidros.....	22
QUADRO 4 – Principais características dos produtos da hidratação do cimento Portland.....	36
QUADRO 5 – Composição dos cimentos Portland comum e composto	37
QUADRO 6 – Influencia dos tipos de cimento nas argamassas e concretos	37
QUADRO 7 – Pesquisas analisadas referente a incorporação do resíduo de vidro em matriz cimentícia	44
QUADRO 8 – Quantidade de materiais para o traço controle	58
QUADRO 9 – Programa experimental dos ensaios das argamassas	62
QUADRO 10 – Programa experimental das caracterizações dos materiais	72
QUADRO 11 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – Piloto (V0)	150
QUADRO 12 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – 3% (V3)	150
QUADRO 13 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – 5% (V5)	150
QUADRO 14 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – 10% (V10)	151
QUADRO 15 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – 15% (V15)	151

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Fator Água Cimento

a.C – Antes de Cristo

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABIVIDRO - Associação Brasileira das Indústrias de Vidro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ANCAT - Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis

BNH – Banco Nacional da Habitação

CEBRACE - Companhia Brasileira de Cristal

CEPIDs - Centros de Pesquisa, Inovação e Difusão

CerTEV - Center for Research, Technology and Education in Vitreous Materials

CERVBRAZIL - Associação Brasileira da Indústria da Cerveja

CP – Cimento Portland

CP-II-F - Cimento Portland Composto com Fíler

DMLU POA - Departamento Municipal de Limpeza Urbana Porto Alegre

DRX – Difração de Raio X

DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial

DTA - Análise térmica diferencial

ECO-92 - Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologia

FRX – Fluorescência de Raio X

IAP – Índice de Atividade Pozolânica

IFSP – Instituto Federal de São Paulo

LabCivil – Laboratório de Engenharia Civil

LCGRS - Laboratório de Caracterização de Resíduos Sólidos

LSR – Líquido Super Resfriado

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura
NM – Norma Mercosul
NBR – Norma Brasileira
PE – Pernambuco
PDF - Powder Diffraction Files
PL – Projeto de Lei
PNRS - Política Nacional dos Resíduos Sólidos
RAS - Álcali-Sílica
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SMA – Secretaria do Meio Ambiente
SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SP – São Paulo
TG - Termogravimetria
UFSCar - Universidade Federal de São Carlos
UNESP – Universidade Estadual Paulista
UNICEF - Fundo das Nações Unidas para a Infância
UNOESTE – Universidade do Oeste Paulista

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVO	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3 – REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1 Resíduos sólidos	4
3.2 Vidro	7
3.2.1 Breve histórico	7
3.2.2 Definição de vidro	9
3.2.3 Transição vítrea	10
3.2.4 Estrutura do vidro	12
3.2.4.1 <i>Vidro Soda-Cálcico</i>	14
3.2.5 Propriedades do vidro	15
3.2.5.1 <i>Viscosidade</i>	16
3.2.5.2 <i>Densidade</i>	17
3.2.5.3 <i>Dureza</i>	18
3.2.5.4 <i>Durabilidade química</i>	18
3.2.5.5 <i>Resistência ao choque térmico</i>	20
3.2.5.6 <i>Resistência mecânica</i>	20
3.2.5.7 <i>Cor</i>	22
3.2.6 Resíduos de vidro	23
3.2.7 Garrafas Long Neck	25
3.3 Matriz cimentícia	26
3.3.1 Breve histórico	26
3.3.2 Cimento Portland	28
3.3.3 Composição química do cimento Portland	29
3.3.4 Hidratação do cimento Portland	31

3.3.5 Cimento Portland composto com Fíler (CP II – F 32).....	36
3.4 Atividade pozolânica.....	38
3.4.1 Materiais pozolânicos.....	38
3.4.2 Atividade pozolânica em matriz cimentícia.....	40
3.4.3 Índice de atividade pozolânica.....	42
3.4.3.1 <i>Determinação de atividade pozolânica por análise térmica.....</i>	<i>42</i>
3.5 Estudos relacionados ao tema.....	43
3.5.1 Estudos sobre aplicação de resíduo de vidro em matriz cimentícia.....	43
3.5.2 Estudos sobre aplicação de resíduo de vidro em argamassa.....	45
3.5.3 Estudos sobre atividade pozolânica de resíduo de vidro em matriz cimentícia.....	46
4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
4.1 Desenvolvimento experimental.....	50
4.2 Materiais.....	51
4.2.1 Vidro.....	51
4.2.1.1 <i>Moagem do vidro.....</i>	<i>51</i>
4.2.2 Cimento.....	55
4.2.3 Agregado miúdo.....	55
4.2.4 Água.....	56
4.2.5 Outros materiais.....	56
4.3 Análise granulométrica do vidro.....	57
4.4 Preparação dos corpos de prova.....	57
4.4.2 Mistura Mecânica.....	58
4.4.3 Moldagem dos corpos de prova.....	59
4.4.4 Cura e desmoldagem dos corpos de prova.....	59
4.4.5 Preparação da pasta para análise térmica.....	61
4.5 Ensaios de engenharia.....	61
4.5.1 Resistência à compressão axial.....	62
4.5.2 Resistência à tração por compressão diametral.....	63
4.5.3 Atividade Pozolânica com cimento – 28 dias.....	65

4.5.4 Atividade pozolânica com cal – 7 dias.....	67
4.5.5 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica	70
4.6 Caracterizações.....	72
4.6.1 Difração de Raios X.....	73
4.6.2 Fluorescência de Raio-X	74
4.6.3 Análise Térmica.....	74
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
5.1 Análise granulométrica do vidro moído	77
5.2 DRX – Vidro moído e CP II F 32.....	77
5.3 FRX – Vidro moído e CP II F 32	79
5.4 TG e DSC – Pasta Cimento + vidro moído	81
5.5 Atividade Pozolânica – Cimento 28 dias	84
5.6 Atividade Pozolânica – Cal 7 dias.....	86
5.7 Resistência à compressão axial	88
5.8 Resistência à tração por compressão diametral	91
5.9 Absorção de água por imersão.....	95
5.10 MEV – Produtos de hidratação das argamassas.....	97
5.11 Resistência à compressão axial – (53 a 38 µm).....	102
6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	105
7 – CONCLUSÕES.....	107
REFERÊNCIAS.....	108
APÊNDICE I.....	123

1 – INTRODUÇÃO

Muito se tem discutido sobre questões ambientais, tendo em vista o quanto estas interferem a curto, médio e longo prazo em uma sociedade. A questão ambiental está diretamente ligada à vida do homem e seu entorno e, cada vez mais, vem sendo enfatizada a necessidade de estudos no tocante ao gerenciamento de resíduos, sua destinação final, redução, reciclagem e reutilização.

Foram gerados no Brasil, somente no ano de 2018, 79 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Deste número, 29,5 milhões de toneladas (40,5%) foram dispostos em locais inapropriados, como lixões e aterros controlados, tornando-se potenciais prejuízos para a saúde humana e para o meio ambiente no qual são expostos (ABRELPE, 2020).

Dentre os RSU, destaca-se o vidro, material inerte, que necessita de milhares de anos para sua decomposição. A produção de vidro no ano de 2018, alcançou 1,3 milhões de toneladas no Brasil. Desta parcela, apenas 6,7 mil toneladas foram coletadas para realização da reciclagem, acarretando no descarte de mais de 1,2 milhões de toneladas. Entre 2018 e 2020, foram recuperadas 52 mil toneladas de vidro, correspondendo a 15% do total gerado, ficando atrás do papel (54%) e do plástico (21%). Este fato ocorre devido ao menor custo de venda (por kg) no mercado, quando comparado aos demais materiais que podem ser reciclados. Entretanto, o vidro é o material que emite menos CO₂ no processo de recuperação, em comparação aos outros materiais reaproveitados/reciclados e, até mesmo, à produção de vidros virgens (ABIVIDRO, 2019; ANCAT, 2020).

Os vidros dispostos em lixões, são encontrados na forma de cacos e, por muitas vezes, em embalagens inteiras, como por exemplo, garrafas de envase do tipo Long Neck. Criadas visando interesses industriais de competitividade entre embalagens de alumínio e vidro, as garrafas Long Neck, não são retornáveis para a indústria, pois, alguns componentes químicos foram retirados de sua composição para que diminuíssem o seu peso. Este processamento acarretou em uma diminuição de sua resistência, o que implica diretamente na impossibilidade da sua reutilização por partes das empresas (FUNVERDE, 2009).

Devido aos problemas ambientais ocasionados pelo descarte incorreto destas embalagens, e a sua fragilidade de resistência, estas garrafas se tornam potenciais

ferramentas de agressões em eventos. Em vista disso, vários projetos de Lei no âmbito Municipal, Estadual e Federal foram criados para sanar esta situação, tornando obrigatória a coleta e destinação final pelos revendedores de bebidas e, em casos mais severos, proibindo a industrialização e comercialização deste tipo de embalagem.

Em outra perspectiva, o setor da construção civil, é responsável por uma grande parcela socioeconômica nacional e mundial, e, com isso, também se torna um grande gerador de resíduos sólidos urbanos. Por outro lado, este setor tem ampla capacidade de absorver os mais variados tipos de resíduos, tanto gerados por ele próprio, como por outras atividades. Os RSU, podem, portanto, ser reutilizados e/ou incorporados em outros materiais de construções, como por exemplo, no concreto, argamassa, na produção do cimento e na substituição ou adição de agregados (JOHN, 2000).

Diversas pesquisas no setor da construção, substituindo parcialmente o agregado miúdo por resíduos de vidro, foram realizados, como Maier e Durham (2012) e Kruger et al. (2002), obtendo bons resultados de resistência mecânica. Porém, quando substituem parcialmente o cimento Portland, muitas vezes há um decréscimo de resistência em vista das reações álcali-sílica (RAS), na qual o tamanho de partículas interfere diretamente.

Com a preocupação com a destinação final das garrafas do tipo Long Neck, a integridade física dos consumidores, catadores e a quantidade deste material gerado por ano, justifica-se a realização de estudos para reutilização dos resíduos provenientes destas garrafas em novos produtos no setor da construção civil.

Neste sentido, o presente trabalho, propõe caracterizar e avaliar as propriedades de argamassas com incorporação de vidro finamente moído, proveniente de garrafas Long Neck, coletados na cidade de Presidente Prudente – SP.

A incorporação de pó de vidro com granulometria fina, visa a melhora da resistência mecânica das argamassas. Isso ocorre devido à presença do óxido de silício ser superior a 80% em sua composição, e, principalmente, porque ele se apresenta predominantemente amorfo. Essa característica lhe atribui a propriedade “super-pozolana”, viabilizando, tecnicamente, sua utilização como aditivo pozolânico ao cimento (MASSAZZA, 1993).

2 – OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

De forma abrangente, o objetivo do presente trabalho é avaliar a viabilidade técnica da incorporação do resíduo de vidro moído proveniente de garrafas não retornáveis “long neck” em argamassas cimentícias.

2.2 Objetivos Específicos

Para o cumprimento do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram desenvolvidos:

- a) Realizar a coleta e o beneficiamento do resíduo de vidro, executando moagem até que o material alcance escalas micrométricas;
- b) Caracterizar o resíduo de vidro, o cimento adotado, os corpos de provas e a pasta de cimento/vidro moído;
- c) Analisar diferentes teores de incorporação do resíduo;
- d) Produzir corpos de provas de argamassas com o resíduo de vidro incorporado;
- e) Executar ensaios de compressão, tração e absorção de água;
- f) Avaliar a atividade pozolânica do resíduo incorporado à matriz cimentícia;
- g) Comparar os resultados dos ensaios com a argamassa de referência e estudos encontrados na literatura.

3 – REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Resíduos sólidos

Com a crescente preocupação quanto à melhoria da gestão de resíduos sólidos, surgem estudos no âmbito de políticas sustentáveis para destinação destes resíduos. Como exemplo, a reutilização destes resíduos incorporados aos materiais de construção civil, que vem sendo uma alternativa e motivo de muitos estudos.

Políticas sanitárias foram se estabelecendo ao longo dos séculos, porém, a preocupação com resíduos sólidos começou a ganhar importância após a Revolução Industrial. A partir de 1970, a questão obteve peso ambiental tanto em âmbito nacional como internacional, sendo abordado em grandes encontros mundiais, como nas conferências de Estocolmo, em 1972, a ECO-92, no Rio de Janeiro, em 1992 e a de Tbilisi, em 1997 (VELLOSO, 2008).

Essas mudanças evidenciam o interesse na gestão de resíduos sólidos, bem como tendências de alterações nas composições destes resíduos, visando minimizar os impactos de natureza socioeconômica e ambiental. Os processos de reciclagem e de gerenciamento de resíduos são poderosos e de fundamental importância para esta questão (PRATES, 1998).

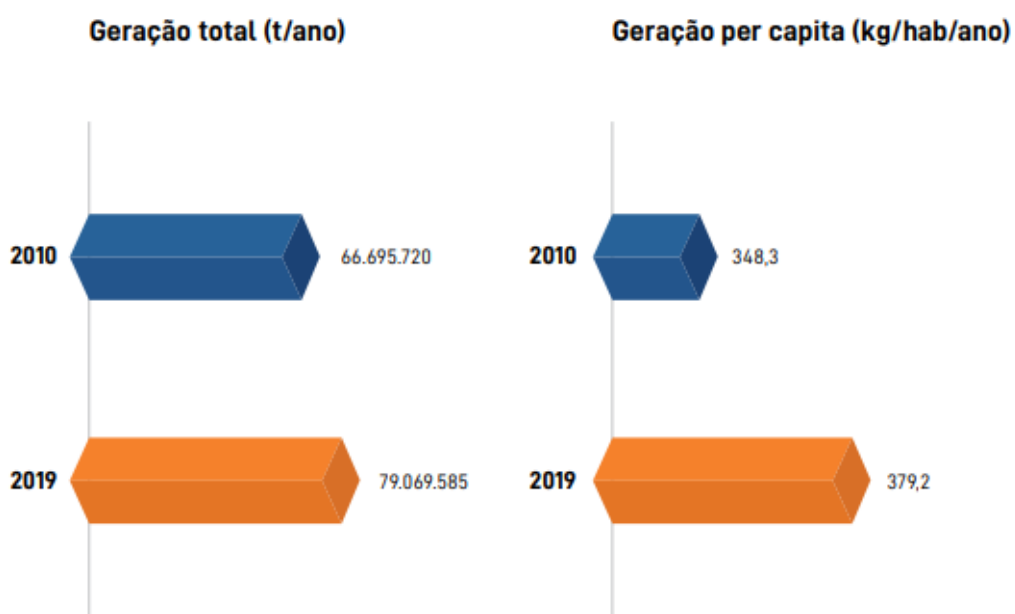
Pitchtel (2005), define resíduo sólidos como um material sólido com valores econômicos negativos, ou seja, tornando seu descarte mais barato do que seu uso. Entretanto, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, regulamentada pelo decreto 7.404, de 23 de dezembro de 2010, contradiz essa definição, quando dispõe a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, definindo resíduo sólido como:

[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Para o Brasil, o gerenciamento de resíduos sólidos tem grande importância para seu crescimento e desenvolvimento. Em 2019, conforme os últimos dados registrados pelo Panorama da ABRELPE (2020), 79 milhões de toneladas de

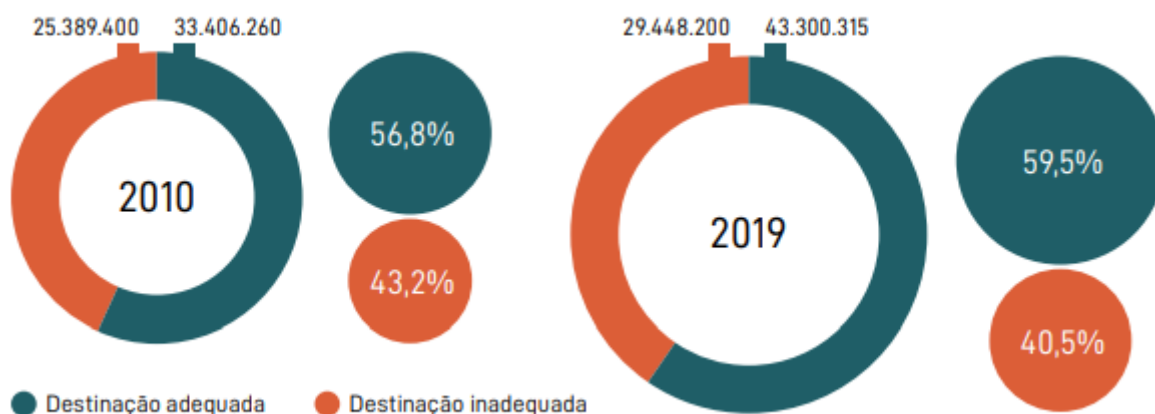
Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) foram gerados. Desse montante, 92% (72,7 milhões) foi coletado, evidenciando que 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidas junto aos locais de geração. Do total de RSU gerado em 2019, 40,5% foi despejado em locais inadequados por 3.001 municípios, ou seja, 29,5 milhões de toneladas de RSU acabaram indo para lixões ou aterros controlados. Estes locais de descarte não contam com um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger a saúde das pessoas e o meio ambiente contra danos e degradações. Nas figuras 1 e 2, observa-se a quantidade gerada de RSU no Brasil nos anos de 2010 e 2019, bem como a disposição final do RSU em toneladas/ano.

FIGURA 1 – Geração de RSU no Brasil



FONTE: ABRELPE (2020)

FIGURA 2 – Disposição final de RSU, por tipo de destinação (toneladas/ano)



FONTE: ABRELPE (2020)

Impactos ambientais provenientes das formas irregulares de disposição e diversidade de resíduos sólidos oferecem, também, riscos à saúde humana. A disposição destes resíduos no solo, ocasiona uma forte exposição humana à várias substâncias tóxicas. O ar e a água contaminada pela degradação destes resíduos também possibilitam riscos à população, sendo potencial fontes ocasionadoras de diversas doenças (GOUVEIA, 2012).

Segundo Gouveia e Prado (2010), a decomposição da matéria orgânica presentes nos resíduos sólidos resultam em chorume, contaminando solo, águas superficiais ou subterrâneas pela contaminação do lençol freático, podendo ocorrer também, a formação de gases tóxicos, asfixiantes e explosivos que se acumulam no subsolo ou são diretamente lançados na atmosfera.

Conforme ABRELPE (2020) o Sudeste, é a segunda região com maior índice de iniciativa de coleta seletiva (89,7%), atrás, apenas, da região Sul (90,9%). Diferentemente das demais regiões do Brasil, produz resíduos em proporção maior que sua participação na população brasileira: concentra 42% dos habitantes, mas gera 50% dos RSU, com um índice per capita de 1,23 quilo por dia, conforme observado na figura 3.

FIGURA 3 – Geração de RSU per capita nas regiões do Brasil



FONTE: ABRELPE (2020)

De modo geral, os impactos ocasionados pela degradação destes resíduos, vão além das áreas de disposição final, afetando toda a população.

Desta forma, é fundamental que essa questão se enquadre em decisões de saúde pública. Dessa forma, políticas econômicas, sociais e ambientais devem ser constantemente empregadas para oferecer diretrizes para a correta gestão de resíduos sólidos. Também, devem subsidiar ações para que todo este material seja destinado de maneira correta, sendo reciclado, e/ou processado para que então seja empregado em um novo uso.

3.2 Vidro

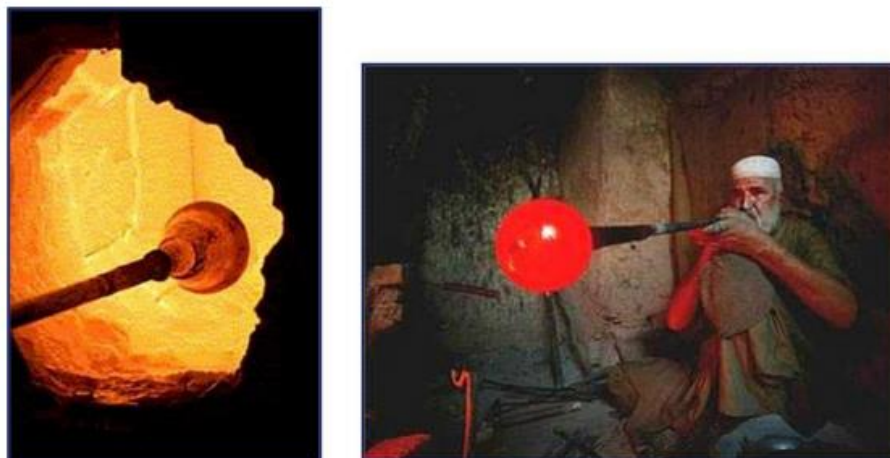
3.2.1 Breve histórico

Conforme Ackerman (2000), a origem do vidro, remontam a dados mais verossímeis há pelo menos 4.000 a.C., quando foram descobertos objetos de vidros em necrópoles egípcias. Outros autores, apontam os navegadores fenícios como os precursores da descoberta do vidro, ao acenderem uma fogueira na costa da Síria, onde estavam ancorados, utilizaram blocos de salitre e soda. Algum tempo depois, notaram que, do fogo, uma substância brilhante escorria e solidificava imediatamente, marcando, ali, o nascimento do vidro.

Por volta de 300 a.C., a técnica de sopro, revolucionou a fabricação de vidro. Esta técnica consiste em colher uma pequena amostra de material em estado de fusão, com a ponta de um tubo, e pela outra extremidade do mesmo, soprar em um

molde obtendo uma forma desejada. Tal descoberta foi de suma importância, em vista que, ainda hoje, o princípio do sopro ainda é muito utilizado na fabricação de vidro nos mais modernos equipamentos, técnica observada na Figura 4 (ACKERMAN, 2000).

FIGURA 4 – Colheita do vidro e o sopro



Fonte: Ackerman (2013).

Conforme Zanotto (1989), também pela técnica do sopro, na Idade Média, popularizou-se o uso de vidro em vitrais e janelas. Passados alguns séculos, em 1970, os vidros chamados cristais, provenientes de Veneza, ficaram famosos por peças de copos e jarros brilhantes.

Ainda no século XVIII, a indústria francesa prosperou alcançando um grau de aperfeiçoamento notável na produção de vidros. Segundo Cebrace (2015), o rei francês Luís XIV, em meados deste século, reunindo alguns mestres vidreiros, montou a Companhia Saint-Gobain, para que fossem produzidos os espelhos do palácio de Versalhes na França. Saint-Gobain, é hoje, uma companhia privada, atuante na manufatura de diversos tipos de materiais.

No Brasil, a primeira oficina de vidro foi montada com a invasão dos Holandeses em 1624 e 1635 em Olinda e Recife (PE) por quatro artesãos que acompanhavam o príncipe Maurício de Nassau. A produção de vidro era artesanal até o século XX utilizando o princípio do sopro. A partir do início do século XX, houve, então, o desenvolvimento da indústria do vidro com a introdução de fornos contínuos, a recuperação de calor e equipados com máquinas semi ou totalmente automáticas para produções em massa (CEBRACE, 2015).

A consolidação da indústria do vidro com a introdução de máquinas automáticas no Brasil, se deu pela pioneira empresa “Companhia Industrial São Paulo

e Rio”, a Cisper, fundada no Rio de Janeiro. Sua produção concentrava-se em copos e garrafas de vidro, fornecendo seu material para várias outras empresas de bebidas no País (CEBRACE, 2015).

3.2.2 Definição de vidro

Dentre os diversos materiais provenientes de algum tipo de resíduos sólidos, está o vidro. Segundo Callister (2012), o vidro é um sólido não cristalino classificado como um material cerâmico. Outros autores definem o vidro, conforme observa-se no Quadro 1

QUADRO 1 – Definições de vidro encontradas em livro-texto na década de 90

Autor	[Ano]	Definição
Elliott	[1990]	“Vidros são materiais amorfos que não possuem ordem translacional a longo alcance (periodicidade), característica de um cristal. Os termos amorfo e sólido não-cristalino são sinônimos nesta definição. Um vidro é um sólido amorfo que exibe uma transição vítrea.”
Zarzycki	[1991]	“Um vidro é um sólido não-cristalino exibindo o fenômeno de transição vítrea.”
Doremus	[1994]	“Vidro é um sólido amorfo. Um material é amorfo quando não tem ordem a longa distância, isto é, quando não há uma regularidade no arranjo dos constituintes moleculares, em uma escala maior do que algumas vezes o tamanho desses grupos. Não é feita distinção entre as palavras vítreo e amorfo.”
Varshneya	[1994]	“Vidro é um sólido que tem a estrutura do tipo de um líquido, um sólido “não-cristalino” ou simplesmente um sólido amorfo, considerando a característica de amorfo como uma descrição da desordem atômica, evidenciada pela técnica de difração de raios-X.”
Shelby	[1997]	“Vidro é um sólido amorfo com ausência completa de ordem a longo alcance e periodicidade, exibindo uma região de transição vítrea. Qualquer material, inorgânico, orgânico ou metal, formando por qualquer técnica, que exibe um fenômeno de transição vítrea é um vidro.”

Fonte: Alves et al. (2001).

Em entrevista à FAPESP, Alisson (2017) relata que, Edgar Dutra Zanotto, professor do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e coordenador do Center for Research, Technology and Education in Vitreous Materials (CerTEV) – um dos Centros de Pesquisa, Inovação e Difusão (CEPIDs) financiados pela FAPESP, aponta que há uma série de erros graves

em definições de vidros, entre elas, as que ensinam que o vidro é um material no estado sólido, ou que seja um material isotrópico.

A fim de realizar uma crítica ao estado da arte do vidro, desmitificando alguns pontos, Zanotto (2017), afirma que o vidro é um material em um estado físico fora do equilíbrio termodinâmico, que parece sólido em uma escala de tempo curta, mas que, continuamente, relaxa em direção ao estado líquido.

Em uma definição ainda mais detalhada, Zanotto diz que:

O vidro é um estado da matéria condensado, não cristalino, sem equilíbrio, que exibe uma transição vítrea. A estrutura dos vidros é semelhante à de seus líquidos super-resfriados (LSR), e eles relaxam espontaneamente em direção ao estado do LSR. O seu destino final solidifica, isto é, cristaliza (ZANOTTO, 2017, p.1).

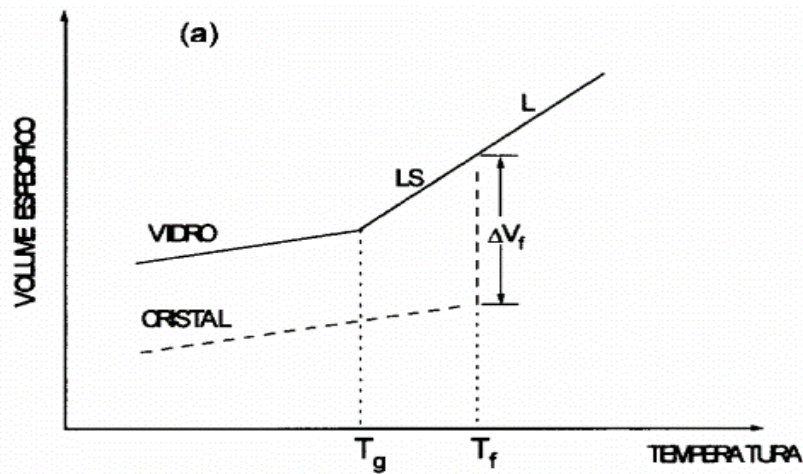
Esta definição é melhor entendida quando se conhece o conceito de fenômeno de transição vítrea.

3.2.3 Transição vítrea

Tanto no processo de preparação do vidro, quanto em um posterior processo de caracterização, um importante parâmetro a se atentar é o de transição vítrea (T_g). Segundo Araújo (1997), com o decréscimo de temperatura gradativo no material em estado líquido, chega-se então em uma temperatura de fusão (T_f), na qual dois fenômenos podem ocorrer. Um deles é o fenômeno de cristalização do material, no qual o mesmo passa por uma descontinuidade em seu volume específico. No outro, o material passa para um estado líquido super-resfriado, sem ocorrência de descontinuidade em T_f , mantendo a mesma taxa de volume do líquido inicial.

Prosseguindo com o decréscimo de temperatura, há um aumento na viscosidade do líquido super-resfriado, ocasionando uma mobilidade atômica muito reduzida, chegando a um momento em que os átomos começam a fixar-se suas posições em torno de uma determinada temperatura T_g , a temperatura de transição vítrea. A figura 5 mostra o comportamento do volume em função da temperatura, como descrito acima.

FIGURA 5 – Variação do volume em função da temperatura no processo de resfriamento

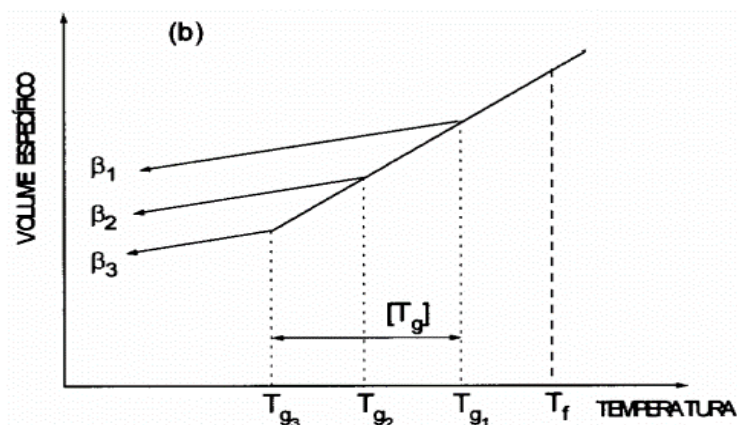


Fonte: Araújo (1997).

Pode-se entender, então, T_g , como a temperatura que separa os comportamentos vítreos e viscoelásticos do material, quando por ação de força aplicada, o material corresponde mecanicamente com escoamento viscoso e deformação elástica (SOUSA, 2013).

A posição de T_g no gráfico da Figura 5, pode variar de acordo com a taxa de resfriamento, ou seja, um rápido resfriamento pode deslocar T_g para maiores temperaturas. Por outro lado, um resfriamento mais lento T_g desloca para menores temperaturas. Dessa forma, é preferível substituir T_g por um intervalo de transição vítrea $[T_g]$, delimitando valores de T_g para alta e baixa taxa de resfriamento, conforme mostra a Figura 6 (ARAÚJO, 1997).

FIGURA 6 – Intervalo de transição vítrea (β : taxa de resfriamento onde $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$)



Fonte: Araújo (1997).

Conceitualizando, também, “temperatura de transição vítrea”, e reforçando a usabilidade do conceito de “intervalo de transformações”, Zanotto afirma que:

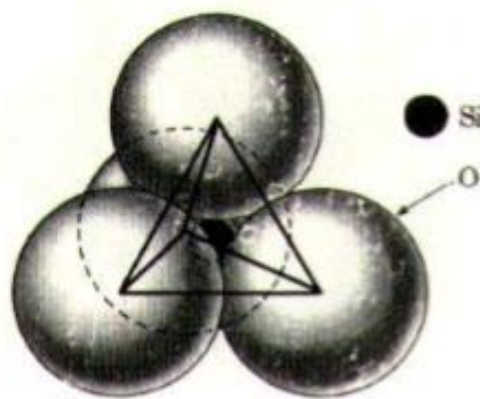
A temperatura na qual a mudança na inclinação ocorre é chamada temperatura de transformação ou temperatura de transição vítrea, T_g . Somente abaixo de T_g é correto descrever o material como um vidro. A mudança de líquido super-resfriado para vidro, que pode ser considerado como ocorrendo a esta temperatura, não é repentina, nem T_g é uma temperatura bem definida para qualquer vidro em particular. De fato, o termo "faixa de transformação" é usado com mais frequência do que "temperatura de transformação" (ZANOTTO, 1998, p.395).

Logo, pode-se afirmar que temperatura de transição vítrea T_g , não é um ponto fixo, mas sim uma faixa, dentro da qual, pode assumir diversos valores, dependendo da velocidade do resfriamento do material (ACKERMAN, 2000).

3.2.4 Estrutura do vidro

Nos vidros mais comuns, os silicatos, a estrutura básica da rede de sílica é o tetraédrico de silício-oxigênio, observado na Figura 7. O tetraédrico é formado por quatro átomos maiores de oxigênio ligados a um átomo menor de silício (ACKERMAN, 2000).

FIGURA 7 – Unidade básica rede de sílica

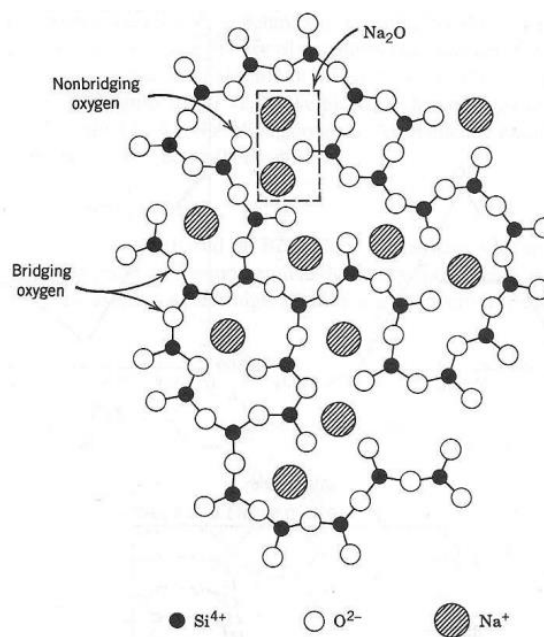


Fonte: Ackerman (2000).

Os tetraedros são ligados pelos vértices, por meio do compartilhamento de um átomo oxigênio, por dois átomos de silício. Os átomos de oxigênio são chamados de

pontantes, por poderem ser compartilhados formando uma rede tridimensional. Átomos como sódio, quando presentes na rede vítrea, se ligam ionicamente com o oxigênio, ocasionando uma interrupção na continuidade da rede. Já que alguns dos átomos de oxigênio não são mais compartilhados entre dois tetraedros, mas ligados somente a um átomo de silício, este tipo de átomo de oxigênio é chamado como não pontante, quando há uma quebra de ligação ponte. Pode-se observar este exemplo na Figura 8 (ACKERMAN, 2000).

FIGURA 8 – Vidro soda-cálcico



Fonte: Toffoli (2013).

Os principais componentes da rede vítrea podem ser classificados em três classes em função de sua atuação:

Formadores de rede: Responsáveis por formar a rede vítrea, os quais encontram-se ligados entre si, cátions e oxigênio, ocasionando ilhas estáveis dentro de uma estrutura de alta viscosidade. Os formadores possuem um pequeno raio iônico e alta densidade de carga iônica, são de alto valor de intensidade de campo, como o silício, fazendo com que suas ligações sejam fortes. Alguns exemplos são SiO_2 , B_2O_3 e GeO_2 (NAVARRO, 2003).

Modificadores de rede: Estes, por suas vezes, possuem baixo valor de intensidade de campo. Os modificadores rompem a estrutura vítrea diminuindo assim sua viscosidade. Dentre eles encontram-se os alcalinos, alcalino-terrosos e metais de

transição. Alguns exemplos são óxidos de sódio, cálcio, magnésio e potássio (NAVARRO, 2003).

Intermediário: Os intermediários, podem atuar na rede vítrea como formadores, no caso do Al na rede de SiO₂, formando AlO₄ graças à uma ligação química mais estável com o oxigênio, aumentando a viscosidade do meio, ou, atuar como modificadores quando o meio for favorável (NAVARRO, 2003). A Tabela 1 mostra alguns óxidos formadores, modificadores de rede ou intermediários.

TABELA 1 – Classificação dos óxidos conforme sua atuação na rede vítrea

Formadores de rede	Modificadores	Intermediários
SiO ₂	Li ₂ O	Al ₂ O ₃
GeO ₂	Na ₂ O	PbO
B ₂ O ₅	K ₂ O	ZnO
As ₂ O ₃	CaO	CdO
As ₂ O ₅	BaO	TiO ₂
V ₂ O ₅		

Fonte: Adaptado de Peralta (2014).

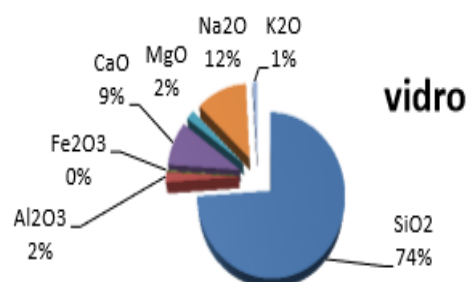
3.2.4.1 Vidro Soda-Cálcico

Dentre os diversos tipos de vidro, estão os soda-cálcicos, sendo os mais comuns, e, compreendem a família de vidro mais antiga e largamente utilizadas. Constituem a maior parte das garrafas, frascos, potes, janelas, bulbos e tubos de lâmpadas (ACKERMAN, 2000).

Barros (2010), em sua análise dos vidros mais comuns e duradouros, equipara a composição química dos vidros soda-cálcicos com a da crosta terrestre, podendo ser observado na Figura 9.

FIGURA 9 – Composição química do vidro soda-cálcico e da crosta terrestre

Óxido	% na crosta terrestre	% nos vidros comuns
SiO ₂ (sílica)	60	74
Al ₂ O ₃ (Alumina)	15	2
Fe ₂ O ₃ (Óxido de ferro)	7	0,1
CaO (Cálcio)	5	9
MgO (Magnésio)	3	2
Na ₂ O (Sódio)	4	12
K ₂ O (Potássio)	3	1



Fonte: Adaptado de Barros (2010).

Consoante Ackerman (2013), a introdução de átomos de sódio na rede vítrea de silício, faz com que os oxigênios, por afinidade, se unam com o sódio quebrando a ligação com o silício, formando uma interrupção na rede. Esta prática, causa diminuição na viscosidade do meio e na temperatura de fusão do vidro, e também, ocasiona um aumento na solubilidade do vidro, em água, conforme aumenta a adição do sódio.

Por sua vez, o cálcio introduzido na mesma rede, funcionando como fluxo estabilizante. Por ser bivalente, átomos de cálcio geram uma ligação a cada duas destruídas, com característica de pouca solubilidade em água, afeta, estabilizando, a resistência a solubilidade dos vidros soda-cálcicos (ACKERMAN, 2013).

O vidro utilizado neste trabalho, proveniente de garrafas long neck, possui composição química típica dos vidros soda-cálcicos (GALVÃO ET AL., 2015).

3.2.5 Propriedades do vidro

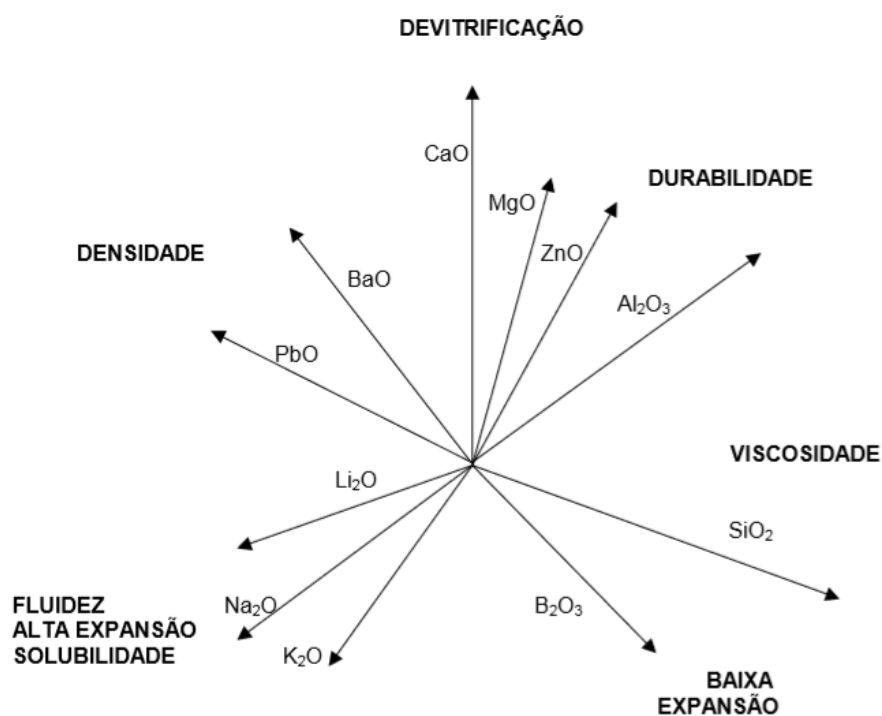
As propriedades dos vidros, estão diretamente relacionadas às suas características estruturais, em que, por maior influência a estrutura se caracteriza dependendo da composição química do vidro, e por menor, pela história térmica do material. Logo, a variação destas propriedades pode ser relacionada em função da concentração dos componentes. Já com relação à história térmica do material, a velocidade com o qual se resfria o vidro, em sua produção, determina o grau de relaxamento estrutural, que também influencia, em menor escala, nas propriedades finais dos vidros (ACKERMAN, 2000).

Ainda sobre propriedades do vidro, Zanotto relata que:

Aumentando-se o Na_2O (óxido de sódio) do vidro, aumenta-se a sua fluidez, expansão e solubilidade, mas por outro lado diminui a sua durabilidade. O Al_2O_3 (alumina ou óxido de alumínio), ao contrário do Na_2O , aumenta a durabilidade e faz aumentar a viscosidade. O BaO (óxido de bário) e o PbO (óxido de chumbo) aumentam a densidade e reduzem a viscosidade, além de aumentarem a expansão térmica. O CaO (óxido de cálcio) favorece a devitrificação (ZANOTTO, 1998, p.395).

Na figura 10, pode-se observar, de maneira qualitativa, a relação dos componentes dos vidros e sua influência nas propriedades do mesmo.

FIGURA 10 – Características obtidas pelos óxidos constituintes



Fonte: ACKERMAN (2000).

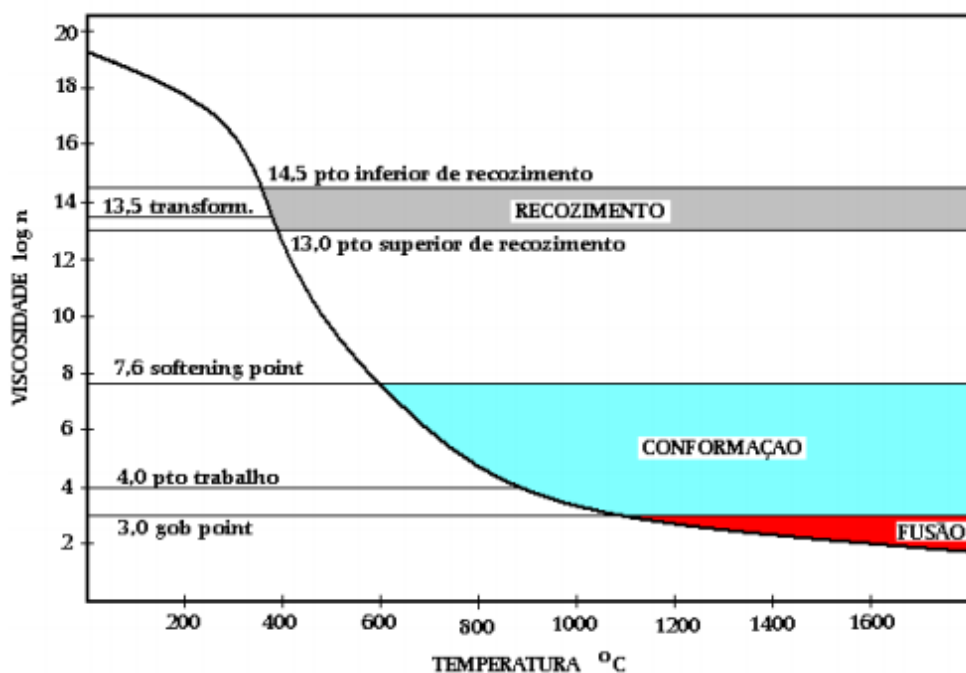
3.2.5.1 Viscosidade

Do ponto de vista de tecnologia empregada na elaboração e conformação de vidros, a viscosidade em função da temperatura é um dos aspectos mais alentado. Esta propriedade implica nas condições de fusão, temperaturas de trabalho e

recozimento, comportamento de afinagem (remoção de bolhas de banho), temperatura máxima de utilização e taxa de cristalização (ACKERMAN, 2000).

A viscosidade varia consideravelmente com a composição química e a temperatura do meio. No início da conformação de um vidro, a viscosidade deve ser tal que permita a sua deformação, porém não muito baixa de modo a preservar a forma adquirida, e ao final da conformação, a viscosidade deve estar em um nível para que seja preservada a forma final da peça. A temperatura na qual a viscosidade possibilita a conformação do vidro, é denominada temperatura de trabalho e pode ser observada na Figura 11, que mostra valores de viscosidade em função da temperatura para vidros soda-cálcico tipo embalagens (ACKERMAN, 2000).

FIGURA 11 – Curva Viscosidade x Temperatura de vidro soda-cálcico



Fonte: Ackerman (2000).

