

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**JOSÉ VENÂNCIO PINHEIRO ROTTA**

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO COMO  
SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO EM CONCRETOS  
ESTRUTURAIS BASEADA NA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E NO  
ATAQUE DE SOLUÇÕES AGRESSIVAS**

MARINGÁ

2022

**JOSÉ VENÂNCIO PINHEIRO ROTTA**

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO COMO  
SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO EM CONCRETOS  
ESTRUTURAIS BASEADA NA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E NO  
ATAQUE DE SOLUÇÕES AGRESSIVAS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sílvia Paula Sossai Altoé

MARINGÁ

2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

R851a

Rotta, José Venâncio Pinheiro

Avaliação da utilização de resíduo de vidro como substituto parcial do cimento em concretos estruturais baseada na resistência a compressão e no ataque de soluções agressivas / José Venâncio Pinheiro Rotta. -- Maringá, PR, 2023.

159 f.: il. color., figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Sílvia Paula Sossai Altoé.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

1. Resíduo de vidro - Reciclagem. 2. Substituição ao cimento. 3. Concreto sustentável. 4. Ataque de sulfatos. I. Altoé, Sílvia Paula Sossai, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 23.ed. 691.97

JOSÉ VENÂNCIO PINHEIRO ROTTA

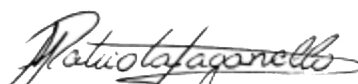
**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO COMO SUBSTITUTO  
PARCIAL DO CIMENTO EM CONCRETOS ESTRUTURAIS BASEADA NA  
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E NO ATAQUE DE SOLUÇÕES AGRESSIVAS**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 28/11/2022, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

**BANCA EXAMINADORA**



**Profa. Dra. Silvia Paula Sossai Altoé**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Estadual de Maringá  
Professora Orientadora



**Profa. Dra. Adriana Macedo Patriota Faganello**  
Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná



**Prof. Dr. Carlos Humberto Martins**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Estadual de Maringá

## AGRADECIMENTOS

Ao apoio da minha família ao longo da produção desta pesquisa;

À minha orientadora Sílvia Paula Sossai Altoé, pela orientação exemplar;

Ao professor José Wilson Assunção, pelo acompanhamento e auxílio no laboratório;

Ao professor Carlos Humberto Martins, pela disponibilidade em fornecer equipamentos para esta pesquisa;

A todos os alunos e amigos que auxiliaram nos ensaios pertinentes a pesquisa, em especial ao Mikael Milam da Silva e a Isadora de Goes Radke;

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PCV) da Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade em poder desenvolver este trabalho;

À CAPES, pelo amparo ao longo do trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

---

## RESUMO

Com o crescimento e desenvolvimento dos países, o concreto se consolidou como um dos materiais mais utilizados no mundo. Junto a esse crescimento, há uma grande demanda dos materiais empregados em sua composição, resultando em diversos impactos ambientais, já que o cimento possui papel de destaque nas emissões de gás carbônico e extração de recursos naturais não renováveis. Dessa forma, há uma urgência em se avaliar materiais alternativos aos componentes tradicionais do concreto. Tais adições, ou substituições, podem gerar benefícios ao desempenho do concreto, que estão relacionados as propriedades mecânicas e aquelas relacionadas com a durabilidade. Em se tratando de durabilidade, os concretos podem apresentar patologias em reação a exposição em soluções agressivas. Posto isso, diversas pesquisas têm avaliado os avanços com relação a utilização de resíduo de vidro como substituto ao cimento que favorece, ao mesmo tempo, uma melhora nas propriedades mecânicas e de resistência a soluções agressivas, e uma destinação ao resíduo que seria descartado em aterros, além de reduzir o consumo de cimento. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar concretos estruturais utilizando pó de vidro como substituição parcial do cimento, a partir da análise da resistência a compressão e do ataque de soluções agressivas. Dessa forma, avaliou-se a resistência a compressão de traços moldados com dois fatores de água/cimento diferentes, 0,55 e 0,60, em concretos produzidos substituindo parcialmente o cimento Portland por pó de vidro em teores de 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em massa, ao longo de um período de 180 dias de cura úmida. E, realizou-se um estudo inicial de durabilidade desses traços perante a um ataque externo de sulfatos, com soluções de 5% e 10% de sulfato de sódio, e outra combinada de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio, ao longo de 91 dias de imersão. Para isso, avaliou-se a resistência a compressão com os traços moldados com a/c de 0,55 nas idades de 56, 91, 120, 150 e 180 dias e em traços moldados com a/c de 0,60 nas idades de 120, 150 e 180 dias. Ainda, verificou-se o comportamento dos traços com a/c de 0,55 imersos em soluções agressivas por 28 e 91 dias, avaliando a resistência a compressão, variação dimensional e do peso e o módulo de elasticidade. Os resultados demonstraram a viabilidade de utilização do pó de vidro em concretos, com parâmetros muito próximos do traço piloto, até em teores altos, e com uma propensão de melhores resultados para menores fatores a/c. Para a durabilidade, verificou-se comportamentos individuais e diferentes para cada traço, com algumas tendências. Para o traço com 25% de substituição, por exemplo, verificou-se que as variações sofridas foram semelhantes nas três soluções agressivas, além de serem menores do que o traço piloto, o que indica uma resistência aos efeitos das reações da agressão.

**Palavras-chave:** Resíduo de vidro. Concreto sustentável. Substituição do cimento. Ataque de sulfatos.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação da resistência a compressão em relação a sua idade .....	27
Figura 2 - Desenvolvimento da resistência do concreto em um período de 20 anos .....	28
Figura 3 - Modelo de ataque de sulfatos de sódio em material cimentício .....	33
Figura 4 – Principais reações com agressão por sulfato de magnésio .....	34
Figura 5 - Modelo de ataque de sulfatos de magnésio em material cimentício .....	35
Figura 6 – (a) Resistência a compressão ao longo dos meses das amostras / (b) Proporção da resistência a compressão .....	42
Figura 7 – (a) Incremento do diâmetro / (b) Incremento do peso .....	44
Figura 8 – Resistência a compressão dos traços .....	45
Figura 9 – (a) Incremento do diâmetro / (b) Incremento do peso .....	45
Figura 10 - Resistência a compressão .....	47
Figura 11 – (a) Mudanças no peso na solução de sulfatos / (b) Mudança de peso na solução mista .....	49
Figura 12 – Resistência a compressão.....	49
Figura 13– Composições das principais famílias de vidros a base de sílica .....	54
Figura 14 - Slump test como função do tempo de imersão e quantidade de PDV .....	64
Figura 15 – Slump e quantidade de ar.....	64
Figura 16 – Resistência à compressão das misturas.....	65
Figura 17 – Resistência à compressão das misturas.....	67
Figura 18 - Resistência a compressão .....	67
Figura 19 - Resistência a compressão .....	68
Figura 20 – Variação da retração em diferentes substituições de pó de vidro .....	70
Figura 21 – Resistência a compressão em diferentes idades.....	71
Figura 22 – Mudança de peso .....	72
Figura 23 – (a) Mudança de peso/(b) redução do volume.....	73
Figura 24 – Resistência a compressão.....	74
Figura 25 – (a) Mudança de peso após imersão em sulfato de sódio / (b) Mudança de peso após imersão em sulfato de magnésio .....	75
Figura 26 – (a) Resistência a compressão após imersão em 5% de sulfatos / (b) Resistência a compressão após imersão em 10% de sulfatos.....	76

Figura 27 -(a) Módulo de elasticidade dinâmico após imersão em 5% de sulfatos / (b) Módulo de elasticidade dinâmico após imersão em 10% de sulfatos.....	77
Figura 28 – Curva granulométrica do resíduo.....	78
Figura 29 - Dimensão dos grãos e classificação do solo.....	79
Figura 30 – (a) Amostra ampliada em 100 vezes/ (b) Amostra ampliada em 500 vezes/ (c) Amostra ampliada em 1000 vezes.....	82
Figura 31 - Fases da amostra de pó de vidro.....	83
Figura 32 - Lista de picos da amostra de pó de vidro apresentadas do programa X’pert High Score.....	83
Figura 33 - Programa experimental resumido.....	89
Figura 34 - Empresa de vidro em Apucarana - PR .....	90
Figura 35 – (a) Válvulas para descarga de resíduo decantado / (b) Sacos com resíduo .....	91
Figura 36 – (a) Secagem da lama de vidro / (b) Destorroamento manual .....	94
Figura 37 - Prensa hidráulica para resistência a compressão .....	99
Figura 38 - Imersão das amostras.....	100
Figura 39 - Realização do módulo de elasticidade.....	101
Figura 40 – Curva granulométrica da brita .....	102
Figura 41 – Curva granulométrica da areia.....	103
Figura 42 – Curvas Granulométricas .....	104
Figura 43 – Relação <i>slump</i> , temperatura e umidade relativa do ar (Lotes 1, 2 e 3).....	105
Figura 44 – Relação <i>slump</i> , temperatura e umidade relativa do ar (Lotes 1 e 2).....	106
Figura 45 – Redução percentual da massa .....	107
Figura 46 – Resistência a compressão por idade.....	108
Figura 47 – Resistência a compressão por traço .....	109
Figura 48 – Variação percentual entre 28 e 180 dias (a/c 0,55).....	109
Figura 49 – Resistência a compressão (a/c 0,60) .....	111
Figura 50 - Variação percentual entre 28 e 180 dias (a/c 0,60) .....	111
Figura 51 - Resistência a compressão em 28, 120, 150 e 180 dias com a/c de 0,55 e 0,60... ..	113
Figura 52 – Módulo de elasticidade e deformação tangencial (a/c 0,55).....	114
Figura 53 - Correlação resistência a compressão e módulo de elasticidade dinâmico (a/c 0,55) .....	115
Figura 54 - Módulo de elasticidade e deformação tangencial (a/c 0,60) .....	116
Figura 55 – Correlação resistência a compressão e módulo de elasticidade dinâmico (a/c 0,60) .....	117



Figura 56 – Pó de vidro .....	118
Figura 57 - Traço T0 (0%) em (a) 120 e (b) 180 dias .....	119
Figura 58 - Traço T1 (10%) em (a) 120 e (b) 180 dias .....	119
Figura 59 - Traço T2 (15%) em (a) 120 e (b) 180 dias .....	119
Figura 60 - Traço T3 (20%) em (a) 120 e (b) 180 dias .....	120
Figura 61 - Traço T4 (25%) em (a) 120 e (b) 180 dias .....	120
Figura 62 - Traço T5 (30%) em (a) 120 e (b) 180 dias .....	120
Figura 63 – Inspeção visual CPs imersos em 10% de sulfatos, em 91 dias .....	122
Figura 64 – Inspeção visual traço piloto (Solução de 10% de sulfatos) .....	122
Figura 65 – Variação percentual da altura .....	123
Figura 66 – Variação percentual do diâmetro .....	124
Figura 67 – Variação percentual do peso das amostras .....	124
Figura 68 - Variação porcentual do peso, altura e diâmetro .....	125
Figura 69 – Resistência a compressão das amostras imersas.....	127
Figura 70 – Resistência a compressão após a imersão por traço e na câmara úmida .....	129
Figura 71 - Módulo de elasticidade dinâmico após imersão .....	131
Figura 72 – Variação percentual da resistência a compressão e módulo de elasticidade por traço .....	132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto de acordo com a NBR 6118.....	26
Tabela 2 - Porcentagem dos principais sais presentes na água do mar.....	30
Tabela 3 - Formação de etringita tardia pelo ataque de sulfatos externos e internos.....	37
Tabela 4 - Requisitos para concreto exposto a solução contendo sulfatos.....	38
Tabela 5 – Comparação entre as normas brasileira e americana para avaliação do ataque por sulfatos .....	40
Tabela 6 – Pesquisas de imersão em soluções agressivas.....	41
Tabela 7 - Exigências químicas.....	52
Tabela 8 - Exigências físicas.....	52
Tabela 9 - Exigências químicas.....	52
Tabela 10- Exigências físicas.....	53
Tabela 11 - Composição química do resíduo de vidro (%).....	60
Tabela 12 - Efeito do vidro na resistência à compressão .....	62
Tabela 13 – Peneiramento do resíduo .....	78
Tabela 14 – Coeficientes da distribuição granulométrica do PDV .....	79
Tabela 15 – Diâmetros da amostra.....	80
Tabela 16 – Características do resíduo de vidro .....	81
Tabela 17 – Comparação cimento CPV e PDV .....	81
Tabela 18 - Composição química do resíduo de vidros e parâmetros normativos.....	84
Tabela 19 – Verificação do slump dos traços .....	86
Tabela 20 – Valores de $\psi_6$ .....	87
Tabela 21 - Resistência a compressão estatística .....	88
Tabela 22 – Programa experimental.....	97
Tabela 23 - Resistência a compressão média e desvio padrão (MPa).....	108
Tabela 24 – Variação da resistência em relação ao traço piloto .....	110
Tabela 25 - Resistência a compressão média e desvio padrão (MPa).....	111
Tabela 26 - Variação da resistência em relação ao traço piloto (a/c 0,60).....	112
Tabela 27 -Variação percentual módulo de elasticidade e resistência a compressão .....	118
Tabela 28 - Resistência e desvio padrão após imersão .....	127

Tabela 29 – Módulo de elasticidade e tangencial .....	131
---	-----

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos principais tipos de sais selenitosos.....	31
Quadro 2- Os diferentes tipos de vidros fabricados e processados .....	57
Quadro 3- Pesquisas recentes com resíduos de vidros .....	59
Quadro 4- Resumo de pesquisas com PDV como substituo ao cimento .....	61
Quadro 5 –Efeito da utilização do pó de vidro na trabalhabilidade dos concretos .....	69
Quadro 6 – Dados cimento LIZ CPV-ARI .....	91
Quadro 7 - Traços em massa .....	95
Quadro 8 – Ensaio para caracterização do concreto .....	97
Quadro 9 - Valores do <i>slump</i> .....	105

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 .....	32
Equação 2 .....	33
Equação 3 .....	43
Equação 4 .....	43
Equação 5 .....	53
Equação 6 .....	63
Equação 7 .....	87
Equação 8 .....	101

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>ABIVIDROS</b>	Associação Brasileira das Indústrias de Vidro
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ABRAVIDROS</b>	Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos
<b>ACI</b>	<i>American Concrete Institute</i>
<b>ARI</b>	Alta Resistência Inicial
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>CNQ</b>	Confederação Nacional do Ramo Químico
<b>CONAMA</b>	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<b>CP</b>	Concreto protendido
<b>CPs</b>	Corpo de prova
<b>DRX</b>	Difração de Raios-X
<b>FRX</b>	Fluorescência de Raios-X
<b>GP</b>	<i>Glass Powder</i> (Pó de vidro)
<b>MEV</b>	Microscopia eletrônica de varredura
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>NBR NM</b>	Normas técnicas de abrangência nos países do Mercosul
<b>PDV</b>	Pó de vidro
<b>RCC</b>	Resíduos da Construção Civil
<b>SNIC</b>	Sindicado Nacional da Indústria do Cimento
<b>C-S-H</b>	Silicato de cálcio hidratado
<b>CPV ARI</b>	Cimento Portland de alta resistência inicial
<b>CP II F-32</b>	Cimento Portland tipo II com adição de Fíler com classe de resistência à compressão de 32 MPa
<b>AS</b>	<i>Australian Standard</i> (Norma australiana)
<b>DIN</b>	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Norma alemã)
<b>M-S-H</b>	Silicato de magnésio hidratado
<b>EEF</b>	<i>early ettringite formation</i> (Formação de etringita primária)
<b>DEF</b>	<i>delayed ettringite formation</i> (Formação de etringita tardia)
<b>RS</b>	Sulfixo de cimento "resistente a sulfatos"
<b>AI</b>	Ataque interno de sal agressivo

<b>AE</b>	Ataque externo de sal agressivo
<b>AIE</b>	Ataque interno e externo de sal agressivo
<b>OPC</b>	<i>Ordinary Portland Cement</i> (Cimento Portland)
<b>CRT</b>	Tubos de raios catódicos
<b>LCD</b>	<i>Liquid Crystal Display</i> (Display de cristal líquido)
<b>a/c</b>	Fator água/cimento
<b>JSTM</b>	<i>Japan Testing Center for Construction Material Method</i>
<b>TEI</b>	técnica de excitação por impulso
<b>CAM</b>	Amostras na câmara úmida
<b>5S</b>	Solução de 5% de sulfato de sódio
<b>10S</b>	Solução de 10% de sulfato de sódio
<b>5S+3C</b>	Solução combinada de 5% de sulfato de sódio e 3# de cloreto de sódio

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	OBJETIVOS	21
1.2	DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>23</b>
2.1	ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO	23
2.2	DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	25
2.2.1	Resistência a compressão	27
2.3	A AÇÃO DOS SULFATOS NO CONCRETO	28
2.3.1	Fontes de sulfatos	29
2.3.2	Agressividade, reação e mecanismo do ataque	30
2.3.2.1	Sulfato de sódio (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	32
2.3.2.2	Sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> )	33
2.3.2.3	Sulfato de magnésio (MgSO <sub>4</sub> )	34
2.3.3	Formação da etringita tardia	36
2.3.4	Fatores que influenciam o ataque de sulfatos	37
2.3.5	Normatização e ensaios	38
2.3.6	Concretos submetidos à imersão de sulfatos e de sulfatos combinados com cloretos	41
2.4	ADITIVOS MINERAIS	50
2.5	APLICAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO NO CONCRETO	53
2.5.1	Vidros	54
2.5.2	Características do resíduo de vidro	59
2.5.3	Influência da aplicação de resíduo de vidro no concreto fresco	63
2.5.4	Influência da aplicação de resíduo de vidro no concreto endurecido	65
2.5.4.1	Resistência à compressão	65
2.5.4.2	Absorção de água	69
2.5.4.3	Retração por secagem	70
2.5.5	Influência do resíduo de vidro no ataque de sulfatos	70
2.6	RESULTADOS E ANÁLISES PRÉVIAS DA CARACTERIZAÇÃO DO PDV	77
2.6.1	Granulometria	77
2.6.2	Massa específica, teor de umidade e outros parâmetros	80
2.6.3	MEV	82