3.2.5.2 Densidade

Segundo Shelby (2000), a densidade dos vidros é uma relação entre as massas dos íons presentes pelo volume livre da rede vítrea. Com a adição de espécies na rede, localizando-se geralmente nos interstícios, se favorece o aumento da densidade

e a diminuição do volume livre. Este aumento de densidade é proporcional à massa dos íons adicionados, em relação à massa dos íons já presentes no vidro.

Nos vidros silicatos, a variação da densidade é possibilitada pelas concentrações de íons alcalinos. Entretanto, o aumento na densidade não se relaciona diretamente com a massa atômica do íon adicionado. Em relação aos vidros com óxido de sódio, quando comparados a vidros com lítio, apresentam maior densidade, já em relação ao potássio, apresentam a mesma densidade (SHELBY, 2000).

3.2.5.3 Dureza

A dureza pode ser definida como a resistência de um corpo à abrasão, penetração ou risco. Um exemplo de teste de dureza, é o teste de risco que usa a escala Mohs, que varia de 1 a 10. Exemplificando, o talco (silicato de magnésio) possui valor de dureza 1 e o diamante, um valor de 10 Mohs, enquanto o Quartzo, uma forma natural de sílica, apresenta dureza de 7 na escala Mohs (BABISK, 2009).

Conforme Shelby (2000), a dureza de vidros silicatos possuem alto grau de variação, pelo método de microindentação Vickers, a dureza de um vidro de sílica pura é de 6,0 GPa, e os valores dos diversos tipos de vidro silicatos estão dentro de aproximadamente 30% deste valor.

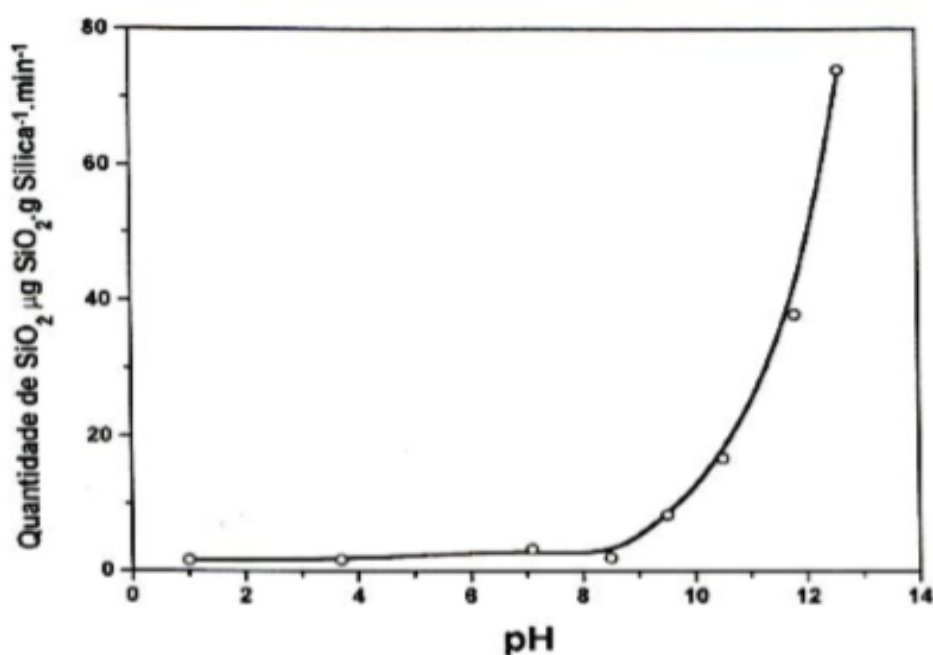
3.2.5.4 Durabilidade química

Dentre as características apresentadas pelos vidros, destaca-se a durabilidade química. Os aspectos que promovem essa característica, são os empregos de óxidos estabilizantes, destacando o CaO, dentre outros, como MgO e Al₂O₃, que também são importantes (NAVARRO, 2003). A adição do óxido de cálcio melhora a durabilidade química do vidro mantendo a temperatura de fusão, ou seja, sem os inconvenientes de silicatos alcalinos. Isto ocorre por sua bivalência e a tendência de formação de vidro ser mantida, pois, somente um cátion é suficiente para neutralizar a carga negativa de dois oxigênios não-pontantes. Mesmo os melhores vidros, conforme Ackerman (2000), não podem ser considerados rigorosamente inertes, sofrendo solubilidade quando em contato com solução aquosa em certas condições. São bons resistentes

às soluções ácidas (exceto ácido fluorídrico) e levemente básicas ($\text{pH} < 9$), porém são atacados por soluções básicas.

Este comportamento pode ser observado no gráfico da Figura 12, em que é possível observar a retirada da sílica do vidro à medida que se varia o pH da solução. Quando se ultrapassa o pH 9, é expressivo o aumento da remoção de sílica do material.

FIGURA 12 – Quantidade de sílica removida de um vidro em função do pH da solução



Fonte: Ackerman (2000).

O ataque da água em relação ao vidro, é conhecido como ataque hidrolítico. Neste ataque químico, a princípio, parte dos íons de hidrogênio da água tendem a se difundir no vidro, removendo uma quantidade equivalente de sódio do vidro para a água ou solução de contato, acarretando a formação de hidróxido de sódio (NaOH). Como resultado, ocorre um leve aumento do pH da solução, se tornando básica (JAIME e DANTAS, 2009).

3.2.5.5 Resistência ao choque térmico

O vidro, é um bom isolante térmico. A resistência à passagem de calor, faz com que, quando uma de suas faces seja aquecida, demore um certo tempo para que o calor atravesse e aqueça a outra. Como resultado, gera-se na outra face, tensões externas de tração na superfície fria, que levam à fratura quando superiores às que o vidro pode suportar. Valores de condutividade térmica do vidro e de outros materiais se encontram na Tabela 2 (ACKERMAN, 2013).

TABELA 2 – Condutividade térmica do vidro e de outros materiais

Material	Condutividade Térmica (W/m.K)
Vidro	1
Alumínio	237
Cobre	401
Tijolo de isolamento	0,15

Fonte: Adaptado de Ackerman (2013).

A capacidade do vidro de resistir aos choques térmicos, é inversamente proporcional à dilatação quando o mesmo é aquecido, quanto maior a dilatação, menor a resistência do vidro às mudanças de temperatura. Por sua vez, a dilatação térmica depende da composição química dos vidros: para de vidros soda-cálcicos, peças de 4 a 5 mm de espessura, suportam cerca de 60°C de diferença de temperatura (ACKERMAN, 2000).

Além de óxidos que podem afetar positivamente a resistência ao choque térmico, existe um processo chamado “têmpera”. A têmpera deixa a superfície do vidro já em compressão, resultando na necessidade de maior temperatura para anular o efeito da superfície do vidro, podendo resistir temperaturas de até 200°C (ACKERMAN, 2013).

3.2.5.6 Resistência mecânica

Há uma certa confusão quando se trata na resistência do vidro, muitos julgam como um material fraco, quando na verdade o vidro é um material frágil e pouco resistente à impactos, porém, não fraco.

Segundo Ackerman (2000), para calcular a resistência de um material frágil, são necessários modelos teóricos. A resistência do vidro se dá em função da força exercida para quebrar a ligação de seus átomos, cujo valor é da ordem de 21 GPa. Porém raramente alcança-se este resultado. Em condições especiais, esta força pode chegar a 15 GPa. Em vidros comuns, como os de garrafas de cerveja e janelas, a resistência é da ordem de 0,01 a 0,1 GPa. Alguns valores de resistência mecânica são demonstrados na Tabela 3.

TABELA 3 – Resistência mecânica real do vidro em diversas situações

Resistência Kg/mm ²	Situações
2100	Resistência teórica
100 - 1500	Resistência das fibras de vidro
100 - 500	Resistência de vidros polidos a ácido
20 - 100	Resistência de objetos de vidro c/ leve danificação da superfície
4 - 20.	Resistência de objetos de vidro manuseados normalmente
0 - 4	Resistência de objetos de vidro c/ forte danificação da superfície

Fonte: Adaptado de Ackerman (2000).

A explicação para a grande discrepância entre valores teóricos e práticos de resistência do vidro, se dá pelo estado de superfície do vidro, ou seja, riscos, trincas, quaisquer imperfeições, mesmo que microscopicamente, reduzem expressivamente o valor de sua resistência. Isto ocorre porque, nestes defeitos, são geradas tensões, muitas vezes, até maiores que tensões externas ao ser aplicada em vidros. Porém, com a aplicação de tensões externas, tensões geradas pelas imperfeições tendem a se propagar. Em suma, falhas atuam como amplificadores de tensão ocasionando a ruptura do vidro (ACKERMAN, 2013).

Barros (2010), expressa alguns valores de resistência mecânica do vidro, tais como:

Resistência à compressão – Para vidros comuns, cerca de 1000 MPa, ou seja, para quebrar um cubo de vidro de 1 cm de lado, a carga necessária será de ordem de quase 10 toneladas, aproximadamente.

Resistência à tração – Varia de 30 a 70 MPa e depende da duração da carga para cargas permanentes, podendo diminuir a resistência em até 40%, o fator da umidade, também pode diminuir cerca de 20% desta resistência, entre outros.

Resistência à flexão – Para esta, em vidros recozidos, a resistência é da ordem de 40 MPa, já em vidros temperado, a mesma pode variar de 120 a 200 MPa.

Pouco pode se fazer quimicamente para o aumento de resistência mecânica do vidro, pois, na prática, os fatores que determinam o estado de superfície, são significativamente maiores que a força de ligação dos seus átomos. Entretanto, a sua superfície pode ser protegida com o emprego de rótulos, ou depósitos superficiais que aumenta a dureza dificultando o surgimento de defeitos. Além disso, a têmpera, processo citado no item 2.7.5, também dificulta a penetração de trincas e sua propagação.

3.2.5.7 Cor

Os vidros tem boa capacidade de transmitir luz que neles as incidem, sendo essa, a razão de sua transparência. Segundo Babisk (2009), os vidros podem ser coloridos propositalmente com a introdução de minerais, compostos ou de óxidos metálicos, de acordo com a coloração desejada, como observado no Quadro 2.

QUADRO 2 – Colorantes utilizados na fabricação de vidros

Compostos	Cor
Óxido de ferro	Verde, marrom
Óxidos de manganês	Âmbar escuro, ametista, incolor
Óxido de cobalto	Azul escuro
Cloreto de ouro	Vermelho rubi
Compostos de selênio	Tons vermelhos
Óxidos de carbono	Âmbar, marrom
Mistura de manganês, cobalto e ferro	Negro
Óxidos de antimônio	Branco
Óxidos de urânio	Verde amarelado (brilha no escuro)
Compostos de enxofre	Âmbar, marrom
Compostos de cobre	Azul claro, vermelho
Compostos de estanho	Branco
Chumbo com antimônio	Amarelo

Fonte: Adaptado de Helmenstine (2018).

Conforme Ackerman (2013), a cor do vidro, além dos aspectos estéticos, possui função de filtrar determinadas radiações de luzes indesejáveis, como exemplo, embalagens de bebidas e medicamentos são geralmente envasadas em vidros verdes ou marrom para que a radiação ultravioleta não deteriore o conteúdo das mesmas.

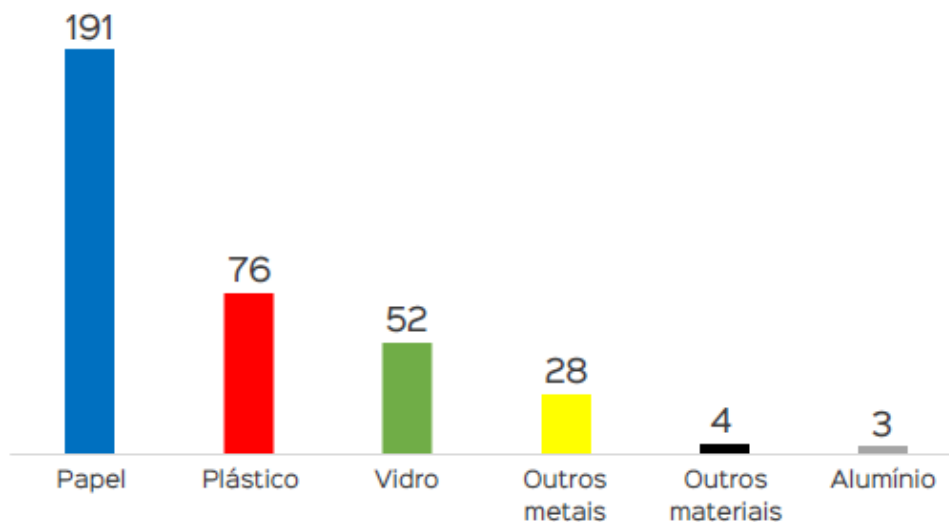
Em janelas, além da proteção contra a luz ultravioleta, a cor afeta na passagem do infravermelho responsável pelo aquecimento de mobiliários, além de proporcionar maior conforto térmico ao ambiente em que seja empregado.

3.2.6 Resíduos de vidro

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Vidro - ABIVIDRO (2019) no Brasil, o mercado produziu em 2018 mais de 8,6 bilhões de unidades de garrafas por ano, o que equivale a 1,3 milhões de toneladas de vidro.

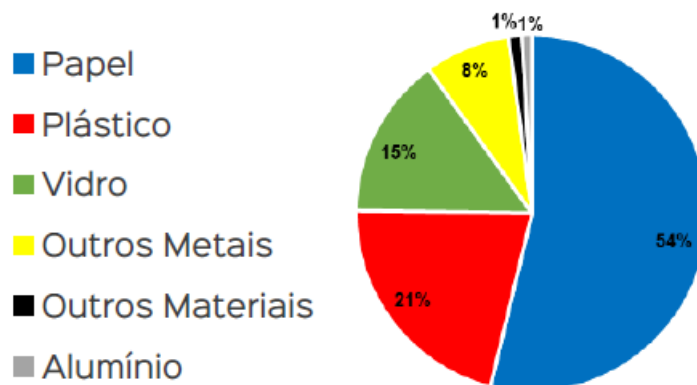
Do volume total de RSU gerados em 2019, apenas 354 mil toneladas de resíduos recicláveis foram coletadas. Do volume total de vidro produzido, apenas 52 mil toneladas de vidro foram coletadas para a reciclagem. Este montante, representa cerca de 10% do volume total de RSU que vão para a reciclagem, conforme Figuras 13 e 14 (ANCAT, 2020).

FIGURA 13 – Volume total coletado por material pelas cooperativas e associações em 2019 (em mil toneladas).



Fonte: ANCAT (2020)

FIGURA 14 – Participação de cada material no volume total coletado em 2019.



Fonte: ANCAT (2020)

Estes índices resultam em milhares de toneladas de vidros descartados, ocasionadores passíveis de impactos à sociedade durante milhares de anos. O Quadro 3 mostra o tempo de decomposição dos vidros de acordo com algumas referências.

QUADRO 3 – Tempo de decomposição do vidro

TEMPO DE DECOMPOSIÇÃO DO VIDRO	
Fonte	Tempo
Campanha Ziraldo	1 Milhão de anos
Comlurb website	Indefinido
SMA São Sebastião	> 10 Mil anos
DMLU POA	Indeterminado
UNICEF Website	4 Mil anos

Fonte: Adaptado de ANAVIDRO (2013).

Milhares de toneladas de vidro produzido não são reciclados no Brasil, equivalente a pouco mais que 1,2 milhões de toneladas. Este percentual corresponde aos vidros não retornáveis e inadequadamente dispostos, causando impactos ambientais e ocupação de área.

No Brasil, 2,34% de todo o RSU corresponde ao vidro. Apesar de pequena a porcentagem, o fato de o material não ser biodegradável dificulta a operação das usinas de triagem e compostagem, que precisa separá-lo por processos manuais e mecânicos. A fundição a 1500°C deste tipo de resíduo, causa efeitos abrasivos aos

fornos e equipamentos de transporte deste material (DIAS e CRUZ, 2009). Questões de custos, juntamente com a pureza do resíduo e transporte para usinas de reciclagem, impactam negativamente para empresas no processo de reciclagem primária, em que o resíduo é convertido em produtos do mesmo tipo de uso.

Entretanto, a reciclagem secundária, é uma ótima alternativa para livrar de impactos ambientais. O montante de resíduo de vidro não biodegradável que se acumulam em aterros e lixões, neste modelo de reciclagem, permite empregar ao resíduo, um novo produto e/ou uso diferente do originalmente produzido (BARDINI e MARCHIORO, 2007).

3.2.7 Garrafas Long Neck

Segundo Popadiuk e Strehlau (2003), na área de bebidas, exceto água e refrigerante, as embalagens de vidro predominam em relações a outros materiais. Os mesmos, afirmam que a distribuição de cerveja, é feita em sua maior parte em embalagens retornáveis, garrafas de 600 ml (67%), barris (4%), e apenas 29% são distribuídos em embalagens não retornáveis, sendo, latas (26%) e garrafas long neck (3%).

Conforme a CERVBRAIL (2018), o setor cervejeiro nacional foi responsável por 1,6% do PIB do País, registrando em 14,1 bilhões de litros por ano, em 2018. Neste contexto os dados de Popadiuk e Strehlau (2003) sugerem que as garrafas long neck, mesmo que comparados aos demais tipos de envases de cerveja, seu valor é ínfimo. Esta parcela representaria cerca de 423 milhões de litros, considerando garrafas long neck de 355 ml, totalizaria aproximadamente 1,2 bilhões de unidades.

Visando atender interesses industriais na competitividade de embalagens, entre vidro e alumínio, as embalagens tipo long neck foram criadas, retirando alguns componentes químicos que davam certo peso à embalagem. Isso resultou em decréscimo da sua resistência, o que implica na não reutilização dessas embalagens pelas empresas, ou seja, após o consumo do produto, o material é tratado como lixo, gerando problemas ambientais (FUNVERDE, 2009).

Devido a estes problemas ambientais e à fragilidade maior de embalagens long neck por ter sua resistência mecânica comprometida, a mesma se torna uma ferramenta potencial de agressão em eventos. Em vista disso, vários projetos de leis

foram propostos para minimizar esta situação, como, por exemplo, a PL 1574/2007, segundo a Câmara dos Deputados (2007) que proíbe a industrialização e a comercialização de cerveja em garrafa de vidro não-retornável, conhecida no mercado como "long neck".

Em Foz do Iguaçu, a Câmara Municipal (2012), aprovou o projeto de Lei Nº 4/2012 que tornou obrigatória a coleta e destinação final pelos revendedores de bebidas em embalagens de vidro do tipo long neck. Também, aprovado o projeto de Lei Nº 28/2017 pela Câmara Municipal da Serra (2017), que proibiu a venda de bebidas em garrafas de vidro long neck, em eventos artísticos, culturais e esportivos do município.

Com a preocupação com a destinação final destas embalagens, a integridade física dos consumidores e catadores de garrafas long neck e a quantidade de unidades geradas por ano, justifica-se a realização de estudos para reutilização dos resíduos provenientes destas garrafas em novos produtos.

3.3 Matriz cimentícia

As matrizes cimentícias são compostas de aglomerantes minerais, podendo conter agregados, nos quais, dão origem a pastas, argamassa ou concretos. As matrizes mais utilizadas são as de cimento Portland (SILVA ET AL., 2012).

3.3.1 Breve histórico

A palavra cimento, originada do latim *CAEMENTU*, o qual designava-se na antiga Roma, espécie de pedra natural de rochedos. Imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por mistura de gesso calcinado, o que remontam a origem do cimento a cerca de 4.500 anos. Panteão e o Coliseu, obras gregas e romanas, respectivamente, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorim ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob adição de água (SNIC, 2004).

John Smeaton, em 1756, conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos, marcando um grande passo no desenvolvimento do cimento. Mais à frente, em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários, sendo então, considerado como o inventor do cimento artificial (ABCP, 2002).

Ao queimar conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino, o construtor Inglês Joseph Aspdin, percebeu que após secas, essas pedras tornavam-se tão duras quanto as pedras empregadas nas construções. Em 1824 foi criado o cimento Portland, patenteado por Aspdin, o nome dado a sua invenção, foi inspirado na semelhança em cor e dureza de pedras de Portland, ilha situada no Sul da Inglaterra, naquela época, muito usada em construções (ABCP, 2002).

No Brasil, a primeira tentativa de aplicar os conhecimentos relativos à fabricação do cimento Portland ocorreu em 1888, quando em sua fazenda em Santo Antônio, no Estado de São Paulo, o comendador Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica, posteriormente, várias iniciativas esporádicas de fabricação de cimento foram desenvolvidas. Os primeiros registros de produção de cimento datam dos primórdios da indústria brasileira, em finais do século XIX, em 1892, no Estado da Paraíba, apesar de o funcionamento da unidade industrial durar por apenas três meses (SUZIGAN, 1972). A usina de Rodovalho operou no período de 1897 a 1904, cessando suas atividades após este período. Em 1907, voltou a funcionar, porém extinguiu-se definitivamente em 1918. O governo do Espírito Santo fundou, em 1912, em Cachoeiro do Itapemirim, uma fábrica que funcionou até 1924, sendo paralisada, voltou a funcionar em 1936, após modernização (ABCP, 2009).

Conforme Santos (2011), nos finais dos anos 1960 e início dos anos 1970, devido ao forte crescimento da atividade econômica no Brasil, o consumo interno foi abastecido com as importações que, no entanto, passaram a responder por algo em torno de apenas 2% da demanda doméstica. A elevação do consumo de cimento durante os anos 1970 de 9,3 para 24,8 milhões de toneladas deveu-se, sobretudo, às políticas habitacionais sob a tutela do Estado - por meio do Banco Nacional da Habitação (BNH) - e aos grandes projetos de engenharia, entre eles a construção de hidrelétricas, rodovias e pontes.

A produção em 1999 alcançou um recorde 40 milhões de toneladas de cimento, devido, especialmente, ao advento do Plano Real. A partir de 2000, sucessivas crises mundiais e consequente instabilidade econômica, provocou queda na produção do cimento Portland (SNIC, 2004).

SNIC (2019), informa que a produção de cimento Portland, no período de abril de 2018 a março de 2019, as vendas acumuladas atingiram 53 milhões de toneladas de cimento, uma redução de 0,1% em comparação com o mesmo período anterior (abril de 2017 a março de 2018).

3.3.2 Cimento Portland

De um modo geral, Pfeil (1985), denomina o cimento como, qualquer material capaz de unir agregados com o objetivo de formar um corpo sólido. O cimento Portland, composto de clínquer e adições, tem propriedade aglutinantes em sua composição. Ao entrar em contato com a água, o pó do cimento endurece e permanece neste estado, a menos que sofra interferência mecânica. Também é considerado o elemento quimicamente mais ativo numa matriz cimentícia.

“O clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa, então, um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C. O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno, o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó. O clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso, e, em seguida endurece adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante” (ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

A fabricação de diversos tipos de cimento é possibilitada por adições de diversos materiais, feitas ainda na fase de moagem. Estes materiais consistem em outras matérias-primas como o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e carbonáticos. Dentre as adições, o gesso, é um dos materiais mais importantes e está presente em todos os tipos de cimento Portland. O gesso tem como

função, controlar o tempo de pega do cimento, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído, quando este é misturado com água. Caso não houvesse a adição de gesso, o endurecimento do clínquer ao contato com a água de hidratação seria quase que instantaneamente, inviabilizando seu uso em obras. Em geral, a quantidade de gesso adicionada é de 3% para 97% de clínquer, em massa (ABCP, 2002).

Conforme Filho et al. (2017) a produção mundial de cimento, em 2016, totalizou 4.200 milhões de toneladas (Mt), uma elevação de 2,4% em relação ao ano anterior (4.100 Mt). O Brasil permaneceu como o maior produtor da América Latina, com 57,6 Mt, que responderam por 1,4% da produção global.

3.3.3 Composição química do cimento Portland

Os resultados de análises químicas expressam, em óxidos, os elementos presentes no cimento Portland. Mehta e Monteiro (1994) mostram os compostos do clínquer conforme observado na Tabela 4.

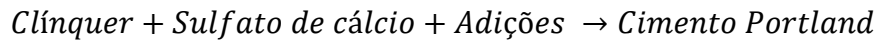
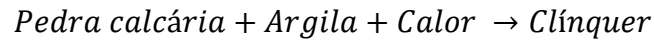
TABELA 4 – Óxidos compostos do clínquer e suas abreviações

Óxido	Abreviação	Compostos	Abreviação
CaO	C	3 CaO. SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2 CaO. SiO ₂	C ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3 CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4 CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	4 CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ A ₃ S
SO ₃	S	3 CaO. 2SiO ₂ . 3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H ₂ O	H	CaSO ₄ . 2H ₂ O	CSH ₂

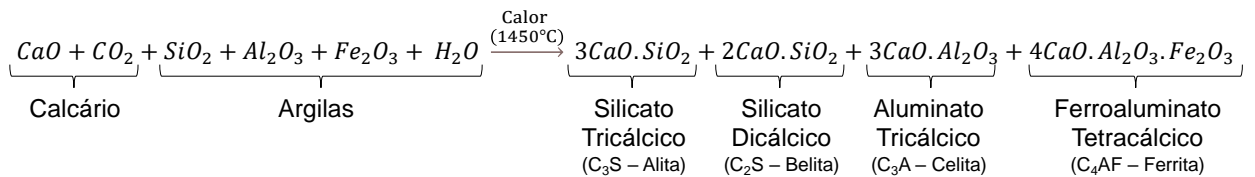
Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (1994).

Os constituintes fundamentais do cimento Portland são: a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), certa quantidade de magnésio (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO₃), adicionado pós calcinação como mecanismo retardador de tempo de pega do produto. Em menor quantidade, o cimento Portland apresenta outros componentes, tais como: impurezas, óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O), óxido de titânio (TiO₂), dentre outras substâncias de menor importância. Denominados álcalis do cimento, são constituídos pelos óxidos de sódio e potássio. (PERUZZI, 2002).

Conforme Mehta e Monteiro (1998), as reações químicas que ocorrem na formação do cimento podem ser representadas como:



Em representação estequiométrica, a formação do clínquer ocorre conforme Equação 1:



Os constituintes fundamentais responsáveis pela resistência mecânica do cimento são o silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), mais conhecido como Alita (C_3S) e o silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), na fase β , conhecido como Belita (C_2S). O aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), conhecido como aluminato tricálcico (C_3A), é o componente que se hidrata mais rápido, porém tem pouca contribuição para a resistência mecânica da pasta. Já o ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), conhecido como Ferrita (C_4AF) tem a função de equilibrar a composição química da pasta, apresentando uma boa estabilidade química, porém, praticamente não contribui com a resistência mecânica do cimento (METHA e MONTEIRO, 1998).

Conforme Kattar e Almeida (1999) e Neville (1997), pode-se resumir as propriedades dos principais constituintes do cimento conforme a Tabela 5.

TABELA 5 – Propriedades dos principais componentes do cimento

Propriedades	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Resistência em pequenas idades	Alta	Fraca	Boa	Fraca
Resistência em idades posteriores	Boa	Boa	Fraca	Fraca
Velocidade de hidratação	Média	Lenta	Rápida	Rápida
Liberação de calor durante a hidratação	Média	Pequena	Grande	Média

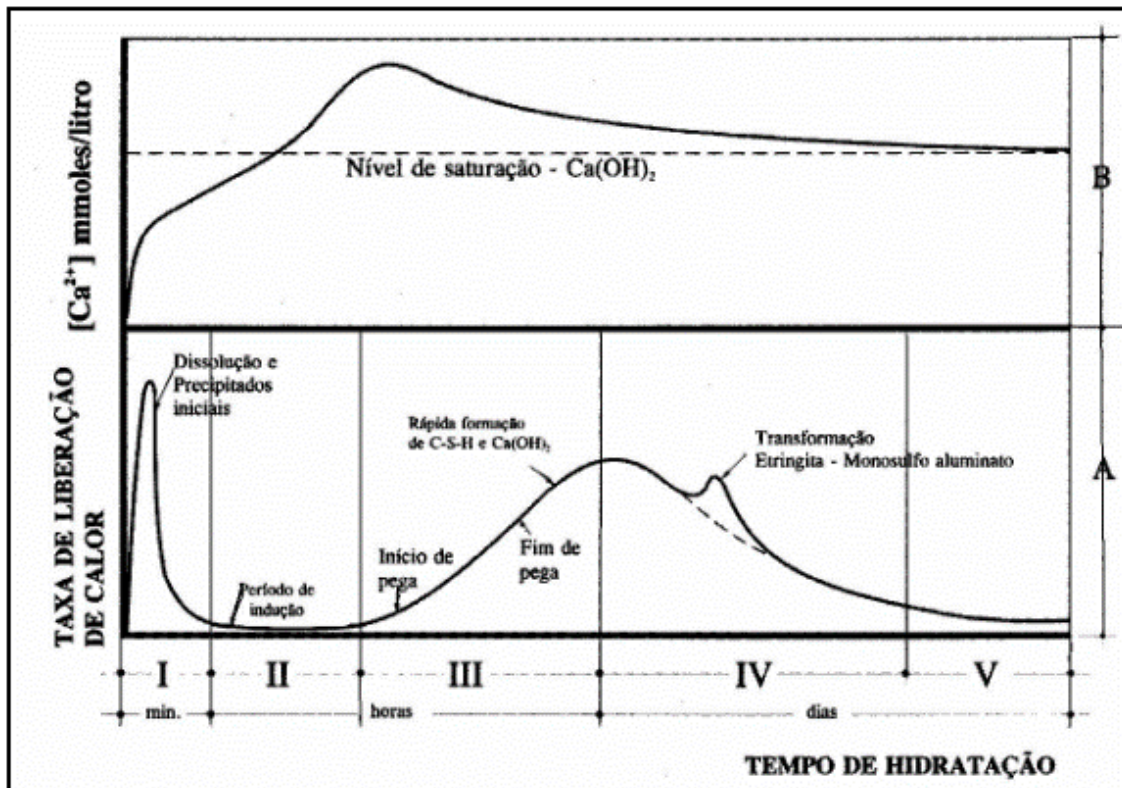
Fonte: Adaptado de Kattar e Almeida (1999) e Neville (1997).

3.3.4 Hidratação do cimento Portland

Imediatamente ao ocorrer contato do cimento com a água, inicia-se uma troca de espécies iônicas entre os sólidos e a fase líquida. Alguns componentes do clínquer possuem elevados teor de solubilidade e, durante a hidratação, aumentam rapidamente a concentração de aluminatos, sulfatos e álcalis (sódio, potássio e cálcio) na fase líquida (JAWED ET AL., 1983).

Jawed et al. (1983) também afirmam que, com a dissolução das fases anidras do clínquer, ocorre a formação de compostos com solubilidade menor, precipitando hidratos na fase endurecida do cimento. Conforme a Figura 15, observa-se o mecanismo de hidratação do cimento dividido em cinco etapas: estágio inicial (I), período de indução (II), período de aceleração (III), período de desaceleração (IV) e estágio final ou período de reação lenta (V).

FIGURA 15 – Representação esquemática da liberação de calor e: (A) a concentração de Ca^{2+} em solução; (B) durante a hidratação do cimento Portland



Fonte: (QUARCIONI, 2008).

Estágio Inicial (I) ou pré-indução: a combinação exotérmica de molhagem das partículas e de reações iniciais de dissolução de sulfatos alcalinos e liberação de íons K^+ , Na^+ e SO_4^{2-} , dissolução de sulfato de cálcio até a saturação, a liberação de íons de Ca^{2+} e SO_4^{2-} promovem o pico inicial neste estágio. Também, neste estágio é formado um gel silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que reveste a superfície dos grãos anidros do clínquer (QUARCIONI, 2008).

Período de indução (II): neste período há a formação de uma barreira entre as fases anidras e a solução aquosa, devido a uma camada de gel depositada sobre os grãos anidros do cimento. Este gel é originado a partir da precipitação inicial da etringita, em menor escala, de C-S-H, sendo rico em sílica e alumínio e com íons de cálcio e sulfato (KADRI e DUVAL, 2002). Este período possui duração aproximada entre 30 minutos e 3 horas, que se finaliza quando a camada de gel depositada sobre os grãos de clínquer é destruída ou se torna mais permeável à difusão iônica (QUARCIONI, 2008).

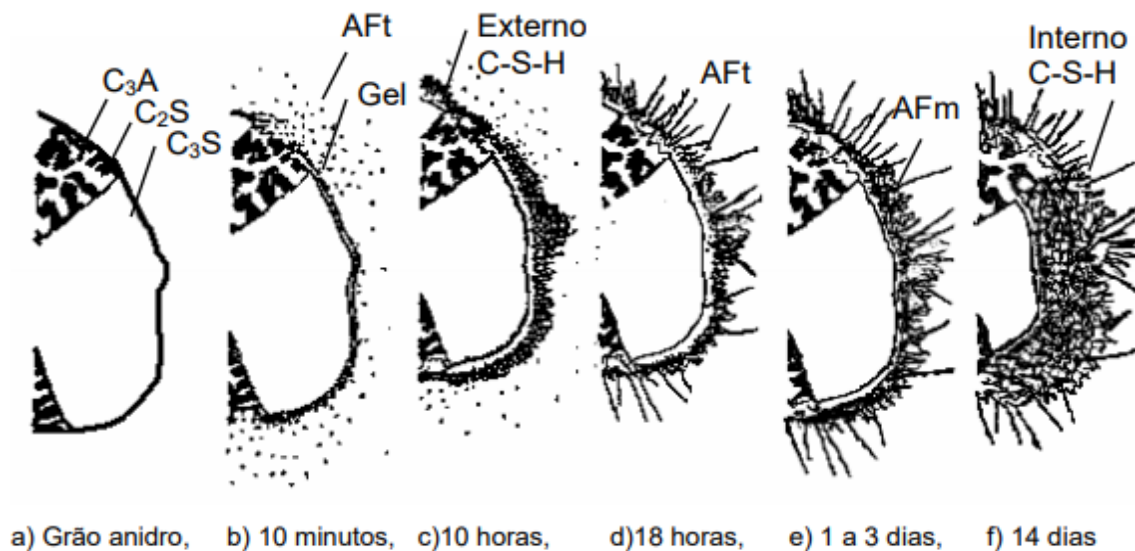
Período de aceleração (III): neste período, predomina a dissolução-precipitação, com conseqüente supersaturação iônica da fase aquosa e rápida formação de C-S-H, que controla a taxa de hidratação. É neste período que se dá o fenômeno de pega, no qual os silicatos, sobretudo a alita (C_3S), passam a se hidratar rapidamente até atingirem a taxa máxima de hidratação ao final desse período, que corresponde ao máximo calor liberado. Ocorre também a precipitação da etringita. (QUARCIONI, 2008).

Período de desaceleração (IV): marcado pelo início da diminuição gradual da taxa da evolução do calor, dado à redução gradual na concentração de íons em solução, em virtude da precipitação de hidratos que recobrem as partículas do cimento e dificultam a solubilização das fases anidras (KADRI e DUVAL, 2002). Neste período as reações passam a ser controladas por difusão iônica ou reação topoquímica. Alguns cimentos com C_3A , em geral, maior que 12%, exibem um ombro característico na curva de calor de hidratação, em aproximadamente 16h, e está associado a uma nova formação de etringita (fase Aft). (QUARCIONI, 2008).

Estágio final (V): Com o crescimento dos produtos de hidratação são preenchidos gradativamente os espaços ocupados inicialmente pelo excesso de água de mistura, com densificação da pasta, e as reações de hidratação prosseguem por mecanismo topoquímico (TAYLOR, 1998).

Conforme Scrivener (1989), é possível observar o desenvolvimento da microestrutura do cimento Portland, de acordo com seu mecanismo de hidratação, por meio da microscopia. Este desenvolvimento microestrutural é demonstrado no diagrama esquemático da Figura 16.

FIGURA 16 – Diagrama esquemático do desenvolvimento microestrutural durante o período de hidratação do cimento Portland



Fonte: Scrivener (1989).

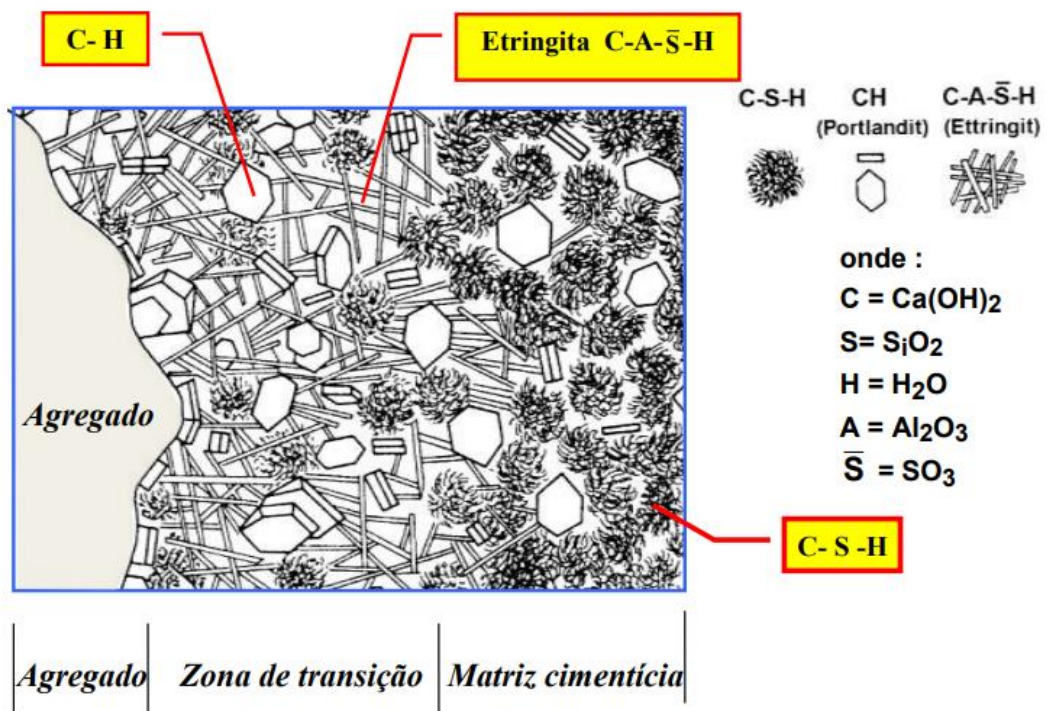
O desenvolvimento da microestrutura com o tempo é descrito por Paula (2006) como:

- Seção de um grão anidro de cimento Portland em contato com a água de hidratação;
- Há um aumento na concentração de íons. Neste início, formam-se lâminas de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) na superfície do C₃S e um gel amorfo rico em aluminato na superfície do C₃A. Aparece, então, a nucleação de pequenas agulhas de Aft (fase de formação da etringita). Após uma hora, formam-se pequenos bastões de etringita;
- Ocorrência de um rápido crescimento do C-S-H e CH (Hidróxido de cálcio), denominado período de aceleração. É a reação do C₃S para produzir C-S-H externo sobre a malha de Aft, deixando 1 μm entre a superfície do grão e a “carapaça” ou “casca” hidratada. C-S-H tem morfologia laminar e o CH precipita-se nos poros saturados como placas hexagonais;
- Neste estágio, a continuidade da hidratação do C₃S proporciona a formação de C-S-H no interior da carapaça hidratada. Crescimento secundário da Aft;

- e) Em decorrência da hidratação C_3A com Aft, forma-se discos hexagonais de Afm (Fase de formação de monossulfato). A contínua formação de produtos internos reduz a separação entre os grãos anidros e a concha hidratada;
- f) Neste estágio, forma-se C-S-H interno o suficiente para preencher o espaço entre os grãos e a carapaça. Nos estágios (e) e (f) (Figura 16), a estrutura indica evolução da hidratação nas idades mais avançadas, ou seja, quando os poros estão significativamente mais reduzidos.

O desenvolvimento da estrutura morfológica da hidratação do cimento Portland, pode ser observada, também, na Figura 17, em que são apresentadas as configurações de CH, C-S-H e Etringita.

FIGURA 17 - Desenvolvimento da estrutura morfológica do Cimento Portland



Fonte: Thomaz.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), é possível observar as principais características, forma e quantidade dos produtos da hidratação do cimento Portland, conforme Quadro 4.

QUADRO 4 – Principais características dos produtos da hidratação do cimento
Portland

Produto	Quantidade	Formas	Características
Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H)	50% a 60% do volume de sólidos	partículas de 1nm a 100nm	Arranjo irregulares de lamelas entrelaçadas; criam espaços de diferentes formas e tamanhos (5Å a 25Å); água capilar- vazios até 50Å; água livre - nenhum efeito na evaporação; água adsorvida - ligada por pontes de hidrogênio (15Å) - liberada em 30% U.R responsável pela retração de secagem
Portlandita Ca(OH)₂ ou CH	20% a 25% de volume de sólidos	crístais grandes prismas hexagonais 1 um	Sua contribuição para a resistência se dá por força de van der Walls
Sulfoaluminatos	15% a 20% de volumes de sólidos		Desempenham papel menos importante na resistência mecânica; vulneráveis ao ataque por sulfatos.

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (1994).

3.3.5 Cimento Portland composto com Fíler (CP II – F 32)

Dentre os diversos tipos de cimento Portland, o CP II – F 32 (Cimento Portland composto com Fíler) destaca-se por ser um dos mais utilizados no Brasil, por suas diversas possibilidades de aplicações.

O CP II tipo F, se enquadra nos compostos com adição de materiais carbonáticos, rochas moídas que apresentam carbonato de cálcio em sua composição, tais como o próprio calcário. Esta adição tem função de tornar concretos e argamassas mais trabalháveis, isso acontece porque os grãos ou partículas deste material tem dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas dos demais constituintes do cimento. Os materiais carbonáticos quando presentes no cimento são chamados de fíler calcário e funciona como um verdadeiro lubrificante melhorando a trabalhabilidade (ABCP, 2002)

Todos os tipos de cimentos são regidos por normas da ABNT. No Quadro 5, pode-se observar a composição, em massa, dos cimentos comuns e compostos em relação aos seus aditivos, segundo normas da ABNT.

QUADRO 5 – Composição dos cimentos Portland comum e composto

Tipos de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)			
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto forno (Sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)
Comum	CP I	95 - 100	0 - 5		
	CP I-S	90 - 94	0	0	6 - 10
Composto	CP II-E	51 - 94	6 - 34.	0	0 - 15
	CP II-Z	71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
	CP II-F	75 - 89	0	0	11 - 25.

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018)

Observa-se que a concentração de material carbonático varia de 11 a 25 %, em massa, para cimentos compostos tipo F. Conforme NBR 16697 (2018), os cimentos compostos correspondem a, aproximadamente, 75% da produção industrial brasileira, devido a sua regularidade na aplicação deste tipo de cimento, conforme sua influência estrutural em argamassas e concretos. No Quadro 6 pode-se observar a influência estrutural do CP II – F e os demais tipos de cimento.

QUADRO 6 – Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos

Propriedade	Tipo de cimento portland						
	Comum e composto	Alto -Forno	Pozolânico	Alta resistência inicial	Resistente aos sulfatos	Branco estrutural	Baixo calor de hidratação
Resistência à compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Muito maior nos primeiros dias	Padrão	Padrão	Menor nos primeiros dias e padrão no final da cura
Calor gerado na reação do cimento com a água	Padrão	Menor	Menor	Maior	Padrão	Maior	Menor
Impermeabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Resistência aos agentes agressivos (água do mar e de esgotos)	Padrão	Maior	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior
Durabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Maior	Padrão	Maior

Fonte: Adaptado de ABCP (2002)

As influências observadas no Quadro 6 são relativas e podem ser ampliadas ou reduzidas por meio da manipulação da quantidade, sobretudo do cimento de da água, e, em menor escala, dos agregados constituintes das argamassas ou concretos.

3.4 Atividade pozolânica

3.4.1 Materiais pozolânicos

Os materiais pozolânicos são definidos como materiais siliciosos ou sílico-aluminosos que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, depois de finamente divididos e na presença de água, reagem com CH. A partir deste efeito, formam compostos com capacidade aglomerante (ABNT NBR 12653: 2014).

Conforme Massazza (1993), o termo pozolana possui dois significados diferentes. O primeiro, rochas piroclásticas das vizinhanças de Pozzouli e das proximidades de Roma. O segundo, abrange os materiais inorgânicos, naturais ou artificiais, que, na presença de água, reagem, quando misturados com hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ou com materiais que liberam o CH, passando, assim, por um processo de “endurecimento” ou “enrijecimento”.

Os materiais pozolânicos, para viabilizar sua utilização, necessitam de um tipo de tratamento prévio, que variam desde uma simples moagem até tratamentos térmicos, como a calcinação (FREITAS, 2005).

A composição química de algumas pozolanas conhecidas, naturais e artificiais, é apresentada na Tabela 6, a qual apresentam característica comum a todas, alto teor de SiO_2 e Al_2O_3 .

TABELA 6 – Análise química de materiais pozolânicos conhecidos

Pozolana	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	TiO_2 (%)
Bacoli (Naples)	53,08	17,89	17,89	9,05	1,23	0,65	3,08	7,61	0,31
Opalina	65,40	10,10	10,10	4,60	2,70	-	-	-	-
Diatomita	86,00	2,30	2,30	-	0,60	-	-	-	-
Cinza Volante	41,49	22,14	22,14	9,48	4,98	1,24	0,94	2,12	0,80

Fonte: Massazza (1993).

Conforme a NBR 12653 (2014) itens, 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3, os materiais pozolânicos são divididos em três classes, segundo suas características físicas e procedências, sendo elas:

- 4.2.1 Classe N: Pozolanas naturais e artificiais que obedeçam aos requisitos desta Norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- 4.2.2 Classe C: Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas, que obedeçam aos requisitos desta Norma;
- 4.2.3 Classe E: Quaisquer pozolanas, não contempladas nas classes N e C, que obedeçam aos requisitos desta Norma.

Estes materiais devem estar de acordo com os requisitos químicos e físicos conforme sua classe, como apresentado na Tabela 7 e Tabela 8.

TABELA 7 – Requisitos químicos (Pozolanas)

Valores em porcentagem (%)

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio(*)
	N	C	E	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO ₃	≤ 4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	ABNT NBR NM 25

(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.

Fonte: ABNT NBR 12653 (2014).

TABELA 8 – Requisitos físicos (Pozolanas)

Propriedade	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 µm	< 20 %	< 20 %	< 20 %	ABNT NBR 15894-3(*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751

(*) Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas..

Fonte: ABNT NBR 12653 (2014).

3.4.2 Atividade pozolânica em matriz cimentícia

O item 3.1 da NBR 12653 (2014) define atividade pozolânica, como sendo: capacidade de determinado material de reagir com o hidróxido de cálcio em presença de água e formar compostos com propriedades cimentícias.

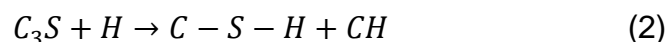
Utiliza-se o termo de reação pozolânica, para as reações que ocorrem entre os constituintes ativos da pozolana, hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e água. O progresso da reação pozolânica é comumente avaliado pela diminuição da concentração de Ca(OH)_2 livre no sistema (MASSAZZA, 1993).

O Ca(OH)_2 (CH), denominado Portlandita, ocupa entre 20% e 25% em volume do total dos produtos hidratados do cimento Portland. Tanto o processo de hidratação da Alita (C_3S), como da Belita (C_2S), podem resultar na produção de Portlandita, porém, no processo da hidratação da Alita a quantidade produzida de Portlandita é bem maior. Em vista disso, usa-se a hidratação da Alita para exemplificar a formação de CH.

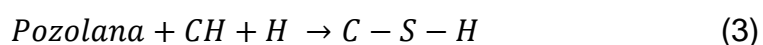
Mehta e Monteiro (1998), explica que as reações de hidratação da Alita (C_3S) e Belita (C_2S), dão origem ao silicato de cálcio hidratado C-S-H, e hidróxido de cálcio CH. O C-S-H responsável pela resistência do cimento, não tem composição fixa, enquanto o CH é solúvel e influencia na durabilidade da pasta, principalmente quando sujeita a meios ácidos.

Para compreender a reação principal de formação de C-S-H, é válido a comparação entre o cimento Portland e o cimento com material pozolânico, com a finalidade de entender as reações e as diferenças entre os seus comportamentos, para tal, pode-se observar as equações 2 e 3.

(x) Cimento Portland



(x) Cimento Portland Pozolânico



Nas equações (2) e (3):

C_3S : Silicatos tricálcico;

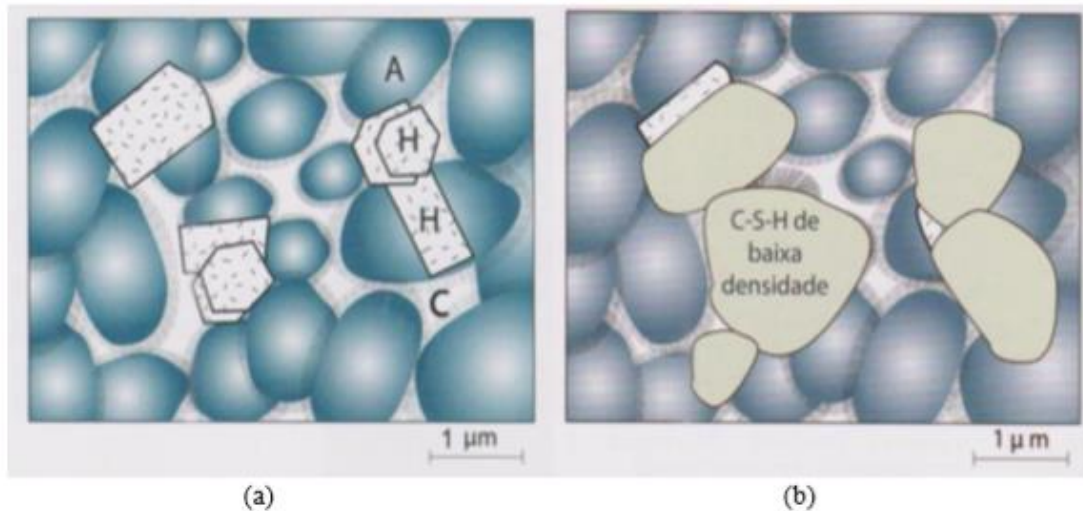
H: Água;

C-S-H: Silicatos hidratados de Cálcio;

CH: Hidróxido de cálcio.

A liberação de C-S-H de forma mais lenta, resultado do efeito da reação pozolânica, pode ser observado na Figura 18.

FIGURA 18 – Modelo de microestrutura (a) Pasta de cimento Portland Hidratada, (b) Pasta de cimento Portland Pozolânico



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Na Figura 18 (a) é possível notar a agregação de partículas de C-S-H (A), os produtos cristalinos hexagonais CH (H) e as cavidades capilares ou vazios (C). Já na Figura 18 (b), do cimento Portland Pozolânico, quando comparado ao cimento Portland comum, apresenta um preenchimento dos vazios capilares e os cristais de CH consumidos pelo gel de C-S-H, adicional da reação pozolânica. Logo, além do gel de C-S-H adicional e o consumo de CH, a reação lenta promove um refinamento dos poros da estrutura (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

A atividade pozolânica em cimentos Portland, resulta em três reações características. A primeira é a liberação de calor e ganho de resistência que ocorrem de forma lenta, devido à reação pozolânica ser, geralmente, uma reação lenta. A segunda, corresponde ao ganho de durabilidade da pasta hidratada frente a

ambientes ácidos, devido ao consumo do CH na reação, e, a terceira, é o aumento da resistência e da impermeabilidade do sistema, provocados pela eficiência no refinamento de poros e tamanho do grão.

3.4.3 Índice de atividade pozolânica

De acordo com Silva (2011), vários métodos são utilizados para a determinação do índice de atividade pozolânica (IAP), sendo esses, ensaios de resistência mecânica ou ensaios químicos.

Frías et al. (2005) classifica os métodos de determinação de IAP como diretos e indiretos. Os métodos diretos são baseados na avaliação da quantidade de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 que não reagiu. Dentre os métodos diretos temos as análises térmicas (TG/DTA/DSC). Os métodos indiretos são baseados em parâmetros ou ensaios mecânicos, tais como composição química, tamanho de partículas, ensaios de resistência mecânica normatizados.

3.4.3.1 Determinação de atividade pozolânica por análise térmica

A análise termogravimetria (TG) é um método amplamente utilizado para avaliar e medir as fases contidas na pasta de cimento endurecida, considerando a perda de água em intervalos de temperaturas específicas que os produtos de hidratação do cimento Portland sofrem (SILVA, 2011).

Roszczyński (2002) e Taylor (1990) afirmam que, a análise térmica, termodiferencial (DTA) e termogravimétrica (TG), é um dos melhores métodos para avaliar a atividade pozolânica. Por meio deste método é possível determinar a quantidade de CH na pasta de cimento, uma vez que, a sua redução seja resultado de atividade pozolânica.

A comparação da pasta de cimento sem material pozolânico, com a que possui o material, possibilita a avaliação do decréscimo da quantidade de CH, resultado da decomposição no intervalo de 450 a 550°C. (ROSZCZYŃSKI, 2002).

3.4.3.2 Determinação de atividade pozolânica por resistência mecânica

John et al. (2003), determina o IAP por meio de ensaios de resistência à compressão de misturas de cimento-pozolana. O ensaio é realizado aos 28 dias, com corpos-de-prova cilíndricos de argamassa, medindo 5 cm de diâmetro e 10cm de altura, traço 1:3 em massa (aglomerante:agregado) de cimento Portland sem pozolana. No ensaio, é comparada a resistência de uma mistura com o mesmo traço, em que 30% do volume do cimento foi substituído por pozolana. A eficiência da pozolana é avaliada pela relação entre as duas resistências, sendo necessário que a resistência da mistura seja superior a 75% da resistência da argamassa do cimento Portland referência, ensaio amparado pela NBR 5752:2014.

A determinação da atividade pozolânica também pode ser estabelecida pelo ensaio de compressão axial com a cal aos 7 dias, conforme 5751:2015 quando os mesmos apresentarem resultados superiores a 6 MPa, como estabelecido, também, nos requisitos físicos da NBR 12653:2014 (ABNT NBR 5751 (2015); ABNT NBR 12653 (2014)).

3.5 Estudos relacionados ao tema

3.5.1 Estudos sobre aplicação de resíduo de vidro em matriz cimentícia

Muitos estudos com foco na incorporação do resíduo de vidro na produção de outros materiais têm sido realizados. Na construção, a maior parte está voltada para aplicação em concretos e argamassas (SIMÕES, 2013). Alguns destes estudos podem ser observados no Quadro 7, em que são apresentados em ordem cronológica entre 2009 a 2013.

QUADRO 7 – Pesquisas analisadas referente a incorporação do resíduo de vidro em matriz cimentícia

Título e (Autor)	Ano	Origem	Publicação
Utilizing Waste Recycled Glass as Sand/Cement Replacement in Concrete. (Taha e Nounu)	2009	Inglaterra	Journal of Materials in Civil Engineering - December/09
Aplicação de resíduos ultrafinos de vidro moído em argamassa e concreto. (Paiva et al.)	2010	Brasil	52º Congresso Brasileiro do Concreto
Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates. (Chidiac e Mihaljevic)	2011	Canadá	Cement & Concrete Composites 33
Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. (Idir, Cyr e Tagnit-Hamou)	2011	França	Cement & Concrete Composites 33
Verificação das atividades pozolânicas do pó de resíduo de vidro em argamassas cimentícias. (Araújo et al.)	2011	Brasil	53º Congresso Brasileiro do Concreto
A cross mixture design to optimize the formulations of a ground waste glass blended cement. (Khmiri, Samet e Chaabouni)	2012	Tunísia	Construction and Building Materials 28
A comparative study on the feasible use of recycled beverage and CRT funnel glass as fine aggregate in cement mortar. (Ling e Poon)	2012	China	Journal of Cleaner Production 29-30
Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures. (Maier Durham)	2012	Estados Unidos	Construction and Building Materials 29
Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. (Matos e Souza-Coutinho)	2012	Portugal	Construction and Building Materials 36
Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled as partial replacement for cement. (Nassar e Soroushian)	2012	Estados Unidos	Construction and Building Materials 29
The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. (Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos)	2012	Portugal	Construction and Building Materials 31
Utilization of imploded glass in structural concrete. (Cassar e Camilleri)	2012	Malta	Construction and Building Materials 29
Use of waste as sand in mortar: Part I - Fresh, mechanical and durability properties. (Du e Tan)	2013	Cingapura	Cement and Concrete Composites 35
Use of waste as sand in mortar: Part II - Alkali-silica reaction and mitigation methods. (Du e Tan)	2013	Cingapura	Cement and Concrete Composites 35

Fonte: Simões (2013).

3.5.2 Estudos sobre aplicação de resíduo de vidro em argamassa

A escolha de pesquisas foi realizada considerando-se o aproveitamento do resíduo de vidro incorporado em argamassas, ou, em substituição parcial do agregado miúdo e/ou do material cimentício. O critério para escolha da substituição do material, varia de acordo o tamanho das partículas do resíduo de vidro, pois, por muitas vezes, os estudos mostravam que era necessário um processo de moagem adequado a fim de que as partículas de vidro obtivessem tamanho desejado. Maier e Durham (2012), citam que o tamanho das partículas tem papel de suma importância, uma vez que influenciam em possíveis reações álcali-sílica (RAS), prejudicando o desempenho mecânico e a durabilidade da matriz cimentícia.

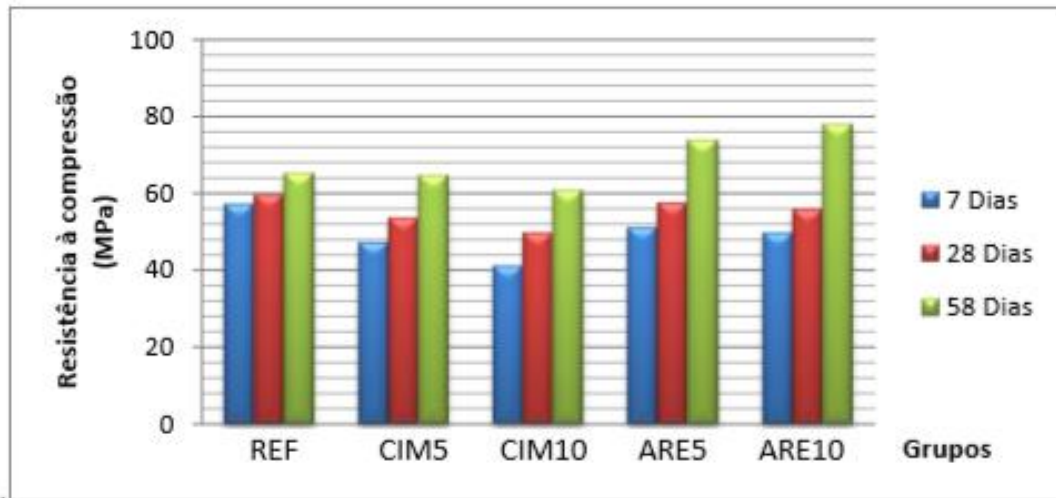
Kruger et al. (2002) substituíram o cimento Portland e os agregados miúdos por vidro moído (passante na peneira #200) em porcentagens de 5 e 10%. Foi verificado que apenas as substituições da areia pelo vidro moído apresentaram um ganho na resistência à compressão considerável, superando a amostra referência, conforme observado na Tabela 9 e Figura 19.

TABELA 9 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão (em MPa) nas diferentes idades de ruptura

Traço da argamassa	Idades de ruptura		
	7 dias	28 dias	58 dias
REF - Cimento e areia	57,08	59,77	65,17
CIM5 - Cimento, areia e 5% de vidro substituindo o cimento	47,13	53,54	64,59
CIM10 - Cimento, areia e 10% de vidro substituindo o cimento	41,01	49,63	60,76
ARE5 - Cimento, areia e 5% de vidro substituindo a areia	51,06	57,5	73,77
ARE10 - Cimento, areia e 10% de vidro substituindo a areia	49,52	55,74	78,07

Fonte: Adaptado de Kruger et al. (2002).

FIGURA 19 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão



Fonte: Adaptado de Kruger et al. (2002).

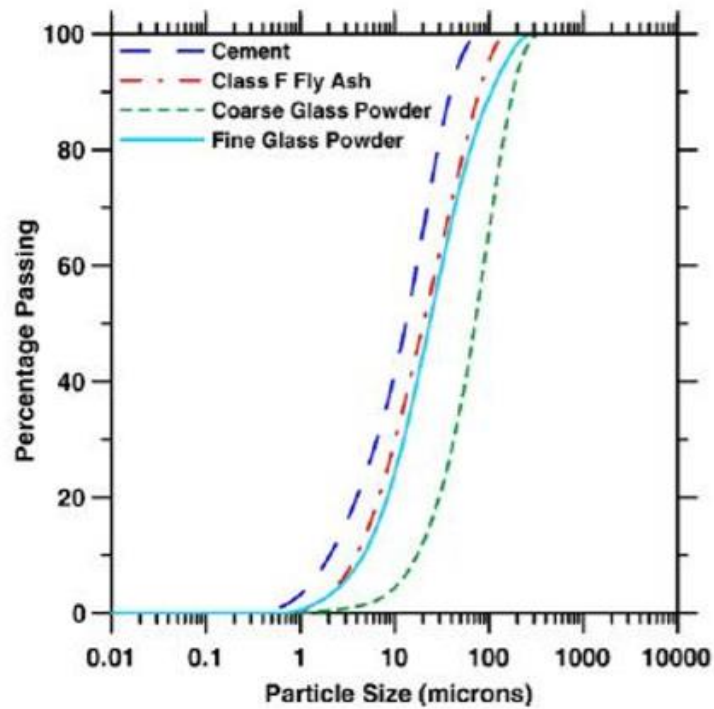
Matos e Coutinho (2012) substituíram parte do cimento por pó de vidro laminado proveniente de para-brisas de automóveis e analisaram algumas das propriedades das argamassas. Foi verificado ganhos significativos entre os 28 e 90 dias, o que indica a ocorrência de reação pozolânica.

Oliveira et al. (2013), estudaram argamassas com teores de substituição do cimento pelo resíduo de vidro nas proporções de 0, 10, 20, 25, 30 e 40%. Nenhuma das misturas alcançou resistência à compressão superior à da argamassa de referência, porém todas obtiveram um aumento considerável entre os 28 e 90 dias, indicando atividade pozolânica. Verificou-se, também, que a diminuição do tamanho da partícula implicava num aumento da resistência mecânica da mistura.

3.5.3 Estudos sobre atividade pozolânica de resíduo de vidro em matriz cimentícia

Schwarz e Neithalath (2008), realizaram estudos comparando vidro moído com cinzas volantes. Na Figura 20 é possível observar a granulometria dos materiais utilizados.

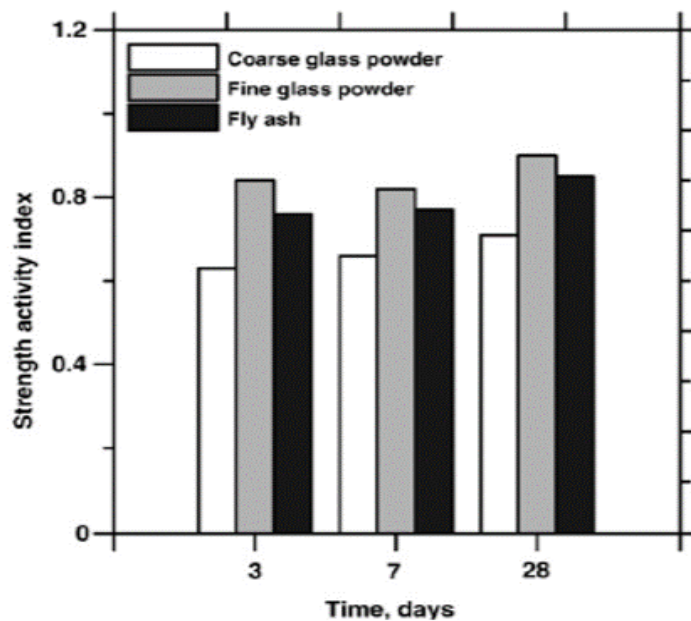
FIGURA 20 – Distribuição granulométrica dos seguintes materiais utilizados no estudo: cimento, pó de vidro e cinzas volantes



Fonte: Schwarz e Neithalath (2008).

Já na Figura 21 é possível observar o índice de atividade pozolânica dos vidros e das cinzas volantes.

FIGURA 21 – Índice de atividade pozolânica do vidro e cinzas volantes



Fonte: Schwarz e Neithalath (2008).

Observa-se que o vidro finamente moído exibiu níveis de pozolanicidade iguais ou maiores que as cinzas volantes em todas as idades estudadas.

Vários outros autores realizaram estudos que resultaram em índices de atividades pozolânica para o resíduo de vidro moído. Simões (2013), relaciona estes estudos na Tabela 10, na qual é possível observar o IAP conforme varia o tamanho das partículas de vidro.

TABELA 10 – Tamanho das partículas de vidro e índice de atividade pozolânica

Tamanho das partículas	Índice de atividade pozolânica	Pesquisadores
Tamanho médio de 5 μm	104%	Paiva et al. (2010)
$\leq 40 \mu\text{m}$	85%	Khmiri, Samet e Chaabouni (2012)
$\leq 75 \mu\text{m}$	90%	Matos e Souza-Coutinho (2012)
$\leq 75 \mu\text{m}$	85%	Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012)
$\leq 60 \mu\text{m}$	92% e 110%	Shi et al. (2005)
$\leq 100 \mu\text{m}$	90%	Idir, CyreTagnit-Hamou (2011)
$\leq 100 \mu\text{m}$	80%	Ismail e Al-Hashmi (2009)
$\leq 100 \mu\text{m}$	85%	Araújo et al. (2011)

Fonte: Simões (2013).

Publicações realizadas nos últimos anos, envolvendo a aplicação de resíduo de vidro em matriz cimentícia, são encontradas no Quadro 8.

TABELA 11 - Publicações de pesquisas referentes a incorporação de vidro em matriz cimentícia com análises de atividade pozolânica nos últimos anos.

Título e (Autor)	Ano	Origem	Publicação
A review of ground waste glass as a supplementary cementitious material: A focus on alkali-silica reaction. (Bueno et al.)	2020	Estados Unidos	Journal of Cleaner Production 257
Economic and life cycle assessment of recycling municipal glass as a pozzolan in portland cement concrete production (Tucker et al.)	2018	Estados Unidos	Resources, Conservation & Recycling 129
A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products (Jiang et al.)	2019	Malásia	Journal of Environmental Management 242

New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure (Guo et al.)	2020	China	Construction and Building Materials 257
Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar (Patel et al.)	2019	India	Construction and Building Materials 199
Performance evaluation of sustainable high strength mortars incorporating high volume waste glass as binder (Liu et al.)	2019	Holanda (Países Baixos)	Construction and Building Materials 202

Fonte: O Autor.

Índices ambientais sustentáveis já apontam uma redução de 20% no impacto ambiental ao substituir cimento pelo pó de vidro Patel et al. (2019) 20% sugere viabilidade na substituição de 20% para pó de vidro de 63 µm, entretanto, para partículas de vidro com 75 µm o nível de substituição é limitado a 10-15%.

Embora muitos trabalhos da literatura mostrem estudos sobre a substituição parcial de cimento ou areia por vidros em matriz cimentícia para avaliação do seu comportamento pozolânico, um consenso sobre os efeitos de sua incorporação ainda não foi alcançado, sendo necessário novas perspectivas para a aceitação da indústria ao utilizar este resíduo (GUO ET AL., 2020).

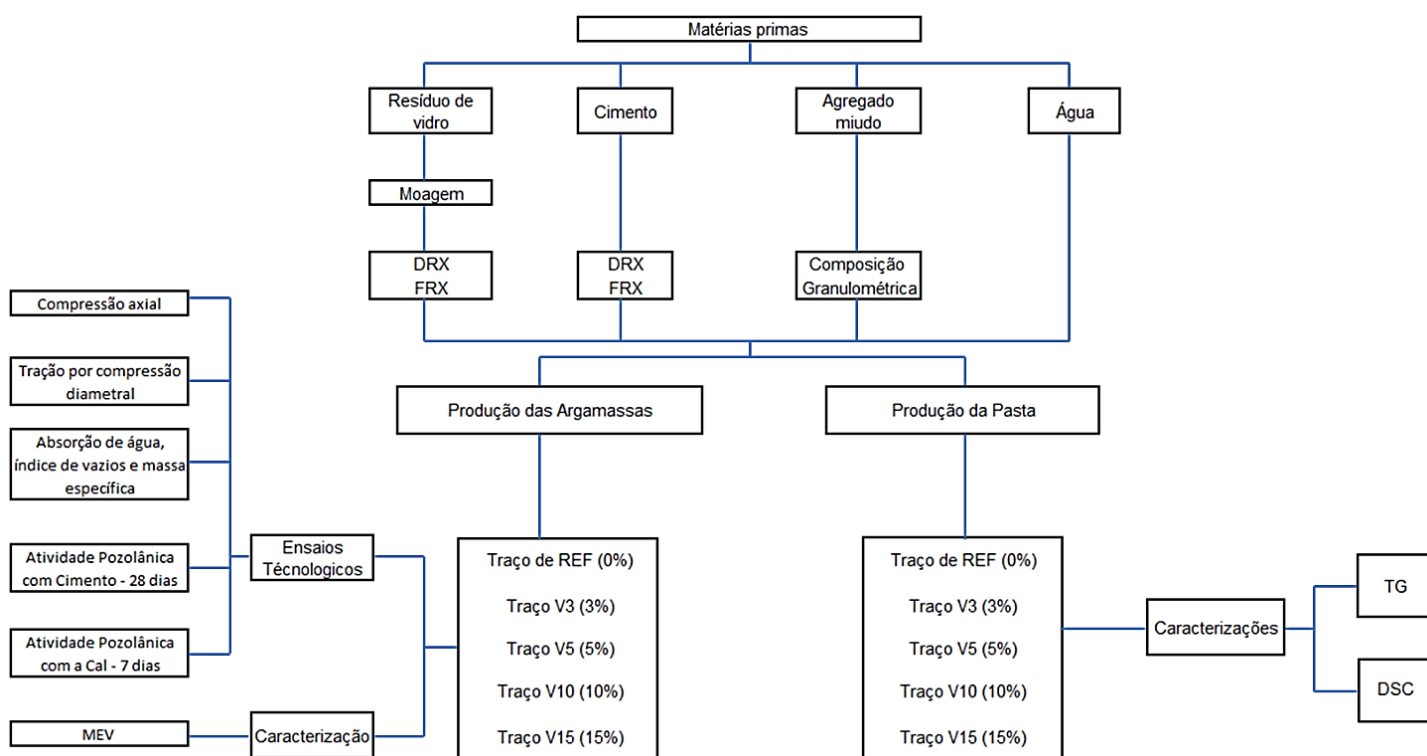
É neste contexto que a proposta deste trabalho se fundamenta. Além de utilizar um vidro residual, este é adicionado à matriz cimentícia com diferentes granulometrias, para, então, avaliar sua contribuição adicional à atividade pozolânica desta matriz e contribuir com novas perspectivas sobre os efeitos desta incorporação.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Desenvolvimento experimental

A Figura 22 mostra um fluxograma contendo as principais etapas desenvolvidas neste trabalho. Cada etapa será descrita, com detalhes, mais adiante.

FIGURA 22 - Diagrama de blocos esquematizando o programa experimental



Fonte: O autor

4.2 Materiais

4.2.1 Vidro

As garrafas de vidro do tipo long neck foram coletadas em um estabelecimento comercial, na cidade de Presidente Prudente – SP. No total foram coletadas 150 garrafas inteiras do tipo long neck, de cor âmbar, embaladas em caixas de garrafa de 600 ml, conforme observado na Figura 23, que posteriormente passaram pelo processo de moagem.

FIGURA 23 – Fornecimento de garrafas Long Neck



Fonte: O autor.

4.2.1.1 Moagem do vidro

O processo de moagem das garrafas de vidro tipo long neck foram realizados em três etapas:

A primeira moagem, foi feita utilizando um triturador de mandíbulas da marca Retsch, pertencente ao laboratório de Separação de Minerais da FCT – Unesp de

Presidente Prudente. As garrafas foram inicialmente quebradas manualmente, e, posteriormente os pedaços foram colocados no triturador, fracionando, por vez, em quantidades de, aproximadamente, 15 garrafas. O processo de moagem era repetido até que não sobrassem mais cacos do material, resultando apenas em resíduo de vidro moído. Na Figura 24 observa-se o moinho utilizado no primeiro processo de moagem e o resultado da mesma, ainda com cacos presentes.

FIGURA 24 – Triturador de mandíbulas, primeira moagem do vidro



Fonte: O autor.

A segunda moagem foi realizada no moinho de bolas, localizado no laboratório de Construção Civil do IFSP, Campus de Presidente Epitácio – SP. Neste processo, o material resultante da primeira moagem, foi colocado em um vaso de 10 litros. O recipiente foi preenchido num total de aproximadamente 70% do seu volume, que era compreendido por 3 Kg de resíduo de vidro moído e 5,40 Kg de esferas de alumina com diâmetro de 6 mm. O processo de moagem foi realizado por, aproximadamente, 8 horas. Após este tempo de permanência, o material moído era separado, e realizava-se o processo novamente com novas amostras, nas mesmas proporções,

até que todo o resíduo proveniente da primeira moagem tivesse sido moído. A Figura 25 mostra o moinho de bolas utilizado nesta etapa.

FIGURA 25 – Moinho de bolas, segunda moagem



Fonte: O autor.

Na terceira etapa, o processo de moagem foi realizado novamente em um moinho de bolas, agora variando o tamanho das esferas de alumina entre 6 a 20 mm de diâmetro, acrescentando, também, água no recipiente. No intuito de refinar ainda mais o tamanho das partículas do resíduo de vidro, neste procedimento, foram colocados cerca de 1,50 Kg de resíduo de vidro proveniente da segunda moagem, 3 Kg de esferas de tamanhos variados e 1,20 Kg de água. O procedimento de moagem foi realizado por, aproximadamente, 24 horas para cada porção de material, até refinar todo o material proveniente da segunda moagem. O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos – LCGRS, FCT- Unesp de Presidente Prudente – SP. Na Figura 26 observa-se o moinho de bolas utilizado para a terceira etapa de moagem do vidro.

FIGURA 26 – Moinho de bolas, terceira moagem



Fonte: O autor.

Após o procedimento de moagem, o resíduo foi retirado e colocado para secagem em estufa a 100°C em, aproximadamente, por 8 horas conforme mostra a Figura 27. Após a secagem do material, o mesmo era separado para posterior análise granulométrica.

FIGURA 27 – Secagem em estufa do resíduo de vidro após terceira moagem



Fonte: O autor.

4.2.2 Cimento

Para a produção de argamassas e pastas de cimento, foi utilizado o cimento Portland composto com Fíler (CP II – F 32), tendo como adição ao clínquer, material carbonático entre 11 a 25%. O cimento foi adquirido no mercado comum de produtos e insumos da construção civil.

4.2.3 Agregado miúdo

Para a composição dos traços de argamassa, foi utilizado, como agregado miúdo, uma areia de origem siliciosa, fornecida diretamente do Laboratório de Engenharia Civil da Unoeste – LabCivil. Realizou-se o peneiramento da areia, separando-a em quatro frações, correspondente a: areia grossa, areia média grossa, areia média fina e areia fina, conforme NBR 7215 (2019), como mostra a Tabela 11.

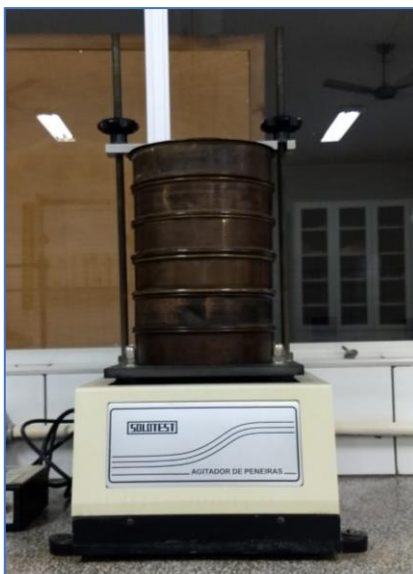
TABELA 12 – Distribuição granulométrica da areia Normal

Denominação da fração	Abertura nominal de malha das peneiras mm	Porcentagem retida em massa de material nas peneiras %
Grossa	2,4 e 1,2	25 ± 5
Média grossa	1,2 e 0,6	50 ± 5
Média fina	0,6 e 0,3	75 ± 5
Fina	0,3 e 0,15	97 ± 3

Fonte: ABNT NBR 7215 (2019).

A distribuição da granulometria da areia areia foi realizada com as peneiras de abertura em mesh: 8, 16, 30, 50, 100 e fundo. O material retido na peneira 16 corresponde à fração grossa, retido na peneira 30 corresponde à fração média grossa, retido na peneira 50, corresponde à fração média fina e retido na peneira 100, corresponde à fração fina da areia. O peneiramento da areia foi realizado, também, no Laboratório de Engenharia Civil da Unoeste – LabCivil, conforme mostra a Figura 28.

FIGURA 28 – Distribuição granulométrica da areia normal



Fonte: O autor.

4.2.4 Água

A água utilizada para a composição das pastas e argamassas foi fornecida pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) de Presidente Prudente e coletada diretamente do Laboratório de Engenharia Civil da Unoeste – LabCivil.

4.2.5 Outros materiais

A seguir, serão listados outros materiais auxiliares empregados para o desenvolvimento da pesquisa. Trata-se de materiais auxiliares utilizados em ensaios, caracterizações e produção de argamassas:

- Enxofre para capeamento de corpos de provas;
- Desmoldante sintético;
- Acetona;
- Ácido fluorídrico;
- Cal;
- Hidróxido de Cálcio.

4.3 Análise granulométrica do vidro

Para a análise da distribuição granulométrica do pó do vidro proveniente dos processos de moagens, foram separados 1 Kg e colocado no agitador de peneiras da marca Lucadema por 1 hora. As peneiras usadas para a análise foram as de 90 μm (170 mesh), 53 μm (270 mesh), 38 μm (400 mesh) e fundo. Para preparação dos corpos de prova, foi utilizada a granulometria retida na peneira 53 μm (270 mesh). O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos – LCGRS, FCT- Unesp de Presidente Prudente

4.4 Preparação dos corpos de prova

Para produção da argamassa, o vidro moído foi adicionado em quantidade de 3, 5, 10 e 15%, em massa, referente ao cimento controle, e, então, analisados na idade de 7, 14, 28 e 91 dias de cura. Considerando 5 amostras para cada concentração de resíduo e por idade de ruptura, foram então, produzidos 250 corpos de prova cilíndricos com dimensão 5 x 10 (cm). Dentre estes:

- 25 Corpos de prova para análise de absorção de água aos 28 dias de cura;
- 200 Corpos de prova para ensaios de tração e compressão aos 7,14, 28 e 91 dias de cura (para a faixa de resíduo de 90 a 53 μm);
- 25 Corpos de prova para análise de compressão aos 28 dias de cura (faixa de resíduo 53 a 38 μm).

Os corpos de provas foram produzidos no Laboratório de Engenharia Civil da Unoeste – LabCivil, conforme NBR 7215 (2019), descritos nos tópicos a seguir.

4.4.1 Quantidade de materiais

Foi considerado o fator água/cimento (a/c) de 0,48, conforme NBR 7215 (2019). As quantidades de materiais a serem misturados, por vez, é indicado no Quadro 8, para o traço controle de argamassa.

QUADRO 8 – Quantidade de materiais para o traço controle

Material	Massa para mistura g
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia normal	
— fração grossa	468 ± 0,3
— fração média grossa	468 ± 0,3
— fração média fina	468 ± 0,3
— fração fina	468 ± 0,3

Fonte: ABNT NBR 7215 (2019).

Para manter o mesmo fator água/cimento, para a produção dos corpos de prova com a inserção do resíduo de vidro moído, foi modificado apenas a quantidade de água à medida que aumentava a concentração do resíduo na argamassa. A quantidade de cimento e areia, por vez, permanecem as mesmas. Os valores, em gramas, de resíduo e água pode ser observado na Tabela 12.

TABELA 13 – Quantidade de vidro moído e água conforme concentrações para produção da argamassa

Quantidade em gramas (g)	0% (V0)	3% (V3)	5% (V5)	10% (V10)	15% (V15)
Vidro moído	-	18,72	31,20	62,40	93,60
Água	300	309	315	330	345

Fonte: O autor.

4.4.2 Mistura Mecânica

A mistura dos materiais foi realizada por meio de um misturador mecânico. Primeiramente, foram misturados a água, cimento e vidro, e, posteriormente acrescentou-se a areia. O processo de mistura foi realizado durante 4 minutos conforme descrito no item 3.5.2.1 da NBR 7215 (2019). Na Figura 29 é apresentado o misturador mecânico utilizado.

FIGURA 29 – Misturador mecânico



Fonte: O autor.

4.4.3 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi realizada imediatamente após o preparo da argamassa. A colocação da argamassa nos moldes cilíndricos foi feita em 4 camadas de alturas aproximadamente iguais. Para cada camada, foi realizado 30 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos com soquete normal, a fim de realizar o adensamento. Após o adensamento, o corpo de prova foi identificado e levado para a cura inicial na câmara úmida.

4.4.4 Cura e desmoldagem dos corpos de prova

Após a moldagem dos corpos de prova, ainda nos moldes, foram colocados na câmara úmida para cura inicial, onde permaneceram por 24 horas, com a face superior protegidas contra gotejamentos, conforme mostram as Figura 30 e 31.

FIGURA 30 – Cura inicial na câmara úmida



Fonte: O autor.

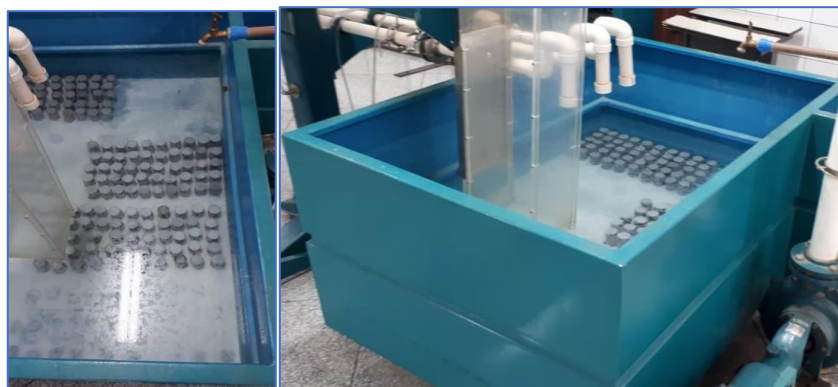
FIGURA 31 – Corpos de prova desmoldados



Fonte: O autor.

Ao término do período de 24 horas de cura inicial, os corpos de prova foram retirados dos moldes, identificados e imersos em tanque para cura com água saturada com cal, onde permaneceram até o momento da ruptura. Na Figura 32 observa-se a cura submersa dos corpos de prova já desmoldados.

FIGURA 32 – Cura submersa com água e cal



Fonte: O autor.

4.4.5 Preparação da pasta para análise térmica

Neste estudo, optou-se por preparar pastas de cimento/material pozolânico (vidro moído) nas mesmas concentrações usadas para os corpos de prova, ou seja, 3, 5, 10 e 15% de vidro em adição, conforme a massa de cimento estabelecida. A quantidade de cimento foi mantida a mesma em todas as concentrações, possibilitando a mesma quantidade de hidróxido de cálcio (CH) disponível para reação. Foi preparado, também, uma pasta de referência sem material pozolânico. A relação água/cimento das pastas se manteve igual em todos os traços (0,48), conforme utilizado na preparação dos corpos de prova cilíndricos, segundo NBR 7215 (2019).

A cura das pastas foi realizada em câmara úmida, a mesma conforme observado na Figura 30. Os ensaios foram realizados nas idades de 7, 14 e 28 dias. O traço de cada pasta é apresentado na Tabela 13.

TABELA 14 - Quantidade de materiais para produção das pastas Cimento / Material Pozolânico

QUANTIDADE DE MATERIAIS - PASTA PARA ANÁLISE TÉRMICA			
Amostra	Cimento (g)	Vidro Moído (g)	Água (g)
Piloto	20	-	9,60
3%	20	0,6	9,88
5%	20	1	10,08
10%	20	2	10,56
15%	20	3	11,04

Fonte: O autor.

4.5 Ensaios de engenharia

Os corpos de provas foram avaliados no estado endurecido, quanto às propriedades mecânicas e propriedades físicas (ensaios tecnológicos), conforme pode ser observado no Quadro 9.

QUADRO 9 – Programa experimental dos ensaios das argamassas

Corpo de provas	Ensaio	Idade (dias)	Concentração de vidro moído (%)	Quantidade de amostras por concentração	Total de amostras	
Corpos de prova cilíndricos 5 x 10 (cm)	Resistência a compressão axial - NBR 7215 (2019)	7	0, 3, 5, 10 e 15	5	25	
		14	0, 3, 5, 10 e 15	5	25	
		28	0, 3, 5, 10 e 15	5	25	
		91	0, 3, 5, 10 e 15	5	25	
	Resistência a tração por compressão diametral - NBR 7222 (2011)	7	0, 3, 5, 10 e 15	5	25	
		14	0, 3, 5, 10 e 15	5	25	
		28	0, 3, 5, 10 e 15	5	25	
		91	0, 3, 5, 10 e 15	5	25	
	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica - NBR 9878 (2005)		28	0, 3, 5, 10 e 15	5	25

Fonte: O autor.

4.5.1 Resistência à compressão axial

Para a determinação da resistência à compressão axial foi utilizado a NBR 7215 (2019) Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Após o período determinado de cura submersa dos corpos de prova, os mesmos eram separados, pesados, capeados com mistura à quente de enxofre e então, submetidos ao ensaio de ruptura. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Unoeste – LabCivil. O Equipamento utilizado foi a prensa universal mecânica Pavitest, modelo Contenco UMC, com carga máxima de 20 toneladas, conforme mostram as Figura 33 e 34.

FIGURA 33 – Capeamento dos corpos de prova



Fonte: O autor.

FIGURA 34 – Ensaio de compressão axial



Fonte: O autor.

O cálculo da resistência à compressão (f_c), em megapascal (MPa), de cada corpo de prova, é obtido dividindo-se a força de ruptura pela área nominal da seção do corpo de prova, conforme a equação 4.

$$f_c = \frac{F \times 9,81}{A} \quad (4)$$

Em que:

f_c = Resistência à compressão (MPa);

F = Força (Kgf);

9,81 = Aceleração da gravidade (m/s²);

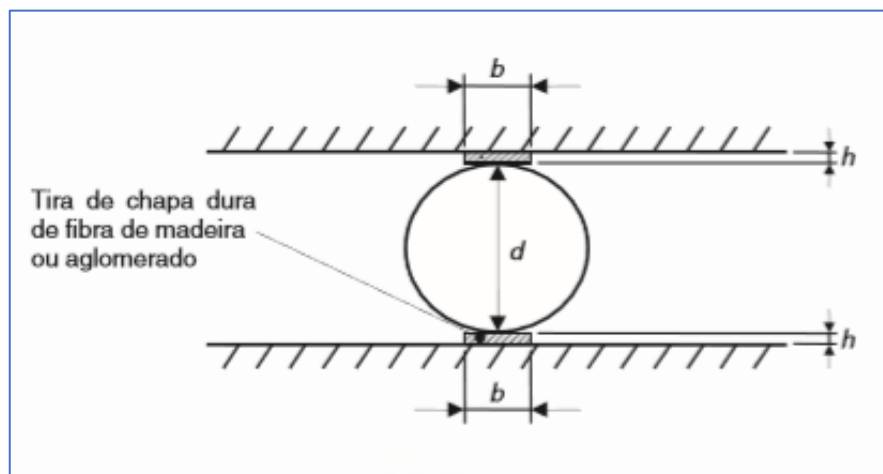
A = Área da seção (mm²).

4.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

Para a determinação da resistência à tração, foi utilizada a NBR 7222 (2011) Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Após o período determinado de cura submersa dos corpos de prova, os mesmos eram separados, pesados, e então, submetidos ao ensaio de ruptura. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Unoeste – LabCivil. O equipamento utilizado foi prensa universal mecânica Pavitest, modelo Contenco UMC, com carga máxima de 20 toneladas.

Para este ensaio, o corpo de prova foi colocado na prensa de forma que a mesma comprimisse seu diâmetro, durante a realização do ensaio. Para melhor distribuição da carga, foi utilizado duas tiras de madeira, conforme exigência da NBR 7222 (2011). A Figuras 35 ilustra a posição do corpo de prova e da tira de madeira durante o ensaio da resistência à tração e a Figura 36 mostra o momento de rompimento de um corpo de prova.

FIGURA 35 – Tira de madeira para ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: ABNT NBR 7222.

FIGURA 36 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: O autor.

Para o cálculo da resistência à tração por compressão diametral, foi utilizada a equação (5):

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d l} \quad (5)$$

Na equação (5),

$f_{ct,sp}$ = é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em megapascal (MPa);

F = é a força máxima obtida no ensaio, expresso em newtons (N);

d = é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

l = é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

4.5.3 Atividade Pozolânica com cimento – 28 dias.

Para determinar o índice de atividade pozolânica do vidro moído quando incorporado à matriz cimentícia, realizou-se o ensaio conforme NBR 5752 (2014) Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Para este ensaio, foram utilizados 5 corpos de provas de referência e 5 corpos de prova com substituição parcial do cimento por vidro moído, em 25% em massa.