	17	
2.6.4	Resultados DRX	83
2.6.5	FRX	84
<b>2.7</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES PRÉVIAS DA CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO</b>	<b>86</b>
2.7.1	Consistência pelo abatimento do tronco de cone (slump test)	86
2.7.2	Resistência a compressão em 28 dias	87
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>89</b>
<b>3.1</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>89</b>
<b>3.2</b>	<b>MATERIAIS</b>	<b>90</b>
3.2.1	Resíduo de Vidro (PDV)	90
3.2.2	Aglomerante	91
3.2.3	Agregado graúdo	92
3.2.4	Agregado miúdo	92
3.2.5	Água	92
<b>3.3</b>	<b>METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS</b>	<b>92</b>
3.3.1	Ensaio de caracterização dos agregados	92
3.3.1.1	Composição Granulométrica	92
3.3.2	Caracterização do resíduo de vidro	93
3.3.2.1	Preparo do resíduo	93
<b>3.4</b>	<b>DOSAGEM, PREPARAÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA</b>	<b>94</b>
<b>3.5</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO</b>	<b>96</b>
3.5.1	Ensaio para caracterização do concreto no estado fresco	98
3.5.1.1	Consistência pelo abatimento do tronco de cone ( <i>Slump test</i> )	98
3.5.2	Ensaio para caracterização do concreto no estado endurecido	98
3.5.2.1	Resistência à compressão	98
3.5.2.2	Ensaio por imersão em soluções agressivas	99
3.5.2.3	Módulo de Elasticidade	100
3.5.2.4	Aferição do peso, altura e diâmetro	101
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>102</b>
<b>4.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS</b>	<b>102</b>
4.1.1	Agregado Graúdo	102
4.1.2	Agregado miúdo	102
4.1.3	Análise da granulometria dos materiais	103

<b>4.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO</b>	<b>104</b>
4.2.1	Abatimento do tronco de cone (slump)	104
<b>4.3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO</b>	<b>106</b>
4.3.1	Massa	106
4.3.2	Resistência a compressão	107
4.3.2.1	Resistência a compressão com fator a/c de 0,55	107
4.3.2.2	Resistência a compressão com fator a/c de 0,60	110
4.3.2.3	Comparação das resistências com a/c 0,55 e 0,60	112
4.3.3	Módulo de Elasticidade	113
4.3.3.1	Módulo de elasticidade com fator a/c de 0,55	113
4.3.3.2	Módulo de elasticidade com fator a/c de 0,60	115
4.3.4	Variação percentual da resistência e módulo em relação ao traço piloto	117
4.3.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	118
<b>4.4</b>	<b>ATAQUE DE SULFATOS E CLORETOS</b>	<b>121</b>
4.4.1	Inspeção visual	121
4.4.2	Variação dimensional e do peso	122
4.4.2.1	Variação da altura	122
4.4.2.2	Variação do diâmetro	123
4.4.2.3	Variação do peso	124
4.4.2.4	Correlação peso, altura e diâmetro por traço	125
4.4.3	Resistência a compressão	126
4.4.4	Módulo de Elasticidade	130
4.4.5	Análise do módulo de elasticidade e resistência	132
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>134</b>
<b>5.1</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>136</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos principais materiais utilizados na indústria da construção civil por ser fundamental ao desenvolvimento da infraestrutura dos países. É um material constituído essencialmente de um aglutinante, como cimento Portland, agregados e água, e pode ainda ser associado ao aço. Embora novos materiais tenham sido aplicados na construção civil, o concreto e o concreto armado continuam sendo amplamente utilizados (BARROS, 2016).

Em 2021, o Brasil produziu cerca de 65,8 milhões de toneladas de cimento, 7,9% a mais que em 2020, sendo que entre as regiões do país, a região sudeste se destaca por produzir 30,6 milhões de toneladas, 46,5% da produção nacional (SNIC, 2021). A produção de cimento segue em tendência de aumento ano a ano sendo 61 milhões de toneladas produzidas em 2020 (SNIC, 2020a), quantidade 7,8% a maior do que em 2019 (SNIC, 2019). Com a alta produção e consumo de cimento, verifica-se que este insumo se torna cada vez mais essencial para a construção. A alta demanda desencadeia um maior processo produtivo, que por sua vez emite grande quantidade de gases de efeito estufa. A indústria do cimento representa 7% de todo o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) emitido pelo homem globalmente, enquanto que no Brasil esse valor é de 2,6% (SNIC, 2020b). Mehta e Monteiro (2014), comentam que o cimento é responsável por mais de 90% da energia total necessária para a produção do concreto.

Nesse contexto, muitas pesquisas buscam tecnologias alternativas que diminuam o consumo de cimento através de materiais que possam ser substitutos ou aditivos ao cimento, ou ainda aos outros componentes tradicionais do concreto, como os agregados, e que não impliquem em problemas nos concretos produzidos. Materiais como resíduos e subprodutos de processos industriais, resíduos da construção civil e da agricultura tem sido cada vez mais utilizados como substitutos do cimento. Magalhães (2019) comenta que o emprego de materiais cimentícios suplementares reflete-se, via de regra, em melhorias nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto, além de minimizar a demanda de matéria-prima e conseqüentemente reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>.

A prática de adições ao cimento é realizada no Brasil há mais de 50 anos. Entre 1990 e 2018, o setor brasileiro conseguiu reduzir a relação clínquer/cimento de 80% para 69%, destacando-se por ser o maior teor de uso de adições no mundo nesse período, ultrapassado apenas em 2019 pela Índia. A previsão é que esse percentual se reduza a 50% em 2050 (SNIC, 2020b). Assim, as adições, quando associadas ao clínquer em diversas proporções, possibilitam a produção de diversos tipos de cimentos, com características diferentes. De acordo com Matos

(2015), o clínquer possui papel fundamental pois é a principal matéria-prima do cimento, porém, demanda um alto consumo de energia em fornos com temperaturas elevadas para sua produção. Dessa forma, reduzindo a utilização de clínquer no cimento, reduz-se a emissão de gases poluentes e contribui-se para uma solução ambientalmente adequada, tendo em vista que os subprodutos utilizados são muitas vezes destinados à aterros, reciclagem, ou ainda podem ter destinação irregular.

Assim, os resíduos que substituem o cimento podem trazer benefícios às estruturas e se tornar uma solução com grande potencial para melhoras das propriedades dos concretos, já que as estruturas de concreto podem sofrer diversos tipos de degradação ao longo de sua vida útil. Tal fator não só traz riscos à segurança dos usuários, como também resulta no consumo maior de material para realização de reparos (PINTO, 2016).

O resíduo de vidro, por exemplo, vem sendo utilizado em concretos e argamassas como adições ou substituições dos agregados ou do cimento, por ser uma solução que contribui para a redução da utilização dos recursos naturais, redução da emissão de CO<sub>2</sub>, além da redução no consumo de energia. Nas pesquisas, o resíduo é utilizado em diferentes granulometrias, tendo diversas nomenclaturas, sendo chamado de pó de vidro (PDV), por exemplo, quando as partículas são pequenas e com características visíveis de um pó. Devido a suas propriedades químicas e físicas, os vidros são capazes de melhorar as propriedades mecânicas e as relacionadas com a durabilidade, como resistência ao ataque de agentes agressivos (GUIGNONE, 2017).

Nesse sentido, Schmalz (2018) comenta que a resistência de concretos aos principais mecanismo de deterioração, como corrosão da armadura, ataque de cloretos, carbonatação e o ataque de agentes agressivos, como os sulfatos, devem ser estudados. A agressividade de algumas soluções pode gerar a expansão, fissuração e lascamento do concreto, levando a perda de massa e de resistência mecânica. Em se tratando de sulfatos, o ataque pode ser interno, quando ocorre a contaminação dos agregados ou estão presentes no cimento, externo, quando as estruturas estão expostas a água do mar, solo, lençol freático, esgoto, efluentes industriais, entre outros, ou ainda, os dois ataques podem ocorrer simultaneamente.

Nesta pesquisa, foi utilizado o resíduo de vidro proveniente da laminação de vidros temperados como substituição parcial do cimento em concreto. A partir dos dados publicados por Radke (2022), avaliou-se, principalmente, a resistência a compressão e módulo de elasticidade em idades avançadas e o efeito das substituições em concretos sob o ataque de soluções de sulfatos e de solução combinada de sulfatos e cloretos.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar concretos estruturais confeccionados com substituição parcial do aglomerante por diferentes teores de pó de vidro, a partir da análise da resistência a compressão, limitada a 180 dias, e do ataque de soluções agressivas, em até 91 dias.

Para comparar as diferenças de comportamento final do concreto sem resíduo com aqueles produzidos com as substituições especificadas, no que diz respeito, principalmente, as propriedades do concreto estrutural, este estudo tem como objetivos específicos:

- a) Pesquisa bibliográfica em se tratando da influência na utilização de resíduo de vidro em concretos e argamassas;
- b) Caracterização dos materiais utilizados a partir do levantamento bibliográfico e da realização de ensaios;
- c) Avaliar as propriedades mecânicas: resistência a compressão e módulo de elasticidade dinâmico, dos traços confeccionados com diferentes teores de substituição e dois fatores a/c, em diversas idades;
- d) Propor um padrão inicial de comportamento de durabilidade para o material estudado avaliando uma conexão entre as propriedades estudadas, como a resistência a compressão, variação dimensional e de peso, e o módulo de elasticidade.

## 1.2 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo eles:

- No Capítulo 1, introduziu-se o tema do trabalho, objetivos geral e específico;
- No Capítulo 2 foi realizada uma revisão de literatura para melhor entendimento do tema a ser pesquisado;
- No Capítulo 3 abordou-se os materiais e métodos necessários para obtenção de dados analisados posteriormente;

- No Capítulo 4, os resultados e discussões realizados pela pesquisa foram descritos;
- No Capítulo 5, apresenta-se a conclusão dos resultados obtidos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

O presente capítulo dedica-se à compreensão dos principais aspectos relacionados com a análise da microestrutura do concreto e seus efeitos sobre a durabilidade. Faz-se também uma abordagem bibliográfica sobre a utilização de vidro em concretos, principalmente como substituo parcial ao cimento, além dos tópicos necessários para melhor entendimento a cerca do ataque de sulfatos.

### 2.1 ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO

Em um nível microscópio, as complexidades da microestrutura do concreto e sua heterogeneidade ficam evidentes, dificultando a criação de um modelo realístico em que o comportamento do material pode ser previsto. Apesar disso, o conhecimento da microestrutura e das propriedades dos elementos individuais do concreto é essencial. Três fases compõe o estudo do concreto na magnitude de ampliação micro, em torno de  $10^5$  vezes, sendo elas, a pasta de cimento hidratada, agregados e a zona de transição, entre elas. Já para a macroestrutura, é possível dividir em duas seções principais e visíveis a olho nu, fase do agregado e suas variações de tamanhos e formatos, e a fase da pasta de cimento hidratada (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com os mesmos autores, quando o cimento Portland é disperso em água, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio de alta temperatura começam a se dissolver e a fase líquida fica rapidamente saturada com vários íons. Em poucos minutos de hidratação do cimento, os cristais em forma de agulha, compostos de hidrato de trissulfoaluminato de cálcio, chamados etringita, são formados devido a uma interação entre os íons presentes no material, como cálcio, sulfato, aluminato e hidroxila. Poucas horas depois, grandes cristais prismáticos, de hidróxido de cálcio, e cristais fibrosos muito pequenos, formados de hidratos de silicato de cálcio, começam a preencher os vazios que eram ocupados pela água e por partículas de cimento dissolvidos. Com o passar dos dias, dependendo da relação alumina-sulfato do cimento Portland, a etringita pode se tornar instável e se decompor para formar hidrato de monossulfoaluminato, que tem uma morfologia de placa hexagonal, semelhante aos aluminatos de cálcio hidratados. Assim, as quatro principais fases sólidas, visíveis em microscópio,

produtos dessas reações de hidratação da pasta de cimento, possuem as seguintes características:

- **Silicatos de cálcio hidratado (C-S-H):** Silicato de cálcio hidratado (C-S-H): São estruturas pequenas e fibrilares que compõe de 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada, sendo dessa forma, a fase mais importante, e determinando assim as propriedades da pasta. Sua morfologia varia desde fibras pouco cristalinas até redes reticulares;
- **Hidróxido de cálcio (Portlandia -  $\text{Ca(OH)}_2$ ):** Os cristais de hidróxido de cálcio, que também chamados de portlandita, constituem cerca de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta. Ele possui uma estequiometria definida,  $\text{Ca(OH)}_2$ , tendendo assim a formar cristais grandes com uma morfologia prismática hexagonal distinta. Sua morfologia geralmente varia de indefinível a amontoados de grandes placas e é afetada pela disponibilidade de espaço, temperatura de hidratação e impurezas presentes no sistema. Comparando- se ao C-S-H, o hidróxido de cálcio tem a potencial contribuição à resistência limitada, uma vez que sua área superficial é consideravelmente mais baixa;
- **Sulfoaluminatos de cálcio (Etringita):** O volume sólido ocupado pelos sulfoaluminatos de cálcio na pasta de cimento hidratada é cerca de 15 a 20%, possuindo desta forma, apenas um papel secundário na relação, microestrutura-propriedade. Ao longo dos primeiros estágios da hidratação, a relação iônica sulfato/alumina favorece a formação de trissulfoaluminato de cálcio hidratado ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ), chamada também de etringita, que tem a forma de cristais prismáticos aciculares (formato de agulha).
- **Grãos de clínquer não hidratados:** Dependendo da distribuição do tamanho das partículas do cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura das pastas de cimento hidratadas, até depois de muito tempo de ocorrido a hidratação. Com o progresso do processo de hidratação, as partículas menores se dissolvem primeiro e com isso elas desaparecem do sistema, e a partir daí as partículas maiores se tornam menores. Em idades avançadas, devido à falta de espaço disponível, a hidratação in situ das partículas de cimento resulta



na formação de um produto de hidratação muito denso, de morfologia parecida com a partícula do clínquer original.

## 2.2 DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

Em decorrência da agressividade do meio em que estão inseridas, as estruturas de concreto podem deteriorar-se devido às ações deletérias de natureza física e química que estão submetidas. Normas técnicas de diversos países, em se tratando de projeto e execução de estruturas de concreto armado, continuam em processo de adequação para fornecer critérios específicos relacionados à durabilidade e que, conseqüentemente, garantam a vida útil prevista em projeto (OLIVEIRA, 2018).

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) traz os requisitos mínimos de qualidade que as estruturas de concreto devem satisfazer:

- Capacidade resistente (segurança à ruptura)
- Desempenho em serviço (capacidade de se manter em condições plenas de utilização, sem apresentar danos que comprometam o uso da estrutura)
- Durabilidade (capacidade de resistir às influências ambientais)

Também, a norma brasileira destaca que a durabilidade é um dos requisitos que garante a qualidade de uma estrutura de concreto. Tal conceito é definido como a capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais previstas e definidas, logo ao início dos trabalhos de elaboração do projeto, em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante. Assim, as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto devem conservar sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil, ou seja, o período de tempo durante em que as características das estruturas de concreto são mantidas. A ACI Committee 201 (ACI, 2016), define durabilidade como sendo a capacidade de resistir ao intemperismo, ataque químico ou qualquer fator destrutivo.

De acordo com Magalhães (2019), a durabilidade do concreto pode ser atribuída, à dificuldade de penetração de agentes agressivos em sua rede de poros seja na forma de gases, vapores ou líquidos. Assim, a impermeabilidade do material é um fator primordial para que haja uma redução do transporte substâncias agressivas e um aumento da vida útil. As edificações podem ser expostas à diversas substâncias que penetram nos poros de sua estrutura

e possuem potencial para influenciar na durabilidade. Dentre as substâncias agressivas, destacam-se a água associada a uma variedade de íons dissolvidos, especialmente os íons cloretos e íons sulfatos, além do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o oxigênio (O<sub>2</sub>).

Neville (2016) destaca que a durabilidade inadequada pode ocorrer de fatores externos e internos, físico, mecânico ou químico. As ações mecânicas são, muitas vezes, impacto, abrasão, erosão ou cavitação. Já as causas químicas são muitas vezes relacionadas as reações álcali-sílica e álcali-carbonato. As altas temperaturas, ciclos de gelo e degelo são algumas das causas físicas em que os concretos podem estar sujeitos. O autor destaca ainda que o processo de deterioração raramente acontece de apenas uma causa, sendo muitas vezes resultado de várias ações simultâneas.

A Tabela 1 relaciona os principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto, dadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

**Tabela 1 - Mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto de acordo com a NBR 6118**

<b>Deterioradores do concreto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lixiviação, responsável por dissolver e carrear os compostos hidratados da pasta de cimento por ação de águas puras, carbônicas agressivas, ácidas e outras;</li> <li>• Expansão por sulfatos, devido à ação de águas ou solos contaminados com sulfatos, que causam reações expansivas e fissuram a matriz cimentícia;</li> <li>• Reação álcali-agregado, uma reação expansiva decorrente da reação dos álcalis do concreto com agregados reativos, na presença de umidade.</li> </ul>
<b>Deterioradores da armadura</b>	<p>Corrosão iniciada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carbonatação, quando o CO<sub>2</sub> presente na atmosfera penetra o concreto, despassivando a armadura;</li> <li>• Ação de cloretos, quando o teor do íon cloro está elevado e rompe a camada de passivação do aço.</li> </ul> <p>Obs.: ambos necessitam de umidade para ocorrer</p>
<b>Deterioradores da estrutura como um todo</b>	<p>Ações mecânicas;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimentações de origem térmica;</li> <li>• Impactos;</li> <li>• Ações cíclicas;</li> <li>• Retração;</li> <li>• Fluência;</li> <li>• Relaxação etc.</li> </ul>

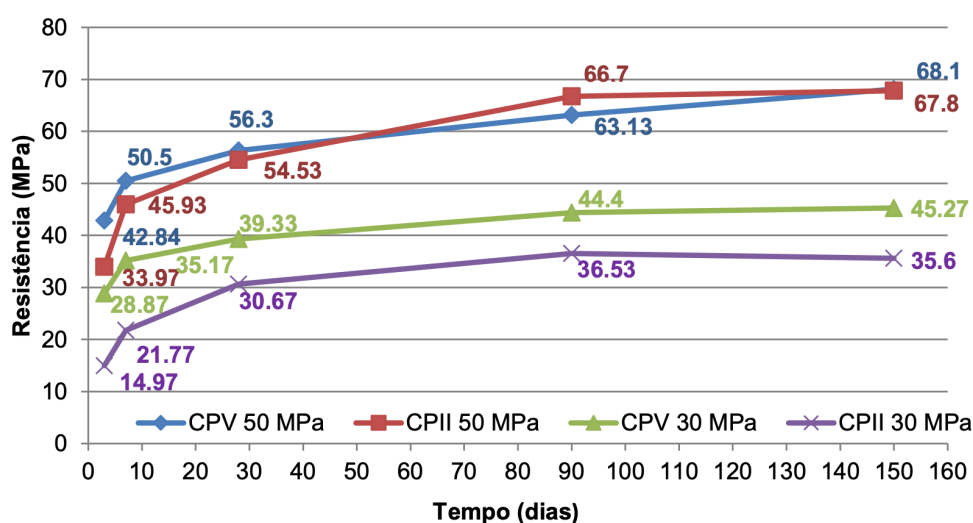
Fonte: ABNT (2014), adaptado pelo autor

### 2.2.1 Resistência a compressão

Como citado anteriormente, a capacidade resistente das estruturas é um fator essencial para a verificação da qualidade do mesmo. O concreto se destaca por ter uma grande resistência a compressão axial no estado endurecido, sendo que o ganho de resistência acontece pela hidratação do cimento e as diversas reações químicas que ocorrem entre os compostos sólidos e a água. Neville e Brooks (2013) afirmam que a resistência geralmente é reflexo da qualidade geral do concreto e que, os principais fatores que a influenciam são o fator água/cimento, grau de compactação, idade e temperatura, além da qualidade dos agregados e do fator agregado/cimento.

Nesse contexto, Santos e Godinho (2017) avaliaram a evolução das propriedades mecânicas de concretos, em até 150 dias, produzidos com dois tipos de cimentos diferentes, CPV ARI e CP II F-32, dosados para resistência de 30 MPa (a/c de 0,39) e 50 MPa (a/c de 0,61). O traço utilizado foi 1:3,6;3,4. Na Figura 1, observa-se os resultados da pesquisa. É possível notar que com o uso do CPV, o valor de 70% da resistência é atingido já em 3 dias de cura. A alta velocidade de endurecimento desse tipo de cimento ocorre devido a um teor mais elevado de  $C_3S$  e pela moagem do clínquer em maiores finuras. A partir de 28 dias, ambos concretos apresentaram um aumento da resistência. Ao final de 150 dias, os concretos com CP II obtiveram um aumento de 24,56%, enquanto com o CP V, o aumento foi de 21%, em relação a 28 dias.

**Figura 1 - Variação da resistência a compressão em relação a sua idade**

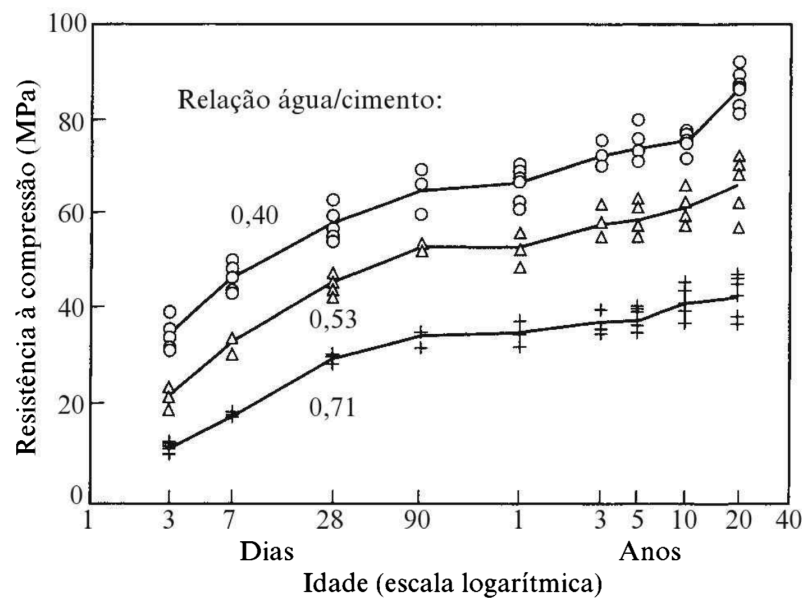


Fonte: Santos e Godinho (2017)

Assim, a resistência do concreto considerada é, tradicionalmente, aos 28 dias de idade, para diversos parâmetros. Não há grandes motivos científicos para a escolha dessa idade, apenas que a resistência deveria ser descrita em um estágio em que a hidratação já fosse significativa. O conhecimento da relação resistência/tempo é importante em situações que a estrutura será colocada em serviço apenas idades maiores (Neville, 2016). O autor ainda destaca que a resistência depende tanto da sua idade quanto da temperatura, e que, quando se considera os dois termos juntos, chama-se de maturidade do concreto. Isso pois a resistência aumenta com o progresso da hidratação do cimento, e a velocidade de hidratação aumenta com a elevação da temperatura.

Na década de 50, uma pesquisa avaliou concretos produzidos com três fatores *a/c* diferentes, de 0,40, 0,53 e 0,71, ao longo de 20 anos, em câmara úmida (Figura 2). Observou-se que misturas com baixo fator água/cimento, apresentaram uma maior resistência a compressão e o aumento de resistência ao longo dos anos foi contínuo, com destaque ao grande ganho inicial nos primeiros 90 dias (NEVILLE, 2016).

**Figura 2 - Desenvolvimento da resistência do concreto em um período de 20 anos**



Fonte: Neville (2016)

### 2.3 A AÇÃO DOS SULFATOS NO CONCRETO

O estudo da exposição do concreto a um ambiente contaminado com sulfato já existe há algum tempo, iniciando-se antes de 1920. Desde então, já se sabe que os íons sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ) em contato com o concreto pode desencadear e progredir uma série de reações que levam a deterioração do material. Tal fenômeno ocorre devido a reação entre os compostos do cimento hidratado e os íons. Dependendo das condições da exposição, diferentes reações podem acontecer e estas se apresentam de duas formas principais e distintas, que podem ocorrer ao mesmo tempo, ou não: expansão e fissuração do concreto, e perda progressiva de resistência, rigidez e massa (SILVA FILHO, 1994).

As duas formas de deterioração ocorrem devido a concentração e fonte dos íons sulfatos, e dos cátions que estão associados, em contato com água e também, a composição da pasta de cimento. Quando a expansão ocorre, o concreto se torna mais permeável e aumenta a penetração da solução agressiva. No caso da perda de resistência, o sulfato age de forma danosa a coesão dos produtos da hidratação do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A seguir, serão abordados brevemente alguns dos principais tópicos em se tratando de sulfatos em concretos.

### **2.3.1 Fontes de sulfatos**

Dyer (2014) afirma que os sulfatos são encontrados em diversas formas, principalmente na água do mar, no solo e nas águas subterrâneas. A água do mar, por exemplo, contém uma grande concentração, entre 2500 a 3000 mg/L, dependendo da salinidade da água. Tal ânion é associado a diversos cátions, como sódio e magnésio e também em uma escala menor, potássio e cálcio. Silva Filho (1994) ressalta que concretos expostos em zonas marítimas em que há uma grande diferença de nível e variação de saturação, ocorre a cristalização dos sais nos poros das estruturas, aumentando a agressividade. Ainda, o autor destaca que a presença de cloretos pode atenuar o ataque de sulfatos em algumas situações, assim como verificado em algumas pesquisas. Por outro lado, em outros estudos, o concreto imerso na solução marítima se mostrou mais suscetível à deterioração, do que apenas em sulfatos.

Assim, apesar da salinidade possa variar de um lugar para outro, as relações entre as quantidades dos íons presentes na água do mar são, aproximadamente, constantes. De acordo com a norma alemã 4030 (DIN, 2008), a quantidade de íons contidos nas águas do mar do Norte, semelhante ao Oceano Atlântico, pode ser verificada pela Tabela 2.

**Tabela 2 - Porcentagem dos principais sais presentes na água do mar**

Íon	Concentração mg/L	Porcentagem
Na <sup>+</sup>	11000	30,6%
K <sup>2+</sup>	400	1,1%
Ca <sup>2+</sup>	400	1,1%
Mg <sup>2+</sup>	1300	3,6%
Cl <sup>-</sup>	19900	55,3%
SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	2800	7,8%
Outros	200	0,6%

Fonte: DIN (2008), adaptado pelo autor

Existem outras fontes de sulfatos em diversos ambientes. A maioria dos solos também contém uma quantidade de sulfato da forma de gesso, geralmente entre 0,01 a 0,05% de íons SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, que são muitas vezes inofensivos ao concreto. A quantidade de sulfato no solo também depende da solubilidade dos minerais presentes assim como a extensão dos lençóis freáticos subterrâneos ao solo e sua mobilidade. Para as águas subterrâneas, é comum a presença de sulfatos associados ao magnésio, sódio e potássio (MEHTA; MONTEIRO, 2014) que, apesar de serem normalmente de origem natural, podem provir de fertilizantes e efluentes industriais (NEVILLE, 2016).

Também, outra fonte são os efluentes de fornalhas que utilizam combustíveis com alto teor de enxofre, e de indústria química podem conter ácido sulfúrico. Em algumas situações, a formação de ácido sulfúrico pode ocorrer por ação bacteriana no gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), como na decomposição da matéria orgânica em pântanos, lagos rasos, poços de mineração e em canais de esgoto. Dessa forma, é muito comum encontrar concentrações de sulfatos com grande potencial nocivo em águas naturais e industriais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

### 2.3.2 Agressividade, reação e mecanismo do ataque

Na maioria dos casos, os íons sulfatos são originários da decomposição, por hidrólise, de diversos sais que estão presentes na água, subterrânea ou marinha, ou em solo, chamados comumente de alcalinos ou selenitosos. A partir do Quadro 1, é possível verificar os principais sais, e seu tipo de cátion, e separá-los em três faixas de agressividade ao concreto, reduzido, médio e elevado, além de sua solubilidade em água.

**Quadro 1 – Características dos principais tipos de sais selenitosos**

TIPO	CÁTION	COR	SOLUBILIDADE	ORIGEM	AGRESSIVIDADE
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Potássio	Branca	Baixa	Água do mar, subterrânea	Elevada
NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>	Amônia	Branca	Alta	Fab. explosivos, água subterrânea	Elevada
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sódio	Branca	Alta	Ind. química, leito do mar e água do mr,	Elevada
Ca <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Cálcio	Branca	Baixa	Águas subterrâneas, escória de carbono	Elevada
MgSO <sub>4</sub>	Magnésio	Branca	Alta	Água do mar, subterrânea	Elevada
CuSO <sub>4</sub>	Cobre	Branca	Alta	Conservação de madeiras, galvanotecnia	Elevada
FeSO <sub>4</sub> / Fe <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ferro	Branca/verde	Alta	Desinfetante, tinturaria, tratamento de água	Elevada
Zn <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Zinco	Branca	Baixa	Ind. Químicas, tinturaria	Média
KAlSO <sub>4</sub>	Potássio/Alumínio	Branca	Baixa	Ind. Químicas	Média
PbSO <sub>4</sub>	Chumbo	Branca	Muito baixa	Ind. Químicas	Reduzida
CoSO <sub>4</sub>	Cobalto	Vermelha	Baixa	-	Reduzida
NiSO <sub>4</sub>	Níquel	Verde	Baixa	Ind. Químicas	Reduzida

Fonte: Silva Filho (1994), adaptado pelo autor

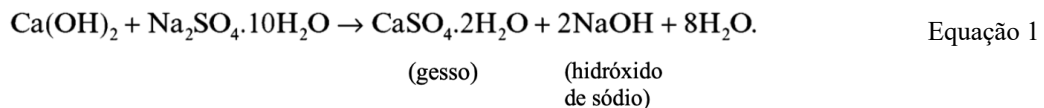
O sulfato de sódio, magnésio e cálcio serão detalhados a seguir por terem maior destaque devido ao nível de agressividade e por serem encontrados em ambientes com mais frequência, em abundancia. Ainda, esses sais produzem quatro reações, de acordo com Silva Filho (1994), sendo as três primeiras consideradas mais importantes e de maior destaque. Tais reações também serão discutidas em sequencia. São elas:

- 1) Reação dos íons sulfato com o aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A), ou com o monosulfoaluminto hidratado de cálcio, gerando etringita;
- 2) Íons sulfato podendo reagir com o hidróxido de cálcio, formando gesso;
- 3) A solução de sulfato de magnésio que pode reagir com o silicato hidratado de cálcio (C-S-H) para a formação de silicato hidratado de magnésio, que possui baixa resistência. Nesse caso, o cálcio liberado é consumido pelo gesso;

- 4) Formação da taumasita, que ocorre em baixas temperaturas e em concretos enterrados, e não são muito comuns. Nesse caso, o C-S-H pode se converter em taumasita, sem função aglomerante.

#### 2.3.2.1 Sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Conhecido como Sal de Gláuber, age na conversão do hidróxido de cálcio (Portlandita) em gesso (ou gipsita), de acordo com a Equação 1. Nessa reação de alta agressividade, o volume dos sólidos aumenta, causando uma expansão de aproximadamente 100% (SILVA FILHO, 1994).



A formação de hidróxido de sódio (NaOH) como subproduto da reação garante uma continuação de um meio com alta alcalinidade no sistema, que é essencial para a estabilidade da hidratação do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Em água corrente, o hidróxido de cálcio, Ca(OH)<sub>2</sub>, pode ser totalmente lixiviado, mas caso haja um acúmulo de NaOH, o equilíbrio é atingido e somente parte do SO<sub>3</sub> é depositado como sulfato de cálcio di-hidratado. Assim, o gesso formado pode reagir com aluminato tricálcio (C<sub>3</sub>A), formando o trissulfoaluminato (etringita), e que também tem um caráter expansivo (NEVILLE, 2016). Esse fenômeno será abordado no próximo tópico. Cabe destacar ainda que o sulfato de sódio é cerca de 20 vezes mais solúvel que o sulfato de cálcio.

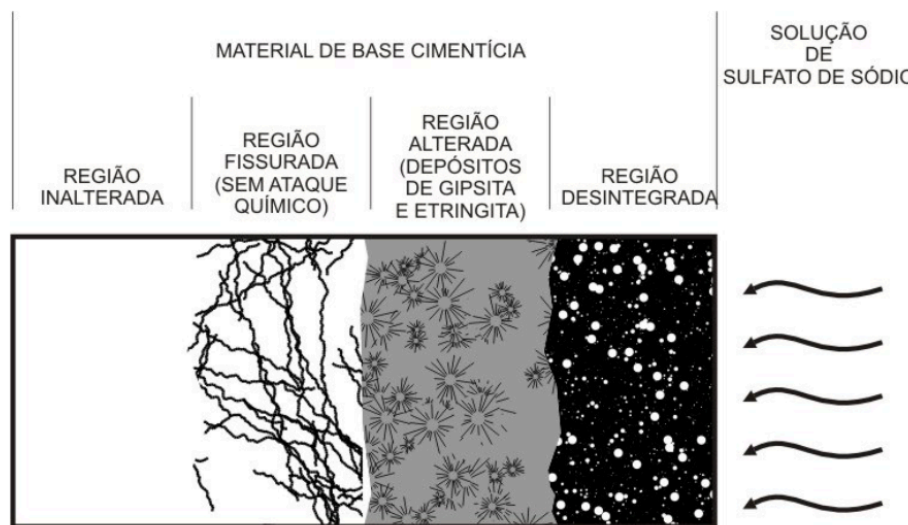
Assim, as etapas do ataque do sulfato de sódio ocorrem de acordo com o descrito a seguir, e também pode ser verificado na Figura 3 (SANTHANAN *et al.*, 2003 *apud* SOUZA, 2006).

- 1) A solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> penetra para o interior do material;
- 2) Nas regiões externas, começam a ser formadas etringita e gipsita nos vazios da pasta de cimentícia, não gerando tensões internas;
- 3) A geração de tensão interna inicia-se à medida que já não há espaço para preenchimento dos vazios com produtos expansivos. Tal tensão é suportada pela região do material que não foi alterada;



- 4) Com a evolução das expansões, a região inalterada não suporta mais as tensões de tração dando início ao processo de fissuração;
- 5) Através da região fissurada, a solução agressiva penetra cada vez mais para o interior do material, formando etringita e gipsita e repetindo o processo descrito. Quatro regiões podem ser classificadas: região desintegrada, região de depósito dos produtos, região fissurada e região inalterada (Figura 3).

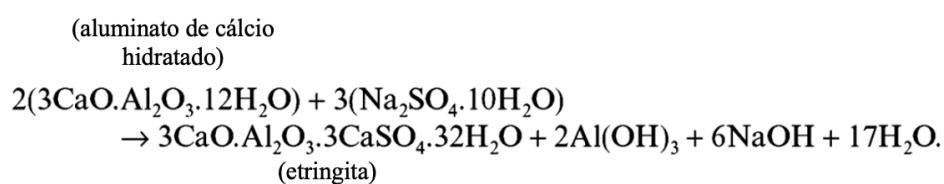
**Figura 3 - Modelo de ataque de sulfatos de sódio em material cimentício**



Fonte: Souza (2006)

### 2.3.2.2 Sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>)

A reação do sulfato de cálcio, ou gesso, na sua forma hidratada, ocorre principalmente no contato com o aluminato de cálcio hidratado, formando etringita, e que pode ser dada pela Equação 2. Silva Filho (1994) destaca que apesar da baixa solubilidade do sal, quando a reação resulta na formação de etringita, tal produto possui um volume em 2,5 vezes maior do que o aluminato, o que resulta na expansão do concreto.



Equação 2

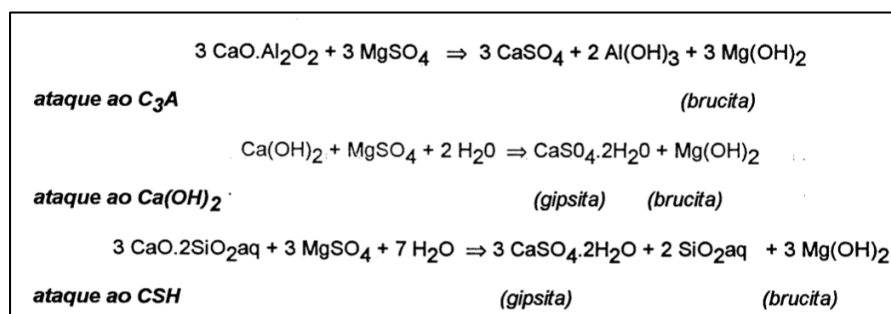
Ainda, Silva Filho (1994) ressalta que o sulfato de cálcio é incorporado já na fabricação dos cimentos, para regular a pega. Assim, Dyer (2014) comenta que a etringita é um dos produtos comuns da hidratação do cimento Portland e tem um papel fundamental nas primeiras idades do concreto. Porém, quando formada em idades mais avançadas e em grandes quantidades, os efeitos podem ser problemáticos. Ou seja, a fonte de alumínio para reagir com o gesso é a própria pasta de cimento.

### 2.3.2.3 Sulfato de magnésio (MgSO<sub>4</sub>)

O ataque de sulfato de magnésio é um dos mais intensos ao concreto e o mais severo do que os outros sulfatos, principalmente, devido a sua solubilidade. É trinta e cinco vezes mais solúvel do que o cálcio e duas vezes mais solúvel que o sulfato de sódio. O magnésio atinge a estrutura resistente do concreto, reagindo com os aluminatos, hidróxido de cálcio e nas fases do silicato de cálcio hidratado e portlandita, desmembrando a fase do C-S-H em sílica, alumina e gesso (COSTA, 2004).