Realizada a mistura mecânica da argamassa, foi executado o ensaio para determinação do índice de consistência, conforme o Anexo A da NBR 7215 (2019). Para realização deste ensaio, a amostra de argamassa foi colocada no molde troncocônico sobre a mesa para índice de consistência. Em seguida, é efetuado o seu abatimento, por movimentos verticais, totalizando 30 golpes, conforme Figura 37. O índice de consistência da argamassa é a média aritmética das medidas de dois diâmetros ortogonais da base do tronco de cone de argamassa.

FIGURA 37 – Índice de consistência (Mesa para abatimento troncocônico)



Fonte: O autor.

Após o período determinado de cura submersa dos corpos de prova, os mesmos eram separados, pesados, capeados com mistura a quente de enxofre e então, submetidos ao ensaio de ruptura. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Unoeste – LabCivil. O Equipamento utilizado foi a prensa universal mecânica Pavitest, modelo Contenco UMC, com carga máxima de 20 toneladas, conforme mostram as Figuras 38 e 39.

FIGURA 38 – Capeamento dos corpos de prova – IAP Cimento 28 dias



Fonte: O autor.

FIGURA 39 – Ensaio de compressão axial – IAP Cimento 28 dias



Fonte: O autor.

O cálculo da resistência à compressão axial foi realizado conforme descrito no item 4.5.1 desta sessão. O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias foi calculado pela equação 6:

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad (6)$$

Em que:

I_{cimento} = é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%);

f_{cB} = é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25 % de material pozolânico (argamassa B, em MPa);

f_{cA} = é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CP II-F-32 (argamassa A, em MPa).

4.5.4 Atividade pozolânica com cal – 7 dias.

Outro ensaio para determinação da atividade pozolânica do vidro moído, é o de determinação de atividade pozolânica com a cal aos sete dias, conforme NBR 5751 (2015) Materiais Pozolânicos.

Para este ensaio, foram confeccionados 3 corpos de prova, nos quais a argamassa deve conter uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio e mais uma

quantidade de material pozolânico, que corresponda ao dobro do volume do hidróxido de cálcio. Os materiais utilizados para este ensaio foram:

- Hidróxido de cálcio P.A.: 104 g;
- Areia normal: 234 g para cada uma das quatro frações;
- Material pozolânico, conforme equação 7:

$$m = 2 \cdot \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \cdot 104 \text{ g} \quad (7)$$

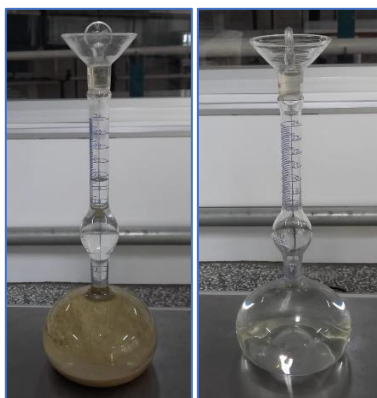
Em que:

δ_{poz} = é o valor da massa específica do material pozolânico em ensaio, determinado pelo método estabelecido na ABNT NBR NM 23;

δ_{cal} = é o valor da massa específica do hidróxido de cálcio P.A. utilizado no ensaio, determinado pelo método estabelecido na ABNT NBR NM 23.

A determinação da massa específica, conforme NBR NM 23, foi realizada utilizando o frasco Le Chatelier. O procedimento consiste em medir a diferença de volumes entre o líquido conhecido (querosene) e o mesmo líquido contendo a amostra de vidro moído (aproximadamente 60g). O frasco Le Chatelier permaneceu por 30 minutos submerso em água para que alcance equilíbrio térmico em temperatura ambiente, conforme Figura 40. O mesmo procedimento foi realizado para a determinação da massa específica do hidróxido de cálcio P.A.

FIGURA 40 – Determinação da massa específica, frasco de Le Chatelier (à direita, nível em cm³ do querosene; à esquerda, nível em cm³ do querosene com adição de vidro moído)



Fonte: O autor.

O cálculo para determinar a massa específica, foi realizado com a Equação 8:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (8)$$

Em que:

ρ = é a massa específica do material ensaiado, em gramas por centímetro cúbico;

m = é a massa do material ensaiado, em gramas;

V = é o volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2' - V_1'$), em centímetros cúbicos.

A quantidade de água para a mistura da argamassa deve corresponder a um índice de consistência de 225 (± 5) mm, obtido no ensaio de abatimento, conforme NBR 7215 (2019), Anexo A. A cura dos corpos de provas foi realizada nos próprios moldes, vedados para evitar a perda de umidade. Durante as primeiras 24 (± 1) h, os corpos de prova permaneceram em ambiente à temperatura de 23 (± 2)°C. Durante as 144 (± 1) h posteriores, os corpos de prova foram mantidos em estufa à temperatura de 55 (± 2)°C para completar a cura térmica, conforme Figuras 41 e 42.

FIGURA 41 – Corpos de provas para cura térmica



Fonte: O autor.

FIGURA 42 – Estufa para cura térmica dos corpos de prova em estufa



Fonte: O autor.

O rompimento dos corpos de prova e os respectivos resultados, foram realizados conforme NBR 7215 (2019), descrito no item 4.5.1 desta sessão. O item 5.2 da NBR 12653 (2012), define que os resultados do ensaio de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias sejam ≥ 6 MPa, como requisito físico.

4.5.5 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica

Para a determinação da absorção de água por imersão, foi utilizada a NBR 9778 (2005) Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, após 28 dias de idade. Foram utilizados 5 corpos de prova para cada concentração, totalizando 25 corpos de prova.

Após o período de cura submersa, os corpos de prova foram limpos, retirando a cal na superfície e colocados em estufa com temperatura de $105 (\pm 5)$ °C por um período de 72 horas. Após, foi registrada a massa seca das amostras (m_s).

Os corpos de prova foram novamente colocados em submersão em água em temperatura ambiente e mantido durante 72 horas nesta condição. Depois deste período, foi determinado sua massa com auxílio da balança hidrostática (m_i) e também a massa saturada da amostrada (m_{sat}).

A absorção de água, conforme NBR 9778 (2005), é o processo em que a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis dos corpos de prova, ou seja, está relacionado à capacidade que um corpo de prova tem de absorver água por meio de seus poros permeáveis. A absorção de água por imersão (A) de cada corpo de prova, em porcentagem, foi determinada pela equação 9.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (9)$$

Em que:

A = Absorção de água por imersão (%);

m_{sat} = massa da amostra saturada após imersão (g);

m_s = massa da amostra seca (g).

O índice de vazios, conforme NBR 9778 (2005), é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Para calcular o índice de vazios (I_v) em porcentagem, usa-se a equação 10.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad (10)$$

Em que:

I_v = Índice de vazios (%)

m_i = massa da amostra saturada imersa (em balança hidrostática).

A massa específica da amostra seca, conforme NBR 9778 (2005), é a relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis. Para o cálculo da massa específica seca da amostra (ρ_s), foi utilizada a equação 11.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (11)$$

A massa específica da amostra saturada, conforme NBR 9778 (2005), é a relação entre a massa do material saturado e o volume total da amostra, incluindo os

poros permeáveis e impermeáveis. Para o cálculo da massa específica saturada da amostra (ρ_{sat}), foi utilizada equação 12.

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat}-m_i} \quad (12)$$

A massa específica real da amostra, conforme NBR 9778 (2005), é a relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis. Para o cálculo da massa específica real (ρ_r), foi utilizada a equação 13.

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s-m_i} \quad (13)$$

4.6 Caracterizações

Para a caracterização dos materiais, foram utilizados ensaios físicos, químicos e morfológicos, aplicados no Cimento Portland, vidro moído, argamassa de referência, argamassa com inserção do vidro moído e, pasta cimento de referência e com a inserção do vidro moído, conforme indicado no Quadro 10.

QUADRO 10 – Programa experimental das caracterizações dos materiais

Amostra	Ensaio	Idade (dias)	Concentração de vidro moído (%)
Cimento Portland	Difração de Raio-X	-	-
Vidro moído		-	100
Cimento Portland	Fluorescência de Raio-X	-	-
Vidro moído		-	100
Cimento Portland	Análise Térmica	-	-
Vidro moído		-	100
Pasta de Cimento Portland + Vidro moído		7, 14 e 28	0, 3, 5, 10 e 15
Argamassa referência e Argamassa com inserção de vidro moído	Microscopia Eletrônica de Varredura	7, 14, 28 e 91	0, 3, 5, 10 e 15

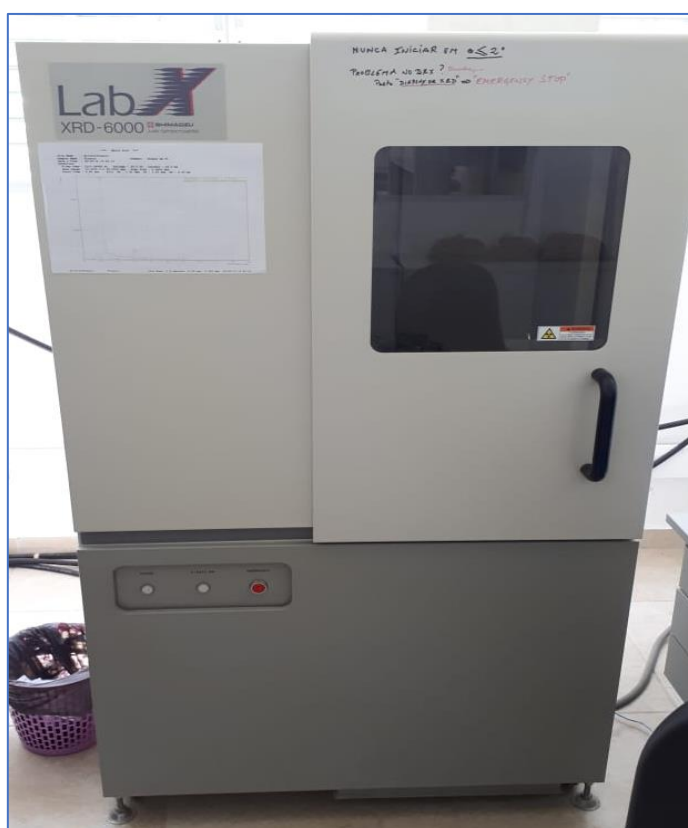
Fonte: O autor.

4.6.1 Difração de Raios X

A caracterização por difração de raios X (DRX) é uma técnica associada à cristalinidade do material, permitindo a identificação de fases cristalinas características e qualificação de elementos de constituição, desde que em faixa adequada de concentração.

Os espectros de DRX foram obtidos utilizando um difratômetro da marca Shimadzu modelo DRX-6000, com fonte de radiação Cu-K α ($\lambda \sim 1,5444 \text{ \AA}$, radiação característica) em uma varredura angular de 10° até 80° (2θ). Este equipamento pertence ao LCGRS, FCT-Unesp (Figura 43). Para a identificação das fases dos materiais, utilizou-se o programa *Search Match* e o banco de dados *PDF (Powder Diffraction Files)*.

FIGURA 43 – Equipamento de Difração de Raios X



Fonte: O autor.

4.6.2 Fluorescência de Raio-X

Para obtenção da composição e a quantificação química, foi utilizada a análise por Fluorescência de raios X (FRX). Esta técnica é adequada para análise de elementos metálicos ou não metálicos, sejam amostras sólidas ou líquidas.

As vantagens desta técnica, são: alta velocidade analítica, alta resolução gráfica, método não destrutivo, multielementar e simultâneo, pois, é sensível à grande parte dos elementos da Tabela Periódica (Na ao U). Para a realização do ensaio, foi utilizado um equipamento da marca Shimadzu, modelo XRF-7000, pertencente ao LCGRS, FCT-Unesp (Figura 44). A FRX foi realizada em vácuo, no modo qualitativo-quantitativo, nas amostras de vidro moído (na forma de pó), utilizando substratos de poliéster biaxialmente-orientado de poli(tereftalato de etileno) (boPET, Mylar®) com área analisada de, aproximadamente, 80 mm².

FIGURA 44 – Equipamento de Fluorescência de raios X



Fonte: O autor.

4.6.3 Análise Térmica

A análise térmica simultânea, Termogravimetria (TG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), foi realizada com o objetivo de caracterizar os materiais por meio da perda de massa (TG) associada aos picos exotérmicos ou

endotérmicos (DSC) e obter informações de referência para avaliação da atividade pozolânica.

O equipamento utilizado foi da marca TA Instruments, modelo SDT-Q600 (Figura 45), pertencente ao LCGRS, FCT-Unesp. Para a caracterização, foram utilizadas amostras que variam de 14 a 20 mg em um cadinho de alumina e porta amostra de alumina (vazio) como referência. A varredura foi feita de 30 a 700°C, com razão de aquecimento de 10°C.min⁻¹ sob o fluxo de 100 mL.min⁻¹ em atmosfera inerte de N₂.

FIGURA 45 – Equipamento de Análise Térmica



Fonte: O autor.

Para a realização dos cálculos entre a reação do material pozolânico (vidro moído) com a da fixação da cal, por análise térmica, foi utilizada a equação 14, análoga ao modelo proposto por Tashima (2012):

$$\text{Variação Percentual Massica de CH (\%)} = \frac{CH_0 - CH_p}{CH_0} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

CH_0 = é a quantidade inicial de CH anterior a pico endotérmico;

CH_p = é a quantidade final de CH após pico endotérmico.

4.6.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

Foram utilizadas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o intuito de obter informações morfológicas das partículas constituintes dos corpos de prova da argamassa referência e da argamassa com inserção de vidro moído. As amostras foram trituradas e um pedaço foi colocado no porta amostra utilizando fita condutora de carbono, que, posteriormente, foi metalizada com ouro.

O equipamento de MEV utilizado foi o modelo EVO LS15 da marca ZEISS e o equipamento para metalização foi o Sputtering Quorum, ambos pertencentes ao Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LaMMEV, FCT-UNESP, Figuras 46 e 47).

FIGURA 46 – Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV



Fonte: O autor.

FIGURA 47 – Equipamento Sputtering Quorum para metalização



Fonte: O autor.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise granulométrica do vidro moído

Analisando a distribuição granulométrica do vidro moído, conforme os resultados apresentados na Tabela 14, optou-se por utilizar a faixa de material retida na peneira de 53 μm (270 mesh), ou seja, partículas que variam de 90 a 53 μm . Esta opção se deu devido à maior quantidade de material, tendo em vista a grande quantidade de corpos de provas a serem produzidos.

A preparação e caracterização por compressão axial de corpos de prova com a fração de vidro mais fina, retida na peneira de 38 μm (400 mesh), aos 28 dias de cura, foi feita apenas para fins de comparação.

TABELA 15 – Distribuição granulométrica do vidro moído

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO VIDRO MOÍDO				
Quantidade de material	Retido em 90 μm # N° 170	Retido em 53 μm # N° 270	Retido em 38 μm # N° 400	Retido no fundo
Gramas (g)	95,77	724,54	142,8	35,64
Porcentagem (%)	9,58	72,45	14,28	3,56
* Perda de 0,13% de material = 1,25 g				

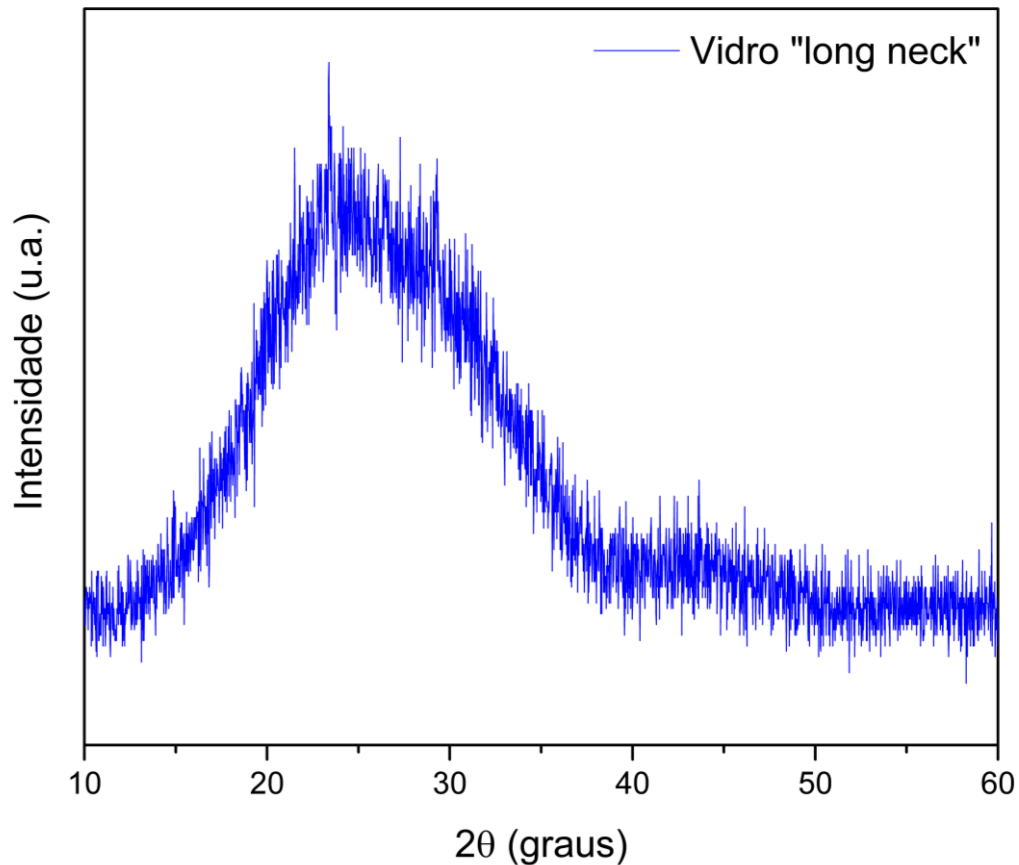
Fonte: O autor.

5.2 DRX – Vidro moído e CP II F 32

A análise por DRX do vidro moído proveniente de garrafas long neck não indicam a presença de fases cristalinas, mostrando apenas a banda de material amorfo característica, em torno da posição de Bragg $2\theta = 30^\circ$ (Figura 48). O resultado da difratometria de raio X, é confirmado com estudos encontrados na literatura. Sales (2014) em estudos de atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, caracterizou seu material (vidro âmbar) como amorfo, por meio desta mesma banda amorfa característica, encontrada na região $2\theta = 30^\circ$. A caracterização de vidros silicatos por difratometria de raios X, foi realizada, anteriormente no LaMaC por

Teixeira (2006), em estudos sobre a incorporação deste tipo de vidro em massas cerâmicas.

FIGURA 48 – Difratoograma de raios X do vidro moído (long neck)



Fonte: O autor.

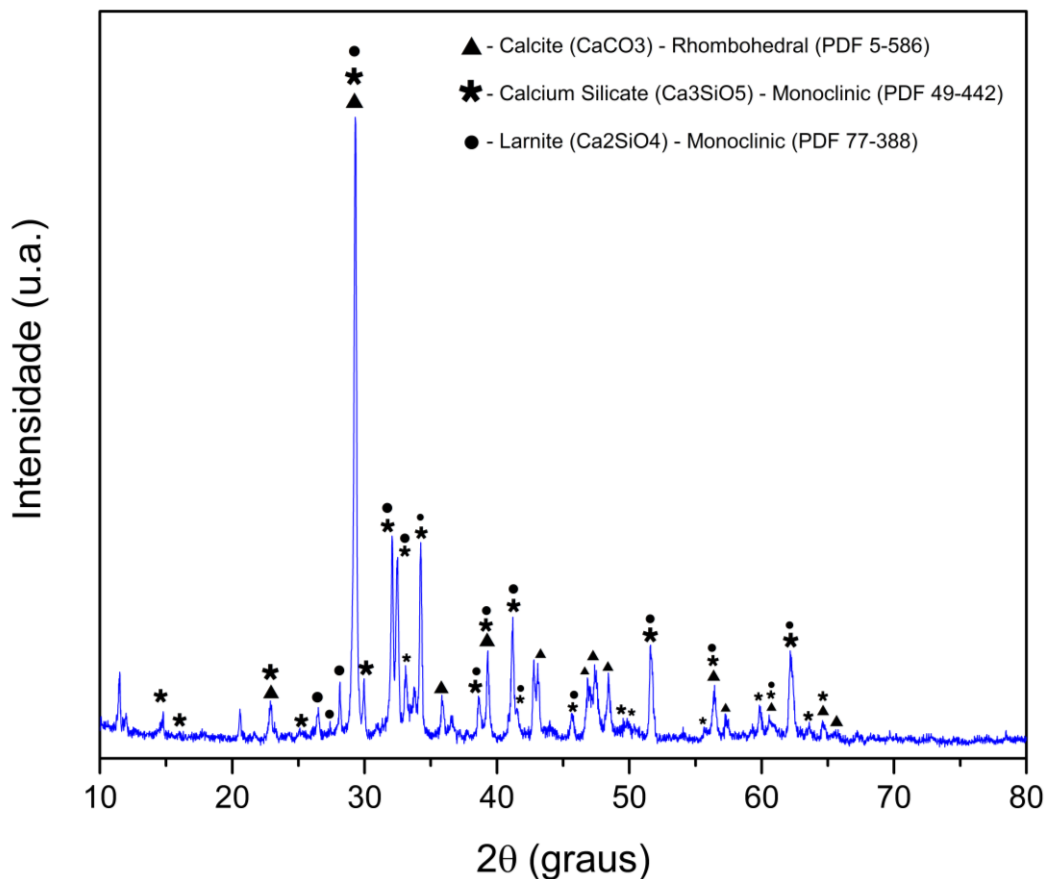
Os resultados de difratometria de raios X realizada com o cimento Portland (CP II – F32) indicam presenças de diferentes fases cristalinas, conforme Figura 49. A presença de picos cristalinos indica formação das fases Calcita (carbonato de cálcio) CaCO_3 , Alita (silicato tricálcico) $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ e Belita (silicato dicálcico) $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$.

Barros (2016), em estudos com inserção de resíduo de vidro em concreto, caracterizou o Cimento Portland tipo IV, por DRX e encontrou a presença de fases características como Alita e Calcita.

Nascimento et al. (2019), ao caracterizar por DRX, o mesmo cimento em estudo neste trabalho (CP II F32), também obteve em seus resultados, a presença das fases cristalinas, como, Calcita (CaCO), Alita (C_3S) e Belita (C_2S). Estes estudos corroboram

com os resultados deste trabalho, em que foram encontradas fases cristalinas características do Cimento Portland.

FIGURA 49 – Difratoograma de raios X do cimento Portland (CP II F32)



Fonte: O autor.

5.3 FRX – Vidro moído e CP II F 32

As Tabelas 15 e 16, apresentam, respectivamente, análises quali-quantitativas dos óxidos do vidro moído e do cimento CP II F 32. No vidro, é possível observar a presença predominante de óxido de silício (SiO₂), mais de 73%, seguindo de óxido de cálcio (CaO), com 13,837 % e óxido de sódio (Na₂O), pouco mais que 8%. Há, ainda, a presença óxido de alumínio (Al₂O₃) em 1,529% e outros óxidos, porém, com quantidade desprezíveis, inferiores a 1% em peso da amostra.

Teores expressivos de SiO₂, CaO e Na₂O também foram encontrados por Silveira (2016), em seus estudos, classificando facilmente seu vidro como tipo soda-cal.

TABELA 16 - Análise química do vidro (óxidos)

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO VIDRO - ANÁLISE DOS ÓXIDOS (FRX)	
Óxidos	% (em peso)
SiO ₂	73,235
CaO	13,837
Na ₂ O	8,012
Al ₂ O ₃	1,529
SO ₃	0,896
MgO	0,879
K ₂ O	0,863
Fe ₂ O ₃	0,609
TiO ₂	0,077
SrO	0,071
BaO	0,061
Cr ₂ O ₃	0,041

Fonte: O autor.

Na análise dos óxidos do cimento, foram observados, também, a presença predominante de óxido silício e óxido de cálcio, porém, em proporções inversas ao observado no vidro, sendo 74,476 % para CaO, e 15,006 para SiO₂. Na Tabela 16 pode-se observar, ainda, a presença de SO₃ com 5,742 % e Fe₂O₃ com 3,17 % em peso da amostra. Outros óxidos são encontrados na composição química do cimento, porém em concentrações inferiores a 1%.

Anjos et al. (2016) encontrou em sua análise 14,71 % de SiO₂, 2,35 % de Fe₂O₃ e 68,68 % de CaO. Percebe-se, portanto, que os resultados obtidos por Silveira (2016) e Anjos et al. (2016) em seus estudos, corroboram os encontrados no experimento.

TABELA 17 – Análise química do cimento Portland – II F 32 (óxidos)

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO - ANÁLISE DOS ÓXIDOS (FRX)	
Óxidos	% (em peso)
CaO	74,476
SiO ₂	15,006
SO ₃	5,742

Fe ₂ O ₃	3,217
K ₂ O	0,968
TiO ₂	0,24
MnO	0,144
SrO	0,085
ZnO	0,055
CuO	0,027
ZrO ₂	0,017
V ₂ O ₅	0,017
Rb ₂ O	0,014
Y ₂ O ₃	0,003

Fonte: O autor.

5.4 TG e DSC – Pasta Cimento + vidro moído

São apresentados na Tabela 17, os resultados do Heat Flow (fluxo de calor, em J/g) no pico de DSC das amostras, em que é possível observar para cada amostra, durante o avanço do tempo de cura, o comportamento em relação a sua perda de massa associada à atividade pozolânica. O mesmo comportamento, é ilustrado também nos gráficos das Figuras 78-82, dispostos na Apêndice I.

Tabela 18 - Quantificação do Heat Flow no pico de DSC das amostras (J/g)*

Idade de cura (dias)	Amostras				
	V0	V3	V5	V10	V15
7	52,34	64,62	107,4	95,26	90,34
14	90,27	99,51	97,41	102,0	100,0
28	97,27	85,31	91,66	74,79	81,84

Fonte: O autor.

A perda de massa identificada pela TG, associada aos picos endotérmicos por DSC, em, aproximadamente, 430°C foi ocasionada pela perda de água quimicamente combinada com o hidróxido de cálcio (CH). Ou seja, quanto menor a intensidade do pico nesta temperatura, menor a quantidade de CH na pasta.

Na argamassa de referência (V0), o evento endotérmico observado pelo DSC da amostra, é característico do processo hidratação do cimento, no qual resulta em hidróxido de cálcio (CH). O aumento da intensidade do pico na pasta de referência,

conforme o avanço da idade de cura (Tabela 17), é característico dos cimentos comuns (sem adição de pozolana). Paiva (2009), observa este mesmo aumento no seu traço de referência, corroborando com os resultados deste experimento. Em idades avançadas (> 28 dias), percebe-se a diminuição do pico, referente ao término da reação de hidratação e início da reação pozolânica. Neste caso, pode-se dizer que há um consumo total de CH, até o momento em que se inicia a reação pozolânica (ou ainda uma reação com a atmosfera), caracterizado pela perda de massa em torno de 600-900°C na curva de TG).

Ao adicionar o resíduo de vidro moído na pasta, é esperado que a intensidade do pico diminua, observados na Tabela 17, e nas Figuras 83-87 também disposto no Apêndice I. Observa-se, portanto, a diminuição no pico endotérmico em aproximadamente 430°C. O consumo do CH da pasta de cimento, pode ser indicado pela atividade pozolânica proporcionada pela inserção do resíduo na matriz. A atividade pozolânica é uma reação lenta, logo, a diminuição do pico é melhor apresentada em idades mais avançadas. Para identificar a variação percentual mássica de CH e a sua perda de massa, ocasionado pela transformação do mesmo em C-S-H, são apresentados resultados dos cálculos sugeridos por Tashima (2012) na Tabela 18.

TABELA 19 - Fixação da Cal para identificação de atividade pozolânica

ATIVIDADE POZOLÂNICA POR REAÇÃO ENTRE RESÍDUO DE VIDRO/HIDRÓXIDO DE CÁLCIO					
Amostra	Idade	CH0 (%)	CHp (%)	Variação percentual mássica de CH (%)	Perda de massa no pico endotérmico (%)
Piloto	7	94,74	93,35	1,48	1,39
	14	87,06	84,85	2,54	2,22
	28	87,02	84,59	2,79	2,43
3%	7	94,21	92,50	1,81	1,71
	14	86,74	84,20	2,93	2,54
	28	74,12	71,79	3,14	2,33
5%	7	90,26	87,72	2,81	2,54
	14	87,46	84,94	2,88	2,52
	28	94,11	91,46	2,82	2,64
10%	7	90,79	88,38	2,65	2,41
	14	89,18	86,53	2,97	2,65
	28	87,76	85,42	2,67	2,34

15%	7	91,31	88,90	2,64	2,42
	14	89,54	87,04	2,79	2,51
	28	88,66	86,36	2,59	2,31

Fonte: O autor.

Para a realização dos cálculos, como não foi introduzido hidróxido de cálcio (CH) artificialmente no sistema, sendo, em sua totalidade, resultado da reação de hidratação do cimento no sistema, a quantidade inicial (CH_0) e final (CH_p) dos mesmos, foram retirados por meio dos eventos endotérmicos observados no DSC das amostras. Para isso, foi utilizada a derivada de TG, em que foi identificado o início e fim do evento, marcando, a porcentagem de massa. As curvas de TG e DSC, nas quais são identificados os valores de perda de massa são encontradas no Apêndice I deste trabalho.

O fator observado que implica nos resultados desejados desta análise, é a dificuldade de homogeneizar a amostra (pasta) de modo que, a retirada de 15-20mg de material em pasta de no máximo 35g, encontrem-se nas proporções executadas de vidro moído/cimento e água.

A variação percentual mássica é inversamente proporcional à fixação da cal no sistema, ou seja, quanto menor a variação, maior a fixação da cal. Observa-se um pequeno aumento da fixação de cal no traço com 3% de incorporação de vidro em relação ao traço de referência aos 28 dias. As pastas que contêm maior quantidade de material pozolânico, 5, 10 e 15% de vidro, apresentam maior fixação da cal em idades mais avançadas, devido à reação da atividade pozolânica ser mais lenta que a reação de hidratação do cimento. Estes resultados mostram que a adição de vidro altera a reação aglomerante, resultando em reações químicas entre a cal e o resíduo de vidro incorporado. Os resultados obtidos por meio das análises térmicas (DSC e TG) indicam um aumento consumo do hidróxido de cálcio que, por sua vez, pode ter sido originado do vidro ou do aumento da hidratação do cimento para ser transformado em silicato de cálcio hidratado. Os resultados nas idades curtas não apresentam a mesma tendência que em idades avançadas. Segundo Tashima (2012), esta aleatoriedade se dá pela atuação em paralelo dos chamados efeito pozolânico e efeito partícula (fíler).

5.5 Atividade Pozolânica – Cimento 28 dias

Os resultados obtidos para a determinação dos Índices de Atividade Pozolânica do vidro moído retido na peneira de nº 270 mesh (53 µm) substituindo 25% da massa do cimento, conforme NBR 5752 (2014), encontram-se nas Tabela 19 e 20, e, Figura 50.

A Tabela 19 apresenta a quantidade de material usado para a preparação das argamassas A e B, a quantidade de água utilizada foi a mesma em ambas, mantendo o mesmo padrão (água/pó). Não houve necessidade da utilização de aditivo super plastificante, pois, o índice de consistência da argamassa B não difere em mais que 10mm da argamassa A, conforme estabelecido pela norma.

TABELA 20 – Índice de consistência das argamassas A e B – Cimento 28 dias

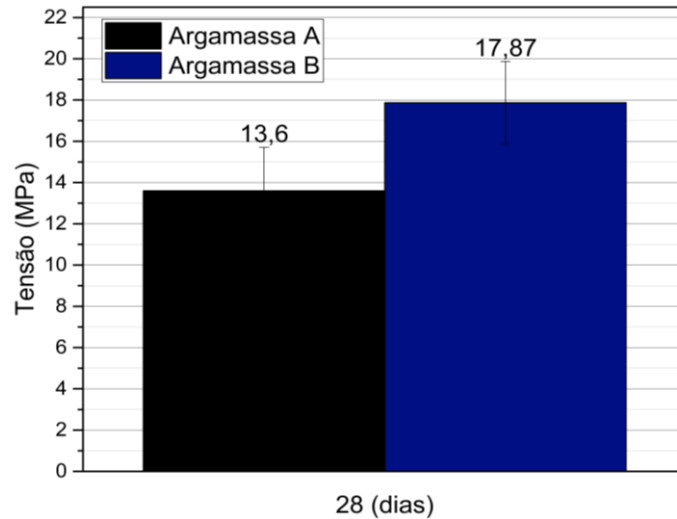
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS A E B		
Material	Massa necessária (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento Portland	624	468
Material Pozolânico (vidro moído, retido na peneira nº 270 mesh)	-	156
Areia Normal	1872	1872
Água	300	300
Índice de Consistência obtido (mm)	194	191

Fonte: O autor.

O resultado do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, foi de 131,40%, isto é, a incorporação de 25% de vidro moído em substituição à massa de cimento, proporcionou um aumento de 31,40% de resistência, alcançando um valor de 17,87 MPa, em comparação a resistência do traço de referência (13,6 MPa).

Este resultado, evidência atividade pozolânica do vidro moído, atendo a NBR 12653 (2015), que determina como requisitos físicos para atividade pozolânica, índice de desempenho $\geq 90\%$.

FIGURA 50 – Resistência a compressão axial média das argamassas A (0%) e B (25%) – Cimento aos 28 dias



Fonte: O autor.

TABELA 21 – Índice de Atividade Pozolânica – Cimento aos 28 dias

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA - CIMENTO 28 DIAS			
Amostra	Resistência média (MPa)	Desvio-Padrão	Índice de Atividade Pozolânica (%)
Argamassa A	13,60	2,11	-
Argamassa B	17,87	2,00	131,40

Fonte: O autor.

De modo geral, estes valores obtidos, confirmam o papel da reação do vidro moído com o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento, sendo a Alita (C_3S) a fase que mais contribui para esta reação nas primeiras idades (TAYLOR, 1990). Sabendo-se que a atividade pozolânica tem reação lenta, pode-se esperar um aumento ainda maior no índice de atividade pozolânica do vidro em idades mais avançadas, proporcionados por reações mais retardadas oriundas da hidratação da belita (C_2S) (VIEIRA, 2005).

Shi et al. (2005), Paiva et al. (2010), Khmiri (2012) et al. encontraram em seus estudos, incorporando diferentes tipos de resíduos de vidro e granulometrias (sempre inferiores a $75 \mu m$), índices de atividade pozolânica com cimento variando entre 85 e 104%. Isso mostra que os resultados obtidos neste trabalho são ligeiramente melhores que aqueles apresentados na literatura.

Patel et al. (2019), encontraram em seus resultados, viabilidade de substituição de até 20% de cimento por pó de vidro com partículas de 63 μm , para 75 μm , a substituição se limita para faixa de 10 a 15%. Neste trabalho, além de superar os índices alcançados por Patel et al (2019), mostrou-se viável de forma técnica a substituição de 25% de pó de vidro (90 a 53 μm) por cimento Portland.

5.6 Atividade Pozolânica – Cal 7 dias

Os resultados obtidos do Índices de Atividade Pozolânica, conforme NBR 5751 (2015) utilizando vidro moído retido na peneira de nº 270 mesh (53 μm), estão apresentados nas Tabelas 21 e 22.

TABELA 22 – Quantidade de materiais, Massa Específica e Índice de Consistência da argamassa – Cal aos 7 dias

QUANTIDADE DE MATERIAIS, MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	
Material	Massa Específica (g/cm³)
Hidróxido de Cálcio P.A.	2,37
Vidro (retido na peneira nº 270 mesh)	2,70
Material	Quantidade (g)
Hidróxido de Cálcio P.A.	104
Material Pozolânico (vidro moído)	236,96
Areia Normal	936
Água	190,94
Índice de Consistência	222 mm
Relação Água/P.A+Vidro	0,56

Fonte: O autor.

A Tabela 21, apresenta dados de massa específica do Hidróxido de Cálcio P.A. e do vidro utilizado, de acordo com a equação 7 apresentada na sessão 4.5.4. Após obtidos os resultados, o cálculo da quantidade de material pozolânico resultou em 236,96 g de vidro moído. Para alcançar o Índice de Consistência estabelecido pela NBR 7215 (2019) 225 (± 5) mm, foram utilizados 190,94 g de água, ocasionando na relação Água/ (P.A. + Vidro) em 0,56. O Índice de Consistência medido foi de 222 mm,

estabelecendo-se dentro dos limites desta norma. Os valores de resistência a compressão dos corpos de prova podem ser observados na Tabela 22.

TABELA 23 – Índice de Atividade Pozolânica – Cal aos 7 dias

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA – CAL 7 DIAS					
Amostra	Massa (g)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio-Padrão	Resistência estabelecido pela NBR 12653:2015
CP 1 - CAL	381,05	2,03	3,30	2,08	6 MPa
CP 2 - CAL	383,16	5,70			
CP 3 - CAL	383,54	2,17			

Fonte: O autor.

O resultado médio de resistência a compressão axial dos corpos de prova, foi de 3,3 MPa, não alcançando o mínimo de 6 MPa estabelecido pela NBR 12653 (2015), como requisitos físicos para considerar atividade pozolânica com teste da Cal aos 7 dias de cura térmica.

Simões (2013), ao produzir argamassa com resíduo de vidro laminado, alcançou média de 4,7 MPa ao realizar o ensaio de atividade pozolânica com a cal – 7 dias. Com este resultado, seu material foi considerado não pozolânico com a cal.

Segundo Weber (2001), devido à variação da qualidade da cal e seus efeitos no resultado do teste, a maioria dos pesquisadores não mais utiliza este ensaio.

Gobbi (2014) ao estudar a atividade pozolânica de diversos materiais considerados altamente reativos, e materiais potencialmente reativos, indica falha da NBR 5751 (2015) quando empregada para comparar a atividade pozolânica de adições para concreto. Segundo os autores, os resultados da DRX realizados, evidenciaram que a determinação do índice de atividade pozolânica com cal segundo a norma, não considera parâmetros importantes que influenciam o resultado de resistência à compressão quando utilizadas adições minerais de alta reatividade.

O principal parâmetro desconsiderado pelo ensaio normatizado, é a disponibilidade de portlandita durante o período de ensaio. O tempo pré-estabelecido do ensaio pode avaliar incorretamente o potencial reativo das adições de minerais, quando não houver reserva alcalina e interrompidas as reações pozolânicas, em

virtude da indisponibilidade de cal a ser fixada na formação dos compostos hidratados. Isto repercute negativamente na resistência à compressão, tornando a comparação da atividade pozolânica pelo IAP com cal imprecisa, fazendo-se necessário alterar a proporção em massa dos materiais, aumentando a relação portlandita/pozolana, tal qual, possa garantir a disponibilidade de cal até o fim do ensaio (GOBBI, 2014).

Hope Filho et al. (2017) também refuta a metodologia utilizada pela NBR 5751 (2015) para a hierarquização de adições minerais de alta reatividade em virtude do esgotamento da reserva alcalina.

5.7 Resistência à compressão axial

Todos os valores obtidos pela média aritmética dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial realizados nos corpos de prova das argamassas, nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias, conforme NBR 7215 (2019), estão apresentados na Tabela 23, que apresenta os valores de resistência em MPa e os desvios-padrão das amostras utilizadas, após realizada a média aritmética.

Ao observar a Tabela 23 verifica-se um ganho de resistência das argamassas incorporadas com vidro moído, em todas as concentrações para 28 e 91 dias de idade, em relação à argamassa padrão (V0).

Os valores de resistência, bem como o desvio-padrão de cada amostra, de cada concentração, encontram-se em Tabelas no Apêndice I deste trabalho.

TABELA 24 – Resistência à compressão axial dos corpos de prova

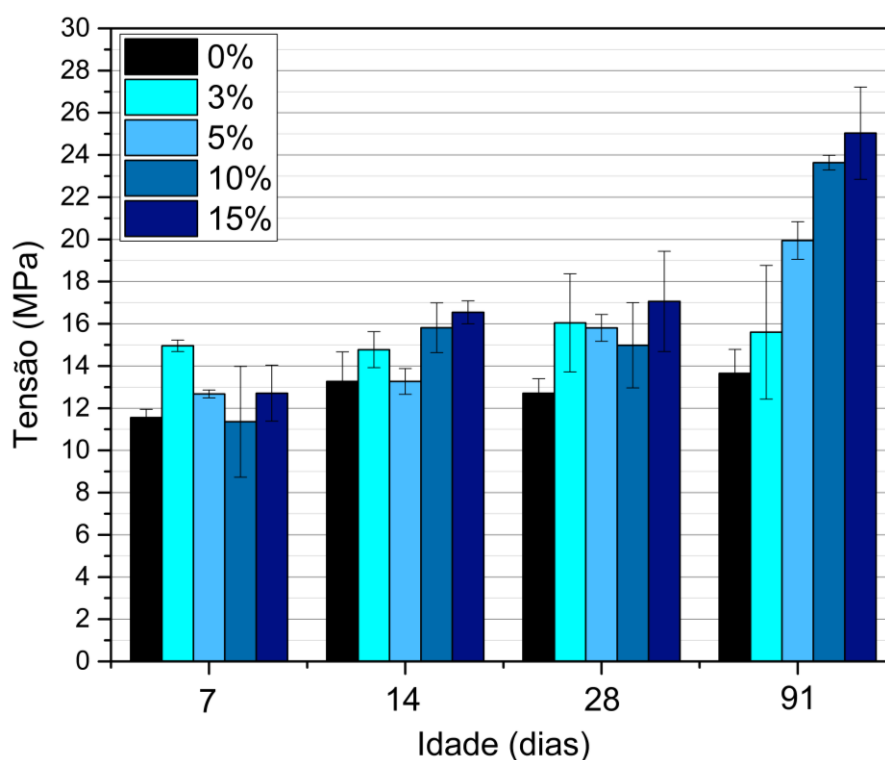
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL (Mpa)								
Média das amostras	IDADES							
	7	desvio-padrão	14	desvio-padrão	28	desvio-padrão	91	desvio-padrão
V0	11,55	0,38	13,27	1,40	12,70	0,69	13,65	1,13
V3	14,95	0,27	14,77	0,85	16,04	2,32	15,60	3,17
V5	12,67	0,18	13,27	0,61	15,80	0,63	19,94	0,88
V10	11,35	2,61	15,81	1,17	14,98	2,01	23,63	0,34
V15	12,71	1,32	19,54	0,54	17,06	2,37	25,03	2,18

Fonte: O autor.

A Figura 51, representa a valores das médias aritméticas de resistência à compressão dos corpos de provas nas idades de ruptura analisadas, em que também é possível observar a plotagem do desvio-padrão em cada uma das médias.

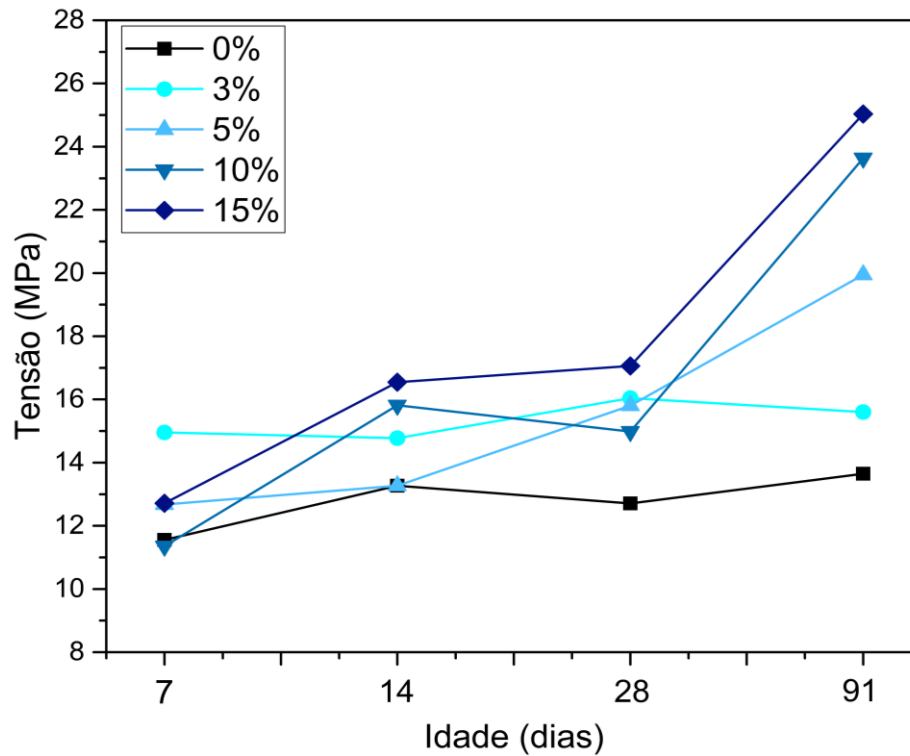
Na Figura 52, os mesmos valores das médias aritméticas de resistência à compressão são expressos em um gráfico de linhas para melhor entendimento da evolução da resistência durante o período de cura.