Além disso, a etringita é instável na presença desse sulfato, podendo reagir e formar gesso. Mehta e Monteiro (2014) comentam que no caso de ataque de sulfato de magnésio, a conversão do hidróxido de cálcio em gesso é acompanhando de forma simultânea pela formação de hidróxido de magnésio, ou brucita, formado a partir da reação com a portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>) e que é insolúvel, reduzindo a alcalinidade do sistema. Nesse caso, o C-S-H deixa de ser estável e é atacado pela solução de sulfatos. As reações típicas podem ser verificadas a na Figura 4, assim como descrito por Silva Filho (1994).

**Figura 4 – Principais reações com agressão por sulfato de magnésio**

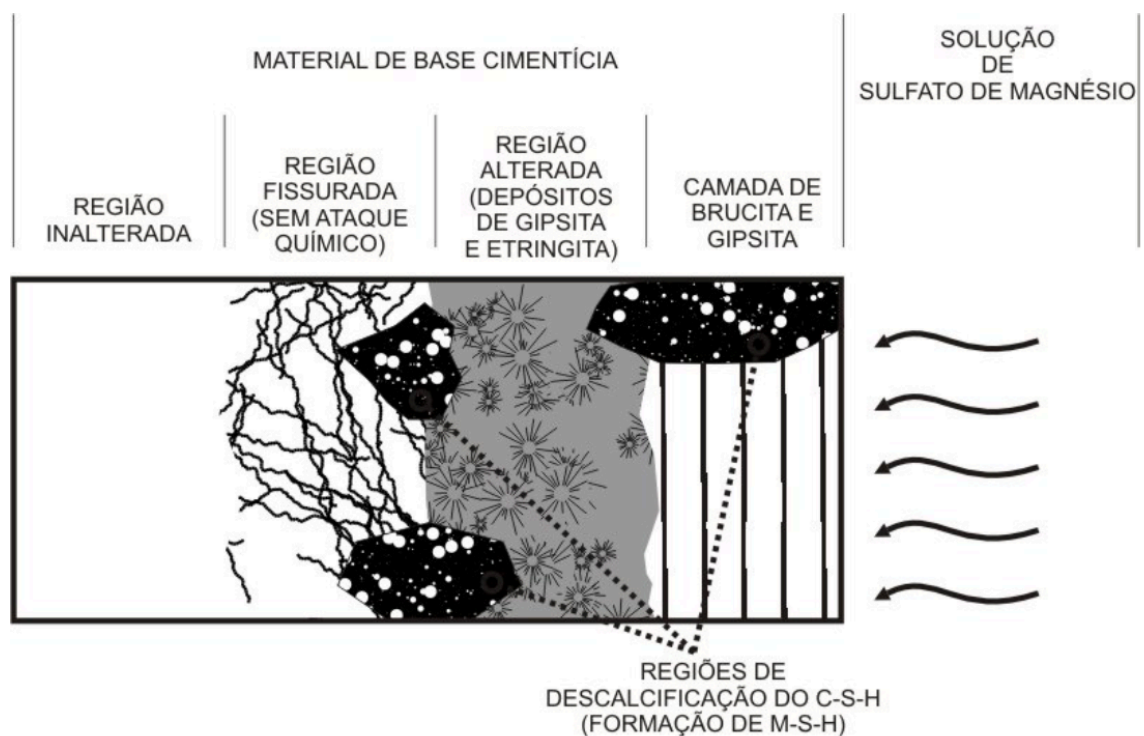


Fonte: Silva Filho (1994)

Santhanan *et al.* (2003) apud Souza (2006), descrevem o passo a passo do ataque do sulfato de magnésio da seguinte forma:

- 1) A solução de  $\text{MgSO}_4$  entra em contato com o material e inicia-se a penetração;
- 2) Formação de gipsita e brucita na camada externa do material;
- 3) A formação de  $\text{Mg(OH)}_2$  consome bastante portlandita, reduzindo o pH da pasta é. Assim, o C-S-H libera portlandita, para manter o equilíbrio, aumentando novamente o pH, o que contribui para a descalcificação da estrutura;
- 4) Depois, a solução agressiva penetra no interior do concreto por difusão, porém a camada de  $\text{Mg(OH)}_2$  dificulta a penetração por ser quase impermeável;
- 5) Forma-se gipsita e etringita sob a camada de  $\text{Mg(OH)}_2$ , causando expansão e aumento de tensões internas nas camadas não afetadas, que desencadeia um processo de fissuração nessa região, semelhante ao que acontece no ataque por sulfato de sódio;
- 6) Assim, a seção do concreto fica dividida em regiões: camada de  $\text{Mg(OH)}_2$  e gesso paralela à superfície do amostra, camada de depósito dos produtos de ataque, região com fissuração e região inalterada, além de regiões isoladas de C-S-H degradado, formando o silicato de magnésio hidratado, M-S-H (Figura 5).

**Figura 5 - Modelo de ataque de sulfatos de magnésio em material cimentício**



Fonte: Souza (2006)

### 2.3.3 Formação da etringita tardia

A formação de etringita é considerada a causa da maioria das expansões de concretos quando expostos ao ataque de sulfatos. Porém, não necessariamente qualquer expansão que envolva a etringita é danosa as estruturas. Quando a etringita ocorre ainda no estado plástico, de forma homogênea e imediata, não causa nenhum efeito nocivo. Quando isso acontece, chama-se de EEF (*early ettringite formation*) que ocorre, por exemplo, quando o gesso reage com aluminato de cálcio através de uma solução. Nesse caso, é um fenômeno comum e muito importante (DYER, 2014).

Já quando a formação da etringita ocorre no concreto com maiores idades tende a ser prejudicial. Esse fenômeno é conhecido como DEF (*delayed ettringite formation*), em que o ataque de sulfatos acontece quando a fonte dos íons é interna. Ocorre principalmente quando os agregados estão contaminados com gesso, ou ainda nos concretos produzidos com cimentos de alto teor de sulfatos. Em temperaturas acima de 65°C, a etringita não é estável e se decompõe para formar monossulfato hidratado. Os íons sulfatos gerados desse fenômeno são absorvidos pelos silicatos de cálcio hidratados e assim, substituindo a estrutura do gel C-S-H. Depois, quando os sulfatos são absorvidos, há a recristalização da etringita, que causa expansão e fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Dyer (2014) afirma que invés do formato comum de agulhas distribuída ao longo do cimento, a etringita assume a forma de grandes cristais, que são expansivos, e em formato esféricos, que não são danosos ao concreto.

O fenômeno de DEF é muitas vezes apresentado por ser uma expansão associada com os sulfatos de fontes internas. Apesar disso, Collepardi (2003) afirma que de um modo geral, devem ser consideradas fontes externas e internas de sulfatos, desde que haja formação de etringita. Nesse caso, o concreto com alta permeabilidade, ambiente com alta concentração de sulfatos e a presença de água são as três condições necessárias. No caso de umas delas não ocorrer, a formação de etringita pode não acontecer. De forma similar, para o ataque interno, o autor destaca que a microfissuração, liberação tardia de sulfato e a presença de água são essenciais para que ocorra a formação do produto. A Tabela 3 traz as informações das principais ocorrências de ataque externo e inteiro.

**Tabela 3 - Formação de etringita tardia pelo ataque de sulfatos externos e internos**

<b>Ataque externo de sulfatos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocorre quando um sulfato presente na água ou no solo penetra na estrutura de concreto;</li> <li>• Ocorre em concretos permeáveis;</li> <li>• Ocorre em ambientes úmidos que favorecem a difusão do <math>\text{SO}_4^{-2}</math> na solução aquosa contida nos poros capilares do concreto.</li> </ul>
<b>Ataque interno de sulfatos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocorre em ambientes livres de sulfatos, devido à presença de sulfatos em agregados contaminados com gipsita ou devido à decomposição térmica da etringita;</li> <li>• É favorecido por microfissuras preliminares onde pode ocorrer o depósito de cristais de etringita;</li> <li>• Ocorre em ambientes úmidos que favorecem a difusão do <math>\text{SO}_4^{-2}</math> e outros íons reativos através de poros capilares saturados com água.</li> </ul>

Fonte: Collepari (2003), adaptado pelo autor

### 2.3.4 Fatores que influenciam o ataque de sulfatos

Em geral, quando uma amostra que está exposta externamente a solução de sulfatos, ocorre uma expansão do concreto, que com o tempo, pode levar a fissuração da matriz, lascamento de camadas exteriores até a desintegração completo do material e seu colapso. Iniciando-se a partir da superfície, bordas e dos cantos, a solução penetra na peça de forma progressiva, levando a uma perda de rigidez e da resistência (SILVA FILHO, 1994). Neville (2016), reforça que as consequências do ataque de sulfatos incluem a perda da adesão entre o cimento hidratado e as partículas dos agregados e que visualmente, tem a aparência esbranquiçada característica. O autor ainda ressalta que o ataque ocorre apenas quando se excede um limite de concentração de sulfatos. Quanto maior a concentração, maior é a velocidade do ataque, a depender do tipo de concreto. Dyer (2014) destaca três fatores básicos que tem forte influência na habilidade do concreto em resistir aos sulfatos, são eles: a concentração dos íons sulfato na solução, a permeabilidade do material e a composição do cimento que o constitui.

Silva Filho (1994) traz os principais parâmetros para o desenvolvimento do ataque em duas categorias:

- a) Fatores endógenos** (ou de produção): são relacionados com os materiais utilizados na produção do concreto, ou seja:
- Tipo de cimento (composição química)
  - Tipo de agregado (granulometria e composição mineral);

- Dosagem (fator a/c; teor de argamassa);
- Cura (temperatura e duração).

**b) Fator ambientais:** são parâmetros relacionados a origem dos sais, decorrentes do meio que está exposto, são eles:

- Concentração da solução agressiva;
- Temperatura da solução;
- Constância do fluxo da solução agressiva.

### 2.3.5 Normatização e ensaios

No mercado, existem os cimentos resistentes a sulfatos, dados pela NBR 16697 (ABNT, 2018), que são cimentos que atendem os requisitos químicos, físicos e mecânicos estabelecidos por seu tipo e classe original e apresentam uma expansão menor ou igual a 0,03%, aos 56 dias de idade, a partir do procedimento de ensaio descrito pela NBR 13583 (ABNT, 2014). O cimento resistente a sulfatos é designado pelo sufixo “RS” ao final de sua denominação original.

Dessa forma, quando um concreto é exposto à ação de íons sulfatos e produzido com cimento resistente a esse íon, recomenda-se seguir o exposto pela NBR 12655 (ABNT, 2022), em que, três condições de exposição são descritas, fraca, moderada e severa, dependendo da quantidade de sulfato solúvel presente na água ou solo (Tabela 4). A partir disso, a norma apresenta limites da relação água/cimento e da mínima resistência característica a compressão do concreto. Ainda, a norma NBR 15900 (ABNT, 2009), limita o teor de sulfato da água de amassamento a ser utilizada na mistura em 2000 mg/L, expresso em íons  $\text{SO}_4^{2-}$  solúveis em água.

**Tabela 4 - Requisitos para concreto exposto a solução contendo sulfatos**

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água ( $\text{SO}_4$ ) presente no solo (% em massa)	Sulfato solúvel ( $\text{SO}_4$ ) presente na água (ppm)	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal*	Mínimo $f_{ck}$ (para concreto com agregado normal ou leve) (MPa)
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	-	-
Moderada**	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa***	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

\*Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.

\*\*Água do mar.

\*\*\*Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Tal classificação apresentada é semelhante ao apresentado pelo ACI 318-08 (ACI, 2014). A diferença consiste na condição de 0,2% a 2,0%, em que no solo é considerado severo, e acima disso, muito severo. Neville (2016) comenta que a extração dos sulfatos nos solos depende da compactação e taxa de extração de água, assim, a determinação da concentração em águas subterrâneas é mais confiável. Ainda, as classificações dadas no ACI são, de certa forma, arbitrárias por não serem determinados a partir de registros de incidência e os danos pelos sulfatos, porém é complexa tal classificação devido a exposição variar ao longo da vida útil da estrutura.

Em área de respingo de água do mar ou em torres de resfriamento, por exemplo, a concentração de sulfatos pode ser bastante aumentada devido a evaporação da água nessas regiões. Sendo assim, para efeitos de avaliação de risco, a velocidade em que o concreto é atacado depende da taxa a que o sulfato removido pelas reações com o cimento é repostado, além do movimento da água subterrânea ou do mar em ciclos de saturação e secagem e quais lados da estrutura estão expostos à solução agressiva. Portanto, o objetivo de classificação das condições de exposição são meramente sugestões preventivas (NEVILLE, 2016).

Em se tratando dos ensaios, não existem normas que padronizam ensaios com concretos submetidos ao ataque de sulfatos, apenas com argamassa. A norma NBR 13538 (ABNT, 2014) é utilizada para avaliar a resistência de argamassas por um ensaio de medição de expansão linear de barras, em condições controladas pela norma. Já a norma ASTM C1202 (ASTM, 2018), traz um procedimento semelhante, também por barras, porém com parâmetros diferentes. Existem diversas diferenças e críticas entre as normas, assim como descrito por Tozetto, Brekailo e Pereira (2019). Os autores comentam que a falta de parâmetros comparativos e limites de expansão de diferentes cimentos dificulta as análises, sendo necessário buscar na literatura parâmetros já publicados.

Schmalz (2018) destaca que pela norma brasileira, os resultados são expostos na forma de expansão resultante, calculada pela diferença entre a expansão média da argamassa na imersão solução agressiva e a expansão média da argamassa mantida em água com cal. Já a norma americana, os resultados são levantados apenas pela expansão média das amostras imersas na solução de sulfato de sódio, verificando, portanto, mais limitações na comparação dos resultados entre as normas. Os parâmetros de cada ensaio podem ser observados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Comparação entre as normas brasileira e americana para avaliação do ataque por sulfatos**

<b>Especificação</b>	<b>NBR 13583 (ABNT, 2014)</b>	<b>ASTM C 1012 (ASTM, 2018)</b>
Traço	1:3,20	1:2,75
Relação a/agl	0,60	0,49
Dimensão do CP (mm)	25 x 25 x 285	
Cura inicial	Ao ar por 48 horas	Imersas em água a $(35 \pm 3) ^\circ\text{C}$ por 24 horas
Cura intermediária	Imersão em água saturada com cal por 12 dias	Imersão em água saturada com cal a $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ até atingir resistência à compressão de 20 MPa.
Cura final ataque por sulfatos	Dois grupos: I - Imersão em água saturada com cal (referência) II - Imersão em solução de sulfato de sódio (10%). Ambos a $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$	Imersão em solução de sulfato de sódio (5%) a $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$
Tempo de exposição	42 dias	365 dias

Fonte: Schmalz (2018), adaptado pelo autor

Mesmo que não haja um teste padrão realizado mundialmente para avaliar a resistência de concretos aos sulfatos, existem diversas metodologias. Dos ensaios que são comumente aplicados, alguns parâmetros se diferem ao longo das pesquisas como a geometria do corpo de prova, o tempo de exposição as soluções, a concentração da solução e os ensaios complementares que possibilite esta análise. Entretanto, algumas das pesquisas possuem características semelhantes. Avalia-se, via de regra, a alteração de peso, dimensões e a resistência a compressão após a imersão em idades diferentes como 1, 3 e 6 meses, chegando até a dois anos ou mais de análises, concentração de sulfatos, entre outros.

Pontes (2019) comenta que a comparação dos resultados obtidos é bastante difícil devido à não padronização dos mesmos. O autor cita que, em geral, pode-se dividir os testes em dois grupos principais. O primeiro é o teste de agressão por incorporação de sulfatos, também conhecido como teste por ataque externo (AI) em que o agente agressivo é adicionado na mistura durante a produção do concreto. O outro é o teste de agressão por imersão em solução de sulfatos, em que ocorra o ataque externo (AE) e os concretos são imersos em uma solução de sulfatos agressiva. Ainda, pode-se ter um ensaio combinado, chamado de interno-externo (AIE), que combina as duas formas de ataque.

Por outro lado, uma norma que é bastante utilizada como parâmetro é norma japonesa JSTM C7401 (JSTM, 1999), com título “Metodologia de ensaio para resistência química de concretos imersos em soluções agressivas”. É a única norma que prega uma comparação entre concretos, e não apenas argamassas, imersos nas soluções agressivas com outros imersos apenas em água. A concentração de soluções de 10% de sulfato de sódio, 10% de sulfato de magnésio ou ainda, 5% de ácido sulfúrico são recomendadas para a realização do ensaio. São necessários



3 corpos de prova cilíndricos de 10x20cm para a resistência a compressão, curados por 28 dias em câmara úmida, e depois imersos no tempo de interesse. Os ensaios que são necessários antes e após a imersão para avaliação são: mudança de massa, dimensões, módulo de elasticidade e resistência a compressão.

A partir disso, existe uma enorme variedade de ensaios que podem se basear, incrementar e modificar estes dois testes básicos. A seguir serão comentados alguns dos estudos pertinentes a pesquisa que utilizam geralmente uma solução que contem sulfato de sódio ou magnésio, de diversas formas, e ainda podem ser combinadas com outros compostos, como os cloretos.

### 2.3.6 Concretos submetidos à imersão de sulfatos e de sulfatos combinados com cloretos

Na Tabela 6, observa-se a diferença dos parâmetros utilizados em pesquisas elencadas que tratam de durabilidade de concretos, especialmente a imersão em soluções agressivas. Algumas das pesquisas serão comentadas em sequência.

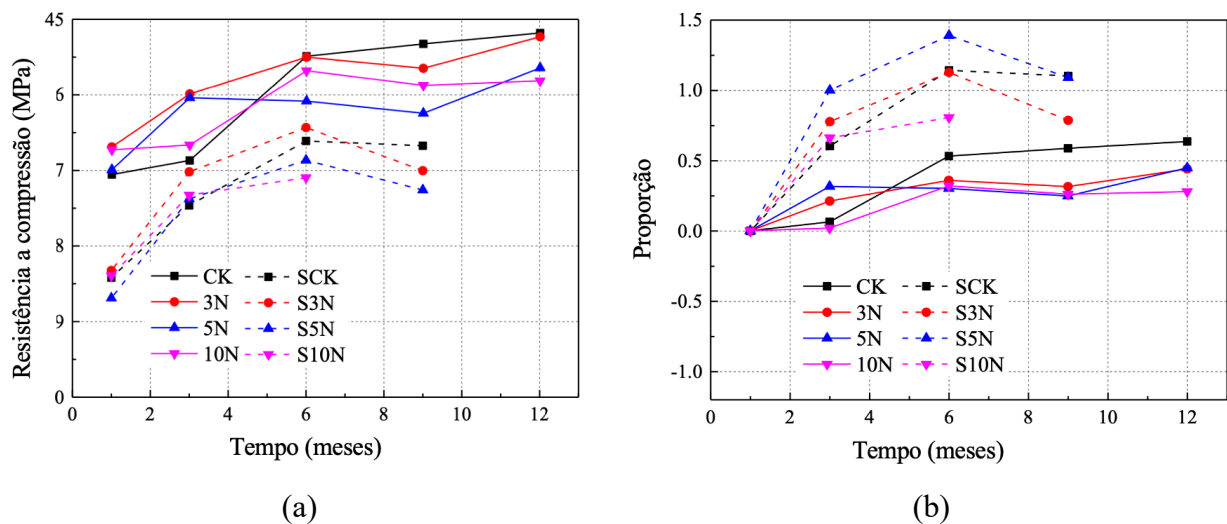
**Tabela 6 – Pesquisas de imersão em soluções agressivas**

Autor/ ano	Corpo de prova	Impermeabilização	Cura antes da imersão	Tempo de imersão	Solução (em massa)
Yang, Usman e Hanif (2021)	10x20 cm (cilindro)	-	28 dias cura na água	6, 12 e 24 semanas	5% de sulfato de sódio e 5% de sulfato de magnésio
Zhao <i>et al.</i> (2020a)	10x20 cm (cilindro)	Topo e base	12h de cura úmida	1,3,6,8,12 meses	0%, 3%, 5% 10% de Sulfato de sódio e solução mista com mesmas adicionado de 3% de NaCl (externo)
Zhao <i>et al.</i> (2020b)	10x20 cm (cilindro)	Topo e base	12h de cura úmida	1,3,6,8,12 meses	0%, 3%, 5% 10% de Sulfato de sódio (externo) + 3% de sulfatos na mistura (interno)
Kim e Hong (2019)	10x20 cm (cilindro)	-	28 dias cura umida	84 e 182 dias	5% de sulfato de sódio e 5% de sulfato de magnésio
Kim, Choi e Yang (2018)	10x20 cm (cilindro)	-	28 dias de cura úmida	28, 56 a 91 dias	10% sulfato de sódio
Liu, <i>et al.</i> (2018)	10x10x10 cm	Laterais (apenas para a imersão de cloretos)	28 dias cura umida	45, 90 e 120 dias	5% e 10% de sulfato de sódio, 8% de Cloretos
Silva (2019)	10x20 cm (cilindro)	-	28 dias cura úmida	91 dias	5% de sulfato de sódio
Mangi (2018)	10x10x10 cm	-	28 dias cura imerso na água	28, 56 e 90	5% sulfato de sodio e 5% de cloretos
Zhao, Li, Shao (2018)	10x20 cm (cilindro)	Topo e base	12h de cura úmida	1,3,6,8,12 meses	0%, 3%, 5% e 10% de Sulfato de sódio (externo) + 3% de cloretos na mistura (interno)
Orhan (2016)	10x10x10 cm	-	28 dias cura na água	180 dias	5% de sulfato de sódio
Maes e Belie (2014)	2x2x2 cm e 2x2x16 cm	-	28 dias cura umida (As amostras foram saturadas com CAOH2 antes da imersão)	8 meses	5% de sulfato de sódio e 5% de sulfatos de sódio+ 5% de cloretos

Fonte: O autor (2022)

Zhao *et al.* (2020a), estudaram mecanismos de degradação de concretos moldados em loco induzidos por ataque apenas externo (AE) e interno-externo de sulfatos (AIE), conhecido também como ataque combinado. Dos traços utilizados, CK é a amostra controle imersa em água destilada, 3N, 5N e 10N são concretos imersos em tanques com concentração de 3%, 5% e 10% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , respectivamente. O prefixo “S” indica os traços em que houve a incorporação de 3% de sulfatos na mistura e depois imersos nas mesmas soluções. O primeiro resultado da pesquisa foi a resistência a compressão, em termos quantitativos (Figura 6a) e em proporção, relacionando a resistência antes da imersão, em 28 dias, com a resistência após a imersão (Figura 6b).

**Figura 6 – (a) Resistência a compressão ao longo dos meses das amostras / (b) Proporção da resistência a compressão**



Fonte: Zhao *et al.* (2020a), adaptado pelo autor

Pelos gráficos, observa-se que quanto maior a concentração de sulfatos, maior é o dano causado aos exemplares. Pelos traços representados pelas linhas pontilhadas, verifica-se que os ataques combinados, internos-externos, resultam em menores resistências a compressão e uma degradação mais acelerada do que apenas os externos. Os autores destacam que a resistência inicial das amostras submetidas ao AIE é muito menor do que ao AE e, a partir de 9 meses, perderam sua capacidade de carga. No sexto mês, o traço S10N já não tinha resistência alguma. Essas perdas consideráveis se deram principalmente pelas fissuras e rachaduras das amostras sendo que as reações da corrosão química das amostras AIE aconteceram rapidamente junto as

necessidades de hidratação dos concretos. Cabe destacar que nos dois casos em que o traço foi imerso apenas em água, representado pela cor preta, resultaram em maiores valores.

A demonstração dos resultados em se tratando de sulfatos varia de acordo com cada autor. O fator de mudança da resistência a compressão ( $F_c$ ) de Zhao *et al.* (2020a) foi calculada pela Equação 3.

$$F_c = \frac{F_s - F_{ini}}{F_{ini}} \quad \text{Equação 3}$$

Em que,

$F_s$  é a resistência a compressão após o dano pelo sulfato (Mpa);

$F_{ini}$  é a resistência a compressão com 28 dias de cura úmida antes da imersão (MPa).

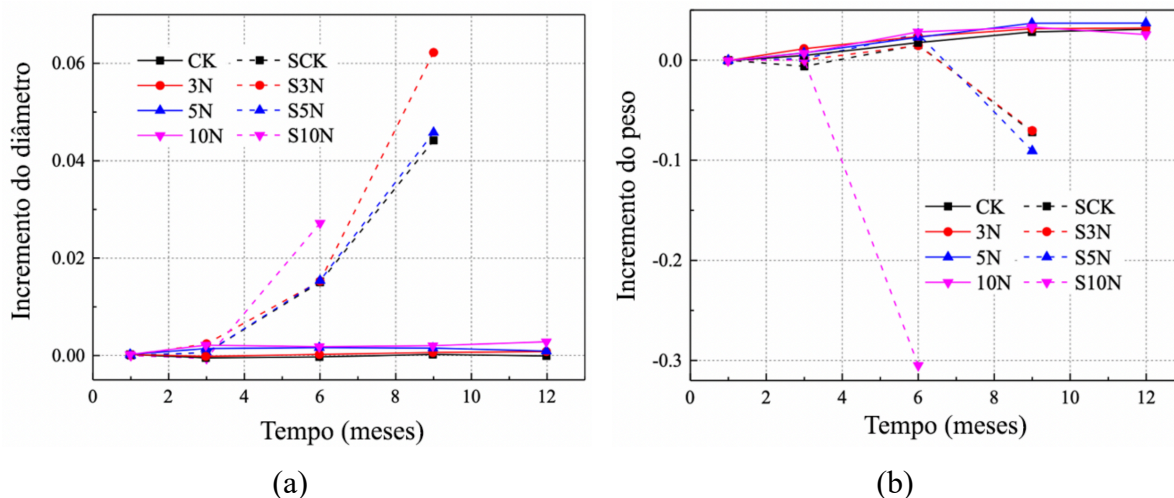
Ainda, outras análises realizadas pelos autores consistem na alteração da massa e das dimensões das amostras ao longo do período de exposição. O incremento do diâmetro foi calculado pela Equação 4 em que  $d_o$  é o valor do diâmetro antes da imersão e  $dt$  é o valor do diâmetro após o período de imersão, aferidos com 1, 3, 9 e 12 meses. Os pesquisadores calcularam a mudança do peso da amostra da mesma forma.

$$D = \frac{dt - d_o}{d_o} \quad \text{Equação 4}$$

Pelas Figura 7a e Figura 7b verifica-se uma grande diferença de comportamento entre as amostras AE e AIE. As amostras AE tiveram uma pequena variação de diâmetro durante, apresentando uma maior expansão nas soluções de 5% e 10%, e um aumento do peso ocorreu gradualmente, com exceção das amostras imersas em 5% e 10% de sulfatos, que mostraram uma diminuição a partir do nono mês. A amostra com 10% mostrou a maior redução.

Já para as amostras AIE o diâmetro aumentou de forma significativa, principalmente a partir do terceiro mês, sendo o concreto imerso em 10% foi o que aumentou mais rapidamente. Em contraste as amostras AIE, o ataque combinado resultou em um aumento de peso nas primeiras idades e logo depois caiu consideravelmente. O traço S10N imerso em 10% caiu a partir do terceiro mês e logo é totalmente degradado.

**Figura 7 – (a) Incremento do diâmetro / (b) Incremento do peso**

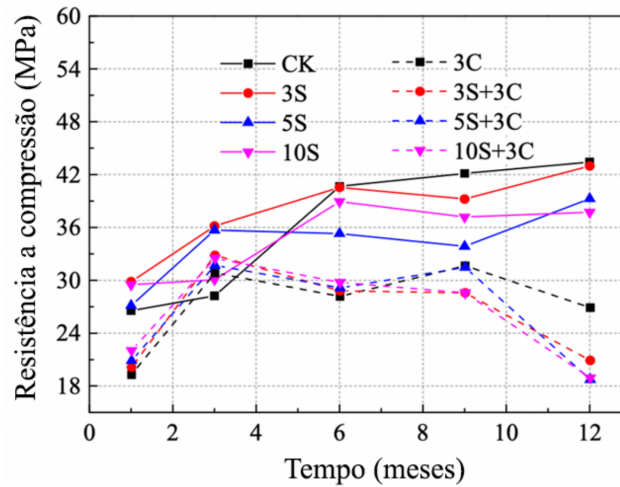


Fonte: Zhao *et al.* (2020a), adaptado pelo autor

Os autores destacam que o acúmulo de produtos resultados da corrosão pelo sulfato gera uma grande tensão nos corpos de prova devido a geração de poros e fissuras que aumentam progressivamente até o colapso. A união dessas fissurações leva a redução do peso do concreto. Da mesma forma, o aumento do diâmetro é resultado da formação e crescimento das rachaduras, que se comporta rapidamente e irreversivelmente. Sendo assim, a situação de ataque combinado interno-externo agrava muito os danos ao concreto.

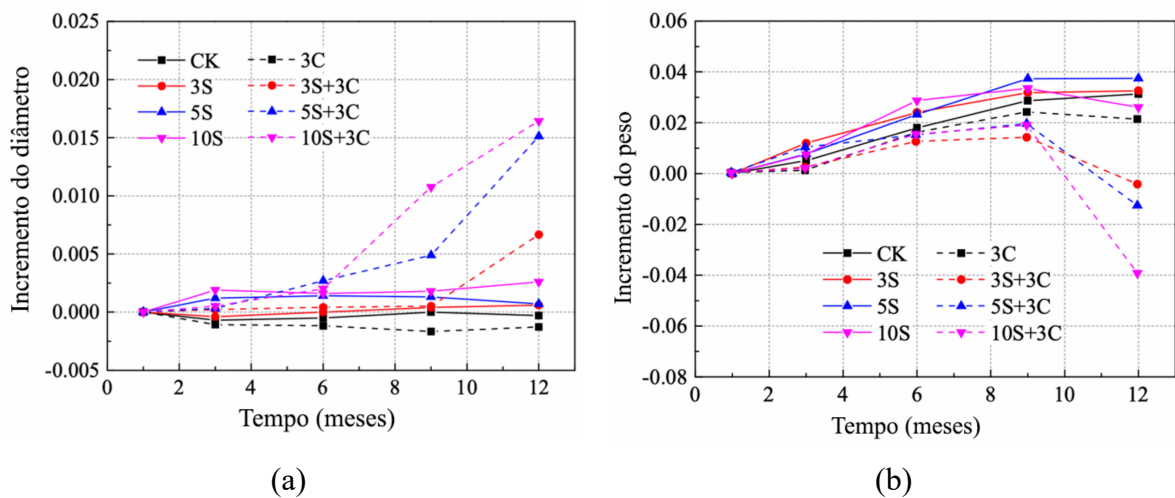
Em outra publicação, o mesmo pesquisador com o auxílio de outros colaboradores compararam exemplares imersos em soluções com sulfatos nas concentrações 3%, 5% e 10% com outros concretos que receberam uma adição de 3% cloretos, misturados ao concreto fresco e depois imersos nas soluções citadas (ZHAO; LI; SHAO, 2018). Assim, os autores verificaram que para soluções expostas apenas externamente, a resistência a compressão foi maior do que aquelas com cloretos na mistura. No primeiro mês se observou menores resistências nas amostras com ataque AIE, o que verifica a influência dos cloretos já nas primeiras idades. Houve também um crescimento de resistência dessas amostras entre o primeiro e o quarto mês (Figura 8).

Ao final de doze meses, verificou-se que as amostras AIE tiveram perdas significativas de resistência, ficando com os valores próximos aos valores em 28 dias de imersão. Já as amostras com AE, mesmo expostas as soluções agressivas, tiveram um ganho de resistência ao longo do período.

**Figura 8 – Resistência a compressão dos traços**

Fonte: Zhao, Li, Shao (2018), adaptado pelo autor

Em relação ao peso, ocorreu um aumento nos primeiros seis meses e depois se estabilizaram, com exceção da amostra em 10%, que perdeu massa devido a alta concentração de sulfatos, e conseqüentemente, maior ataque químico. Para amostras com ataque combinado, a partir do nono mês, as amostras começaram a fissurar e resultaram na perda de massa severa (Figura 9). E também, o comportamento da mudança de dimensões dos corpos de prova, semelhante ao que ocorreu na pesquisa de Zhao *et al.* (2020a). Entretanto, observa-se que as amostras não foram danificadas ao longo do estudo, sendo possível realizar leituras até o final, e verifica-se que o AIE utilizando sulfatos internamente foi mais agressivo do que utilizando cloretos.

**Figura 9 – (a) Incremento do diâmetro / (b) Incremento do peso**

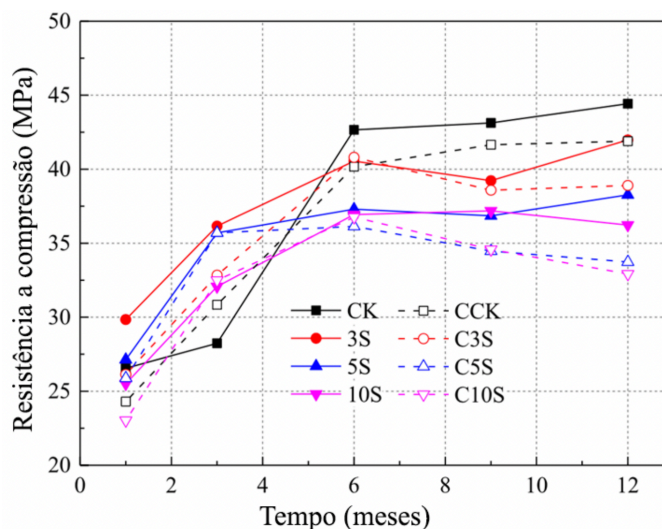
Fonte: Zhao, Li, Shao (2018), adaptado pelo autor

Com esses dados, os autores destacam que para as amostras com cloretos internos, nas primeiras idades, há formação de produtos da corrosão e da hidratação, resultando em um pequeno aumento do diâmetro e do peso, junto ao crescimento da resistência. Para as amostras sem cloretos, fica evidente que a resistência a compressão ao final do estudo depende da concentração de sulfatos, o que reforça a premissa de que quanto maior a concentração de sulfatos, menor é a resistência a compressão.

Ainda, em uma outra pesquisa, Zhao *et al.* (2020b) estudaram a degradação de concretos sujeitos a um ataque exclusivamente externo misturando duas soluções: sulfatos e cloretos. Dessa forma, quatro soluções de 0%, 3%, 5% e 10% de sulfato de sódio foram utilizadas e também outras quatro com o mesmo teor de sulfatos, porém com adição de 3% de cloreto de sódio em cada uma. Os autores destacam quatro pontos importantes em se tratando das soluções escolhidas:

- 1) Os íons cloreto difundem-se mais rapidamente que os íons sulfato e, portanto, têm a prioridade de reagir com a composição do concreto;
- 2) A competição entre íons sulfato e cloreto na reação de corrosão limita a formação de produtos de corrosão dos sulfatos;
- 3) O ataque de cloreto produz menos expansão de volume do que o ataque de sulfato, consequentemente causando menor desenvolvimento de fissuras no concreto;
- 4) A formação de produtos de corrosão envolvidos por cloretos altera o pH das soluções de poros, influenciando as propriedades morfológicas e a solubilidade dos produtos de corrosão gerados pelos sulfatos.

Assim, a Figura 10 ilustra a relação de mudança de resistência ao longo tempo de imersão para as diferentes soluções. Foi possível observar que os íons agressivos têm um efeito significativo no desenvolvimento da resistência do concreto. A resistência de todas as amostras testadas em soluções corrosivas aumentou de forma relativamente rápida nos primeiros 4 meses, quando comparado com a amostra referência. O aumento da resistência do concreto na fase inicial pode ser relacionado ao preenchimento dos poros e fissuras dos concretos com os produtos de corrosão, que aumenta o peso do corpo de prova e torna o concreto mais denso, e que, consequentemente, aumenta sua resistência.

**Figura 10 - Resistência a compressão**

Fonte: Zhao *et al.* (2020b), adaptado pelo autor

No entanto, a resistência dos corpos de prova nas soluções agressivas torna-se estável ou mesmo começa a diminuir a partir de 6 meses, devido à degradação. Para amostras em soluções de sulfato, a maior perda de resistência é observada para amostras em soluções de sulfato de 5% e 10%. A amostra 10S apresentou uma maior perda de resistência no 12º mês, indicando que quanto maior a concentração de sulfato, maior é a degradação sofrida pelo concreto. A diminuição da resistência do concreto deve-se ao preenchimento excessivo de produtos de corrosão e cristais nas fissuras e poros originais do material, colocando o concreto sob tração. Em seguida, novas fissuras e prolongamentos das fissuras originais, gerando mais tensões, e em seguida há diminuição tanto do peso quanto da resistência do concreto.