FIGURA 51 – Resistência a compressão das argamassas com desvio padrão



Fonte: O autor.

FIGURA 52 – Resistência à compressão das argamassas



Fonte: O autor.

Os resultados de resistência à compressão axial, das argamassas com inserção de vidro moído passante na peneira nº 170 e retido na nº peneira 270 (90 a 53 μm) obtidos neste experimento, foram satisfatórios, superiores ao traço de referência, argamassa V0.

Em algumas concentrações, observa-se que os valores de resistência diminuem ligeiramente de 7 para 14 dias de cura, ou de 14 para 28, podendo ser atribuído a variabilidade do método do ensaio. Entretanto, o desvio-padrão nestes casos se encontram maiores, possibilitando que os mesmos se enquadrem em intervalos maiores, assegurando a uniformidade dos resultados. Com exceção do V10, todos os traços com vidro incorporados obtiveram melhores resultados desde os 7 dias, prosseguindo com o padrão até 91 dias de cura. A argamassa V15 aos 28 dias de cura, alcança resistência superior a 34% em relação ao traço de referência V0. Aos 91 dias, a argamassa V15, obteve um aumento de aproximadamente 97%, quase o dobro da argamassa V0, de referência, na mesma idade.

O padrão de aumento da resistência, conforme o aumento da inserção do vidro moído na argamassa, é notório e sem exceção na idade de 91 dias, alcançando resultados muitos superiores aos da argamassa de referência.

Os resultados obtidos nesta sessão, reafirmam o alto índice de pozolanicidade do resíduo de vidro, finamente moído, para o emprego em matriz cimentícia, observados nos itens 5.3, 5.4 e 5.5. Além do efeito químico provocado pelo índice de atividade pozolana do material, o ganho de resistência, segundo Tashima (2006), se dá também pelo efeito fíler, diminuindo assim os tamanhos dos poros da argamassa.

Na avaliação da resistência à compressão em argamassas produzidas com vidro moído, Koller (2007), obteve resultados inferiores ao traço de referência, quando substituiu parcialmente (25, 50 e 75%) o cimento pelo resíduo de vidro passante na peneira de nº 100.

Os resultados obtidos neste trabalho viabilizam o uso de resíduo de vidro moído na incorporação em até 15% de argamassas, a fim de aplicações como, assentamento, revestimentos e pisos.

Vale ressaltar que os valores médios encontrados estão ligeiramente abaixo daqueles esperados para argamassas preparadas com o cimento CP-II, cujos valores nominais são da ordem de 32 Mpa para a idade de 28 dias. Essa discrepância pode estar associada a alguns contratempos experimentais não observados no momento dos ensaios. Hipóteses como a calibração do equipamento usado para a ruptura, alguma alteração no método utilizado para efetuar os ensaios ou, ainda, problemas com o capeamento dos corpos de prova com enxofre, podem ser consideradas para justificar as alterações de valores obtidos.

5.8 Resistência à tração por compressão diametral

Apesar dos constituintes da matriz cimentícia, e suas aplicações, tais como, argamassa e concreto, serem projetados para resistirem à tensões de compressão, as tensões de tração não podem ser descartadas, uma vez que, segundo Mehta e Monteiro (2014), a fissuração do concreto e argamassa, geralmente é resultante de uma ruptura à tração causada por retração restringida.

Considerando a importância ao conhecimento das resistências às tensões de tração, os corpos de provas de argamassa foram submetidos aos ensaios de tração por compressão diametral, analisados nas idades de ruptura de 7, 14, 28 e 91 dias. Os valores da média aritmética dos resultados obtidos por este ensaio, conforme NBR 7222 (2011), estão apresentados na Tabela 24.

TABELA 25 – Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova

RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (Mpa)								
Média das amostras	IDADES							
	7	desvio-padrão	14	desvio-padrão	28	desvio-padrão	91	desvio-padrão
V0	2,58	0,37	3,24	0,06	3,64	0,01	3,46	0,23
V3	2,95	0,15	3,18	0,06	3,31	0,18	3,47	0,11
V5	3,16	0,41	3,33	0,07	3,28	0,10	3,56	0,15
V10	2,67	0,19	3,01	0,04	3,26	0,39	3,63	0,12
V15	2,71	0,05	2,91	0,31	3,12	0,39	3,80	0,10

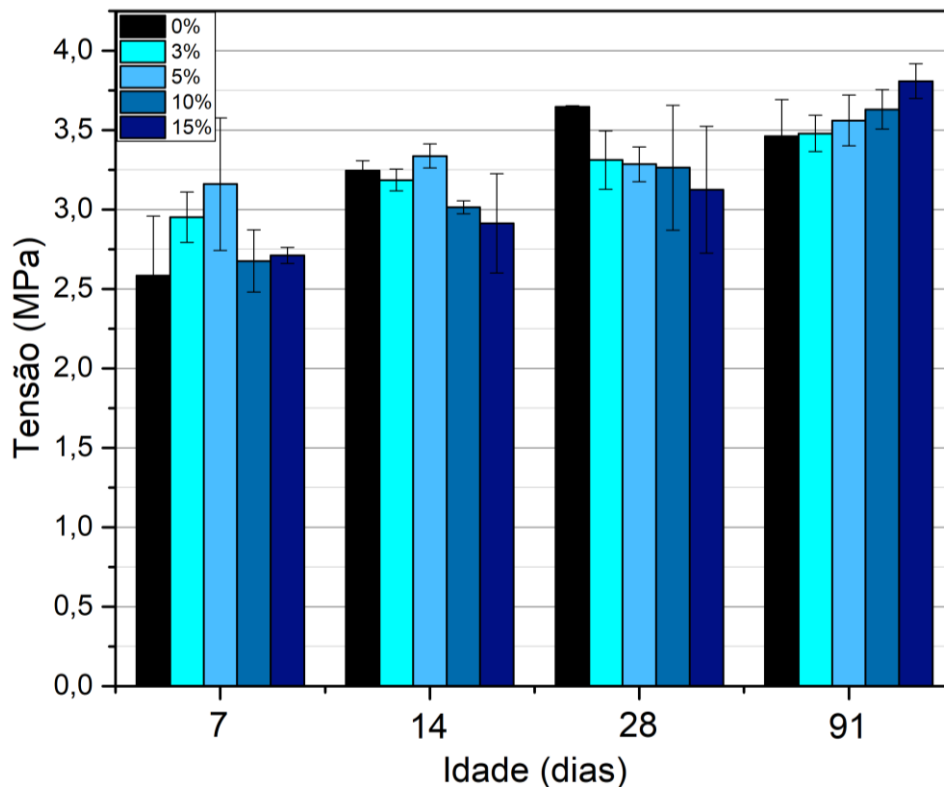
Fonte: O autor.

Na Tabela 24 é possível observar valores de força de ruptura diametral dos corpos de prova (resistência à tração), bem como a média aritmética utilizada e o respectivo desvio-padrão. Nota-se que, para a idade de 7 dias, todas as concentrações de vidro moído obtiveram um aumento aleatório de resistência inicial em relação a argamassa de referência (V0).

Para 28 dias de cura, observa-se uma pequena queda na resistência dos traços de argamassa, apresentando valores decrescentes, conforme aumenta a concentração de vidro moído. Entretanto, aos 91 dias de idade, os corpos de provas com incorporação do vidro moído, alcançaram melhores resultados de resistência à tração em relação a argamassa V0, apresentando valores crescentes conforme aumenta a concentração de vidro moído.

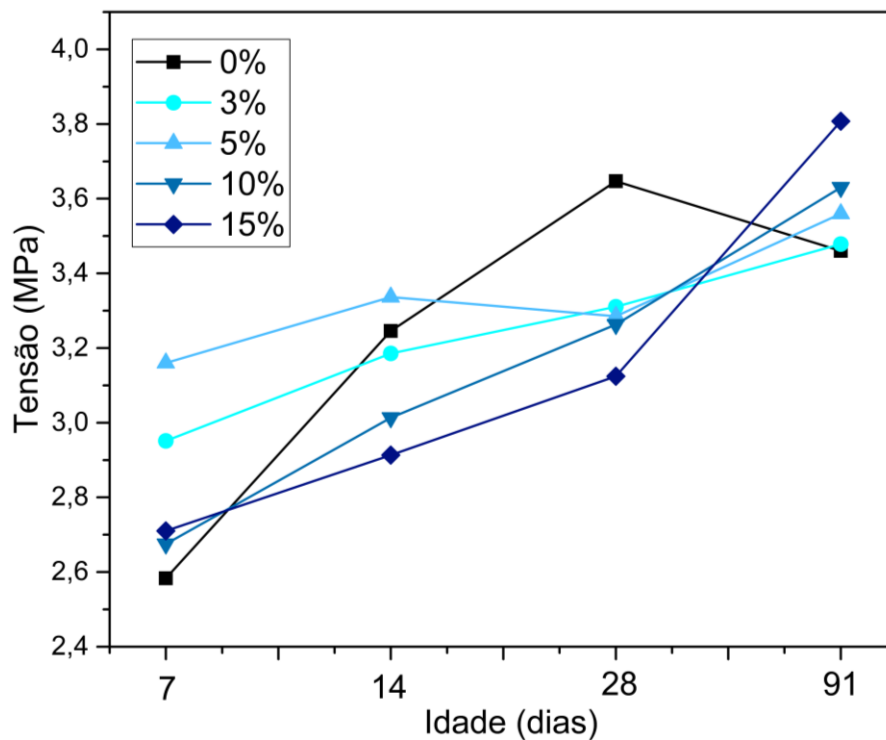
Para melhor entendimento da evolução da resistência, referente à média dos traços em relação à idade de ruptura, bem como o desvio padrão dos mesmos, os resultados da Tabela 24 são apresentados nas Figura 53 e 54.

FIGURA 53 – Resistência à tração por compressão diametral das argamassas com desvio padrão



Fonte: O autor.

FIGURA 54 – Resistência à tração por compressão diametral das argamassas



Fonte: O autor.

Por meio dos gráficos apresentados nas Figuras 53 e 54, é possível observar ganho de resistência nos primeiros 7 dias de cura, para todas as concentrações de vidro incorporados na argamassa, em relação ao traço de referência. Entretanto, exceto para a argamassa V5, aos 14 dias, a resistência à tração para a argamassa V0 ultrapassa os outros traços. Após 28 dias de cura, observa-se que o traço de referência V0 alcança resistência superior a todos os traços de argamassa incorporados com vidro.

Nota-se que as argamassas perdem resistência à medida que aumenta a concentração de vidro moído, sendo a maior perda, de 14,34% (V15 comparado a V0 aos 28 dias).

Aos 91 dias de cura submersa, todas as concentrações de vidro incorporado em argamassa, obtiveram resultados melhores que a argamassa de referência, sendo que o aumento da resistência é maior, conforme aumenta-se a concentração de resíduo inserido. Aos 91 dias, a argamassa V15, obteve um aumento de cerca de 10% em relação a argamassa V0, na mesma idade. Comparando a resistência à tração entre 28 e 91 dias, as argamassas com inserção de vidro moído, V3, V4, V5, V10 e V15, tiveram aumento, respectivamente, de 5,06%, 8,37%, 11,25% e 21,87%.

Higuchi (2018), ao incorporar vidro moído em matriz cimentícia com aplicação em concreto alto adensável em concentrações de 0, 10, 15 e 20%, obteve uma diminuição nos traços de 10 e 20% ao analisar a tração por compressão diametral dos corpos de prova. Os autores mostraram que a maior perda, cerca de 13% foi para o traço com 20% de resíduo em relação ao traço de referência (0% de resíduo).

Segundo Pereira (2016), existe um valor de cálculo teórico para resistência à tração, este, sempre em torno de 10% do valor da resistência a compressão.

Vieira (2016), em estudos sobre o reaproveitamento de lã de vidro em argamassas, verificou um aumento de resistência à tração, em idades mais avançadas, 180 e 360 dias, em relação a argamassa de referência nas mesmas idades. Silva et al. (2007), Braga et al. (2012) e Oliveira et al. (2013), também obtiveram melhores resultados de tração com o aumento do teor de incorporação de finos, entretanto, substituindo parcialmente o agregado miúdo.

Os valores obtidos neste experimento, se enquadram nos parâmetros citados por Pereira (2016) e em pesquisas de outros autores, como Sobrinho (2017) e Higuchi (2018), corroborando com este experimento na idade de 28 dias. O ganho de

resistência à tração em idades mais avançadas, com a incorporação de vidro moído em argamassa, é confirmado por Silva et al. (2007), Braga et al. (2012) e Oliveira et al. (2013).

5.9 Absorção de água por imersão

A Tabela 25 apresenta, respectivamente, resultados de ensaio de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica seca, saturada e real, conforme NBR 9778 (2009), dos corpos de provas após o período de cura de 28 dias. O tempo de secagem em estufa e imersão para saturação dos corpos de provas, foi de 72 horas.

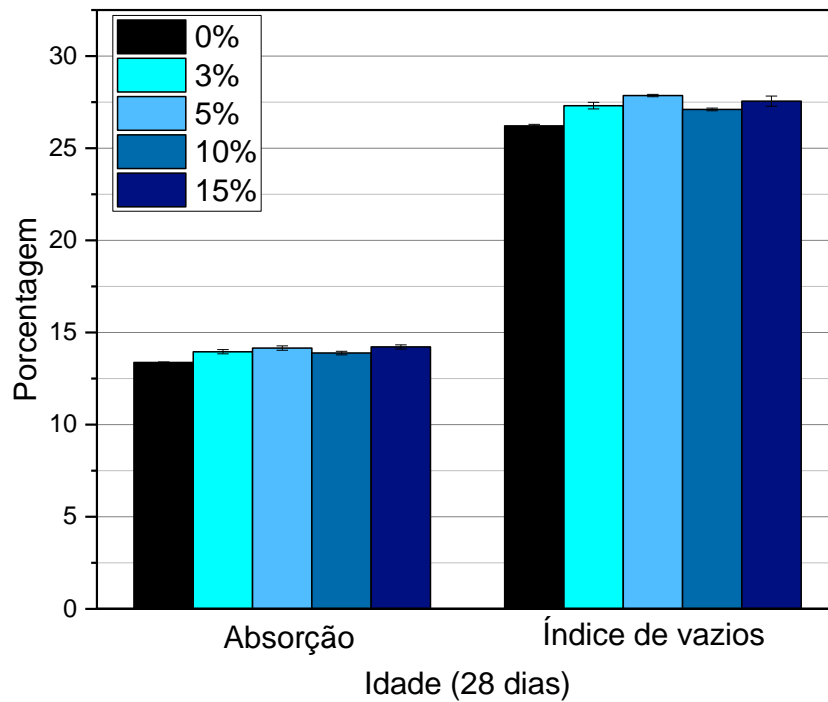
TABELA 26 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão NBR 9778:2009 Corpos de prova após 28 dias de cura

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO - VALORES MÉDIOS DAS ARGAMASSAS AOS 28 DIAS.								
Média das amostras	Massa seca - Ms (g)	Massa Saturada - Msat (g)	Massa Submersa - Mi (g)	Absorção (%)	índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)		
						Seca	Saturada	Real
V0	425,81	482,47	264,97	13,38	26,21	1,96	2,22	2,65
V3	426,09	485,13	267,90	13,96	27,31	1,96	2,23	2,69
V5	426,84	486,87	269,40	14,15	27,86	1,96	2,27	2,71
V10	424,79	486,13	265,60	13,88	27,10	1,95	2,22	2,67
V15	421,42	481,13	264,267	14,21	27,55	1,94	2,22	2,68

Fonte: O autor.

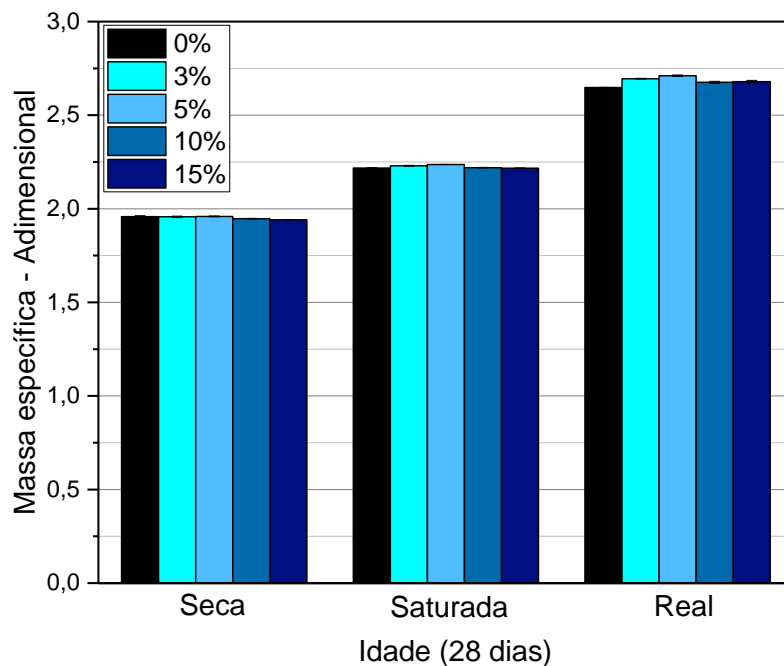
Os gráficos apresentados nas Figuras 55 e 56 mostram valores obtidos pela média aritmética das 5 amostras para cada concentração de vidro introduzido, bem como o desvio-padrão calculado a partir da média.

FIGURA 55 – Absorção de água por imersão e índice de vazios dos corpos de prova após 28 dias de cura (valores médios)



Fonte: O autor.

FIGURA 56 – Massa específica seca, saturada e real dos corpos de prova após 28 dias de cura (valores médios)



Fonte: O autor.

Ao observar a Tabela 25 e as Figuras 55 e 56, é possível verificar que os resultados apresentados pelas argamassas com vidro moído, mantiveram-se similares aos da argamassa de referência, traço V0. A absorção por imersão teve como resultado de 13 – 14%; índice de vazios, 26 – 27%; massa específica seca 1,94 – 1,95 g/cm³; massa específica saturada 2,21 – 2,23 g/cm³ e massa específica real 2,64 – 2,71 g/cm³. A similaridade destes resultados resultou em um baixo desvio-padrão.

Peres et al. (2013), em seus estudos com argamassa cimentícia com vidro moído como agregado, ao realizar ensaios de absorção de água por imersão, obteve resultados de 8,9 a 13,5% de absorção de água.

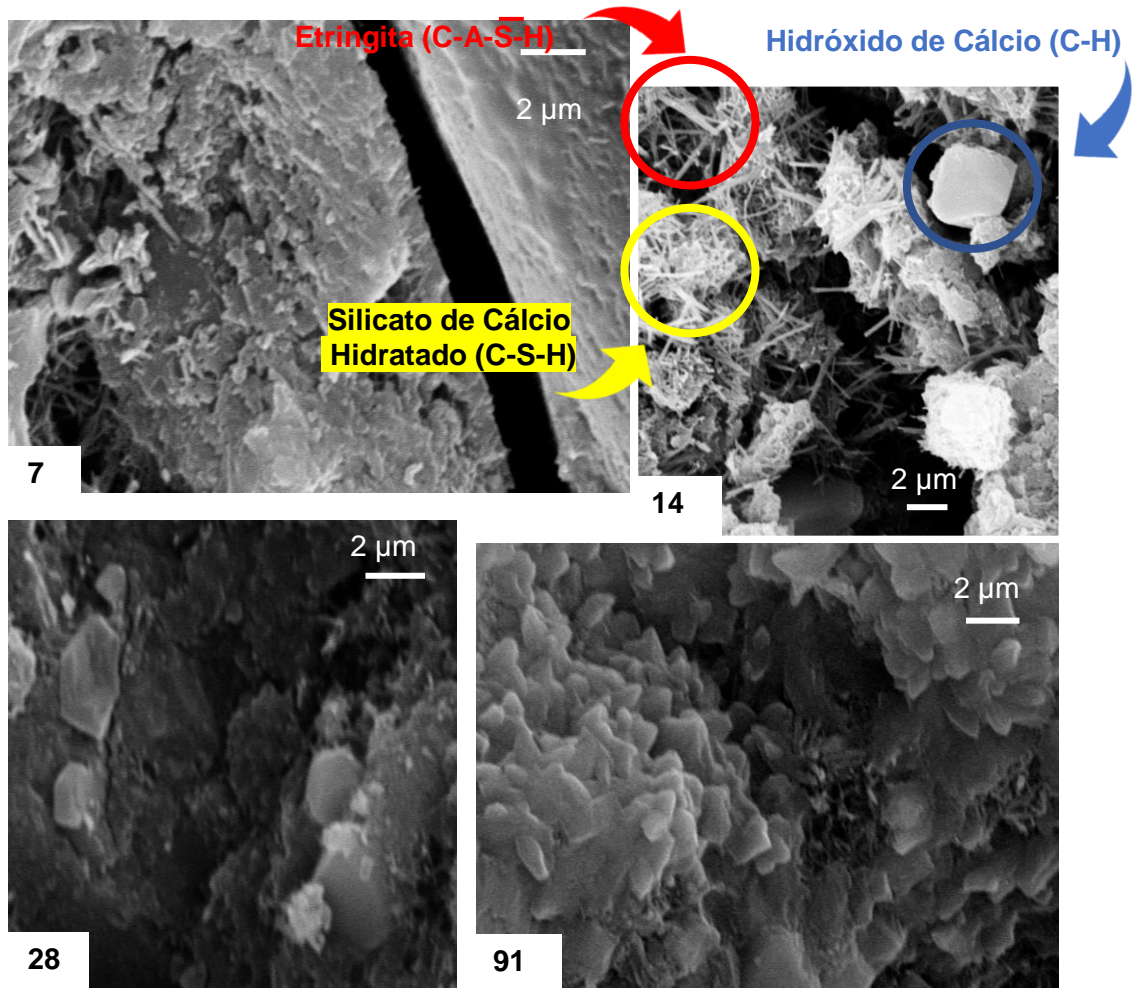
Lordelo (2018), utilizando também resíduo de vidro moído de garrafas para produção de argamassas em substituição à areia natural, obteve resultados médios de 15 a 16% para absorção de água, 27 a 29% para o índice de vazios e 2,57 g/cm³ para massa específica real em seus corpos de prova. Estes estudos, corroboram com resultados obtidos neste ensaio.

As Tabelas de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, em que são apresentados todos os resultados obtidos para cada amostra com todas as concentrações de vidro moído, encontram-se no Apêndice I deste trabalho.

5.10 MEV – Produtos de hidratação das argamassas

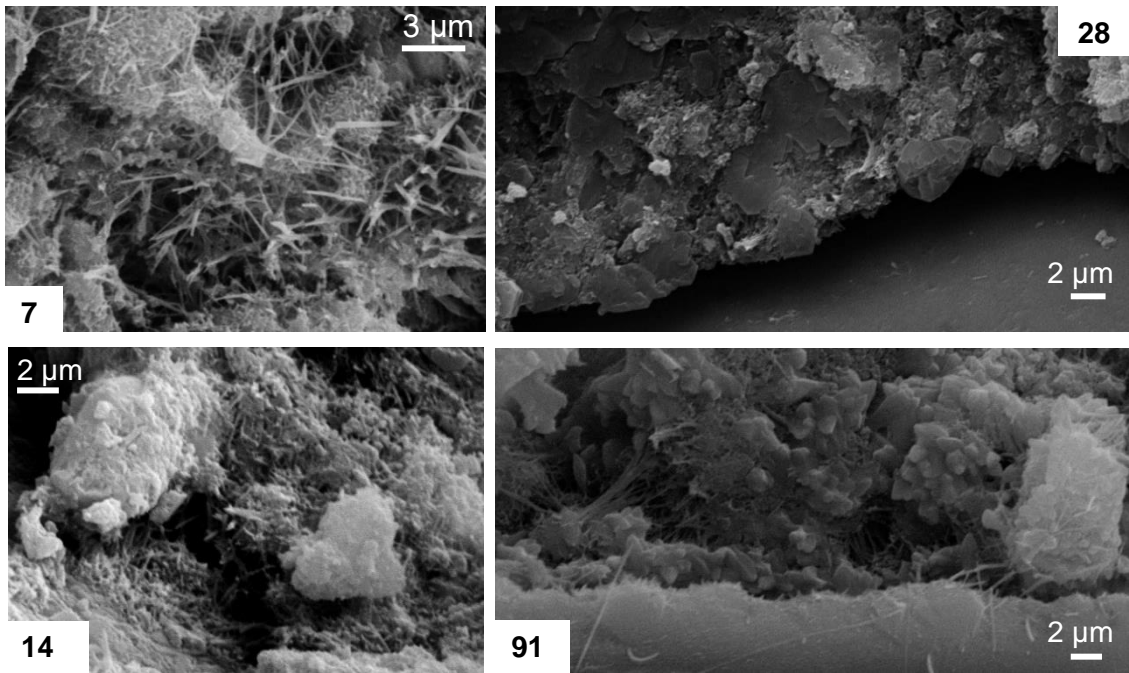
Os resultados das análises morfológicas são mostrados nas imagens de MEV das Figuras 57-61. As imagens mostram os produtos de hidratação das argamassas, através das micrografias realizadas no tempo de cura de 7, 14, 28 e 91 dias.

FIGURA 57 - Produtos de hidratação da argamassa de referência V0 aos 7,14, 28 e 91 dias de cura



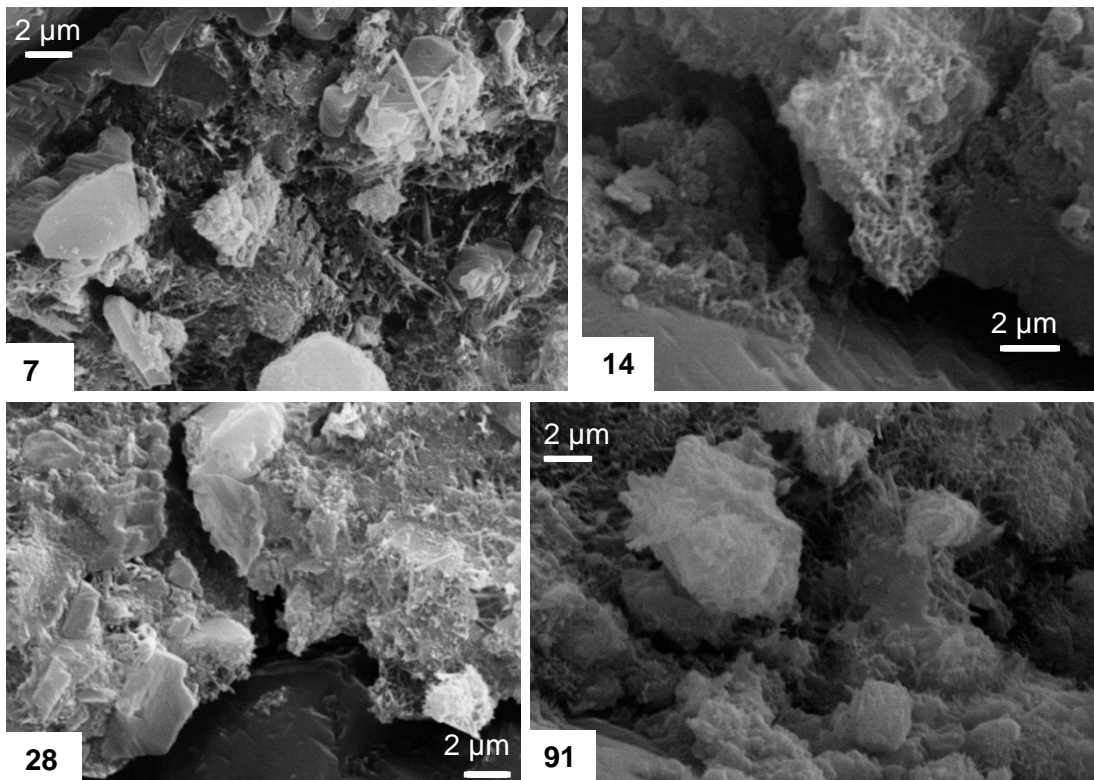
Fonte: O autor.

FIGURA 58 - Produtos das de hidratação da argamassa V3 aos 7, 14, 28 e 91 dias de cura



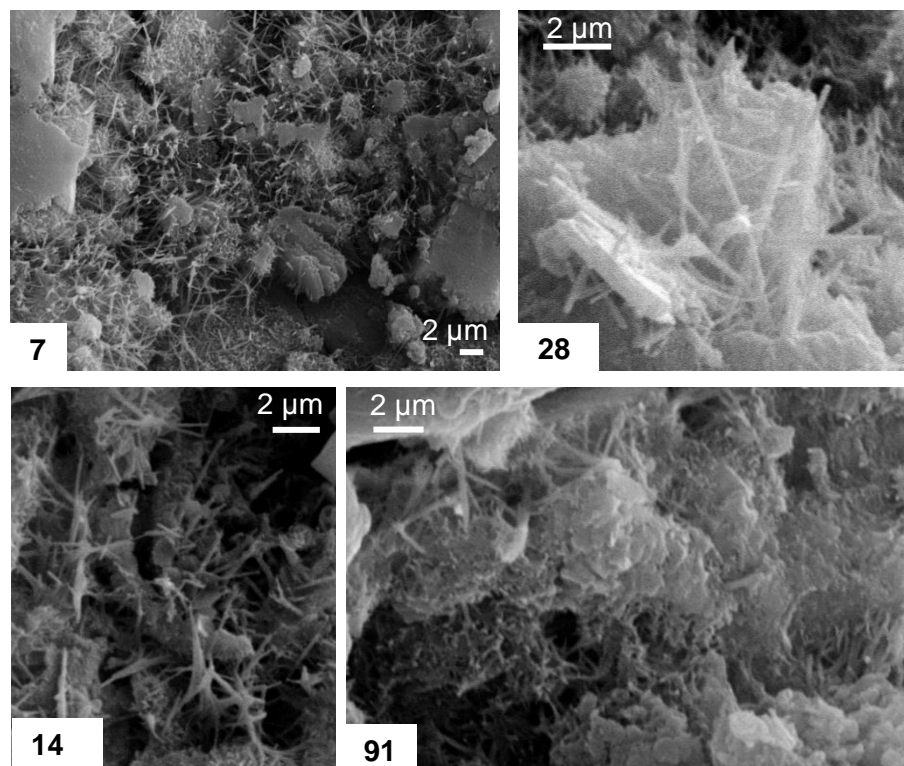
Fonte: O autor.

FIGURA 59 - Produto de hidratação da argamassa V5 aos 14, 28 e 91 dias de cura



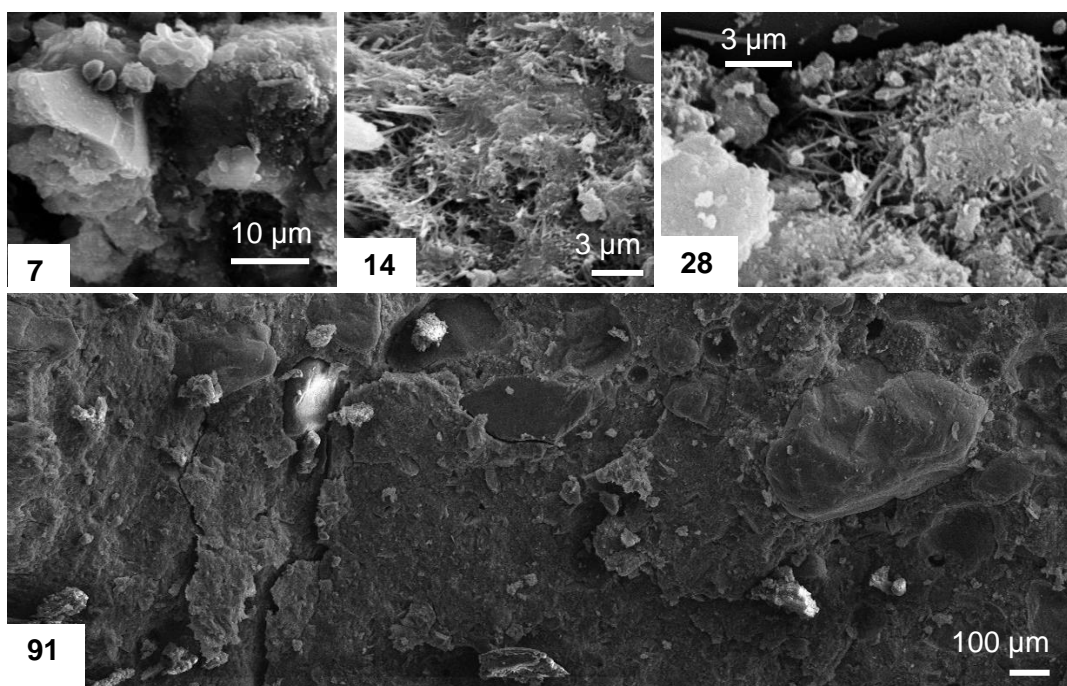
Fonte: O autor.

Figura 60 - Produto de hidratação da argamassa V10 aos 7, 14, 28 e 91 dias de cura



Fonte: O autor.

Figura 61 - Produtos de hidratação da argamassa V15 aos 7, 14, 28 e 91 dias de cura



Fonte: O autor.

A Figura 57 apresenta os produtos de hidratação da argamassa de referência V0, aos 7 dias. Observa-se a interseção do agregado com a matriz cimentícia. Aos 14 e 28 dias nota-se a formação de Portlandita (Hidróxido de Cálcio - CH), no formato de cristais hexagonais, envolvidos por uma matriz fibrosa de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e em menor quantidade etringita.

A presença de C-S-H e Etringita é observado na Figura 58, aos 7 dias na argamassa V3. Aos 28 dias, ainda é perceptível a presença de cristais de CH, e, aos 91 dias, observa-se uma matriz fibrosa de C-S-H. Na Figura 59, é possível observar Etringita em forma de bastões, aos 7 dias, e cristais hexagonais de Portlandita na argamassa V5.

A Figura 60 apresenta uma presença mais significativa de C-S-H na argamassa V10 aos 7 e 14 dias de cura. Aos 28 dias, é possível observar cristais de CH e bastões de Etringita, e, aos 91 dias uma densificação de C-S-H aparentemente maior. Na Figura 61, aos 7, 14 e 28 dias são apresentados respectivamente, cristais de CH, C-S-H e etringita em forma de bastão (pequenos filamentos finos); aos 91 dias de cura é possível observar um maior refinamento dos poros na estrutura, ocasionado pelo consumo de CH que a adição pozolânica promove, resultando em C-S-H adicional e preenchendo o vazios capilares (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Com o avanço da idade e o aumento concentração de material pozolânico, as micrografias indicam uma promoção de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), resultado da reação pozolânica. Estes efeitos são notados em todas concentrações de vidro moído inserido na matriz cimentícia, em maior intensidade conforme aumenta-se a concentração. Imagens semelhantes são observadas por Cassol (2015) e Tashima (2012). Liu et al. (2019), ao incorporar vidro reciclável em argamassas cimentícias, observou uma microestrutura mais densa em suas micrografias, um aumento do gel de C-S-H também foi notado, influenciado positivamente na resistência das argamassas, quando comparado com a referência, corroborando com os resultados deste experimento.

5.11 Resistência à compressão axial – (53 a 38 µm)

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial, conforme NBR 7215 (2019), realizados nos corpos de prova com vidro moído, com tamanho de partículas de 53 a 38 µm (Retido na peneira nº 400 Mesh) aos 28 dias de cura, são apresentados na Tabela 26 e Figura 62.

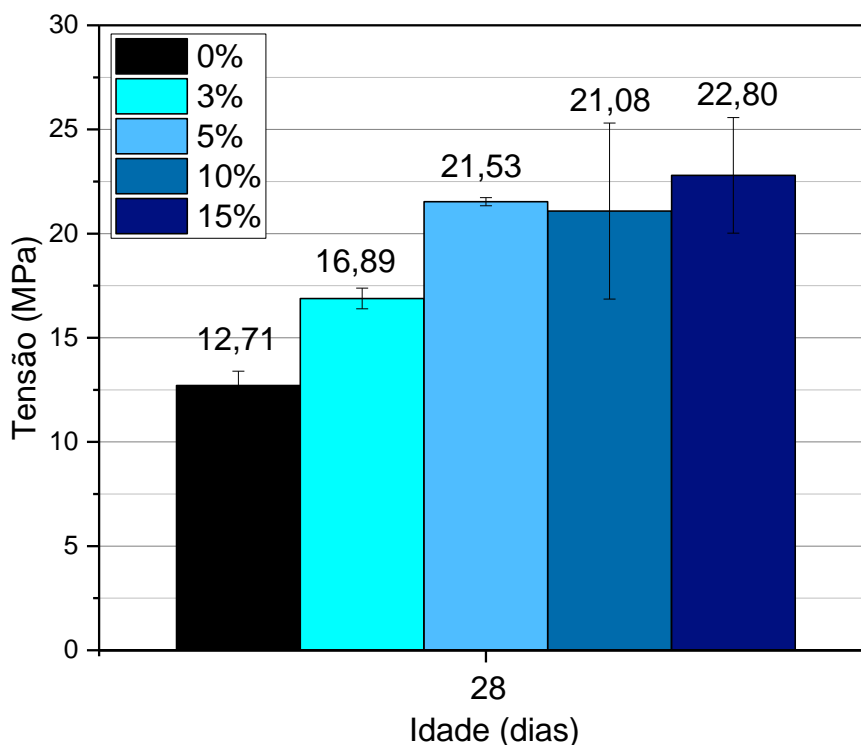
O ensaio foi realizado com o intuito de investigar a relação do tamanho das partículas dos grãos do material pozolânico (vidro moído) com o índice de atividade pozolânica do material. Este teste foi realizado para avaliar se houve um aumento na resistência à compressão axial dos corpos de prova de argamassa com o vidro de menor granulometria incorporado à argamassa.

TABELA 27 – Resistência à compressão axial dos corpos de prova de argamassas aos 28 dias (53 a 38 µm)

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL (Mpa)					
Média das amostras	28 dias (53 a 38 µm)				
	V0	V3	V5	V10	V15
1	13,50	19,66	17,51	11,39	17,00
2	12,24	16,36	21,85	23,55	19,62
3	12,38	17,34	23,31	16,2	24,05
4	16,61	16,96	19,43	23,5	24,72
5	11,19	11,57	25,47	28,01	27,18
Média (53 a 38 µm)	12,71	16,89	21,53	21,08	22,80
Desvio-Padrão	0,69	0,49	1,96	4,23	2,77
Média (90 a 53 µm)	12,71	16,04	15,80	14,98	17,06

Fonte: O autor.

FIGURA 62 – Resistência a compressão axial dos corpos de prova de argamassas aos 28 dias (53 a 38 μm)



Fonte: O autor.

A Tabela 26 apresenta os valores de resistências das 5 amostras para cada concentração. Os valores destacados em azul, foram utilizados para o cálculo da média aritmética, após descarte do menor e maior valor. Observa-se também, os valores de desvio padrão.

Ao analisar o gráfico da Figura 62, verifica-se o aumento de resistência à compressão das argamassas V3, V5, V10 e V15 em relação ao traço de referência, V0. Conforme aumenta-se a concentração de vidro moído nos corpos de prova, eleva-se a resistência, exceto para V10. Entretanto, observa-se que o maior desvio-padrão também se dá na argamassa V10, atribuindo então, a possibilidade deste resultado se encaixar no padrão de linearidade dos aumentos das resistências.

Os resultados de resistência à compressão do traço V15, representa um aumento expressivo de 79,39% em relação à argamassa de referência, V0. As argamassas V3, V5, e V10, obtiveram um aumento da resistência mecânica de respectivamente, 32,89%, 69,39% e 65,85%.

Comparando com o melhor resultado (V15 aos 28 dias) com a faixa granulométrica de 90 a 53 μm (25,03 MPa), que apresenta aumento de cerca de 34% em relação a V0, o aumento de V15 aos 28 dias (53 a 38 μm) teve um salto de 45%, ou seja, de 34% para 79,39%.

Cordeiro et al. (2011), avaliaram a relação entre o tamanho da partícula, área superficial específica e a atividade pozolânica. Concluindo que quanto menor o tamanho da partícula e maior a área superficial, maior a reatividade deste material. A relação entre atividade pozolânica e o tamanho da partícula também foi confirmada por Massazza (1993). Os estudos destes autores citados nesta sessão, corroboram com os resultados obtidos neste experimento.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O reaproveitamento do resíduo de vidro de garrafas long neck em matrizes cimentícias pode ser uma alternativa para a redução do impacto ambiental proporcionado pela disposição inadequada deste material. Os resultados obtidos, ao estudar a inserção deste resíduo em argamassas, apontam a viabilidade técnica na utilização do mesmo, como forma de adição pozolânica ao cimento.

Ao realizar os ensaios de resistência à compressão axial para determinação das propriedades mecânicas das argamassas, os resultados da adição do resíduo de vidro mostram aumento da resistência mecânica em relação à argamassa de referência desde as primeiras idades até idades avançadas. A argamassa V15 (com 15% de vidro incorporado) apresentou resultado superior, correspondendo a mais de 34% dos valores encontrados para a amostra de referência (V0) aos 28 dias. Esta diferença alcança cerca de 97% aos 91 dias, quase o dobro da resistência da argamassa de referência.

Quanto à tração por compressão diametral (propriedade secundária das argamassas), os resultados da adição de vidro mostram-se similares ao do traço de referência, com uma maior redução para a amostra V1,5 em relação à V0 aos 28 dias (~0,52 Mpa). Entretanto, aos 91 dias, todas as concentrações de vidro superaram os valores de resistência a tração da argamassa de referência - V0.

Entretanto, todos os traços de argamassa (V0, V3, V5, V10 E V15), obtiveram resistência a compressão mínima abaixo de 32 MPa, recomendado por norma para a classe de Cimento Portland tipo II – F 32. Assegurado da correta dosagem dos traços de mais de 200 corpos de provas, sua devida moldagem, cura, execução dos ensaios, e padronização nos resultados obtidos, é crível a hipótese que a falha seja no equipamento utilizado para os ensaios de resistência a compressão. Embora não tenha alcançado a resistência mínima, é notório a melhora das propriedades mecânicas ao incorporar o resíduo de vidro moído, quando comparado com a referência.

Em relação à atividade pozolânica, os resultados obtidos por meio do ensaio com cimento aos 28 dias de cura (NBR 5752:2014) aponta um Índice de Atividade Pozolânica – IAP de 131,40%, ou seja, ao substituir em 25% o cimento Portland pelo resíduo de vidro, obteve-se um acréscimo de 31,40% na resistência a compressão

das argamassas. Ao realizar o ensaio com a cal aos 7 dias de cura (NBR 5751:2015), o mesmo resíduo não alcançou resultados superiores ao requerido pela norma para classificá-lo como material pozolânico. Entretanto, a metodologia deste ensaio é refutada por diversos autores.

Os resultados obtidos por análises térmicas (TG/DSC) indicam que o aumento da concentração de resíduo de vidro na pasta de cimento promove o consumo do hidróxido de cálcio (CH) para formarem silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). Esta reação ocorre em idades avançadas, característico dos materiais pozolânicos.

As micrografias das argamassas com inserção de resíduo de vidro, realizadas durante as idades de 7, 14, 28 e 91 dias de cura, mostram os produtos de hidratação do cimento. É observado através das imagens uma maior presença de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). O C-S-H é responsável pela maior resistência mecânica e um maior refinamento dos poros, provocados pela reação pozolânica do vidro na matriz de cimento, corroborando com os resultados das análises térmicas.

Os resultados do efeito da diminuição do tamanho das partículas de vidro de 90 a 53 μm para 53 a 38 μm , em relação à resistência mecânica das argamassas, mostraram-se muito satisfatórios. Aos 28 dias, a argamassa V15 que antes, apresentava resistência à compressão média de 17,06 MPa com a granulometria anterior, passa a apresentar resistência média de 22,80 MPa, na mesma idade. Comparado ao traço de referência (V0), o refinamento dos grãos de vidro, provocou um aumento expressivo de 79,39% para a amostra V15 aos 28 dias. O aumento da resistência mecânica conforme a diminuição do tamanho de partículas também é característico da reação pozolânica.

Os resultados de absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios, realizados aos 28 dias de cura, conforme NBR 9778:2009 mostraram-se similares em todas concentrações de adição de vidro em relação à argamassa de referência, não interferindo, assim, nas propriedades físicas no estado endurecido da argamassa. Vale ressaltar, que a atividade pozolânica tem reação lenta e que um refinamento dos poros é notado nas micrografias aos 91 dias, com a adição de vidro na argamassa.

7 – CONCLUSÕES

Os efeitos da incorporação de resíduo de vidro de garrafas long neck, aumentaram significativamente a resistência mecânica das argamassas, conforme o aumento de sua concentração (90 a 53 μ m, V15 à V0, aumento de 34% aos 28 dias), o avanço da idade (90 a 53 μ m, V15 à V0, aumento de 97% aos 91 dias) e a diminuição do tamanho de partículas de vidro (53 a 38 μ m, V15 à V0, aumento de 79,39% aos 28 dias).