Em geral, a resistência das amostras nas soluções mistas sulfato-cloreto (C3S, C5S e C10S) é relativamente menor do que aquelas imersas nas soluções apenas de sulfatos. Fica claro que a perda de resistência dos corpos de prova imersos em soluções mistas é mais significativa, e os valores de resistência também são relativamente menores na fase de corrosão mais tardia. A resistência dos corpos de prova imersos em soluções com maiores concentrações de sulfato apresentou maior perda após o período de 12 meses. Os autores ainda destacam que as perdas significativas de resistência dos corpos de prova imersos em soluções mistas sulfato-cloreto podem ser desencadeadas pelo seguinte:

- O ataque de sulfato na fase inicial leva à formação de produtos de corrosão sulfato, diminuindo a resistência do concreto da camada externa;

- O ataque combinado sulfato-cloreto na fase inicial retarda o desenvolvimento da resistência e causa fissuras extras no concreto da camada externa, com excesso de expansão em diâmetro;
- A geração de fissuras extras no estágio inicial fornece mais caminhos para que os íons corrosivos penetrem mais profundamente e acelerem a degradação, produzindo uma grande diminuição na resistência do concreto.

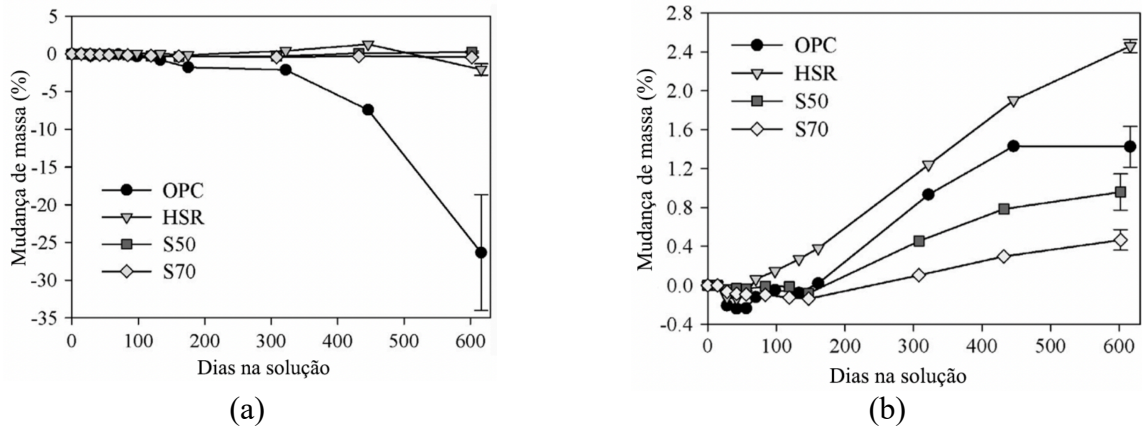
Algumas pesquisas verificaram o comportamento de adições e diferentes tipos de cimentos em concretos e argamassas. Maes e Belie (2014), por exemplo, estudaram a resistência de argamassas em um ataque externo combinando cloretos e sulfato de sódio. O objetivo foi entender a influência dos íons cloretos em um ataque de sulfatos e por isso, utilizou-se duas soluções, uma com 50g/L (5%) de sulfato de sódio e outra com 50g/L (5%) de sulfatos combinado com 50g/L (5%) de NaCl. Os autores trabalharam com quatro traços de argamassas com cimentos diferentes: Cimento Portland (OPC), Cimento Alta Resistencia a Sulfatos (HSR), 50% de substituição do cimento Portland com Escória de Alto Forno (S50) e 70% de substituição do cimento Portland com Escória de Alto Forno (S70). A análises foram realizadas através da alteração do peso de corpos de prova prismáticos com lado de 2 cm e pela análise da mudança das dimensões com amostras de 2x2x16 cm. As amostras foram curadas por 28 dias em câmara úmida antes da imersão.

Ao longo dos 600 dias de exposição, observou-se que as amostras que utilizaram apenas o cimento Portland (OPC) foram a que menos resistiram ao ataque de sulfatos. A partir da Figura 11a, observa-se que até os 320 dias na solução de sulfatos, houve pouca diferença na mudança de massa entre os traços. Depois disso, a amostra com OPC perdeu drasticamente seu peso, reduzindo em 26,5%, quando comparado com sua massa inicial. Enquanto isso, para as soluções mistas (Figura 11b), verifica-se que as amostras ganharam peso inclusive o OPC, que ganhou 1%. Porém, a partir de 450 dias, as argamassas com OPC começou a reduzir.

Os autores comentam que a presença dos cloretos teve um efeito mitigador em relação a diminuição da massa. Porém, pode-se dizer que esse efeito está apenas retardando o processo de deterioração que irá ocorrer em maiores idades.



**Figura 11 – (a) Mudanças no peso na solução de sulfatos / (b) Mudança de peso na solução mista**

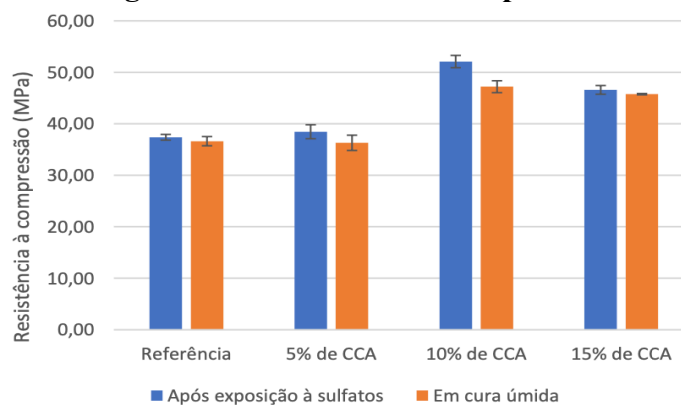


Fonte: Maes e Belie (2014), adaptado pelo autor

Pelas análises da microestrutura, quando imerso nas soluções mistas, uma grande quantidade de etringita está presente na argamassa, mas não se observou deterioração alguma, o que pode ser devido a pouca quantidade de gesso. No caso das soluções de apenas de sulfatos, encontrou-se etringita e gesso em grandes quantidades, resultando na deterioração. Verificou-se, em geral, que as amostras com escórias sofreram nenhuma influencia na solução mista, demonstrando sua alta resistência aos ataques de sulfatos, já que sua massa não teve variação significativa.

Silva (2019) também pesquisou a influência da substituição do cimento por cinza da casca de arroz, em 0%, 5%, 10% e 15% e seus efeitos sob a ação de sulfatos. Para o ensaio, a autora utilizou corpos de prova de concreto com dimensões de 10x20cm curados por 28 dias em câmara úmida e depois imersos em solução de 5% de sulfato de sódio. Avaliou-se a resistência a compressão das amostras imersas com as mantidas em câmara úmida. Assim, verificou-se um aumento de resistência nos concretos expostos (**Figura 12**), devido a formação dos compostos resultantes da reação dos sulfatos.

**Figura 12 – Resistência a compressão**



Fonte: Silva (2019)

---

## 2.4 ADITIVOS MINERAIS

Diversas indústrias, como metalúrgicas, alimentícia, açúcar e álcool são fontes de grande quantidade de subprodutos como as cinzas volantes, escória de alto-forno, cinzas de casca de arroz, cinzas de óleo de palma, entre outros. Esses subprodutos gerados pelas indústrias ganham destaque em estudos e pesquisas devido à sua alta aplicabilidade na produção de concreto, resultando em concretos com adições minerais, que trazem diversos benefícios tanto econômicos quanto ambientais (DIETRICH, 2015).

Barros (2016), destaca que resíduos gerados pelas indústrias são, muitas vezes, descartados de forma imprópria, e podem resultar em contaminação e riscos ao solo e fontes naturais de água. Assim, as adições minerais consistem no reaproveitamento desse subproduto, reduzindo o impacto ambiental que ocorreria caso a destinação ocorresse de forma inadequada. Diversas pesquisas já mostram os avanços tecnológicos em concretos e argamassas na incorporação de resíduos no concreto, como o aumento de resistência à compressão, além da comprovação dos benefícios ambientais.

Dietrich (2015) afirma que destinar esses materiais à aterros, ou ainda os utilizar como substitutos aos agregados representam um desperdício das suas potencialidades pois as adições minerais são, em geral, siliciosas e com granulometria fina, podendo trazer melhores benefícios quando utilizados em produtos cimentícios. Ainda, dentre as vantagens, as adições podem não só gerar melhora na resistência à fissuração térmica pelo controle do calor de hidratação, como também aumentar a resistência à compressão pelo refinamento dos poros da argamassa e fortalecendo a zona de transição entre argamassa e agregado graúdo, por exemplo.

Nesse contexto, Mehta e Monteiro (2014) destacam que as adições minerais podem ser classificadas de acordo com suas propriedades físico-químicas em três grupos. O primeiro são as adições minerais pozolânicas que, apesar de não ter qualidade aglomerante própria, são capazes de agir com o hidróxido de cálcio para formar C-S-H, numa reação conhecida como pozolânica (NEVILLE; BROOKS, 2013). O segundo grupo é das adições minerais cimentícias, que precisam de água para que ocorra a hidratação, além de ter suas reações aceleradas quando expostos ao hidróxido de cálcio, como a escória de alto-forno (NEGREDO, 2016);

Por fim, as adições minerais inertes são materiais que possuem a granulometria fina, próxima ao cimento, influenciando nas propriedades físicas como trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, entre outros. Podem causar três efeitos principais: a diluição do cimento Portland, a modificação na distribuição das partículas (efeito filer) e os pontos de nucleação. A diluição é um efeito que ocorre quando há a substituição parcial do cimento pelo

material, que aumenta o fator  $a/c$  efetivo. O efeito filer é o empacotamento dos grãos na estrutura com o preenchimento dos poros com os finos da adição, o que influencia na porosidade inicial da pasta e pode influenciar na resistência. Já a nucleação é um fenômeno que estimula a hidratação do cimento e pode melhorar a resistência logo nas primeiras idades (NEGREDO, 2016).

A aplicabilidade de materiais com propriedades pozolânicas como aditivos é determinada pela chamada “atividade pozolânica” do material. Tal fator é extremamente relacionado a quantidade de substâncias ativas, como  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água, formando compostos cimentícios (C-S-H), em uma reação conhecida como “reação pozolânica” (GUIGNONE, 2017). Neville e Brooks (2013) destacam que a pozolanicidade dos materiais ainda não é totalmente compreendida e definem pozolana como um material natural ou artificial que contém sílica em forma reativa. O material silicoso ou silício-aluminoso por si só não possui nenhuma atividade cimentícia, porém reage quando finamente moído e na presença de água.

Em geral, há necessidade de poucos procedimentos para transformar alguns dos subprodutos industriais em pozolanas, podendo citar a moagem e classificação, que reduz o tamanho e aumento da superfície específica das partículas. Em se tratando da utilização de resíduos em concretos pode se destacar subprodutos industriais, já citados, e também o reaproveitamento de materiais descartados, como os resíduos de vidros gerados pela lapidação de vidros e reciclagem de garrafas (GUIGNONE, 2017).

O autor ainda destaca que nos tempos atuais, tendo em vista a urgência da adoção medidas alternativas e sustentáveis nos processos produtivos que geral algum impacto ambiental, seja grande ou pequeno, a reciclagem de vidro destinada à fabricação de novos materiais compostos por vidros e também a incorporação destes resíduos no concreto, por exemplo, destacam-se como contribuições de relevância já que o produto seria, em parte, descartado e depositado em aterros sanitários. Dessa forma, o material é novamente inserido na cadeia produtiva resultando em benefícios ambientais.

Conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), materiais pozolânicos são aqueles que atuam com pouca ou nenhuma propriedade aglomerante, mas, que quando finamente dividido e na presença de umidade, têm a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento a temperaturas ambientes, para obter compostos que possuam propriedades aglomerantes.

A norma classifica os materiais pozolânicos em três classes de acordo com sua origem e requisitos físicos e químicos. Na classe N, estão inseridos os materiais pozolânicos naturais,

geralmente de origem vulcânica ou sedimentar, ou artificiais, que são provenientes de tratamento término ou subprodutos industriais. Na classe C, os materiais são provenientes da queima de carvão mineral em usinas termoelétricas. Já na classe E, está inserida qualquer pozolana que difere das classes anteriores. Enquadrados na classe E, as escórias siderúrgicas ácidas, as cinzas de materiais vegetais e o rejeito de carvão mineral são considerados como pozolanas não tradicionais.

Ainda, destaca-se que os materiais pozolânicos devem estar de acordo com as exigências química e físicas estabelecidas pelas Tabela 7 e Tabela 8, caso contrário, devem ser rejeitados.

**Tabela 7 - Exigências químicas**

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % mín.	70	70	50
SO <sub>3</sub> , % máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade, % máx.	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo, % máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014), adaptado pelo autor

**Tabela 8 - Exigências físicas**

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 µm, % máx.	34	34	34
<i>Índice de atividade pozolânica:</i>			
- com cimento aos 28 dias em relação ao controle, % mín.	75	75	75
- com o cal aos 7 dias, em Mpa	6,0	6,0	6,0
- água requerida, % máx.	115	115	110

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014), adaptado pelo autor

A norma brasileira NBR 12653 (ABNT, 2015) é bastante semelhante à norma americana ASTM C618 (ASTM, 2022). As pozolanas são classificadas em três tipos: N, F e C, dependendo da sua origem. De forma análoga, as exigências químicas de cada classe estão dispostas na Tabela 9.

**Tabela 9 - Exigências químicas**

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	F	C
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % mín.	70	50	50
CaO, %	Apenas reportar	18 (max)	>18
SO <sub>3</sub> , % máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade, % máx.	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo, % máx.	10,0	6,0	6,0

Fonte: ASTM C618 (ASTM, 2022), adaptado pelo autor

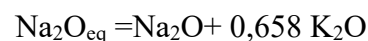
A Tabela 10 descreve as exigências físicas descritas na norma americana. Observa-se uma diferença quando comparada à norma brasileira.

**Tabela 10- Exigências físicas**

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	F	C
Material retido no peneiramento úmido na peneira 45 µm, % máx.	34	34	34
<i>Índice de desempenho</i>			
- Com cimento Portland, aos 7 dias, min % de controle	75	75	75
- Com cimento Portland, aos 28 dias, min % controle	75	75	75
Água requerida, % máx.	115	105	6,0
Expansão ou contração da autoclave, % máx	0,8	0,8	0,8
Densidade, máx variação da média	5	5	5
Porcentagem de material retido na peneira 45 µm, máx variação	5	5	5

Fonte: ASTM C618 (ASTM, 2022), adaptado pelo autor

Os principais componentes das pozolanas são os óxidos de alumínio, óxido de ferro, óxido de cálcio e anidrido sulfúrico. Pelas normas citadas, observa-se que o teor de anidrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>) deve ser menor ou igual a 5%, sendo tal para evitar a expansão que ocorre devido a formação de etringita nas primeiras horas de hidratação. Já os compostos Na e K em teor elevado é, muitas vezes, indesejável pois favorece o fenômeno das eflorescências ou a ocorrência de reação álcali-agregado. O teor máximo de álcalis recomendável, em equivalente de Na<sub>2</sub>O, é 1,5%. É importante citar que o termo “álcalis”, quando se refere à reação álcali-agregado está relacionada a quantidade total de álcalis presentes representados por Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O e representada pelo do teor equivalente alcalino em sódio (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>), representado pela Equação 5 (ÁGUAS, 2014).



Equação 5

## 2.5 APLICAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO NO CONCRETO

No Brasil, o índice de reciclagem efetiva de resíduos que podem ser recicláveis é de apenas 4% dos 27,7 milhões de toneladas produzidos anualmente. O vidro representa aproximadamente 2,7% desse montante, chegando a um total de 2,2 milhões de toneladas/ano que poderiam ser reciclados (BRASIL, 2022). Nesse contexto, a gestão dos resíduos sólidos

ainda é, indiscutivelmente, um desafio para o mundo. Sua utilização em concretos se configura como uma forma auxiliar e adequada para preservar as matérias-primas naturais, reduzir o consumo de energia e ainda, reduzir a quantidade de resíduo destinado a aterros.

A seguir, serão apresentados os tipos de vidros, suas composições e classificações.

### 2.5.1 Vidros

Os vidros consistem em materiais cerâmicos formados por silicatos não-cristalinos que contém diversos óxidos, como CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, por exemplo. A quantidade de óxidos influencia diretamente nas suas propriedades e características (Figura 13) sendo as principais características dos vidros a transparência ótima e a facilidade de fabricação (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

**Figura 13– Composições das principais famílias de vidros a base de sílica**

Tipo do vidro	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO
I. "Soda"-silicato <sup>a</sup> ( <i>water glass</i> )	Composição variável razão SiO <sub>2</sub> – Na <sub>2</sub> O de 1,6 a 3,7							
II. "Soda-lime" <sup>b</sup> silicato ( <i>lime glass</i> )	72,1	21,1	–	2,8	–	–	2,0	–
	72,1	14,0	–	9,9	3,2	–	0,3	–
III. Borossilicato	81,0	4,5	–	–	–	12,5	2,0	–
IV. Aluminossilicato	54,5	–	–	17,5	4,5	10,0	14,0	–
	59,0	11,0	0,5	16,0	5,5	3,5	4,5	–
	65,8	3,8	–	10,4	–	–	6,6	–
V. Silicato de chumbo	56,0	2,0	13,0	–	–	–	–	29,0
	3,0	–	–	–	–	11,0	11,0	75,0
	5,0	–	–	–	–	10,0	3,0	62,0
VI. Alta sílica	96,7	–	–	–	–	2,9	0,4	–
	99,9	–	–	–	–	–	–	–

<sup>a</sup>soda (do inglês) = Na<sub>2</sub>O; <sup>b</sup>lime (do inglês) = CaO.

Fonte: Alves, Gimenez e Mazali (2001)

Barros (2016) comenta que os vidros apresentam semelhanças com dois estados da matéria, o líquido, devido à sua estrutura atômica, e o sólido, em relação à rigidez dos átomos na estrutura. O autor ressalta que a definição de vidro foi modificada à medida que se compreendia melhor esse material, até se chegar à definição atualmente aceita como um sólido não cristalino que exibe um fenômeno de transição vítrea. Diferente dos materiais cristalinos, os vítreos não apresentam uma temperatura definida no qual o líquido se solidifica e, seu volume diminui continuamente com redução da temperatura.