A atividade pozolânica deste resíduo é confirmada nos ensaios e caracterizações realizados, após apresentar aumento da reação entre o vidro moído e o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento, conforme aumenta-se a concentração de vidro inserido na matriz cimentícia, verificado por análises térmicas. Ainda, verificou-se índices de atividade pozolânica com o cimento aos 28 dias de 131,40%, estabelecendo-se acima da norma, podendo concluir que o mesmo possui viabilidade técnica para ser utilizado como aditivo pozolânico pela indústria de cimento.

A viabilidade técnica obtida por meio dos resultados deste trabalho, mostra-se como uma possível alternativa para a diminuição dos impactos ambientais provocados por milhares de toneladas de garrafas long neck produzidas por ano, descartadas de maneiras incorretas. Uma avaliação do ciclo de vida poderia contribuir para verificar a viabilidade ambiental, vindo a amparar, portanto, os resultados aqui apresentados.

REFERÊNCIAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7. ed. São Paulo: ABCP, 2002. 28 p.

ABCP. **Uma breve história do cimento Portland**. 2009. Disponível em: <<https://abcp.org.br/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>>. Acessado em 21 de outubro de 2019.

ABIVIDRO. **Vidro: o resíduo infinitamente reciclável**. 2019. Disponível em: <<https://abividro.org.br/2019/02/07/vidro-o-residuo-infinitamente-reciclavel/>>. Acessado em 10 de dezembro de 2019.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2020. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acessado em 08 de abril de 2021.

AKERMAN, M. **Introdução ao vidro e sua produção**, ABIVIDRO Escola do Vidro, 2013. Disponível em: <http://www.certev.ufscar.br/documentos/arquivos/introducao-ao-vidro>> Acessado em: 2 de setembro de 2019.

AKERMAN, M. **Natureza Estrutura e Propriedades do Vidro**, CETEV (Centro Técnico de Elaboração do Vidro), 2000. Disponível em: <https://www.unifal-mg.edu.br/ppgcemateriais/files/file/processo%20seletivo/NaturezaEstrut_Prop_Vidro%20Saint%20Gobain%202000.pdf> Acessado em: 2 de setembro de 2019.

ALISSON, E. Pesquisador brasileiro propõe nova definição de vidro. **Agencia FAPESP**. São Paulo, 1 de Setembro de 2019. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/pesquisador-brasileiro-propoe-nova-definicao-de-vidro/26039/>>. Acessado em: 19 de setembro de 2019.

ALVES, et al. Vidros. **Química Nova na Escola**, 2001.

ANAVIDRO. **Quanto tempo o vidro leva para se decompor?**. 2013. Disponível em: < <http://www.anavidro.com.br/quanto-tempo-o-vidro-leva-para-se-decompor/>>. Acesso em: 01 de setembro de 2018.

ANCAT. **Anuário da Reciclagem 2020**. 2020. Disponível em: < <http://anuariodareciclagem.eco.br/> >. Acessado em 07 de abril de 2021.

ANJOS, M. A. S., ET AL. **Avaliação da atividade pozolânica de microssílica cinza densificada e não densificada**. 2016. Disponível em: < <https://www.redalyc.org/pdf/4815/481554871008.pdf>>. Acessado em 18 de novembro de 2019.

ARAÚJO, E.B. Vidro: uma breve história, técnicas de caracterização e aplicações na tecnologia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v.19, n.3, p. 325-329. 1997. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v19a34.pdf>>. Acessado em: 25 de setembro de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão: NBR 7215**. Rio de Janeiro, 2019.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: NBR 7222**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica:** NBR 9778. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos - Requisitos:** NBR 12653. Rio de Janeiro, 2012.

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

BABISK, M, P. **Desenvolvimento de vidros sodo-cálcicos a partir de Resíduos de rochas ornamentais.** Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: IME -INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA, 2009. 90 p. Disponível em: <http://www.ime.eb.mil.br/arquivos/teses/se4/cm/MICHELLE_P_BABISK.pdf> Acessado em: 2 de setembro de 2019.

BARDINI, I.S.; MARCHIORO, T.B. **Um Estudo Exploratório do Uso de Vidro Reciclado como Agregado de Concretos.** Tubarão: UNISUL, 2007. 42 p.

BARROS, C. Apostila de Vidros. **Materiais de Construção – Edificações.** Rio Grande do Sul. 2010. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/7408337-Apostila-de-vidros-out-2010-profa-carolina-barros-revisao-profa-tais-viana-materiais-de-construcao-edificacoes.html>> Acessado em: 2 de setembro de 2019.

BARROS, L.M. **Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado.** Tese de Doutorado, 2016. Universidade de São Paulo, USP. São Carlos – SP.

BUENO, E. T. et al. A review of ground waste glass as a supplementary cementitious material: A focus on alkali-silica reaction. **Journal of Cleaner Production.** v. 257. p. 120-180. 2020.

BRAGA, M. et. al. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars”. **Construction and Building Materials**, v. 36. p. 960-968. 2012.

BRASIL (2010) Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União.

BRASIL. Congresso. Câmara dos Deputados. **PL 1574/2007 - Proíbe a industrialização e a comercialização de cerveja em garrafa de vidro não retornável.** 2007. Disponível em: <<https://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:camara.deputados:projeto.lei;pl:2007-07-11;1574>>. Acessado em 18 de dezembro de 2019.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 8ª ed., New Jersey, Editora LTC, 2012.

CASSOL, G. **Caracterização e utilização do resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico em matrizes cimentantes.** Dissertação de Mestrado, 2015. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Ilha Solteira – SP.

CEBRACE. **A história do vidro.** Brasil, 2015. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/#!/enciclopedia/interna/a-historia-do-vidro>>. Acessado em 07 de abril de 2021.

CERVBRASIL. **Dados do setor cervejeiro nacional.** São Paulo. 2019. Disponível em: <http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/dados-do-setor/>. Acessado em 18 de dezembro de 2019.

CORDEIRO, G.C. **Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash.** *Cement & Concrete Composites.* V33, p. 529-534. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095894651100028X>>. Acessado em 25 de novembro de 2019.

DIAS, G.G. CRUZ, T.M. **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Vítreos – PGIRV**. Programa Minas Sem Lixões. Belo Horizonte, 2009.

FILHO, A. de A. ET AL. **Cimento**. Agência Nacional de Mineração. 2017. Disponível em: < http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-brasileiro-mineral-2017/cimento_sm_2017>. Acessado em: 15 de outubro de 2019.

FOZ DO IGUAÇU. **Projeto de Lei Nº 4/2012 - Torna obrigatória a coleta e destinação final pelos revendedores de bebidas em embalagens de vidro do tipo long neck**. CÂMARA MUNICIPAL. 2012. Disponível em: <<http://www.cmfi.pr.gov.br/pdf/projetos/1526.pdf>>. Acessado em 18 de dezembro de 2019.

FREITAS, E. **Caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil**. Dissertação de Mestrado, 2005. UENF/LECIV. Rio de Janeiro.

FRÍAS, M. VILLAR-COCIÑA, E. SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I. VALENCIA-MORALES, E. **The effect that different pozzolanic activity methods has on the kinetic constants of the pozzolanic reaction in sugar cane straw-clay ash/lime systems: Application of a kinetic-diffusive model**, Cement and Concrete Research. 35 (2005) 2137–2142.

FUNVERDE. **A poluição causada pelas embalagens long neck e a lei 333/09**. 2009. Disponível em: <<https://www.funverde.org.br/blog/a-poluicao-causada-pelas-embalagens-long-neck-e-a-lei-33309/>>. Acessado em 18 de dezembro de 2019.

GALVÃO, A.C.P. FARIAS, A.C M. MENDES, J.U.L. **Characterization of waste of soda-lime glass generated from lapping process to reuse as filler in composite materials as thermal insulation**. Cerâmica 61 (2015) 367-373.

GUO, P. et al. New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. **Construction and Building Materials**. v. 257. p. 119-579. 2020.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas nbr 5751/2012 e nbr 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. Dissertação de Mestrado, 2014. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba – PR.

GOUVEIA, N. PRADO, R.R. Riscos à saúde em áreas próximas a aterros de resíduos sólidos urbanos. **Rev Saude Publica** 2010; 44(5):859-866

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciênc. saúde coletiva**. Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1503-1510, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232012000600014&lng=en&nrm=iso>. Acessado em 18 setembro de 2019.

HELMENSTINE, A. M. **Colored Glass Chemistry**. About: Chemistry. Disponível em: <<http://chemistry.about.com/cs/inorganic/a/aa032503a.htm>> 2018. Acessado em 03 de setembro de 2019.

HIGUCHI, A. M. D. **Estudo do desempenho do resíduo de vidro moído como material cimentício suplementar para aplicação em concreto autoadensável de alto desempenho**. Dissertação de Mestrado, 2018. UFAM – Universidade Federal do Amazonas. Amazonas. Disponível em: <<http://200.129.163.131:8080/handle/tede/6870#preview-link0>>. Acessado em 21 de novembro de 2019.

HOPPE FILHO, J. et. al. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). **Matéria (Rio J.)**. Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, e11873, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000300423&lng=en&nrm=iso>. Acessado em 12 de dezembro de 2019.

JAIME, S.B.M., DANTAS, F.B.H. **Embalagens de vidro para alimentos e bebidas: propriedades e requisitos de qualidade**. Campinas: CETEA/ITAL, 2009. 223p

JAWED, I., ET AL. Hydratations of Portland cement. In: BARNES, P. (Ed.). **Structure and Performance of Cement**. Essex: Applied Science Publishers, 1983. P. 237-318.

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

JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese de Livre Docência, 2000. USP. 113 p.

JOHN, V.M.; CINCOTTO, M.A.; SILVA, M.G. **Cinza e aglomerantes alternativos**. Cap. 6, In: *FREIRE, W.J.; BERARDO, A.L. Tecnologia e materiais alternativos de construção*. Campinas: UNICAMP, p. 145-190, 2003.

KADRI, E. H; DUVAL, R. Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 3, p. 138-142, 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/279901329_Effect_of_ultrafine_particles_on_heat_of_hydration_of_cement_mortars>. Acessado em: 15 de outubro de 2019.

KATTAR, J.E. e ALMEIDA, N.J. **Cimento Portland**. Publicação da Holdercim do Brasil. São Paulo. 1999.

KHMIRI, A., ET AL. A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass blended cement. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 680-686, 2012.

KOLLER, D. R. P. **Avaliação da resistência à compressão de argamassas produzidas com vidro moído**. 2007. Disponível em:

<<https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/viewFile/1217/1154>>. Acessado em 21 de novembro 2019.

KRUGER, F.R; OLIVEIRA, D.L.A; BRAGA, S.R.O.Q. **Incorporação de vidro plano moído em substituição ao cimento e ao agregado miúdo (areia) em argamassas de concreto**. 25ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. Poços de Caldas, 2002.

LIU, G. et al. Performance evaluation of sustainable high strength mortars incorporating high volume waste glass as binder. **Construction and Building Materials**. v. 202. p. 574-588. 2019.

LORDELO, R.S.D. **Avaliação da utilização de resíduo de vidro de garrafas na produção de argamassa**. Dissertação de Mestrado, 2018. Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana – BA. Disponível em: <<http://tede2.uefs.br:8080/bitstream/tede/700/2/AVALIA%c3%87%c3%83O%20DA%20UTILIZA%c3%87%c3%83O%20DE%20RES%c3%8dDUO%20DE%20VIDRO%20DE%20GARRAFAS%20NA%20PRODU%c3%87%c3%83O%20DE%20ARGAMASSA.pdf>>. Acessado em 25 de novembro de 2019.

MAIER, P.R; DURHAM, S.R. **Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures**. *Construction and Building Materials*, v. 29, p.428-437,2012.

MASSAZZA, F. **Pozzolanic Cements**. *Cement & Concrete*. V. 15, p.185-214.1993.

MATOS, A.M.; COUTINHO, J.S. **Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement**. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 205-215, 2012.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª Edição. IBRACON. 2014

MEHTA, P.K. e MONTEIRO, P.J.M. **Concreto estrutura, propriedades e materiais**. Editora PINI. São Paulo, 1994.

MEHTA, P.K. e MONTEIRO, P.J.M. **Concreto estrutura, propriedades e materiais**. Editora PINI. São Paulo, 1ª ed., 1998.

NASCIMENTO, J.E.F. ET AL. Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland. **Cerâmica**. v.65. p. 85-91. 2019. Disponível em: <www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132019000100085&tlng=pt>. Acessado em 05 de dezembro de 2019.

NAVARRO, J. M. F. **El vidrio**. 3 ed. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2003.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 2ª Edição. Editora PINI. São Paulo. 1997.

OLIVEIRA, R. ET AL. Incorporação de agregados finos de vidro em argamassas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. v. 21. p. 25-39. 2013.

PAIVA, O. A.; ET AL. **Aplicação de resíduos ultrafinos de vidro moído em argamassa de cimento Portland**. In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. Anais. Fortaleza: IBRACON, 2010.

PAIVA, O.G. **Resíduo industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado, 2009. Universidade Federal do Amazonas – UFAM. Manaus – AM.

PAULA, M, O de., **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado, 2006. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais.

PATEL, D. et al. Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement

in making paste and mortar. **Construction and Building Materials**. v. 199. p. 406-415. 2019.

PERALTA, M, M, C. **Uso de um lodo de cromo proveniente da indústria de curtume na fabricação de vidro sodo-cálcico**. Tese de Doutorado, 2014. Universidade de São Paulo. São Paulo. 121 p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-24042015-153102/pt-br.php>> Acessado em: 2 de setembro de 2019.

PEREIRA, A. H. **Avaliação da utilização de vidro comum como pozolana e avaliação da utilização de sucata de vidro temperado como agregado graúdo em concretos**. Trabalho de Conclusão de Curso, 2016. UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão – PR. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6861/1/CM_COECI_2016_1_05.pdf>. Acessado em 21 de novembro de 2019.

PERES, J.G.M. ET AL. **Estudo da viabilidade da adição de resíduos de vidro moído na produção de argamassa cimentícia**. 2013. Disponível em: <<http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/include/getdoc.php?id=2758&article=1208&mode=pdf>>. Acessado em 25 de novembro de 2019.

PERUZZI, A, P de., **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. Dissertação de Mestrado, 2002. Universidade São Paulo. São Paulo

PFEIL, W. **Concreto armado**. Rio de Janeiro – RJ. LTC – Livros técnicos e científicos editora. Cap. 1, conceitos gerais. p. 1., 1985.

PICHTEL, J. (2005) Waste management practices: municipal, hazardous, and industrial. **Boca Raton: Taylor & Francis**. 649 p.

POPADIUK, S. STREHLAU, V.I. Avaliação da composição e da funcionalidade da embalagem de cerveja, segundo o envolvimento do consumidor. **Revista de Ciências**

da **Administração**. v.5. n.10. p.1-15. 2003. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/2735/273526072001.pdf>>. Acessado em 18 de dezembro de 2019.

PRATES, G.A. **Ecodesign utilizando QFD, métodos Taguchi e DFE**. Florianópolis, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

QUARCIONI, V.A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – estudo em pasta**. 2008. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo.

ROSZCZYNIANSKI, W. Determination of Pozzolanic Activity of Materials By Thermal Analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. V. 70, p. 387-392. 2002.

SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**. Tese de Doutorado, 2014. Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Belo Horizonte – MG.

SANTOS, L. B. A indústria de cimento no Brasil: origens, consolidação e internacionalização. **Soc. nat. (Online)**. Uberlândia, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-45132011000100007&lng=en&nrm=iso>. Acessado em 21 de outubro de 2019.

Schwarz,N. Neithalath. N. **Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration**. *Cement & Concrete Composites* 30, 2008, pp 486–496, United States.

SCRIVENER, K. L. The Microstructure of Concrete. Em SKALNY, J. P. **Materials Science of Concrete I**. Westerville: American Ceramic Society, 1989. 473p.

SERRA. **PROJETO DE LEI Nº 28/2017 - Dispõe sobre a proibição de os organizadores de eventos artísticos, culturais e desportivos, no âmbito do Município da Serra, efetuarem a venda de bebidas em garrafas de vidro descartáveis, "long neck"**. CÂMARA MUNICIPAL. 2017. Disponível em: <<http://www3.camaraserra.es.gov.br/Arquivo/Documents/PL/PL282017/15609-15133902052017.pdf>>. Acessado em 07 de abril de 2021.

SHELBY, J. E. ; LACOURSE, W. C. ; CLARE, A. G.. **Ceramics and Glasses**. New York State College of Ceramics, Alfred University. In: Engineered materials Handbook. Engineering properties of oxide glasses and other inorganic glasses, vol 4, 2000.

SHI, C. ET AL., Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement and Concrete Research**, v.35, p. 987-993, 2005.

SILVA, E. J., ET AL. Aplicação de fibra de coco em matrizes cimentícias. **Revista eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. Bahia, 2012. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/271104070_APLICACAO_DE_FIBRA_DE_COCO_EM_MATRIZES_CIMENTICIAS>. Acessado em: 14 de setembro de 2019.

SILVA, G. **Estudo da Atividade Pozolanica do Resíduo de Polimento de Porcelanato**. Tese de doutorado, 2011. UFMG/CEPGEM. Minas Gerais.

SILVA, J. ET AL. Incorporation of fine ceramics in mortars. **Construction and Building Materials**. v. 23. p. 556-564. 2007.

SILVEIRA, N.C.G. **Estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro na produção de argamassa**. Trabalho de conclusão de curso, 2016. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

SIMÕES, L.J. **Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto**. Dissertação de Mestrado, 2013. Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Vitória – ES.

SNIC. **Números da indústria**. 2019. Disponível em: < <http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acessado em 21 de outubro de 2019.

SNIC. **Relatório Anual 2004**. 2004. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2004.pdf>. Acessado em 21 de outubro de 2019.

SOBRINHO, H. C. ET AL. **Análise do concreto convencional com adição de resíduo de cerâmica polida proveniente de demolição**. 2017. Disponível em: < http://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2017/civil/29_adcccadrpcpdd.pdf>. Acessado em 21 de novembro de 2019.

SOUZA, E. C. P. **Cinética de cristalização em vidros teluritos do sistema TLWN**. 2013, 88p. Exame de Qualificação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira, SP. Disponível em: < https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91983/sousa_ecp_me_ilha_prot.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acessado em: 25 de setembro de 2019.

SUZIGAN, W. **A indústria Brasileira: origens e desenvolvimento**. São Paulo: Brasiliense, 1986.

TASHIMA, M.M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado, 2006. UNESP. Ilha Solteira – SP. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/91490>>. Acessado em 19 de novembro de 2019.

TASHIMA, M.M. ET AL. Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozzolânica. **Ambiente Construído**. Porto Alegre. v. 12. n. 2. p. 151-163. 2012.

TASHIMA, M.M. **Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del silicoaluminato de cálcico vítreo (VCAS)**. Tese de Doutorado, 2012. Departamento de Ingeniería de La Construcción y de Proyectos de la Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

TAYLOR H. F. W. **Cement chemistry**. London: Academic Press Limited, 1990.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2. Ed. London: Thomas Telford, 1998. 459p.

TEIXEIRA, S. R. **Caracterização de argilas usadas para produção de cerâmica vermelha e estudo das alterações nas suas propriedades pela adição de resíduos sólidos**. Tese de Doutorado, 2006. Universidade Estadual Paulista - Faculdade de ciências e tecnologia, FCT-UNESP. Presidente Prudente – SP.

THOMAZ, E.C.S. **Hidratação do Cimento Portland**. (Microscopia Eletrônica Ambiental). Notas de aula. Instituto Militar de Engenharia – IME. Disponível em: <<http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/>>. Acessado em 14 de dezembro de 2019.

TUCKER, E. L. et al. Economic and life cycle assessment of recycling municipal glass as a pozzolan in portland cement concrete production. **Resources, Conservation & Recycling**. v. 129. p. 240-247. 2018.

TOFFOLI, S. **Estrutura e formação dos vidros**. Apostila, 2013. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <[http://www.pmt.usp.br/pmt5783/AulaCer%C3%A2mica3\(Vidros\)-2013.pdf](http://www.pmt.usp.br/pmt5783/AulaCer%C3%A2mica3(Vidros)-2013.pdf)>. Acessado em 26 de novembro de 2019.

VELLOSO, M.P. 2008. **Os restos na história: percepções sobre resíduos**. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 13, n. 6, p. 1953-1964.

VIEIRA, A.A.P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos.** Dissertação de Mestrado, 2005. Universidade Federal da Paraíba - UFPB. João Pessoa – PB.

VIEIRA, P.L.C. **Reaproveitamento do resíduo de lã de vidro na produção de argamassa.** Dissertação de Mestrado, 2016. Instituto Federal do Espírito Santo. Espírito Santo. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/282/DISSERTA%c3%87%c3%83O_Reaproveitamento_res%c3%adduo_l%c3%a3_vidro_produ%c3%a7%c3%a3o.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acessado em 02 de dezembro de 2019.

WEBER, S. L. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz.** Dissertação de Mestrado, 2001. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis – SC.

ZANOTTO, E. D. Do cathedral glasses flow? **American Journal of Physics**, v. 66, n.5, p. 392-395. 1998. Disponível em: <<https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.19026>>. Acessado em: 25 de setembro de 2019.

ZANOTTO, E. D.; MAURO, J. C. The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.05.019>>. Acesso em: 19 de setembro de 2019.

ZANOTTO, E.D. Vidros: arte, ciência e tecnologia de 4000 a.C. a 2000 d.C., **Engenharia de Materiais**. 1989. 33-66. Disponível em: <<http://www.lamav.ufscar.br/artpdf/em1-89.pdf>> Acessado em: 26 de setembro de 2019.

APÊNDICE I

Tabelas de resistência à compressão axial – item 5.7.

TABELA 28 – Resistência a compressão argamassa referência – V0

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL (Mpa)				
%	IDADES			
Piloto (0)	7	14	28	91
1	11,25	14,89	13,5	14,95
2	11,99	12,47	12,24	13,14
3	12,21	16,8	12,38	15,9
4	11,43	12,46	16,61	12,86
5	8,64	10,23	11,19	12082
Média	11,5567	13,2733	12,7067	13,65
Desvio P.	0,38592	1,40008	0,6906	1,1345

Fonte: O autor (2019).

TABELA 29 – Resistência a compressão argamassa 3% – V3

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL (Mpa)				
%	IDADES			
3	7	14	28	91
1	14,83	14,86	10,23	18,78
2	18,32	13,88	19,62	10,92
3	15,27	10,93	18,15	17,49
4	14,77	16,92	16,43	11,94
5	13,36	15,58	13,55	17,37
Média	14,9567	14,7733	16,0433	15,6
Desvio P.	0,27301	0,85331	2,32425	3,17022

Fonte: O autor (2019).

TABELA 30 – Resistência a compressão argamassa 5% – V5

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL (Mpa)				
%	IDADES			
5	7	14	28	91
1	13,3	13,8	15,09	16,13
2	12,56	12,6	16,31	23,8
3	12,89	13,86	16,01	20,03
4	10,48	10,53	13,23	19,02
5	12,57	13,41	18,51	20,79
Média	12,6733	13,27	15,8033	19,9467
Desvio P.	0,18771	0,61213	0,63571	0,88794

Fonte: O autor (2019).

TABELA 31 – Resistência a compressão argamassa 5% – V5

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL (Mpa)				
%	IDADES			
10	7	14	28	91
1	8,06	16,25	16,96	21,8
2	9,04	14,48	12,93	23,7
3	16,03	12,4	15,06	24,1
4	14,19	16,71	19,36	23,95
5	10,84	16,76	11,43	23,26
Média	11,3567	15,8133	14,9833	23,6367
Desvio P.	2,61359	1,17738	2,01609	0,34933

Fonte: O autor (2019).

TABELA 32 – Resistência a compressão argamassa 15% – V105

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL (Mpa)				
%	IDADES			
15	7	14	28	91
1	14,65	15,92	18,07	19,26
2	14,04	14,5	12,98	26,81
3	8,97	16,89	18,77	26,61
4	12,71	16,82	20,49	22,54
5	11,39	17,15	14,35	25,95
Média	12,7133	16,5433	17,0633	25,0333
Desvio P.	1,325	0,54096	2,37574	2,18436

Fonte: O autor (2019).

Tabelas de resistência à tração por compressão diametral – item 5.8.

TABELA 33 – Resistência a tração por compressão diametral argamassa referência

– V0

RESISTENCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (Mpa) - ARGAMASSA PILOTO					
Idade	Amostra	Força de Ruptura (N)	Resistência (MPa)	Média	Desvio Padrão
7	1	23700,96	3,017699952	2,5834476	0,376078236
	2	18570,33	2,364447851		
	3	18599,76	2,368194995		
	4	14764,05	1,87981723		
	5	26879,4	3,422391501		
14	1	25506	3,247524782	3,24544304	0,061854155
	2	24995,88	3,182574287		
	3	26310,42	3,349946718		
	4	25967,07	3,306230038		
	5	18560,62	2,363211536		
28	1	26663,58	3,394912446	3,64680379	0,005902771
	2	26840,16	3,417395309		
	3	28605,96	3,642223948		
	4	28694,25	3,65346538		
	5	28625,58	3,644722044		
91	1	25839,6	3,290000054	3,46000851	0,232534936
	2	29884,4	3,804999985		
	3	21519,91	2,740000041		
	4	26428,85	3,365025694		
	5	29256,08	3,724999798		

Fonte: O autor (2019).

TABELA 34 – Resistência a tração por compressão diametral argamassa 3% – V3

RESISTENCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (Mpa) - ARGAMASSA 3%					
Idade	Amostra	Força de Ruptura (N)	Resistência (MPa)	Média	Desvio Padrão
7	1	23043,69	2,934013736	2,95150041	0,15935033
	2	25005,69	3,183823335		
	3	24495,57	3,118872839		
	4	21326,94	2,715430337		
	5	22003,83	2,801614649		
14	1	23485,14	2,990220896	3,18548873	0,069435535
	2	27036,36	3,442376269		
	3	24456,33	3,113876647		
	4	25054,74	3,190068575		
	5	25545,24	3,252520974		
28	1	24701,58	3,145102847	3,31080988	0,183844986
	2	27948,69	3,558537733		
	3	27556,29	3,508575813		
	4	24240,51	3,086397591		
	5	25751,25	3,278750982		
91	1	29668,41	3,777499284	3,47833298	0,114081474
	2	26330,47	3,352499563		
	3	28077,98	3,574999447		
	4	27547,84	3,507499926		
	5	23993,91	3,054999504		

Fonte: O autor (2019).

TABELA 35 – Resistência a tração por compressão diametral argamassa 5% – V5

RESISTENCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (Mpa) - ARGAMASSA 5%					
Idade	Amostra	Força de Ruptura (N)	Resistência (MPa)	Média	Desvio Padrão
7	1	13871,34	1,766153739	3,1600912	0,417377041
	2	23828,49	3,033937363		
	3	23131,98	2,945254962		
	4	17834,58	2,270769093		
	5	27497,43	3,50108128		
14	1	26173,08	3,332459813	3,33662331	0,076277192
	2	26820,54	3,414896974		
	3	22219,65	2,829093507		
	4	22150,98	2,820350171		
	5	25623,72	3,26251313		
28	1	24299,37	3,093891663	3,28499599	0,10946345
	2	22719,96	2,89279495		
	3	24554,43	3,126366908		
	4	25329,42	3,225041693		
	5	26271,18	3,344950292		
91	1	29373,89	3,739999571	3,56000001	0,159765098
	2	26978,43	3,435000152		
	3	22207,13	2,827499411		
	4	27528,21	3,505000311		
	5	30866,15	3,930000002		

Fonte: O autor (2019).

TABELA 36 – Resistência a tração por compressão diametral argamassa 10% – V10

RESISTENCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (Mpa) - ARGAMASSA 10%					
Idade	Amostra	Força de Ruptura (N)	Resistência (MPa)	Média	Desvio Padrão
7	1	22670,91	2,886549912	2,67504445	0,196070036
	2	18011,16	2,293252116		
	3	20728,53	2,63923841		
	4	19629,81	2,499345034		
	5	23112,36	2,942757072		
14	1	24034,5	3,060167583	3,01353646	0,040863791
	2	17932,68	2,283259732		
	3	23534,19	2,996466136		
	4	25456,95	3,241279542		
	5	23436,09	2,983975656		
28	1	28056,6	3,572277261	3,26292971	0,392356838
	2	29881,26	3,804600187		
	3	22121,55	2,816603225		
	4	26663,58	3,394912446		
	5	22160,79	2,821599417		
91	1	22972,9	2,925000473	3,63000042	0,12422254
	2	29432,8	3,747500487		
	3	31376,66	3,995000429		
	4	28608,13	3,642500241		
	5	27488,94	3,500000545		

Fonte: O autor (2019).

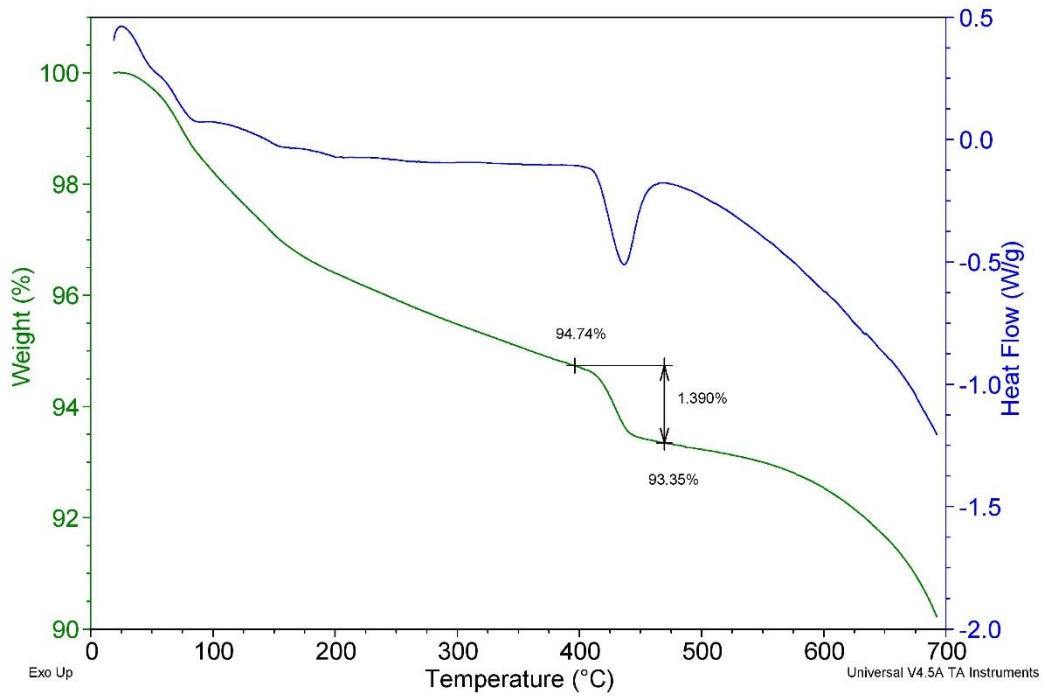
TABELA 37 – Resistência a tração por compressão diametral argamassa 15% – V15

RESISTENCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (Mpa) - ARGAMASSA 5%					
Idade	Amostra	Força de Ruptura (N)	Resistência (MPa)	Média	Desvio Padrão
7	1	19227,6	2,448134067	2,71043415	0,050936049
	2	21542,76	2,742909393		
	3	23700,96	3,017699952		
	4	21493,71	2,736664153		
	5	20826,63	2,65172889		
14	1	23956,02	3,050175199	2,91319627	0,312542492
	2	24613,29	3,133861415		
	3	20071,26	2,555552194		
	4	19953,54	2,540563618		
	5	28046,79	3,571028213		
28	1	21238,65	2,704188905	3,12428538	0,399688202
	2	30263,85	3,853313059		
	3	24887,97	3,168834759		
	4	27487,62	3,499832477		
	5	17324,46	2,205818756		
91	1	30846,51	3,927499634	3,8075002	0,109658121
	2	31808,63	4,050000557		
	3	27488,94	3,500000545		
	4	29157,91	3,712500405		
	5	29707,69	3,782500569		

Fonte: O autor (2019).

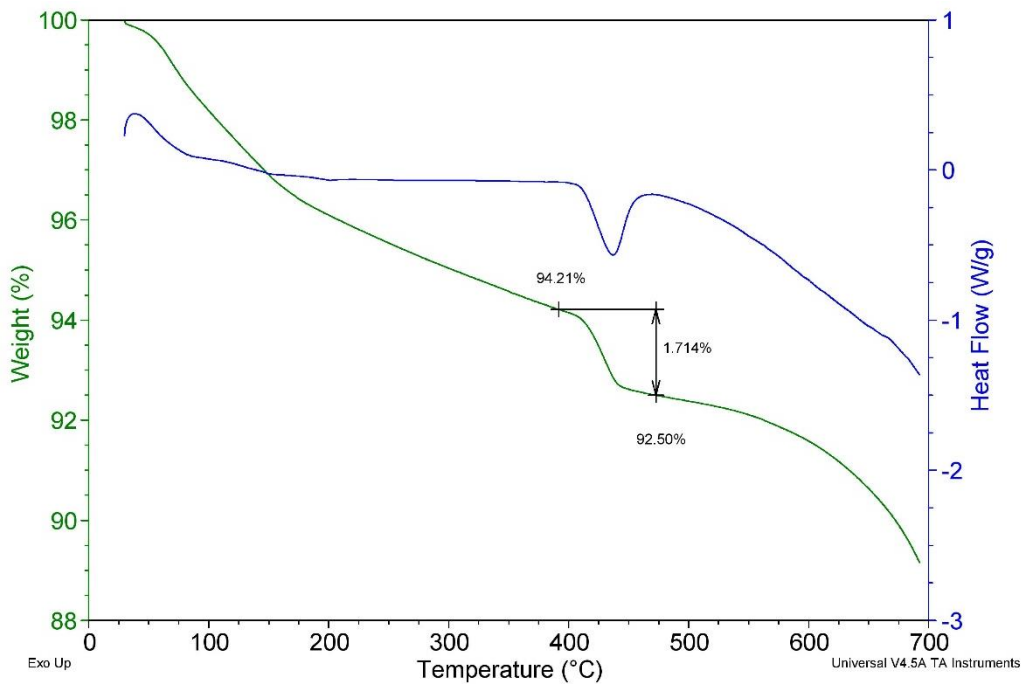
Curvas de TG e DSC das argamassas aos 7, 14, 28 – item 5.4

FIGURA 63 - TG e DSC da argamassa V0 - 7 dias



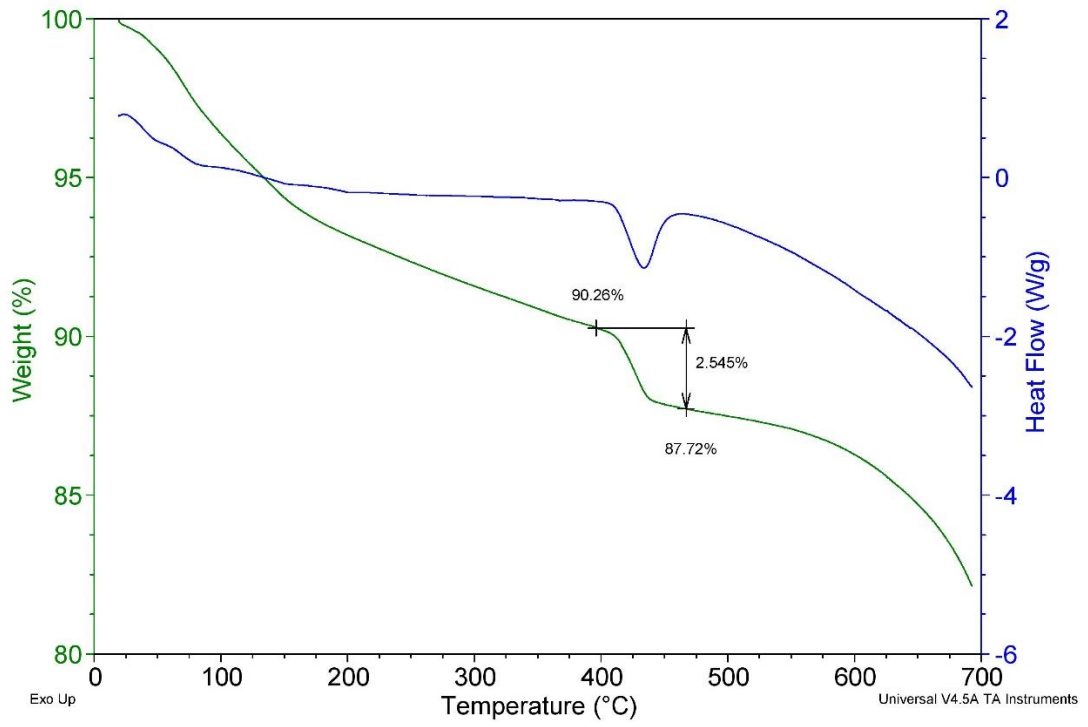
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 64 - TG e DSC da argamassa V3 - 7 dias



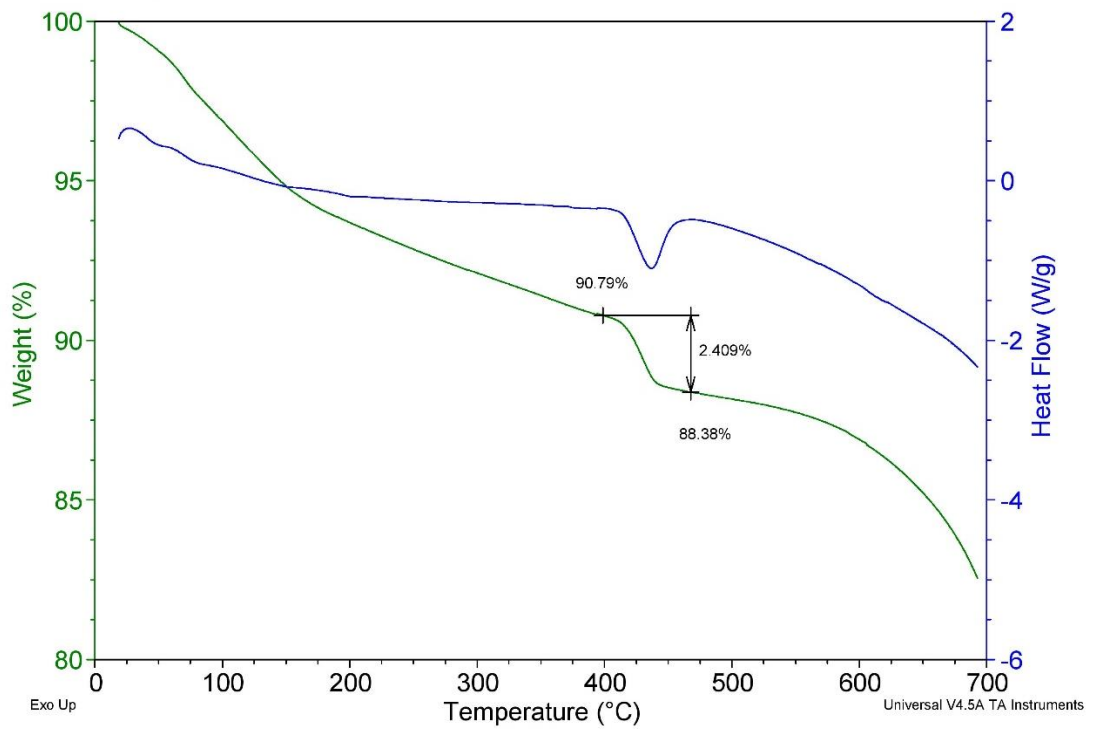
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 65 - TG e DSC da argamassa V5 - 7 dias



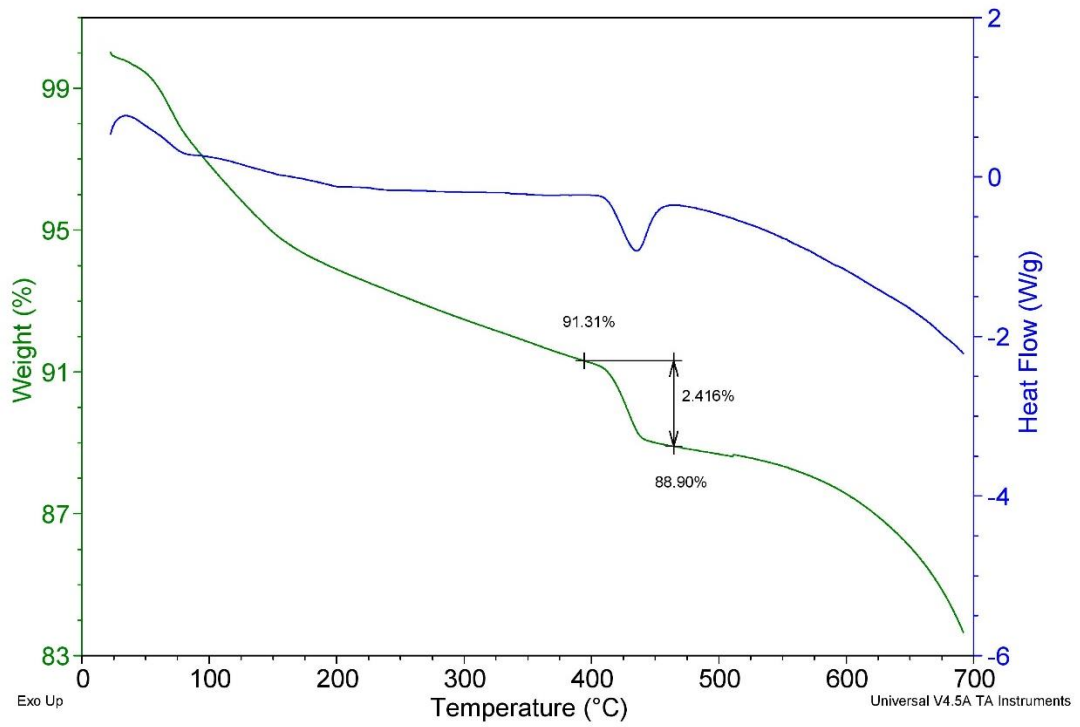
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 66 - TG e DSC da argamassa V10 - 7 dias



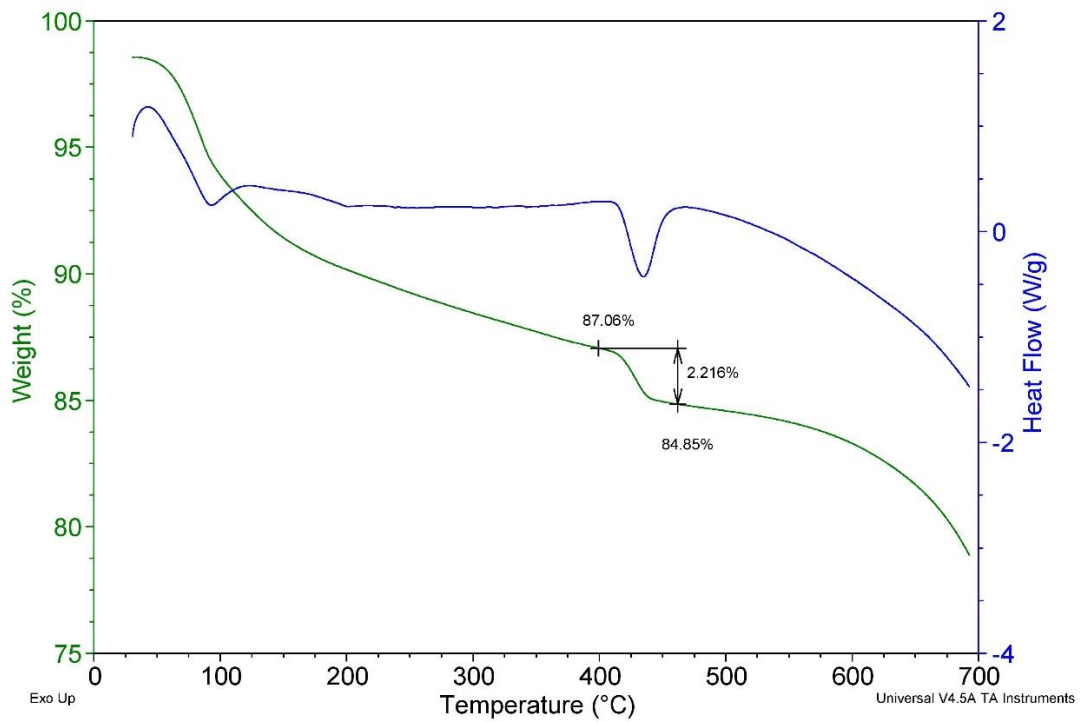
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 67 - TG e DSC da argamassa V15 - 7 dias