Apesar do vidro ser um material transparente e, em geral, quebrável com facilidade, há uma tendência de se assumir que todos os vidros tem a mesma composição. Porém, os vidros são diversos e as suas propriedades, as quais determinam sua aplicação, variam diretamente da sua composição e possuem as mais diversas características óticas, condutoras ou isolantes, além de distintos valores de resistência mecânica e térmica, absorção de radiações de alta energia e ionizantes e resistência ao ataque químico, por exemplo (ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001) Assim, os autores descrevem as seis mais importantes composições básicas de vidros à base de sílica:

- *“Soda”-silicato*: agentes complexantes em detergentes sintéticos e em banhos de limpeza para metais;
- *“Soda-lime” silicato*: invólucros de lâmpadas incandescentes, garrafas, janelas, isolantes elétricos, blocos de vidro para construção, embalagens de alimentos e fármacos;
- *Borosilicato*: instrumentos para laboratório, como béquers, pipetas, buretas, tubos de ensaio;
- *Aluminossilicato*: fibras de vidro, isolamento com fibras de vidro resistentes à hidrólise, lã de vidro, fabricação de filtros, roupas e cortinas a prova de fogo, tampos de fogões, invólucros de lâmpadas de mercúrio de alta pressão, vidros do tipo opalina usados como louças e objetos de decoração e para visualizar chapas de raios-X;
- *Silicato de chumbo*: comumente chamado “cristal”, é utilizado em jogos de utensílios de mesa e em peças artísticas, devido à facilidade para gravação e polimento; também empregado na fabricação de instrumentos ópticos (lentes, prismas), tubos de televisores, anteparos para blindagem de radiação  $\gamma$  e como vidro para solda;
- *Alta Sílica*: são vidros que apresentam um teor de  $\text{SiO}_2$  superior a 96% e que, devido a sua elevada resistência química e térmica, temperatura de fundição de aproximadamente  $2000^\circ\text{C}$ , são utilizados em equipamentos especiais de laboratório, invólucros para lâmpadas de altas temperaturas e pré-formas para fibras ópticas.

Para fabricação, a cadeia produtiva do vidro inicia-se com a extração dos minerais necessários para abastecer as usinas. As principais matérias-primas do vidro e suas

respectivas proporções são a sílica, ou areia, (70%), a barrilha (15%), o calcário (10%), a dolomita (2%), o feldspato (2%), além de aditivos como sulfato de sódio, ferro, cobalto, cromo, selênio, magnésio, cálcio, entre outros (CNQ, 2015).

A CNQ (2015) destaca que a indústria brasileira de vidros é dividida em quatro principais segmentos, de acordo com o produto que fabrica. Em 2011, por exemplo, os vidros planos representaram 51% da produção, as embalagens 36% e os vidros especiais e domésticos 5,5% e 8%, respectivamente. Os segmentos são:

1) *Vidros para embalagens*: são utilizadas nas indústrias de bebidas, alimentos farmacêuticos e cosméticos;

2) *Vidros planos*: são fabricados em chapas e utilizados pela construção civil, indústria automobilística, moveleira e decorações de interiores;

3) *Os vidros especiais ou técnicos*: são as lãs e fibras de vidro, com finalidade de isolamento e indústria têxtil, os tijolos e blocos de vidro, os isoladores elétricos de vidro, as ampolas para garrafas térmicas, os bulbos de lâmpadas, os vidros para tubo de imagem e as ampolas farmacêuticas;

4) *Vidros domésticos*: são utilizados em utensílios como louças de mesa, copos, xícaras, e objetos de decoração.

A Abividros (2016), ressalta que o termo “vidro plano” é usado para diferenciá-lo do vidro oco, utilizado em embalagens. O vidro plano é utilizado não só em fachadas, móveis, espelhos, como também na indústria automobilística e na fabricação de eletrodomésticos. Dentre os processos de fabricação, o mais comum é o método *float*, que consiste na flutuação da massa de vidro em banho de estanho derretido. Dessa forma, o vidro plano comum é normalmente denominado no mercado como vidro *float*.

As chapas de vidro plano produzidas pelas fábricas possuem dimensões padronizadas, nas tonalidades incolor, verde, bronze e cinza e em espessuras que variam de 2 a 19 mm, chegando até a chapas de 25 mm. O Quadro 2 resume as diferentes possibilidades de produtos e beneficiamentos disponíveis no mercado em um panorama geral, sendo possível que nem todas as processadoras realizem todos os tipos de beneficiamento, ou ainda que alguns fabricantes também forneçam vidros já processados em chapas padronizadas, como algumas opções de laminados e pintados (ABIVIDROS, 2016).



**Quadro 2- Os diferentes tipos de vidros fabricados e processados**

Produzido nas Fábricas	Processado nas Distribuidoras		Vidros Especiais
	Tratamento superficial	Beneficiamento	
Aramado Controle Solar Espelho Extra clear Float colorido Float incolor Impresso Laminado	Acidado Jateado Pintado a frio Serigrafado	Curvo Insulado Laminado Temperado	Antibactéria Antifogo Antirrisco Autolimpante Blindado Fotovoltaico

Fonte: Abividros (2016), adaptado pelo autor

Em 2020, a capacidade nominal de produção de vidros planos no Brasil foi de 7.530 toneladas por dia, sendo o vidro temperado o principal produto processado não automotivo. Em 2019, o vidro temperado representou 55,4% da produção, seguido pelo espelho, com 25,7% e o laminado com 11,8% (ABRAVIDROS, 2020). Cabe ressaltar que em se tratando de vidros, há uma deficiência de dados estatísticos, com indisponibilidade de indicadores de desempenho bem consolidados, fonte confiáveis e defasagem de informações, assim como descrito no Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos de 2020 do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2020).

Com a produção de vidro, a gestão de resíduos sólidos não degradáveis são problemas substanciais que países em desenvolvimento enfrentam. O crescimento populacional acelerado, a urbanização, crescimento econômico aumentou consideravelmente a taxa de geração de resíduos, levando a graves problemas ambientais e de saúde (TUAUM; SHITOTE; OYAWA, 2018).

Ainda, de acordo com o exposto por Bendixen, *et al.* (2019), a utilização dos agregados está em situação crítica. A cada ano são extraídos no mundo 32 a 50 bilhões de toneladas de areia e brita para a produção de concreto, vidro e eletrônicos, principalmente. Este montante excede a capacidade natural de renovação dos recursos, de modo em que, próximo ao meio deste século, estima-se que demanda possa superar a oferta, gerando impactos tanto ambiental quanto econômico.

No Brasil a classificação dos resíduos é determinada pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) através da Resolução nº 307/2002 (BRASIL, 2002), que estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos Resíduos da Construção Civil (RCC). Segundo a resolução, o vidro é classificado como Classe B, sendo os resíduos da construção civil classificados da seguinte forma:

*I – Classe A:* são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis, como por exemplo, agregados, sendo eles:

- a) de construção civil, reformas e reparos de pavimento, demolição;
- b) componentes para a construção civil como os tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento;
- c) processo fabricação ou demolição de peças produzidas em obras ou pré-fabricadas, como blocos, tubos, meio fios.

*II – Classe B:* resíduos de outra destinação, como por exemplo, plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gessos.

*III – Classe C:* são resíduos que não possuem retorno financeiro viável, portanto, serão descartados pois não há tecnologia de aproveitamento viável.

*IV – Classe D:* resíduos perigosos, oriundos da construção, reforma ou demolição de alguma edificação, como tintas, solventes e outros que possam ser prejudiciais a saúde.

Dessa forma, Guignone (2017) reafirma que a utilização de resíduos que não são reciclados, como o de vidro, na produção de concretos, como substitutos parciais ao cimento, promove uma destinação alternativa do resíduo e uma mitigação do impacto ambiental, devido principalmente pela redução da utilização do cimento na produção de concretos. Face ao exposto, o autor ainda destaca os benefícios ecológicos ou ambientais destes materiais alternativos que incluem: o desvio de resíduos não reciclados, que iriam para aterros, em aplicações funcionais, a redução dos efeitos nocivos da produção do cimento, em se tratando do consumo de recursos naturais não-renováveis e ainda, a redução do uso de energia necessária para a produção do cimento e da emissão de gases de efeito estufa.

Assim, a substituição parcial do cimento Portland por um material, ou até mesmo pela combinação de dois ou mais materiais cimentícios, pode ser vantajosa não apenas do ponto de vista econômico, mas também do ponto de vista ambiental, principalmente quando estão disponíveis a baixo custo, ou até mesmo quando não possuem custo algum. Nessa situação, o material que seria levado para o descarte tem uma destinação alternativa, diretamente para a produção de concretos, como é o caso do PDV (BARROS, 2016).

No Quadro 3 verifica-se algumas pesquisas recentes em que foi utilizado o resíduo de vidro em concretos e argamassas, de diversas formas.

**Quadro 3- Pesquisas recentes com resíduos de vidros**

<b>Autor</b>	<b>Título da pesquisa</b>
Patel, <i>et al.</i> (2019)	<i>Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar</i>
Khan, Sheikh, McCarthy <i>et al.</i> (2019)	<i>Experimental investigation on foam concrete without and with recycled glass powder: A sustainable solution for future construction</i>
Elaqra (2019)	<i>Effect of immersion time of glass powder on mechanical properties of concrete contained glass powder as cement replacement</i>
Kalakada, Doh e Zi (2020)	<i>Utilisation of coarse glass powder as pozzolanic cement—A mix design investigation</i>
Jain, Sancheti e Gupta (2020)	<i>Durability performance of waste granite and glass powder added concrete</i>
Nahi, Leklou, Khelidj <i>et al.</i> (2020)	<i>Properties of cement pastes and mortars containing recycled green glass powder</i>
Adesina, Das (2020)	<i>Influence of glass powder on the durability properties of engineered cementitious composites</i>
Gao, Li, Yuan (2020)	<i>Assessing the modification efficiency of waste glass powder in hydraulic construction materials</i>
Bostanci (2020)	<i>Effect of waste glass powder addition on properties of alkali-activated silica fume mortars</i>

Fonte: o Autor (2022)

### 2.5.2 Características do resíduo de vidro

Em geral, obtêm-se pelo ensaio de Difração de Raios-X a caracterização química do resíduo de vidro. A Tabela 11 apresenta a composição química do vidro em diferentes pesquisas recentes em que o vidro foi utilizado com substituto ao cimento. Destacam-se algumas exigências químicas descritas na NBR 12653 (ABNT, 2014) e na ASTM C618 (ASTM, 2019) para os materiais pozolânicos, como o somatório dos óxidos  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , que deve ser de no mínimo 50% para Classe E e 70% para as classes N e C, e a porcentagem de  $\text{SO}_3$ , que deve ser no máximo 4% para Classe N e 5% para Classe C e E. Ainda, a norma brasileira traz um limite máximo de  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente de 1,5%, teor tal não atendido por nenhum dos estudos, e a norma americana limita a porcentagem de  $\text{CaO}$  em no máximo 18%.

Pela Tabela, é possível verificar que a maioria dos vidros possuem alto teor de óxido de silicato, seguidos pela concentração principalmente de óxido de sódio e cálcio.

Tabela 11 - Composição química do resíduo de vidro (%)

PARÂMETROS	Patel, <i>et al.</i> (2019)	Khan, Sheikh, McCarthy <i>et al.</i> (2019)		Elaqra (2019)	Kalaka da, Doh e Zi (2020)	Jain, Sancheti e Gupta (2020)	Nahi, Leklou, Khelidj <i>et al.</i> (2020)	Adesina, Das (2020)	Gao, Li, Yuan (2020)	Bostanci (2020)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	67,21	72,90	72,50	69,94	69,77	72,50	73,64	67,37	69,51	69,45
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,83	0,46	0,50	1,81	1,42	0,4	1,42	4,79	0,91	1,38
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,40	0,27	0,26	1,97	0,29	0,2	0,38	-	0,3	0,45
<b>CaO</b>	6,28	9,50	9,42	18,55	10,00	9,7	9,08	8,07	10,52	12,1
<b>MgO</b>	3,41	3,76	3,81	3,12	0,67	3,3	1,43	n.e.	1,28	3,6
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,32	0,27	0,27	0	0,19	0,19	0,27	-	0,06	n.e.
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	7,56	13,18	13,16	9,16	12,53	13,7	11,62	14,81	16,38	12,35
<b>K<sub>2</sub>O</b>	-	0,09	0,10	0,44	-	0,1	0,01	n.e.	0,69	0,59
<b>SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	70,44 (Ok)	73,63 (Ok)	73,26 (Ok)	73,72 (Ok)	71,48 (Ok)	73,1 (Ok)	75,44 (Ok)	-	70,72 (Ok)	71,28 (Ok)
<b>SO<sub>3</sub></b> (NBR 12653 e ASTM C618))	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	-	Ok	-
<b>Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub></b> (NBR 12653)	7,56 (Não Ok)	13,24 (Não Ok)	13,23 (Não Ok)	9,45 (Não Ok)	12,53 (Não Ok)	13,77 (Não Ok)	11,63 (Não Ok)	-	16,83 (Não Ok)	12,74 (Não Ok)
<b>CaO</b> (ASTM C618)	Ok	Ok	Ok	Não ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

n.e. = não especificado

ok = atende a(s) norma(s)

não ok = não atende a(s) norma(s)

\*Equivalente Alcalino:  $Na_2O_{eq} = Na_2O + 0,658 K_2O$

Fonte: O autor (2022)

Um outro parâmetro de importância é tamanho das partículas do resíduo e sua influência no comportamento do concreto. Mirzahosseini e Riding (2015), utilizaram em argamassas resíduos de pó de vidro com distribuições de tamanho de partícula nos intervalos: 0–25 µm, 25–38 µm e 63–75 µm. Os resultados indicaram que as amostras com partículas na menor faixa apresentaram a maior resistência à compressão, com exceção da amostra controle com cura em 90 dias, no mesmo intervalo de tamanho de partículas.

Patel *et al.* (2019), destacam que, baseando-se em diversos estudos prévios, já está estabelecido que a utilização de partículas menores que 75 µm em substituições de cimento de 10 a 25% gera resultados satisfatórios na produção de argamassas e concretos. Os autores estudaram o efeito da redução do tamanho das partículas do pó de vidro em 12 µm, de 75 µm para 63 µm, na resistência à compressão da argamassa. Os resultados indicam que é aceitável a utilização de 20% de substituição com partículas de 63 µm, já para as partículas de 75 µm, o limite de adição fica em torno de 10 a 15%. Assim, com a redução em 12 µm pode-se utilizar, aproximadamente, 5% a mais de substituição. Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016)

verificaram que, utilizando 10% de substituição com partículas menores que 75  $\mu\text{m}$ , há uma melhora em 9% nos valores da resistência a compressão nas amostras com 7 dias de cura.

Kalakada, Doh e Zi (2020) analisaram vários estudos e o máximo percentual de substituição trabalhado pelos autores em função intervalos de tamanho de partículas e outras especificações, como tamanho médio das partículas (Quadro 4). Os autores comentam que a maioria dos estudos trabalham com resíduos finos (<100  $\mu\text{m}$ ) e geralmente, com granulometrias semelhantes ao cimento que será substituído.

**Quadro 4- Resumo de pesquisas com PDV como substituo ao cimento**

Intervalo da dimensão das partículas de PDV ( $\mu\text{m}$ )	Detalhes ( $\mu\text{m}$ )	Máxima substituição (%)	Autores
$\leq 75$	Dimensão média: 10	20	You, Zi <i>et al.</i> (2019)
$\leq 75$	-	30	Elaqra (2019)
$\leq 100$	40% PDV $\leq 10$	60	Du, Tan (2017)
$\leq 50$ e $125 \leq \text{PDV} \leq 200$	-	30	Zheng (2016)
-	Dimensão média: 8,4	20	Kamali, Ghahremaninezhad (2016)
$\leq 75$	-	25	Aliabdo, Elmoaty, Aboshama (2016)
$\leq 40$	Dimensão média: 12	30	Omran, Mahou (2016)
$\leq 100$	40% PDV $\leq 10$	45	Siad, Lachemi, Sahmaran, <i>et al.</i> (2016)
-	Dimensão média: 8,4	20	M. Kamali, A. Ghahremaninezhad (2015)
$\leq 100$	40% PDV $\leq 10$	30	Y. Sharifi, I. Afshoon, Z. Firoozjaie (2015)
-	Dimensão média: 3,4	60	H. Du, K.H. Tan (2015)
$\leq 25$	-	25	M. Mirzahosseini, K.A. Riding (2014)

Fonte: Kalakada, Doh e Zi (2020), adaptado pelo autor

Já os autores Guo *et al.* (2020) analisam diversos estudos e outros parâmetros como o tipo de vidro utilizado na pesquisa, tamanho das partículas, qual o material substituído, o percentual de substituição e a tendência de resistência à compressão dos estudos (Tabela 12).

Em termos gerais, observa-se uma tendência de redução da resistência à compressão a medida que o tamanho partículas de vidro crescem. Ressalta-se que muitos autores utilizaram o resíduo de vidro como substituição aos agregados graúdos e miúdos, porém, verifica-se que na maioria dos casos, ocorreu uma diminuição da resistência à compressão.