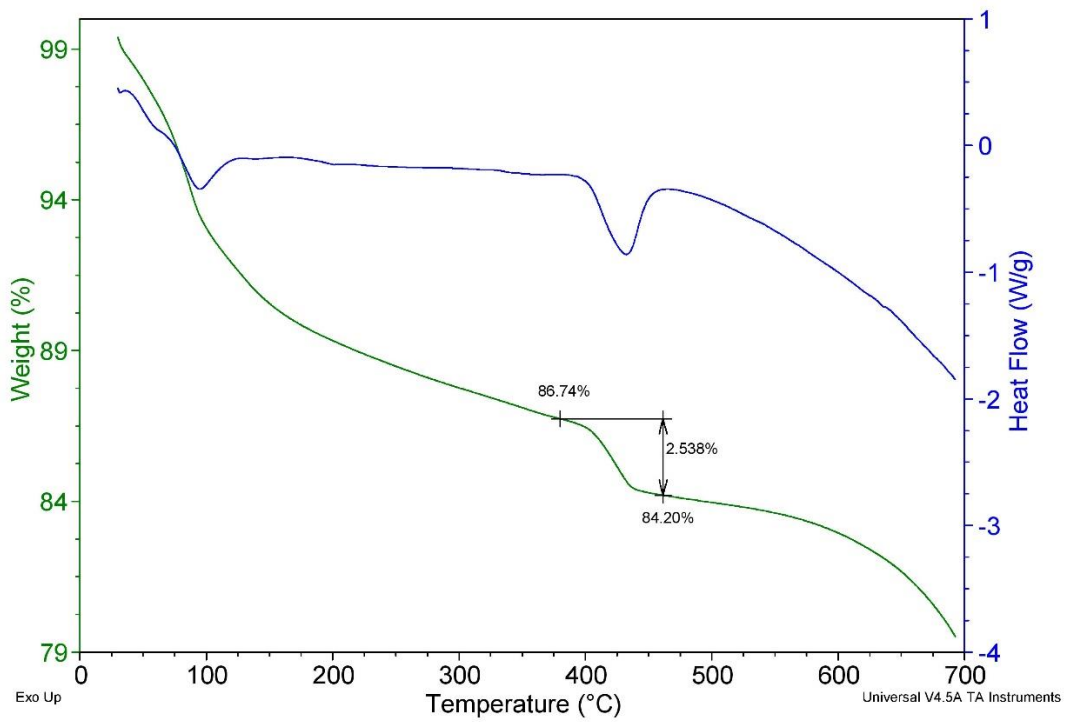
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 68 - TG e DSC da argamassa V0 - 14 dias



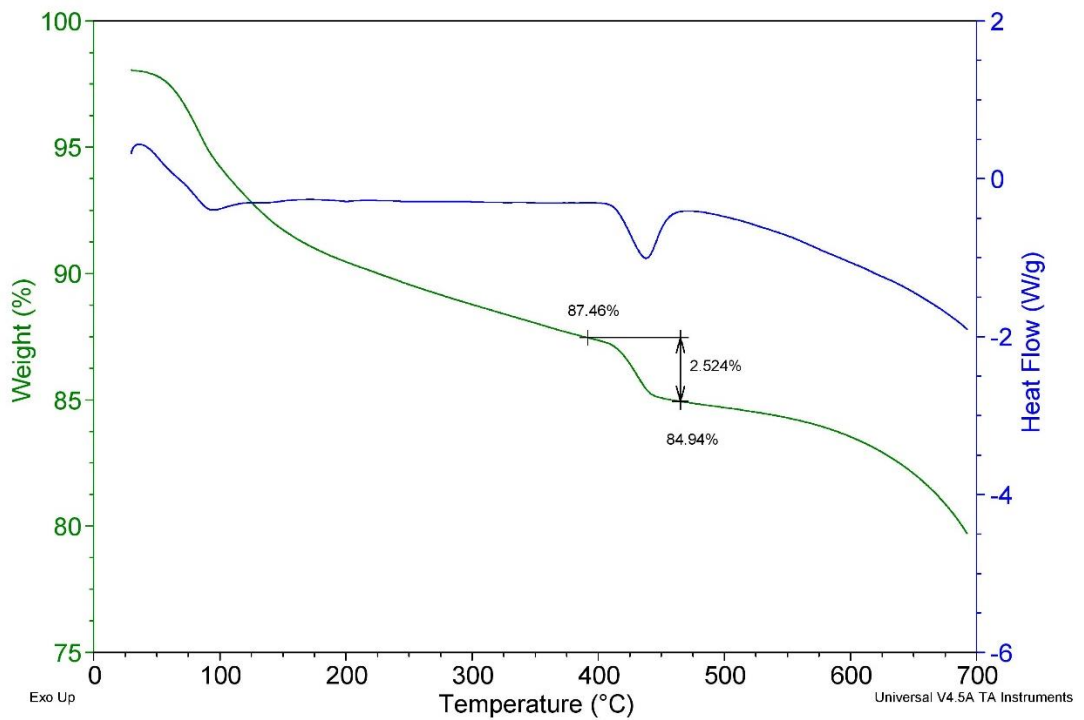
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 69 - TG e DSC da argamassa V3 - 14 dias



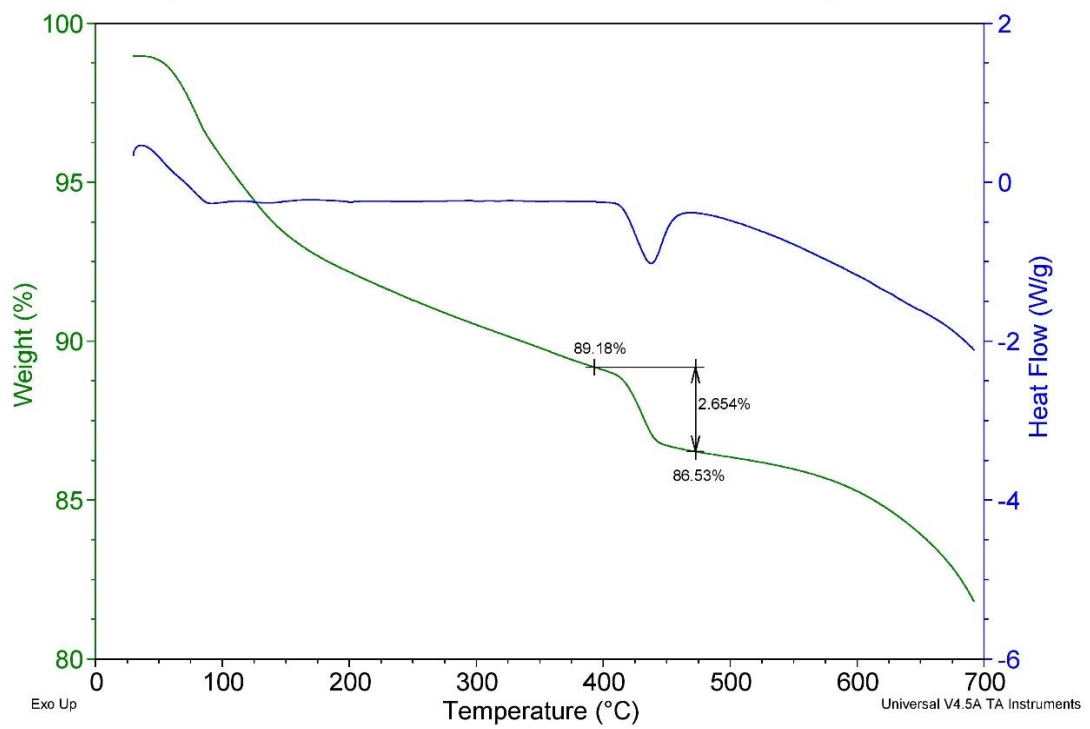
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 70 - TG e DSC da argamassa V5 - 14 dias



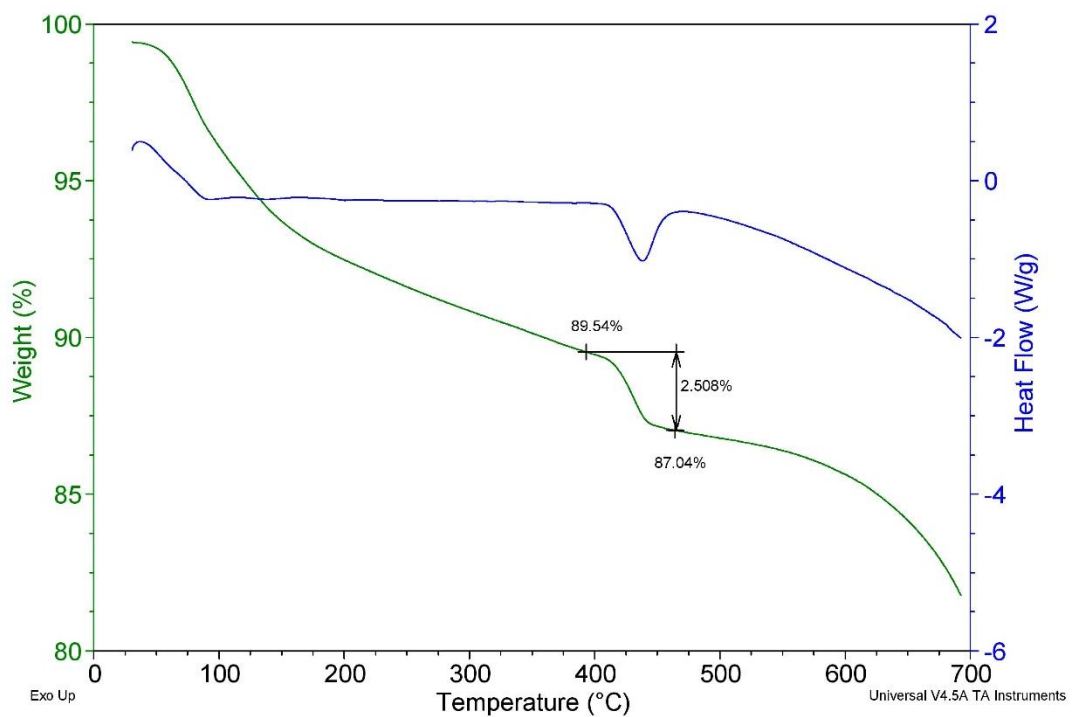
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 71 - TG e DSC da argamassa V10 - 14 dias



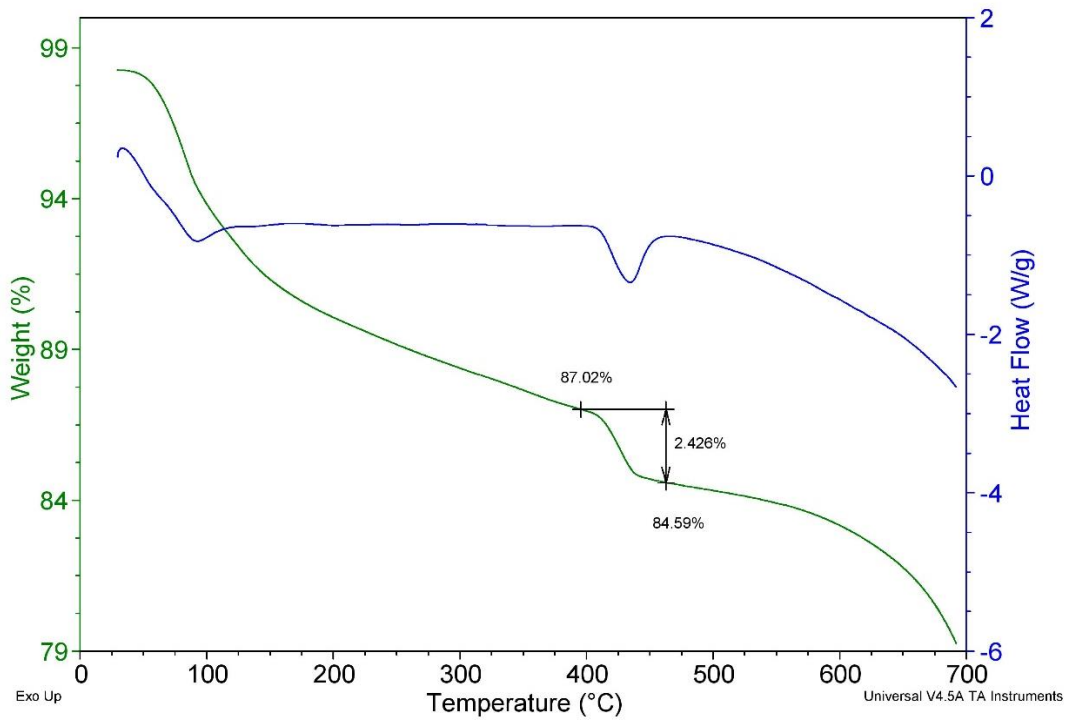
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 72 - TG e DSC da argamassa V15 - 14 dias



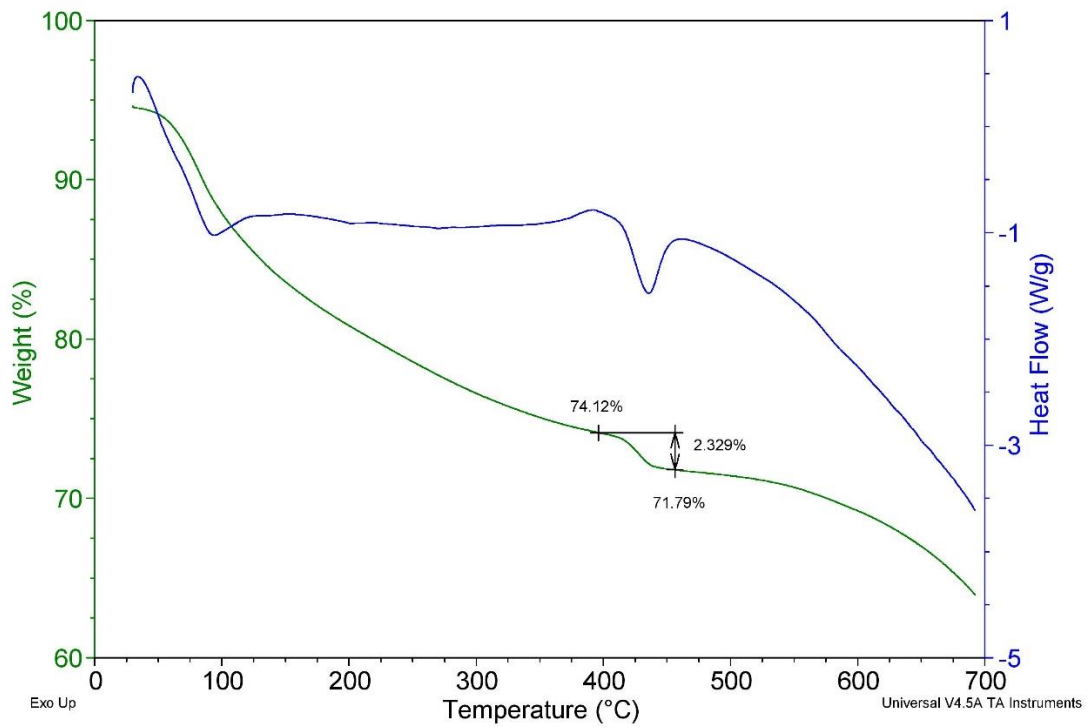
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 73 - TG e DSC da argamassa V0 - 28 dias



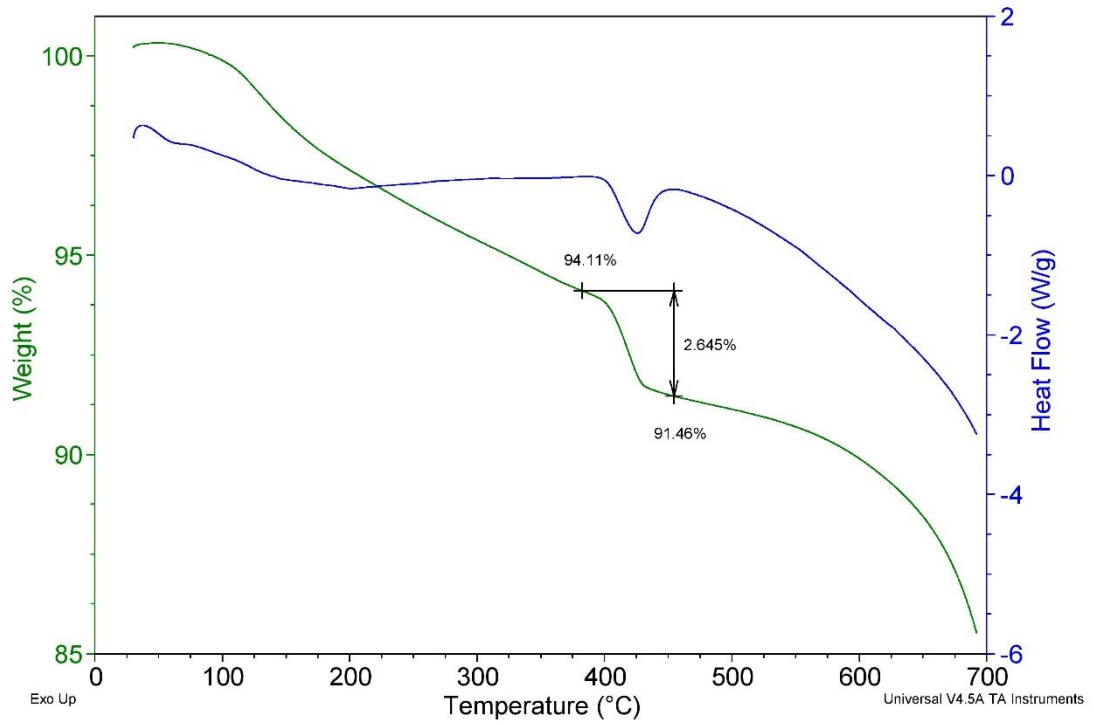
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 74 - TG e DSC da argamassa V3 - 28 dias



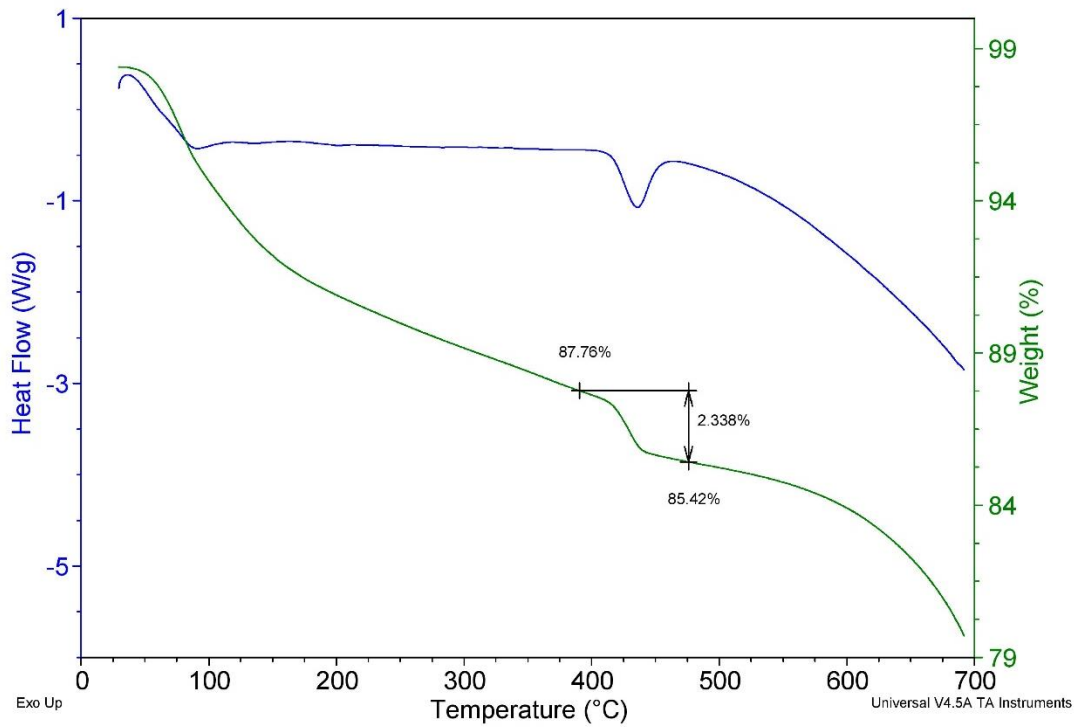
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 75 - TG e DSC da argamassa V5 - 28 dias



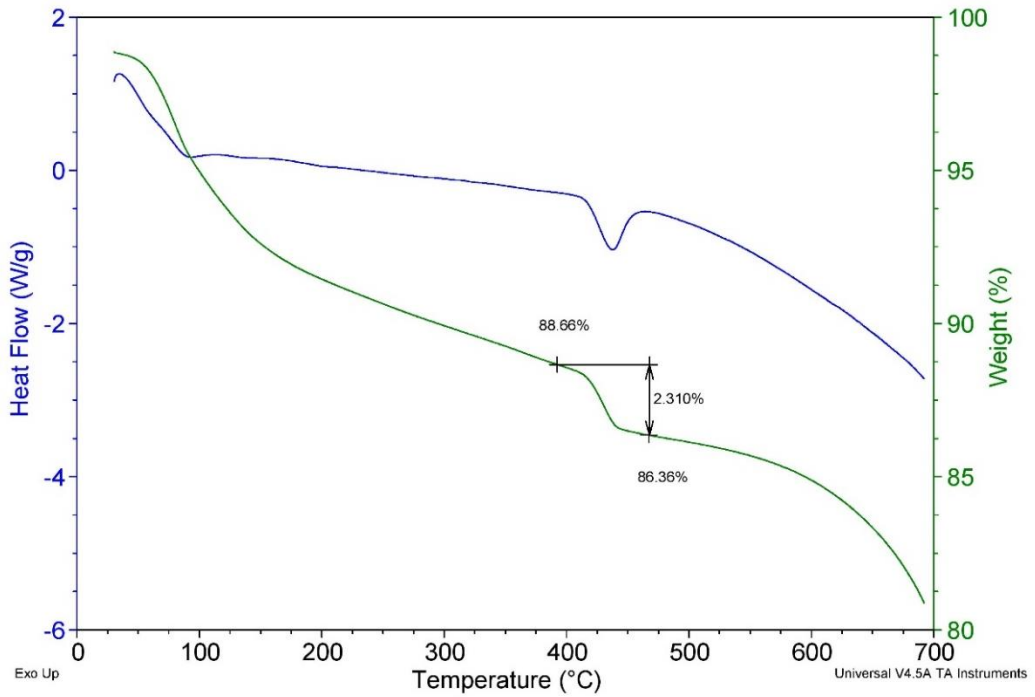
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 76 - TG e DSC da argamassa V10 - 28 dias



Fonte: O autor (2019).

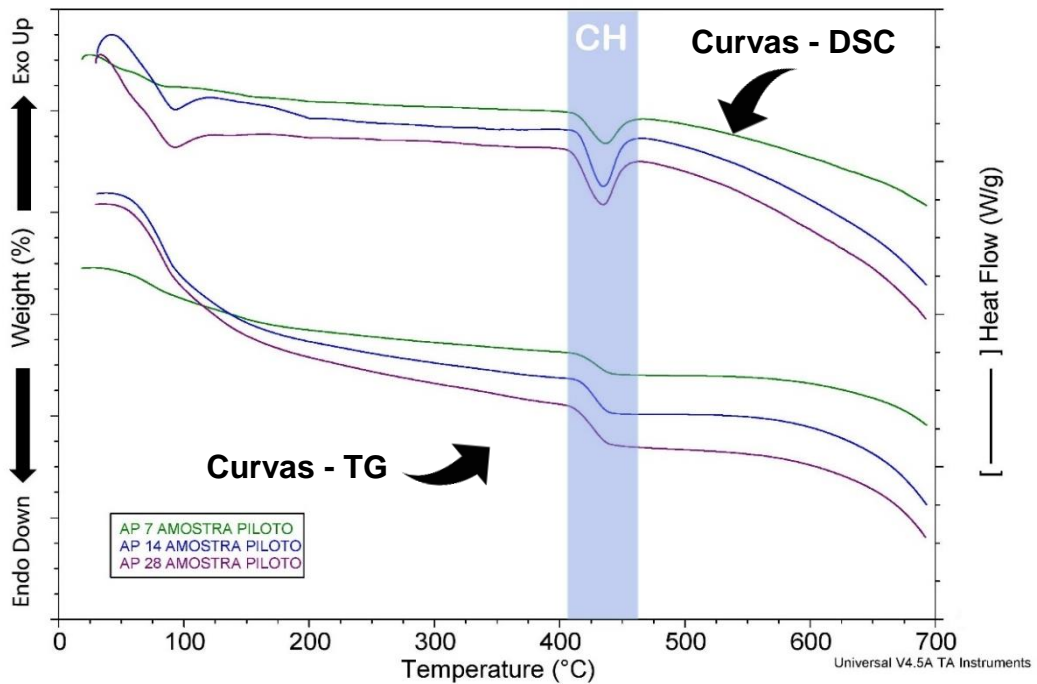
FIGURA 77 - TG e DSC da argamassa V15 - 28 dias



Fonte: O autor (2019).

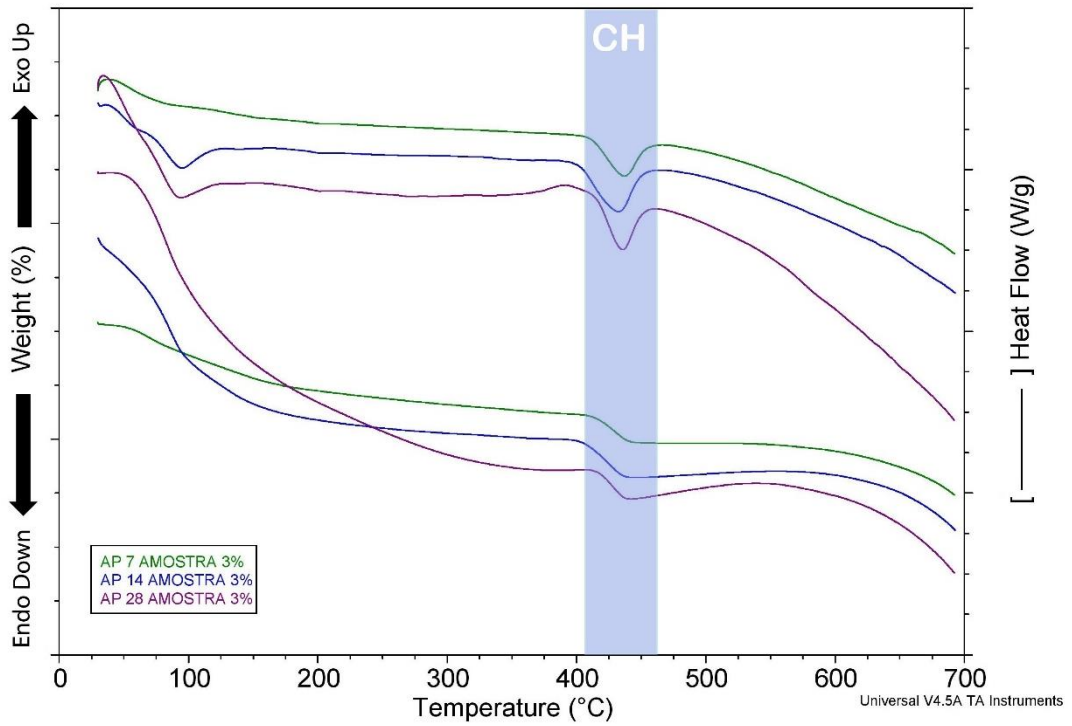
Curvas TG/DSC das argamassas agrupadas por idades de cura pra cada amostra – Item 5.4

FIGURA 78 - Curva TG/DSC amostra piloto (7, 14 e 28 dias)



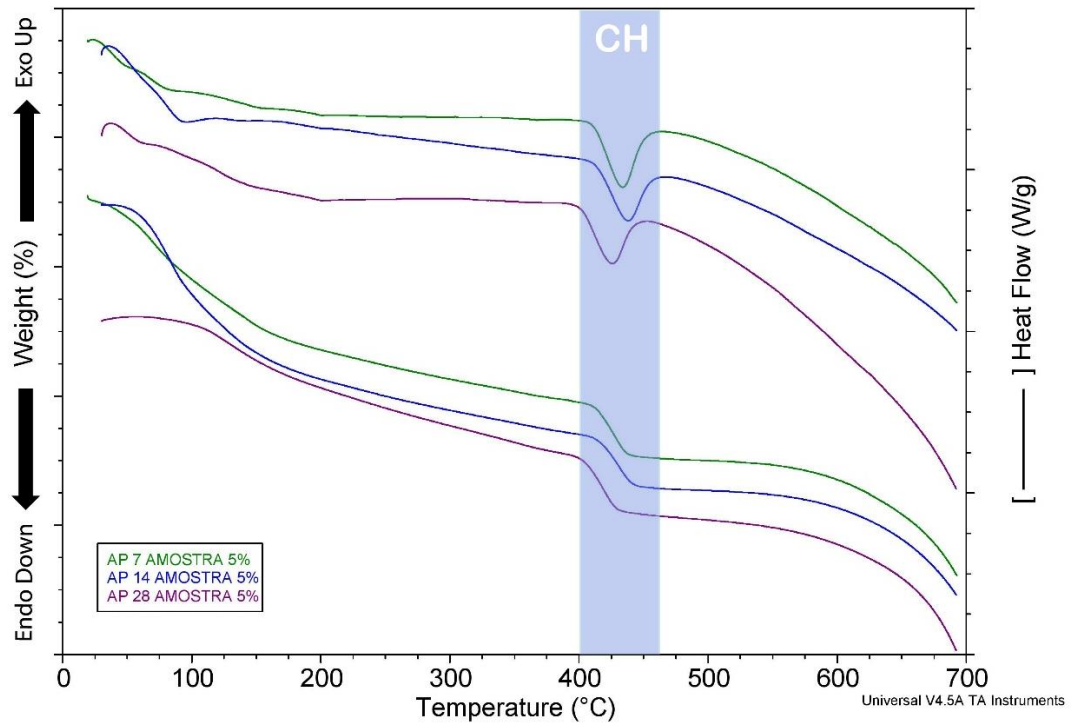
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 79 - Curva TG/DSC amostra 3% vidro (7, 14 e 28 dias)



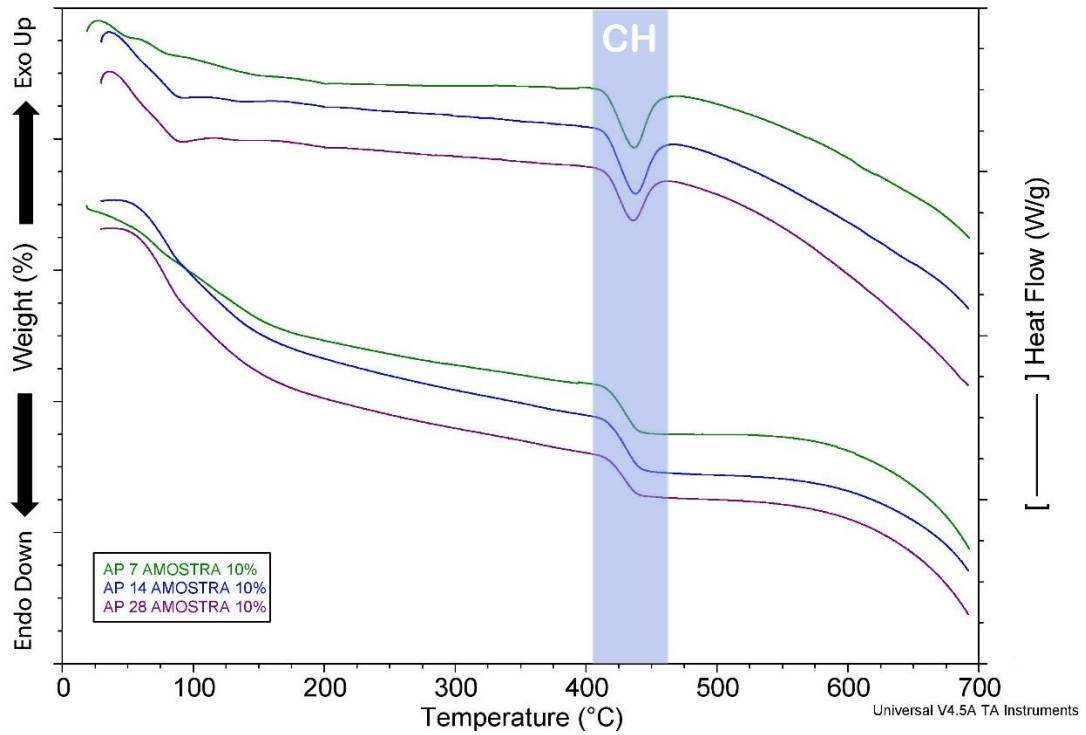
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 80 - Curva TG/DSC amostra 5% vidro (7, 14 e 28 dias)



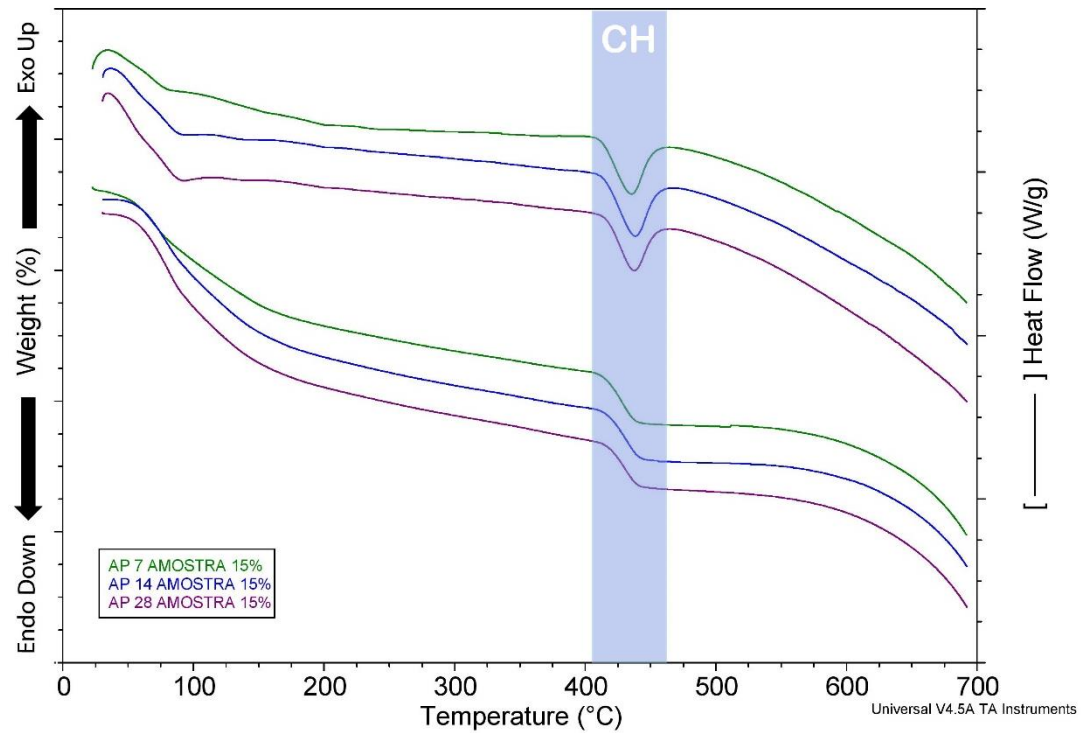
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 81 - Curva TG/DSC amostra 10% vidro (7, 14 e 28 dias)



Fonte: O autor (2019).

FIGURA 82 - Curva TG/DSC amostra 15% vidro (7, 14 e 28 dias)



Fonte: O autor (2019).

Valores de intensidade de pico endotérmico de DSC para as argamassas aos 7, 14 e 28 dias de cura – Item 5.4

Figura 83 - DSC endothermic peak intensity for V0 sample

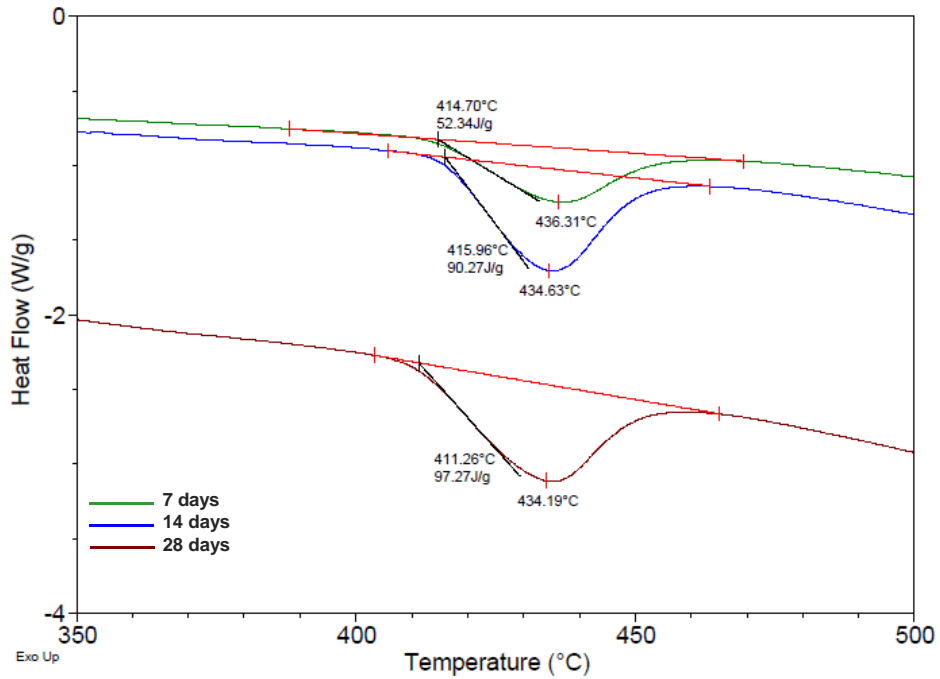


Figura 84 - DSC endothermic peak intensity for V3 sample

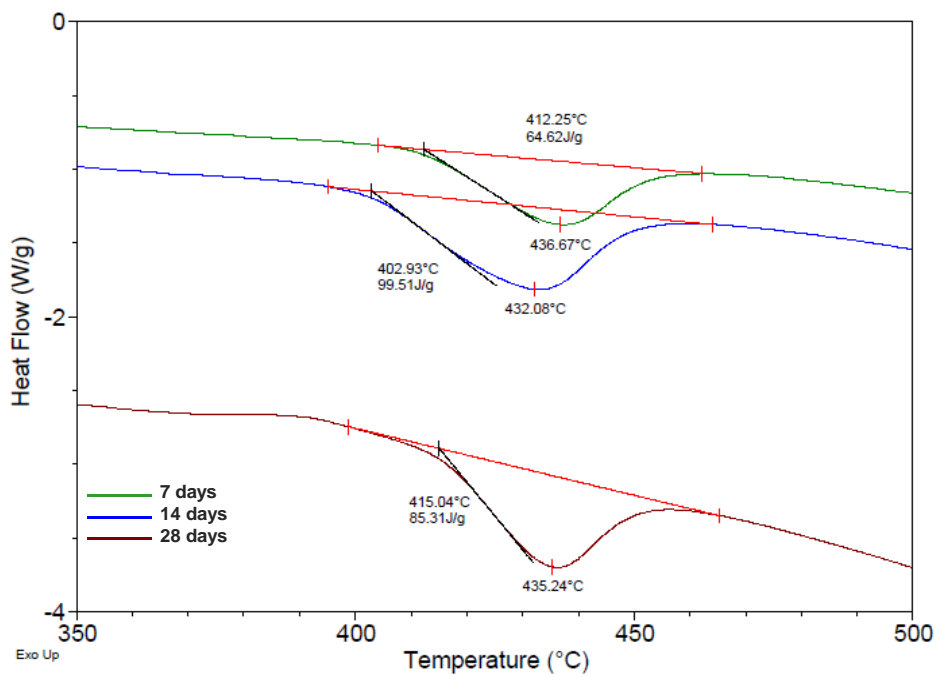


Figura 85 - DSC endothermic peak intensity for V5 sample

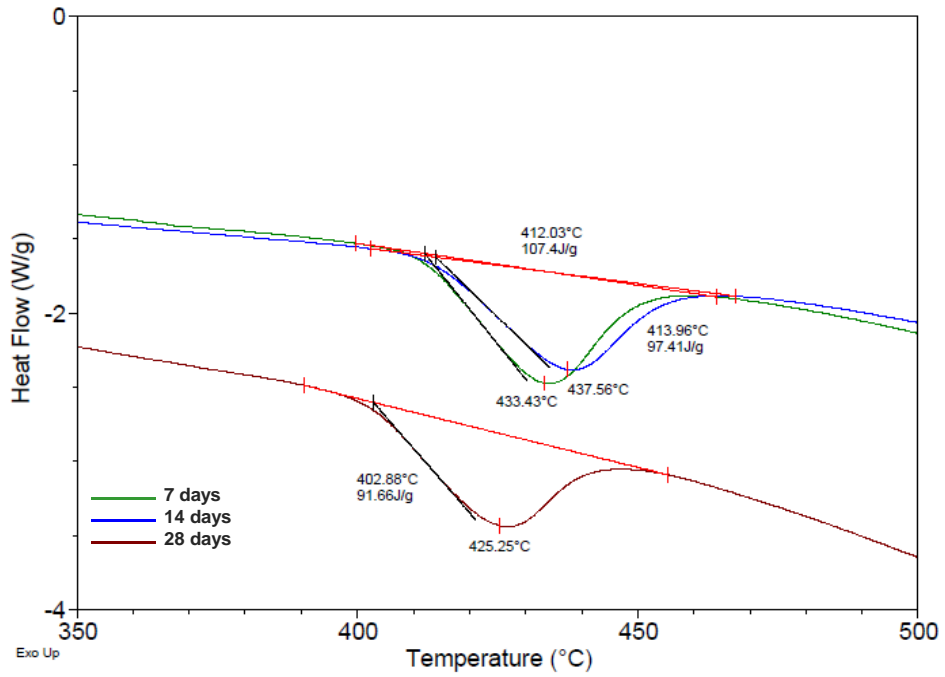


Figura 86 - DSC endothermic peak intensity for V10 sample

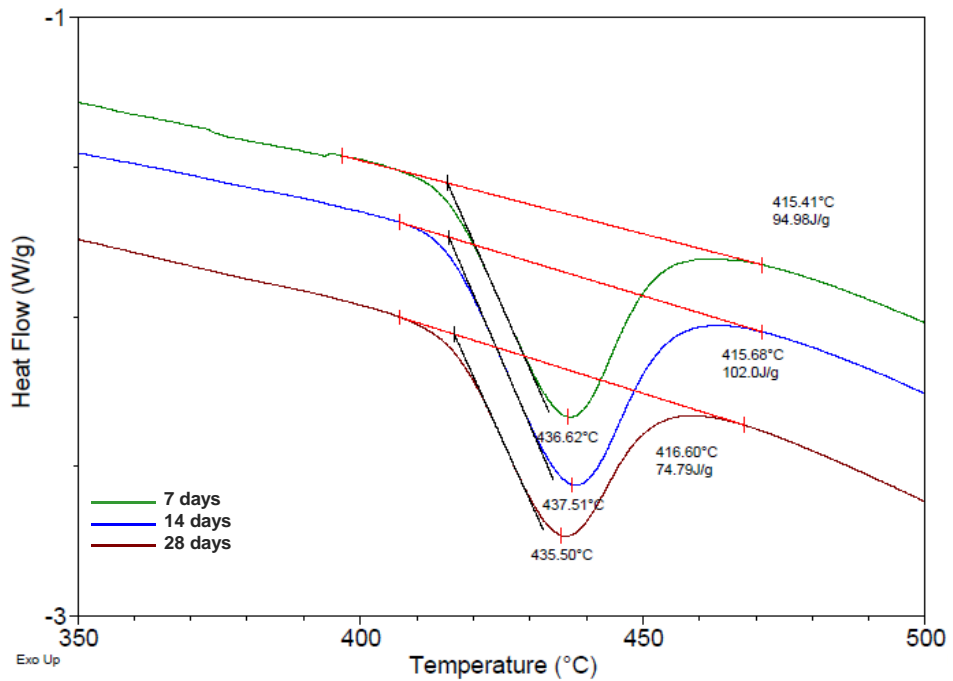
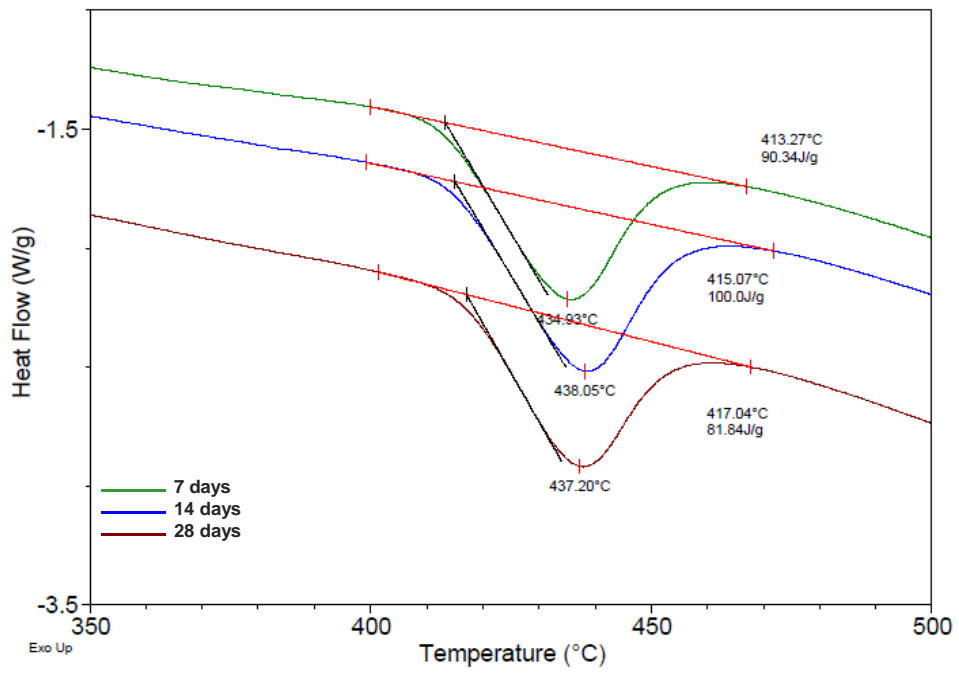
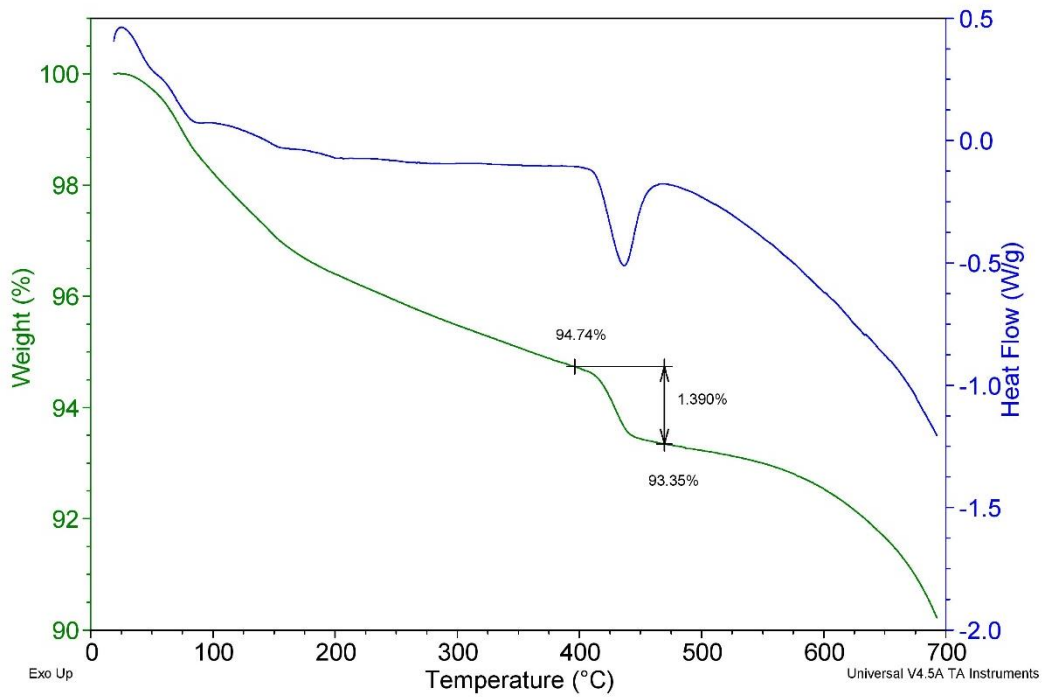


Figura 87 - DSC endothermic peak intensity for V15 sample



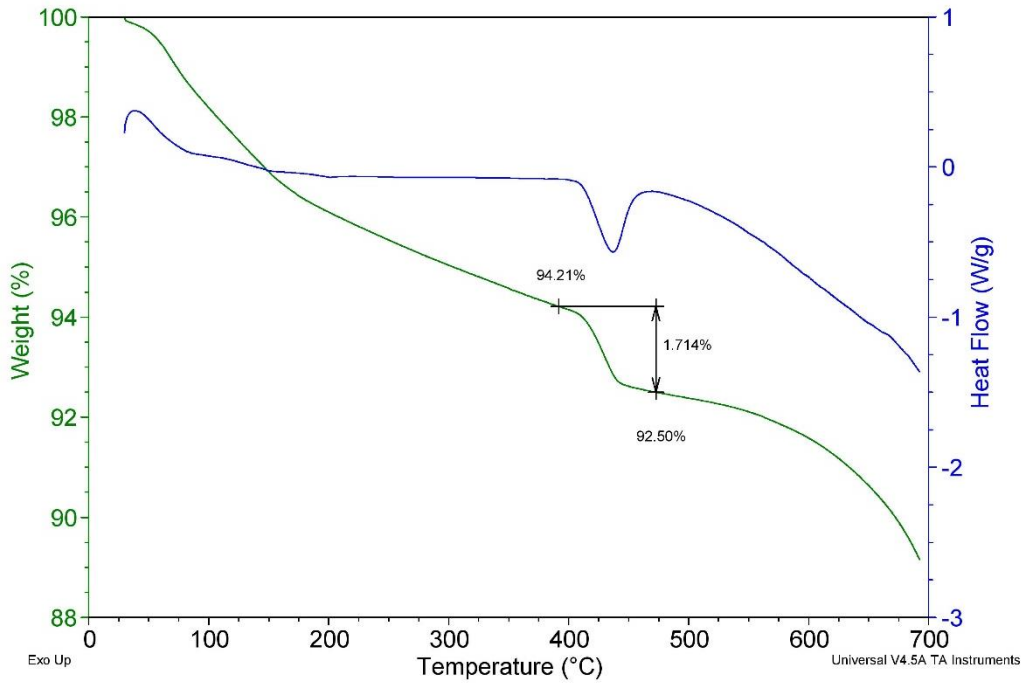
Curvas de TG e DSC das argamassas aos 7, 14, 28 para cálculo da fixação da cal – item 5.4

FIGURA 88 - TG e DSC da argamassa V0 - 7 dias



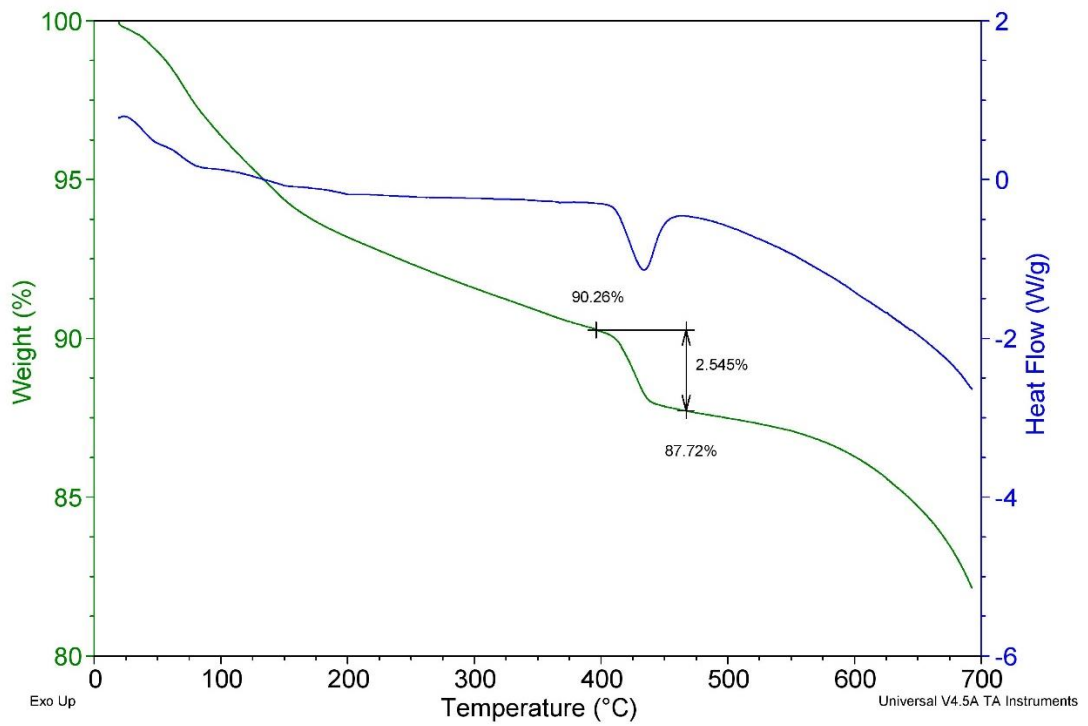
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 89 - TG e DSC da argamassa V3 - 7 dias



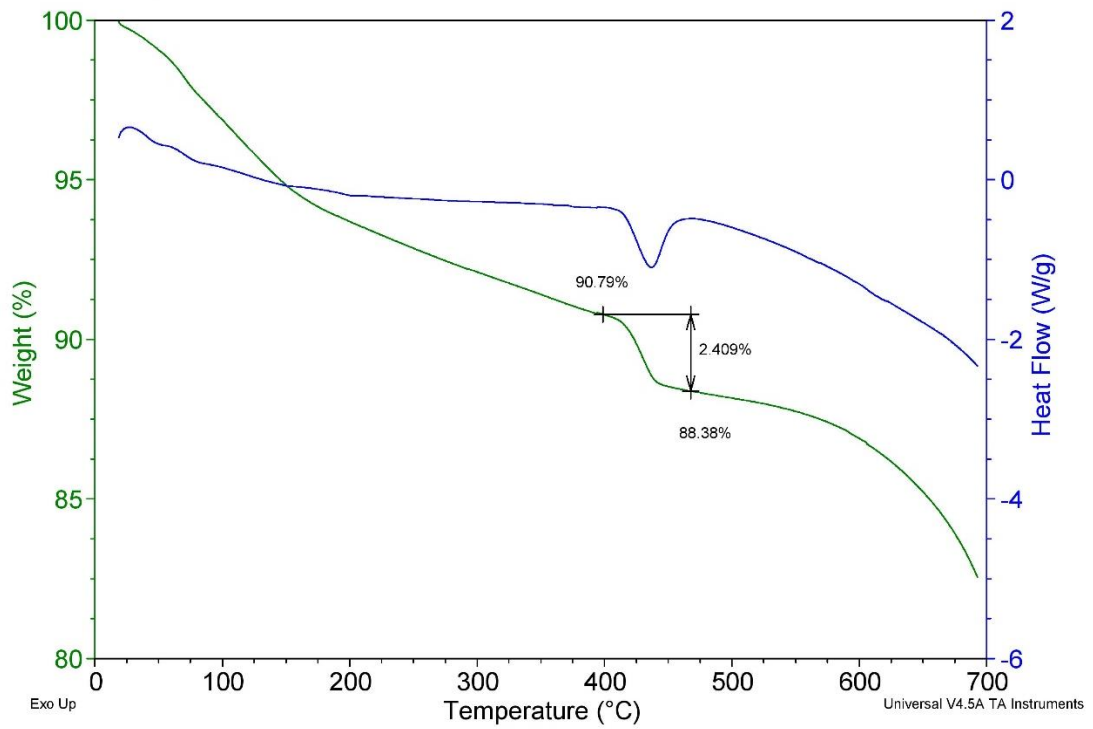
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 90 - TG e DSC da argamassa V5 - 7 dias



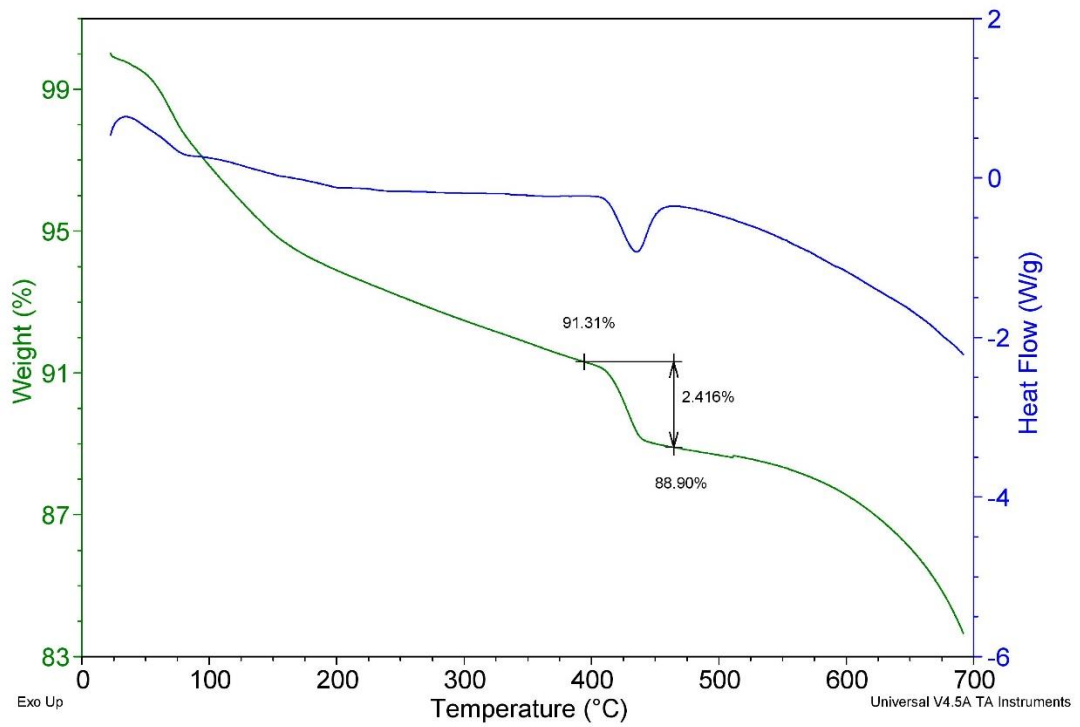
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 91 - TG e DSC da argamassa V10 - 7 dias



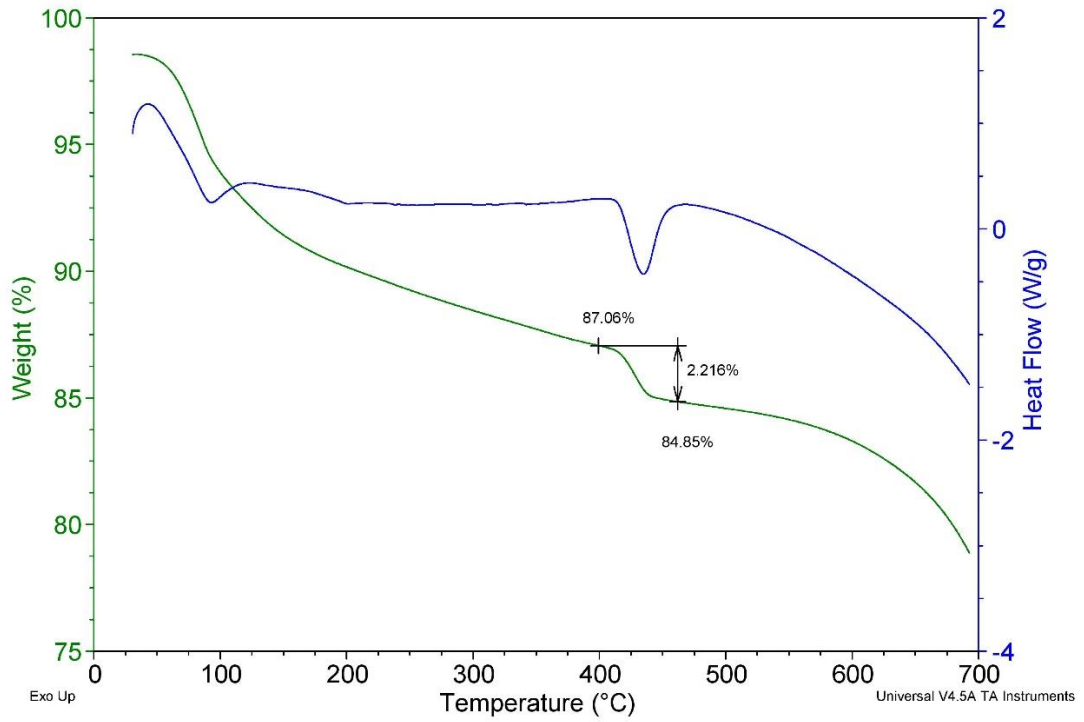
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 92 - TG e DSC da argamassa V15 - 7 dias



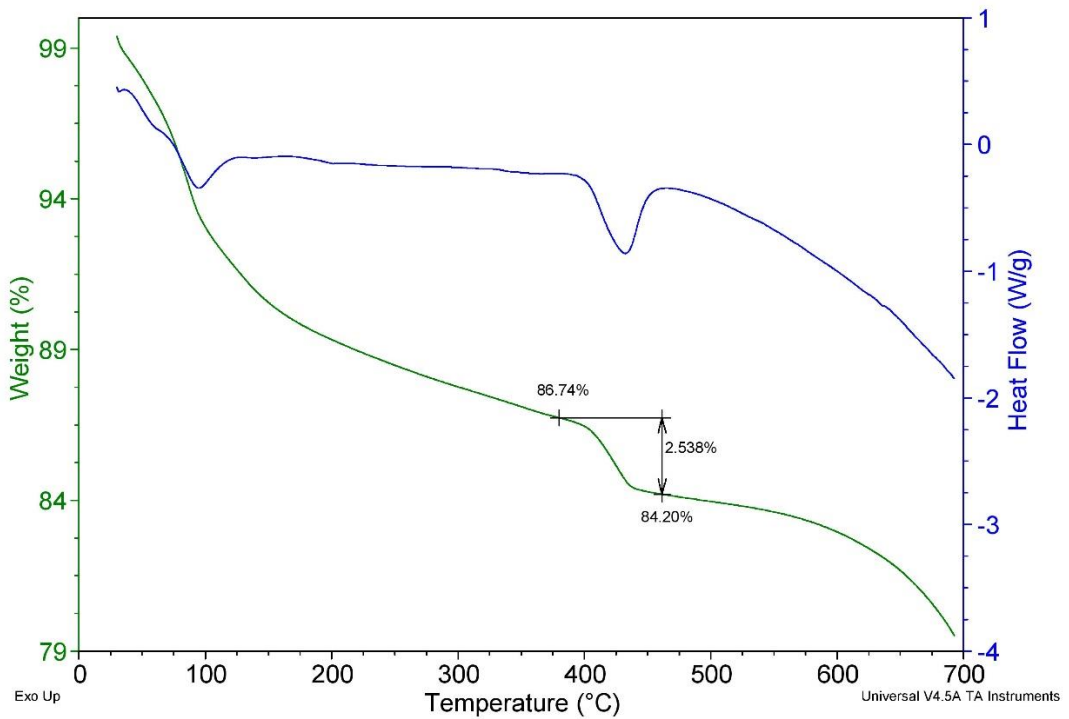
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 93 - TG e DSC da argamassa V0 - 14 dias



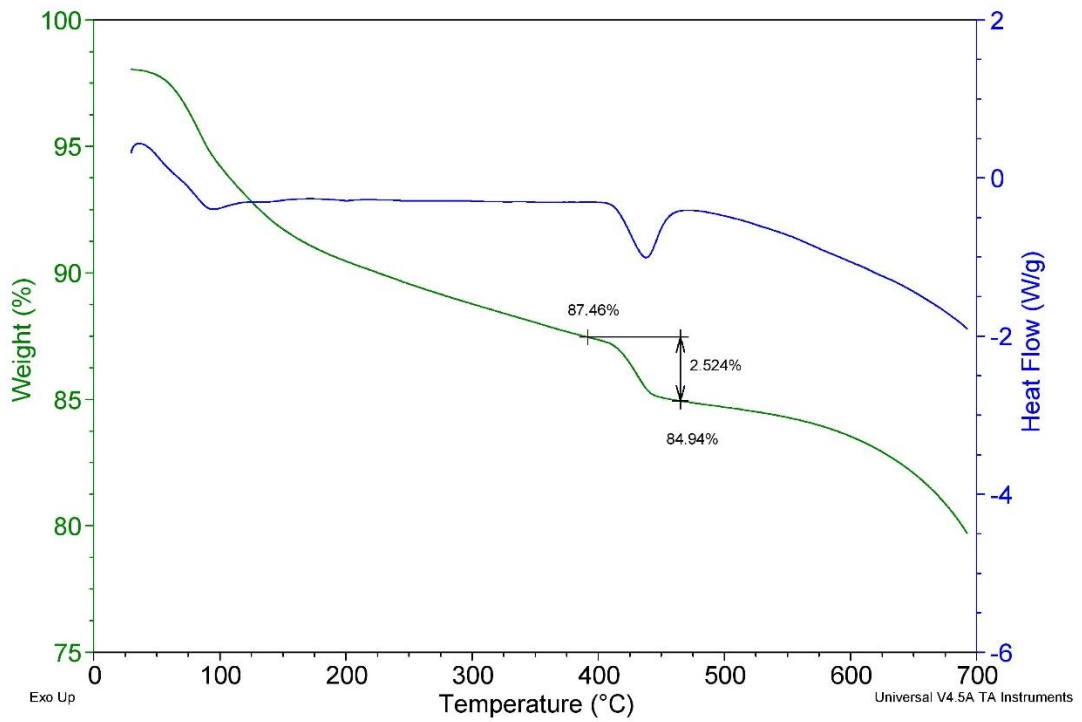
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 94 - TG e DSC da argamassa V3 - 14 dias



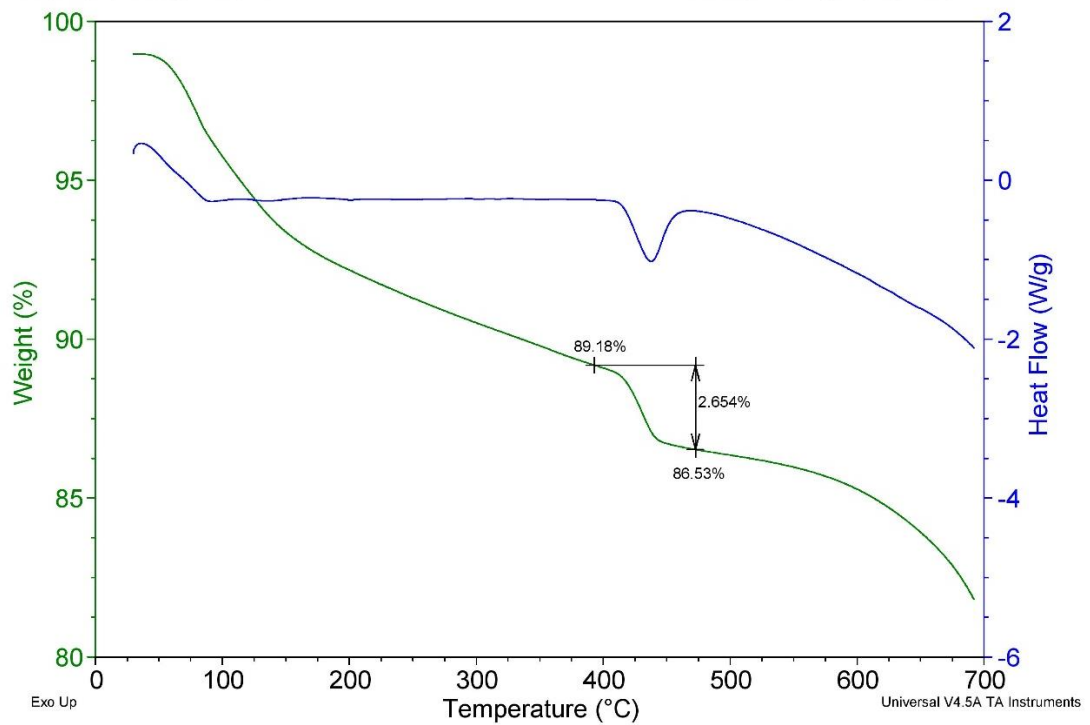
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 95 - TG e DSC da argamassa V5 - 14 dias



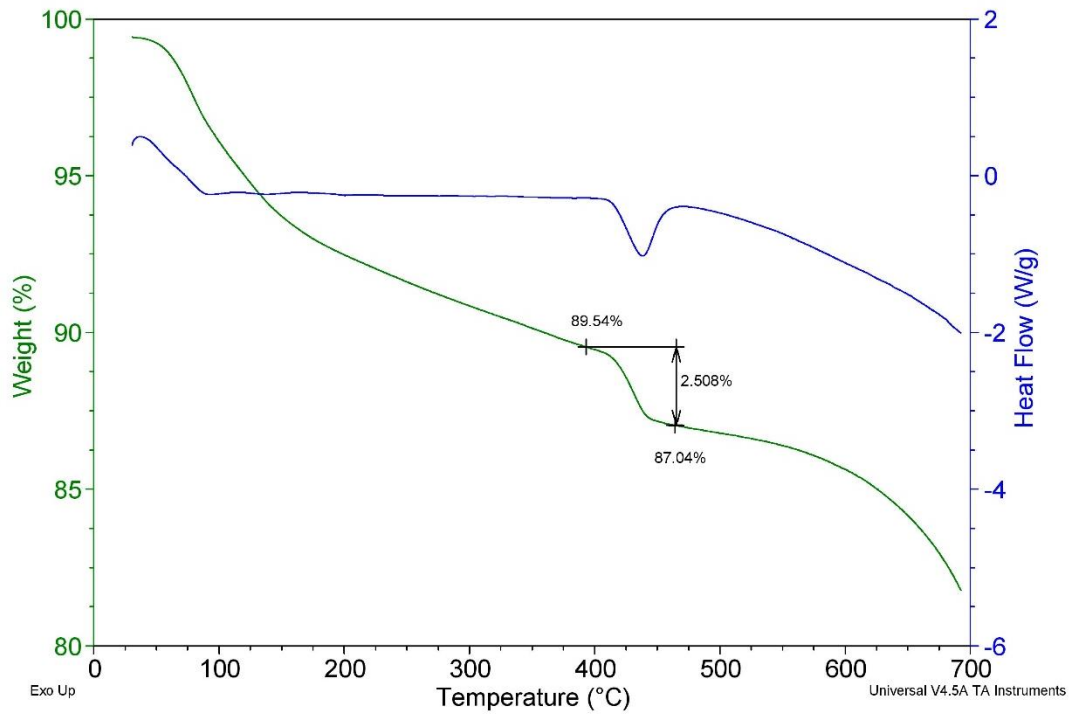
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 96 - TG e DSC da argamassa V10 - 14 dias



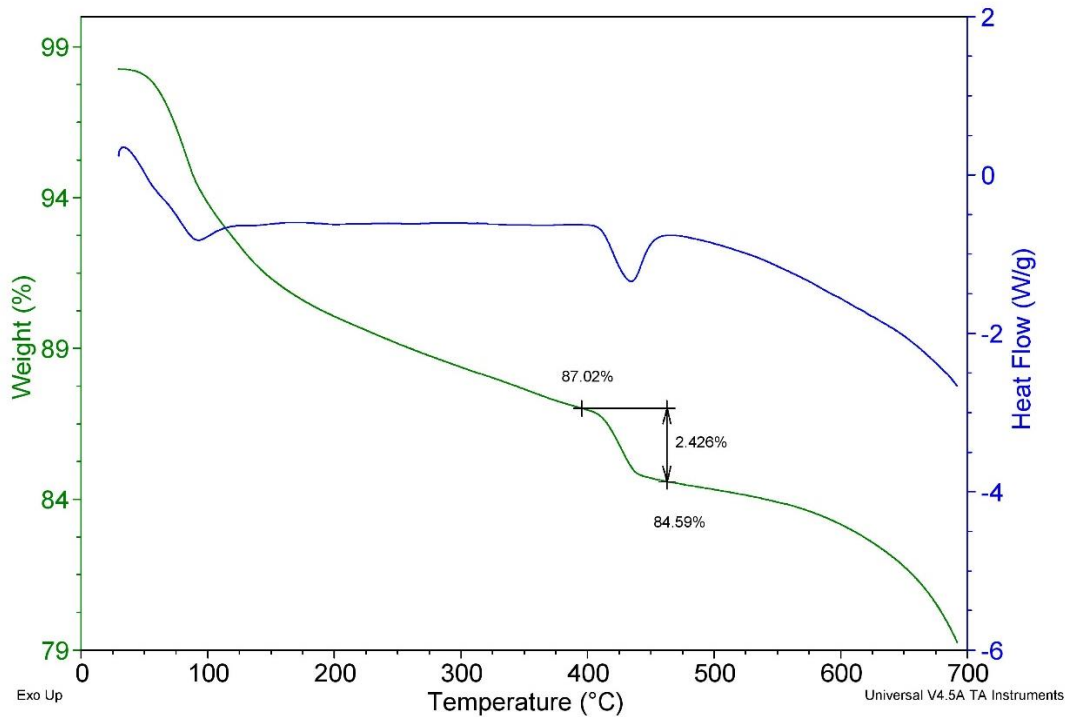
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 97 - TG e DSC da argamassa V15 - 14 dias



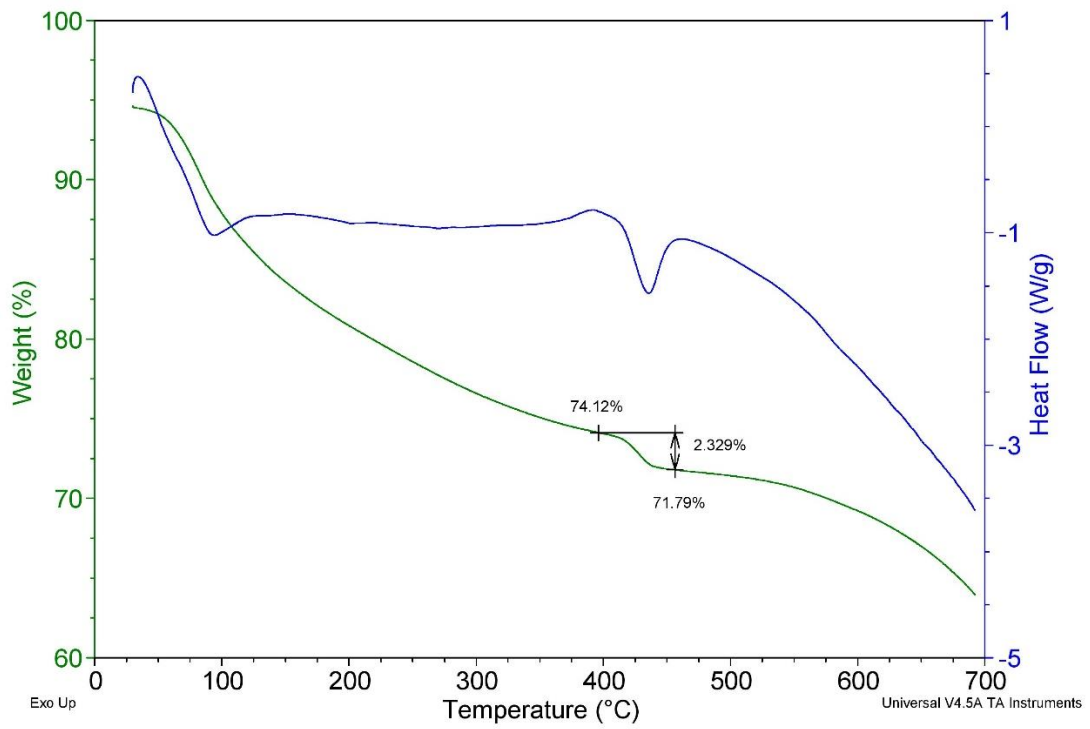
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 98 - TG e DSC da argamassa V0 - 28 dias



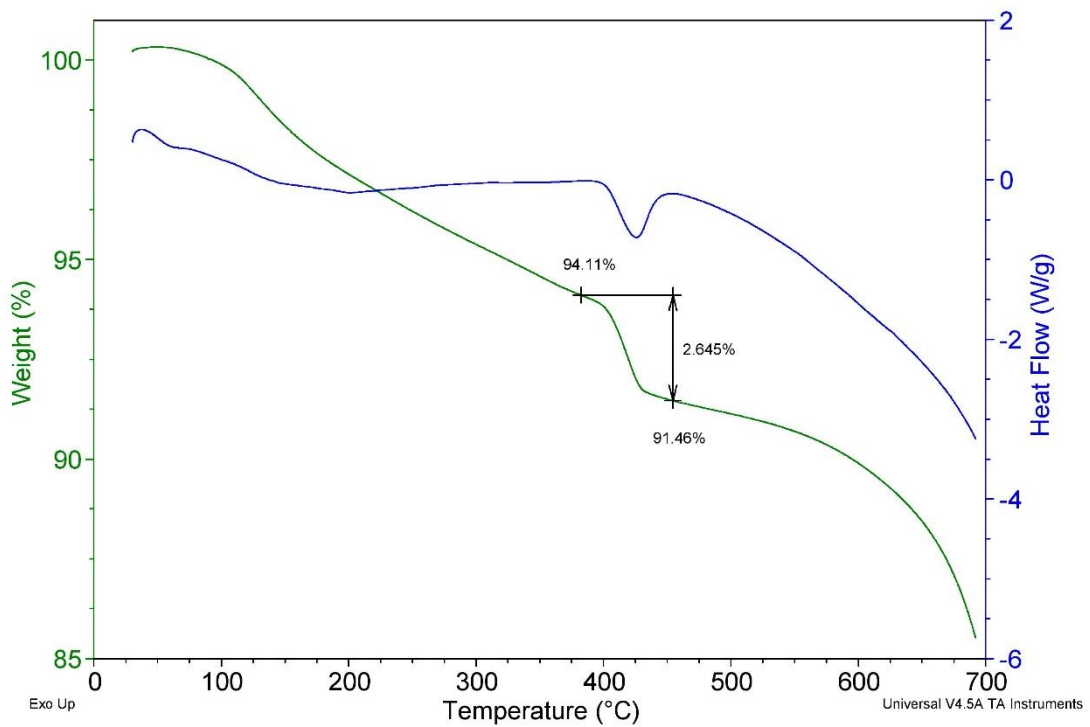
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 99 - TG e DSC da argamassa V3 - 28 dias



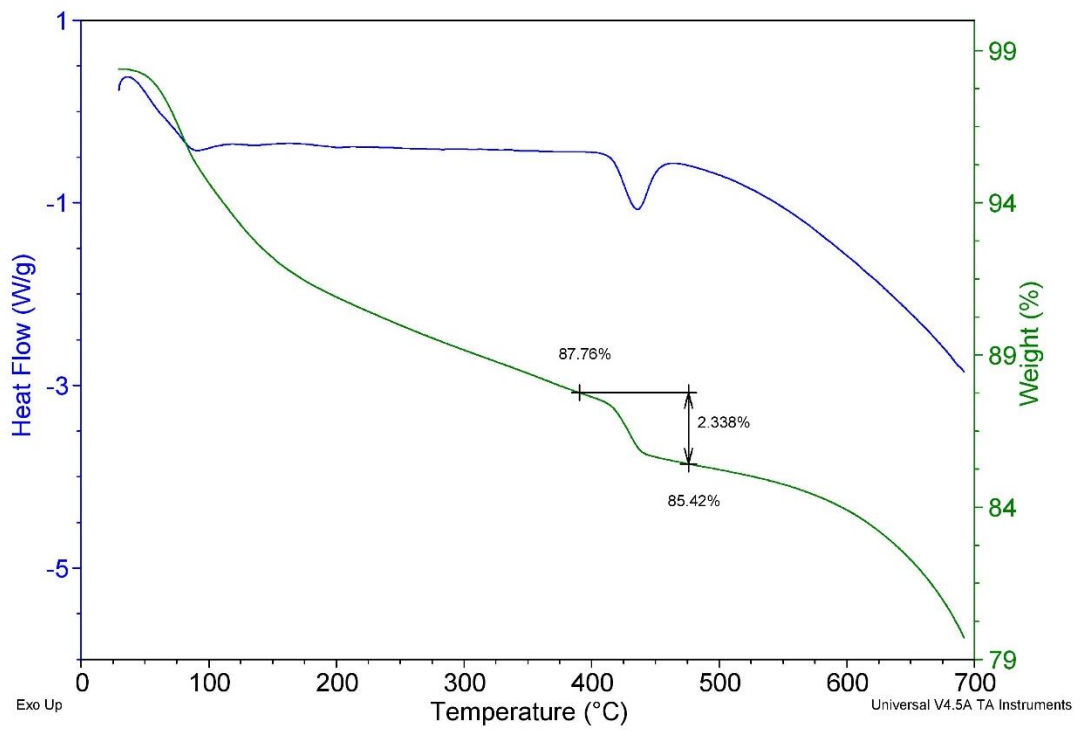
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 100 - TG e DSC da argamassa V5 - 28 dias



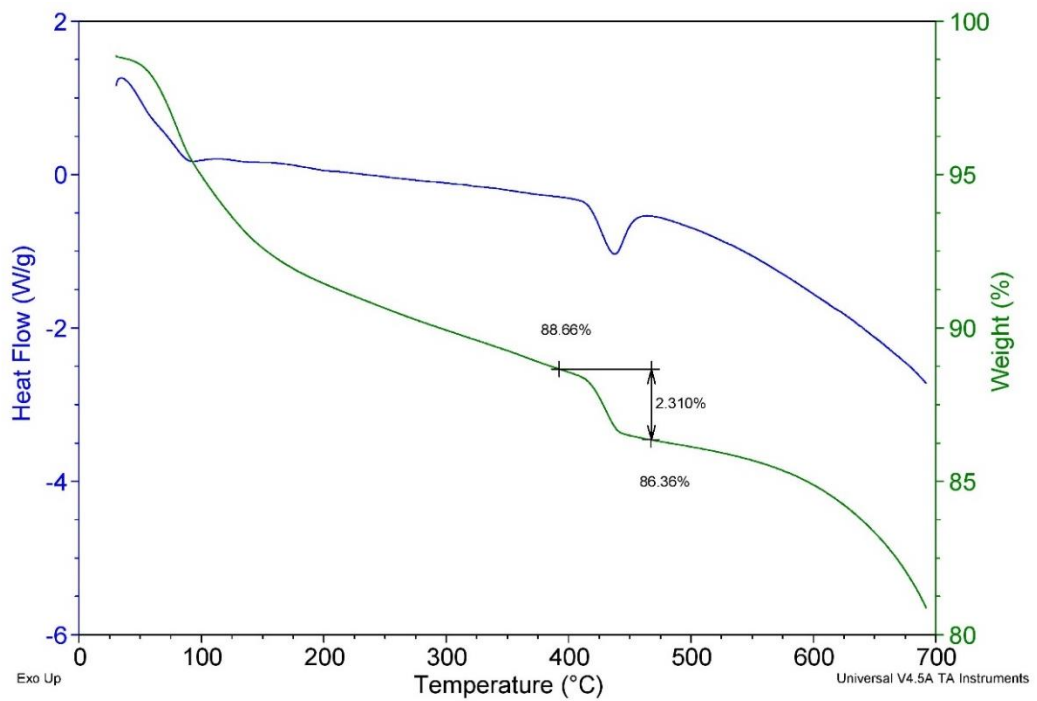
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 101 - TG e DSC da argamassa V10 - 28 dias



Fonte: O autor (2019).

FIGURA 102 - TG e DSC da argamassa V15 - 28 dias



Fonte: O autor (2019).

Tabelas de absorção de água por imersão – item 5.9.

QUADRO 11 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – Piloto (V0)

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO - ARGAMASSA PILOTO - V0.								
Amostra	Massa seca - Ms (g)	Massa Saturada - Msat (g)	Massa Submersa - Mi (g)	Absorção (%)	índice de vazios	Massa específica		
						Seca	Saturada	Real
1	425,7	482,6	266,6	13,36622034	26,3425926	1,970833333	2,23426	2,67568
2	421,67	478,2	262,4	13,40621813	26,1955514	1,953985171	2,21594	2,64752
3	425,99	482,9	265,1	13,35946853	26,1294766	1,955876951	2,21717	2,64771
4	425,73	483,1	265	13,47567707	26,3044475	1,951994498	2,21504	2,64873
5	426,37	481,9	264,8	13,02389943	25,5780746	1,963933671	2,21971	2,63892
Média	425,8067	482,466667	264,966667	13,37730234	26,2098252	1,957931931	2,21761	2,64798
Desvio P.	0,159478	0,51316014	0,15275252	0,025268344	0,08835446	0,005283026	0,00192	0,00065

Fonte: O autor (2019).

QUADRO 12 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – 3% (V3)

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO - ARGAMASSA PILOTO 3% - V3.								
Amostra	Massa seca - Ms (g)	Massa Saturada - Msat (g)	Massa Submersa - Mi (g)	Absorção (%)	índice de vazios	Massa específica		
						Seca	Saturada	Real
1	424,89	484,3	267,2	13,98244251	27,3652695	1,957116536	2,23077	2,69446
2	425,99	484,9	267,6	13,82896312	27,1099862	1,960377358	2,23148	2,6895
3	426,26	484,6	268,3	13,68648243	26,9717984	1,970688858	2,24041	2,69853
4	426,02	485,9	267,8	14,05567814	27,4552957	1,953324163	2,22788	2,69258
5	426,58	487,3	268,4	14,23414131	27,7386935	1,948743719	2,22613	2,6968
Média	426,09	485,133333	267,9	13,95569459	27,3101838	1,956939353	2,23004	2,69461
Desvio P.	0,147986	0,68068593	0,36055513	0,1157001	0,17912424	0,003529934	0,00191	0,00211

Fonte: O autor (2019).

QUADRO 13 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – 5% (V5)

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO - ARGAMASSA PILOTO 5% - V5.								
Amostra	Massa seca - Ms (g)	Massa Saturada - Msat (g)	Massa Submersa - Mi (g)	Absorção (%)	índice de vazios	Massa específica		
						Seca	Saturada	Real
1	422,61	482,6	266,7	14,1951208	27,786012	1,957433997	2,23529	2,7106
2	427,36	486,3	269,5	13,79165107	27,1863469	1,971217712	2,24308	2,70721
3	426,89	487,7	269,7	14,24488744	27,8944954	1,958211009	2,23716	2,71576
4	426,85	486,7	269,1	14,02131896	27,5045956	1,961626838	2,23667	2,70586
5	426,79	487,6	269,6	14,24822512	27,8944954	1,957752294	2,2367	2,71512
Média	426,8433	486,866667	269,4	14,15377573	27,8583343	1,959196714	2,23684	2,71098
Desvio P.	0,050332	0,66583281	0,26457513	0,117378774	0,0626329	0,002117011	0,00027	0,00397

Fonte: O autor (2019).

QUADRO 14 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – 10% (V10)

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO - ARGAMASSA PILOTO 10% - V10.								
Amostra	Massa seca - Ms (g)	Massa Saturada - Msat (g)	Massa Submersa - Mi (g)	Absorção (%)	índice de vazios	Massa específica		
						Seca	Saturada	Real
1	425,29	485,2	266,7	14,08685838	27,4187643	1,946407323	2,22059	2,68169
2	422,21	480,9	264,3	13,90066555	27,0960295	1,949261311	2,22022	2,67374
3	426,35	485,1	265,6	13,77975841	26,7653759	1,942369021	2,21002	2,65226
4	429	488,1	269,5	13,77622378	27,0356816	1,962488564	2,23285	2,68966
5	422,73	481,8	264,5	13,97345824	27,1836171	1,945375058	2,21721	2,67162
Média	424,79	486,133333	265,6	13,8846274	27,1028395	1,947014564	2,21934	2,67568
Desvio P.	1,861075	1,70391706	1,1	0,097840798	0,07438455	0,002013032	0,00186	0,00531

Fonte: O autor (2019).

QUADRO 15 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – 15% (V15)

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO - ARGAMASSA PILOTO 15% - V15.								
Amostra	Massa seca - Ms (g)	Massa Saturada - Msat (g)	Massa Submersa - Mi (g)	Absorção (%)	índice de vazios	Massa específica		
						Seca	Saturada	Real
1	421,14	481,1	264,1	14,23754571	27,6313364	1,940737327	2,21705	2,68174
2	421,39	481,7	264,8	14,31215738	27,8054403	1,942784693	2,22084	2,69104
3	419,57	478,7	261,7	14,09299998	27,2488479	1,933502304	2,20599	2,65769
4	422,57	483,1	265,2	14,32425397	27,7787976	1,939284075	2,21707	2,6852
5	421,74	480,6	263,9	13,95646607	27,1619751	1,946192893	2,21781	2,67195
Média	421,4233	481,133333	264,266667	14,21423436	27,552994	1,940935365	2,21731	2,67963
Desvio P.	0,301386	0,55075705	0,47258156	0,111422873	0,27352298	0,001758692	0,00043	0,00687

Fonte: O autor (2019).