Tabela 12 - Efeito do vidro na resistência à compressão

Tipo de vidro	Tamanho da partícula ( $\mu\text{m}$ )	Material substituído	Porcentagem de substituição (%)	Tendência da resistência a compressão	
				Aumento/Redução	(%)
Elétrico	5	Cimento	10	Aumento de	22
Elétrico	12	Cimento	10	Aumento de	11
Soda-lime	12	Cimento	50	Aumento de	6
Soda-lime	<38	Cimento	20	Aumento de	12
Soda-lime	<60	Cimento	8	Aumento de	2
Soda-lime	<60	Cimento	12	Aumento de	5
Soda-lime	<100	Cimento	20	Aumento de	5
Soda-lime	<100	Cimento	20	Aumento de	5
Soda-lime	<150	Cimento	30	Aumento de	21
Soda-lime	<90	Cimento	10	Aumento de	14
Soda-lime	<90	Cimento	20	Aumento de	21
Soda-lime	<90	Cimento	25	Redução de	7
Soda-lime	<120	Cimento	10	Aumento de	4
Soda-lime	<120	Cimento	20	Aumento de	9
Soda-lime	<120	Cimento	30	Redução de	13
Elétrico	<600	Agregado miúdo	40	Aumento de	53
Elétrico	<2360	Agregado miúdo	10	Redução de	7
Elétrico	<2360	Agregado miúdo	20	Aumento de	2
Soda-lime	<2000	Agregado miúdo	10	Redução de	8
Soda-lime	<850	Agregado miúdo	50	Redução de	29
Soda-lime	<2360	Agregado miúdo	100	Redução de	18
Soda-lime	<4760	Agregado miúdo	60	Redução de	9
Soda-lime	<4760	Agregado miúdo	100	Redução de	22
Elétrico	<4760	Agregado miúdo	80	Redução de	18
Cristal de chumbo	<1160	Agregado miúdo	100	Redução de	13
Cristal de chumbo	<4000	Agregado miúdo	100	Redução de	30
Cristal de chumbo	<4760	Agregado miúdo	100	Redução de	11
Cristal de chumbo	<4760	Agregado miúdo	25	Redução de	23
Cristal de chumbo	<4760	Agregado miúdo	100	Redução de	12
Cristal de chumbo	<5000	Agregado graúdo	30	Redução de	16
Cristal de chumbo	<5000	Agregado graúdo	100	Redução de	22
Soda-lime	<6000	Agregado graúdo	20	Redução de	13
Elétrico	<9530	Agregado graúdo	10	Redução de	8
Soda-lime	<9600	Agregado graúdo	100	Redução de	20
Soda-lime	<16000	Agregado graúdo	100	Redução de	15
Resíduo	<25000	Agregado graúdo	100	Redução de	55

Fonte: Guo *et al.* (2020), adaptado pelo autor

Através de uma análise numérica dos estudos analisados, os autores propuseram um equacionamento, que reflete os efeitos do tamanho das partículas ( $d$ ) e o percentual de substituição ( $p$ ), introduzindo um parâmetro chamado “índice de partícula” ( $I$ ), dado a seguir pela Equação 6.

$$I = d^{0,38} \cdot p^{0,18}$$

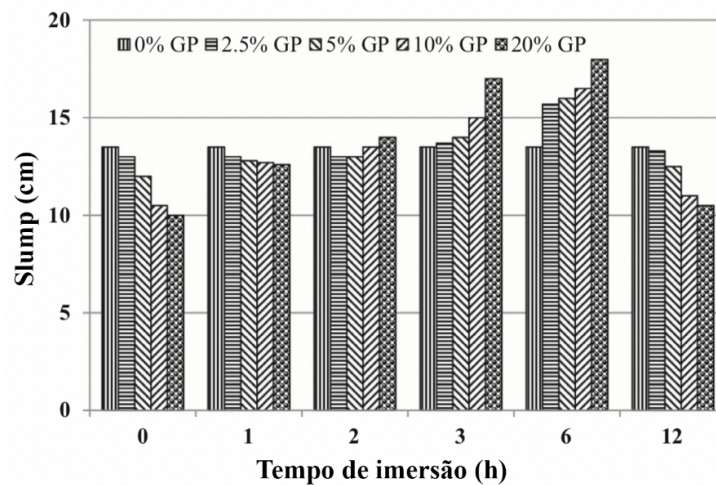
Equação 6

### 2.5.3 Influência da aplicação de resíduo de vidro no concreto fresco

O ensaio de abatimento do concreto, também conhecido como “*slump test*”, é um ensaio amplamente utilizado para avaliar a trabalhabilidade em seu estado plástico. Estudos anteriores demonstraram um aumento do valor do slump nas misturas com PDV, em comparação à mistura controle. Kamali e Ghahrenmaninezhad (2015) investigaram o valor de abatimento de um concreto com aplicação de dois tipos de PDV que possuíam partículas de mesmo tamanho (8,4  $\mu\text{m}$ ), mas com diferentes composições químicas. Ambos substituíram o cimento em valores de 5%, 10%, 15% e 20%. Como resultado, a maioria das misturas tiveram maiores valores de slump do que a mistura controle, com exceção da mistura do tipo 1 com 15% de substituição, e da mistura do tipo 2 com 10 e 20% de substituição, que resultaram em menor trabalhabilidade.

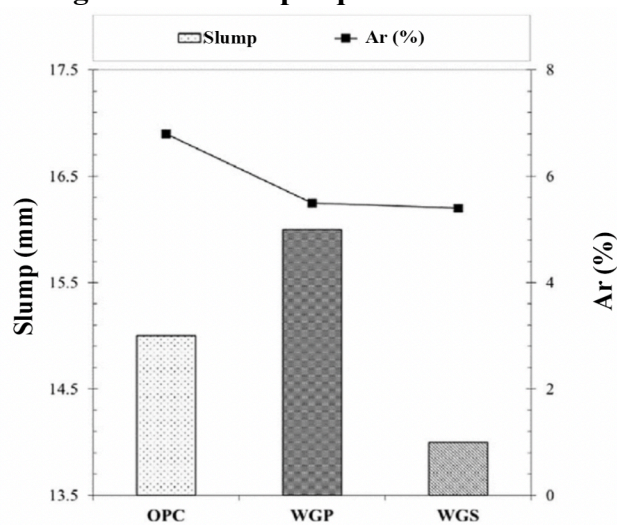
De acordo com Kalakada, Doh, Zi (2020), pode-se concluir que, em geral, a substituição com PDV leva a uma melhor trabalhabilidade, principalmente devido ao aumento da proporção a/c e à menor absorção de água do vidro. A trabalhabilidade não é influenciada diretamente pela resistência, porém com seu melhoramento, pode ser usada para produzir concreto em proporções a/c mais baixas com um teor constante de cimento, resultando em maior resistência e durabilidade do que a mistura de controle. Na pesquisa realizadas pelos autores, todas as misturas resultaram em um slump nulo devido a alta proporção de areia. Sendo assim, foi necessário a aplicação de um super-plastificante na proporção de 1% de cimento.

No estudo realizado por Elaqra *et al.* (2019) foi investigado a influência da imersão do PDV (partículas menores que 75  $\mu\text{m}$ ) em água durante um determinado tempo antes de sua aplicação em misturas. A porcentagem de substituição ao cimento foi de 0%, 2,5%, 5%, 10%, 15% e 20% e o tempo de imersão foi 0, 1, 2, 3, 6 e 12h, mantendo a relação a/c fixa em 0,67. Como resultado, o valor do slump reduziu com o aumento do percentual de substituição para os tempos de 1 e 12h de imersão, sugerindo que esse valor é governado pela absorção de água na superfície das partículas de PDV. Para os tempos de 3 e 6h, houve um aumento da trabalhabilidade com o aumento do percentual de substituição (Figura 14).

**Figura 14 - Slump test como função do tempo de imersão e quantidade de PDV**

Fonte: Elaqra *et al.* (2019), adaptado pelo autor

Guo *et al.* (2020) destacam que os efeitos do resíduo na trabalhabilidade do concreto podem ser inconsistentes, ou seja, em alguns estudos há uma melhora e em outros, não. Os autores ressaltam que a trabalhabilidade está diretamente relacionada ao tamanho das partículas, sendo um parâmetro de extrema importância. Esse fenômeno pode ser verificado na pesquisa de Lee, *et al.* (2017). Na Figura 15, observa-se que a amostra com pó-de-vidro com substituição de 20% (WGP) com tamanho médio das partículas de 22,8  $\mu\text{m}$ , resultou em maior valor de slump quando comparado com a amostra controle (OPC).

**Figura 15 – Slump e quantidade de ar**

Fonte: Lee, *et al.* (2017), adaptado pelo autor



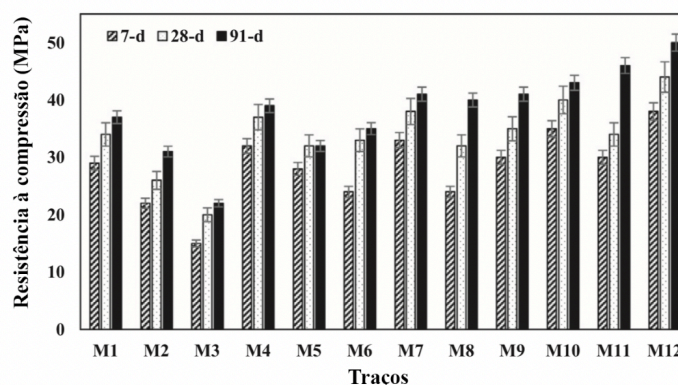
Já na amostra com lama de vidro com 20% (WGS) e tamanho médio de 14,7  $\mu\text{m}$ , o slump obteve valor menor. Ainda, a quantidade de ar incorporado nas amostras reduziu a medida que se aplicou os resíduos. Os resultados do slump e quantidade de ar são resultados da maior área de superfície e do formato do resíduo de vidro utilizado.

## 2.5.4 Influência da aplicação de resíduo de vidro no concreto endurecido

### 2.5.4.1 Resistência à compressão

Diversos fatores influenciam na resistência à compressão dos concretos com PDV. Um deles é a porcentagem de substituição. Na Figura 16, apresentam-se os resultados dos testes de resistência à compressão realizados por Kalakada, Doh, Zi (2020) em diversas misturas. Na pesquisa, utilizou-se PDV com dimensão médias das partículas de 150  $\mu\text{m}$  como substituto parcial do cimento nas porcentagens de 0% (M1, M4, M7 e M10), 15% (misturas M2, M5, M8 e M11) e 30% (misturas M3, M6, M9, M12), por peso de cimento. Pode-se observar que todas as misturas apresentaram incremento na resistência à compressão após mais dias cura, indicando reação progressiva de hidratação. A relação a/c das misturas foi variada em 0,5 (M1, M2, M3), 0,45 (M4, M5, M6), 0,42 (M7, M8, M9) e 0,39 (M10, M11, M12). Assim, as melhorias de resistências nas misturas com PDV foram mais evidentes nas proporções mais baixas de a/c, quando comparadas com as misturas que empregam proporções mais altas.

**Figura 16 – Resistência à compressão das misturas**



Fonte: Kalakada, Doh e Zi (2020), adaptado pelo autor

Como esperado pelos autores, a mistura M12, com a menor relação a/c (0,39) e 30% de PDV produziu os melhores resultados em se tratando de resistência. O maior valor de

resistência à compressão nas misturas sem PDV foi de 43 MPa, na amostra M10, ao passo que as misturas M11 e M12, com PDV, atingiram um maior valor.

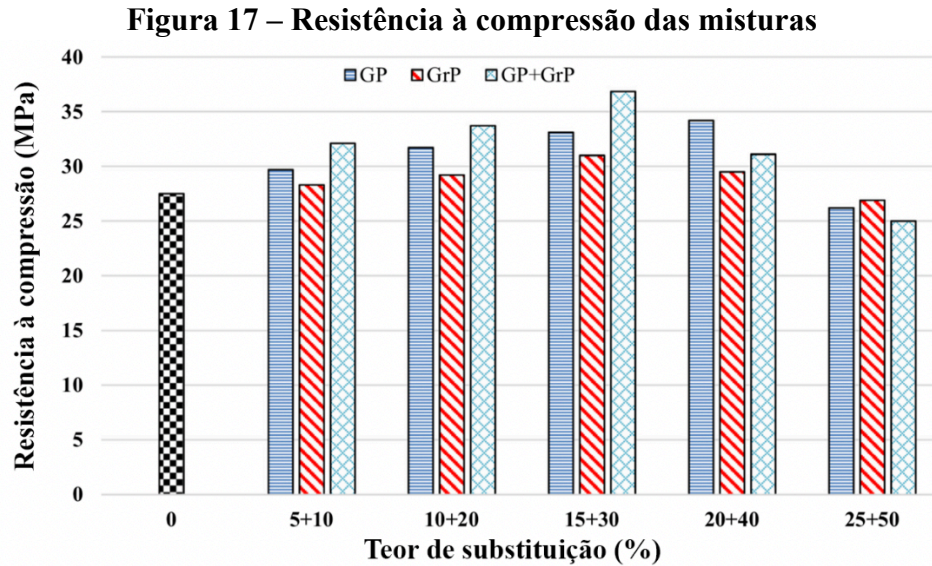
Para a pesquisa de Gao *et al.* (2020), a substituição de cimento por pó de vidro em até 20% mostrou um pequeno incremento de resistência em 7 e 28 dias, aumentando 1,3 MPa após 7 dias de cura e 2,6 MPa em 28 dias, quando comparado à amostra controle. O estudo revela que a reutilização do vidro o pó não mostrou efeito negativo na propriedade de resistência à compressão, ou seja, a substituição do cimento Portland por 20% de pó de vidro, ou a utilização integral de cimento, resulta em níveis semelhantes de resistência.

Por outro lado, a utilização de mais de 10% afetou negativamente a resistência à compressão do concreto pesquisado por Aliabdo *et al.* (2016). A redução na resistência à compressão em concretos com 28 dias foi de 9,4%, 11,1% e 12,5% para substituições de 15%, 20% e 25% de pó de vidro, respectivamente, em comparação com concreto sem pó de vidro (mistura de controle). Os autores descrevem que esse fenômeno pode ser explicado pois quando a substituição por PDV é alta, o teor de cimento é baixo e que, essa redução na resistência pode ser eliminada diminuindo a proporção a/c do concreto.

De acordo com Chandra, Šavija, Babafemi (2018), vários estudos relatam que, quando se utiliza PDV no concreto, o valor da resistência à compressão é baixo em pequenos tempos de cura, e alto em maiores idades de cura, quando comparados à mistura controle. Isso foi observado no estudo de Patel *et al.* (2019), em que se avaliou a influência do tamanho das partículas do PDV nas propriedades das argamassas. As dimensões de 75  $\mu\text{m}$  e 63  $\mu\text{m}$  foram aplicadas para substituir parcialmente o cimento nas porcentagens de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, em peso. Quando se substituiu 20%, a taxa de aumento da resistência à compressão em 90 dias foi apenas 6% menor que a mistura de controle para o diâmetro 75  $\mu\text{m}$ , enquanto que para a mistura com 63  $\mu\text{m}$  o valor máximo foi igual à mistura de controle. Os autores explicam que a reação pozolânica pode ocorrer em estágios posteriores ou seja, o verdadeiro comportamento pozolânico do PDV pode se manifestar com o passar do tempo.

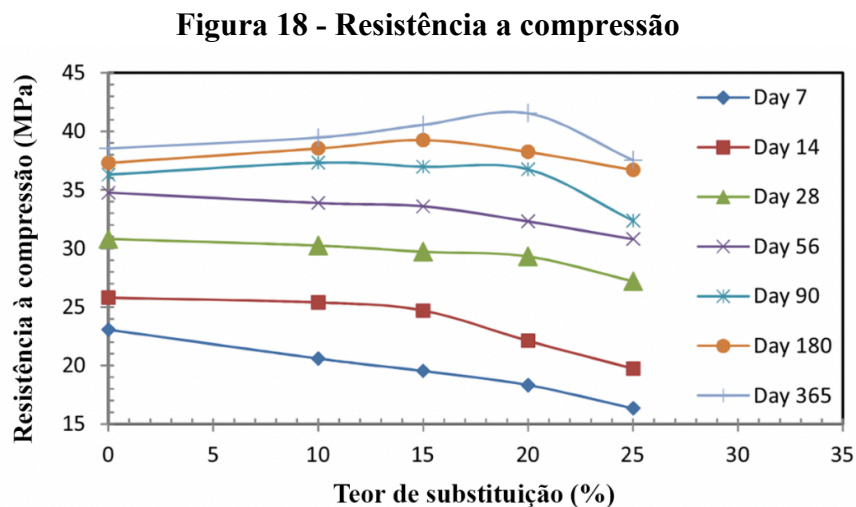
Outros autores relatam a utilização de PDV junto à outras adições minerais pozolânicas. Jain, Sancheti e Gupta (2020) por exemplo, avaliaram a aplicação de resíduos da lapidação de granito, como adições à areia (10%, 20%, 30%, 40% e 50%), e o pó de vidro obtido de garrafas de vidro como adição ao cimento (5%, 10%, 15%, 20% e 25%), em diferentes misturas. A relação a/c foi mantida fixa em 0,53. Os resultados dos testes de resistência à compressão em 28 dias para cada mistura são mostrados na Figura 17. Quando comparado à amostra controle sem adições minerais, observa-se que os maiores valores de resistência à compressão de cada tipo de mistura foram nas amostras com pó de vidro (GP) em 20%, nas amostras com 30% de

adição de pó de granito (GrP), e quando utilizou-se ambas adições (GP+GrP), o maior valor foi em misturas com 15% de pó de granito e 30% de PDV.



Fonte: Jain, Sancheti e Gupta (2020), adaptado pelo autor

As resistências à compressão com a adição de vidro reciclado em argamassas em diferentes idades são apresentadas na Figura 18. As resistências à compressão médias mais baixas, em comparação com a argamassa de controle (0% de substituição do vidro) foram obtidas aos 7, 14, 28 e 56 dias de idade. Exceto 25% de adição de vidro, todas as outras argamassas substituídas por cimento, a resistência média à compressão excedeu a da argamassa de controle em 90 dias. O estudo atual em 90 dias, nível de substituição de cimento de 10% deu a maior resistência à compressão na argamassa (ISLAM, RAHMAN, KAZI, 2016).

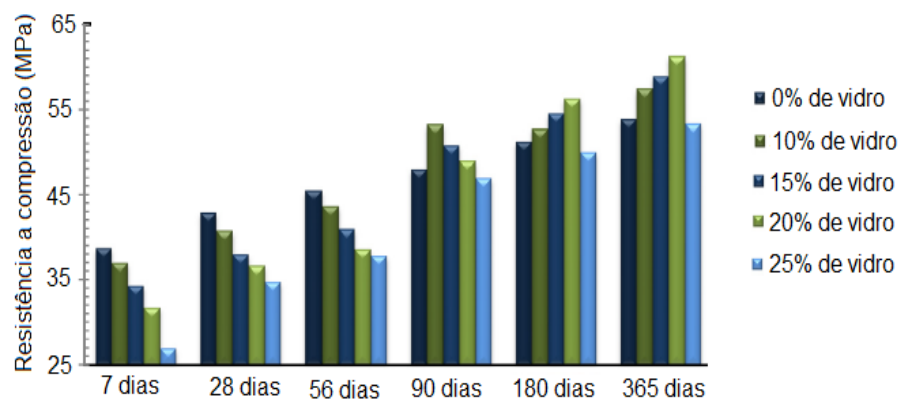


Fonte: Islam, Rahman e Kazi (2016), adaptado pelo autor

Tendência semelhante foi observada na idade de 180 dias, entretanto, a substituição de 15% do cimento proporcionou a maior resistência à compressão entre as argamassas com adição de vidro. No entanto, o aumento na resistência à compressão das argamassas de vidro reciclado em comparação com as argamassas de controle tanto aos 90 quanto aos 180 dias foi estatisticamente insignificante. Como no teste de 90 dias, a amostra de argamassa de 365 dias deu resistência máxima à compressão com adição de 20% de resíduos de vidro, que é 8% maior do que a argamassa de controle sem vidro.

Para o ensaio de resistência à compressão, amostras de concreto foram preparadas sem qualquer adição. As resistências à compressão do concreto de vidro reciclado (0–25% de adição de vidro) em diferentes idades são mostradas na Figura 19. A resistência à compressão alvo de 35 MPa em 28 dias foi alcançada para todas as amostras até 0–20% de adição de vidro, enquanto que para 25 A% de adição foi ligeiramente inferior. Com a adição do vidro, menores resistências médias à compressão em relação ao concreto controle (0% vidro) são obtidas aos 7, 14, 28 e 56 dias de idade. Com a progressão da reação na idade de 90 dias, os concretos de vidro reciclado com 10, 15 e 20% de adição de vidro forneceram resistências à compressão médias superiores ao concreto de controle e a substituição de 10% de cimento deu o maior valor entre eles. A adição de 25% de vidro resultou em resistência à compressão ligeiramente inferior (aproximadamente 2%) do que o concreto de controle.

**Figura 19 - Resistência a compressão**



Fonte: Islam, Rahman e Kazi (2016), adaptado pelo autor

Exceto a adição de 10% de vidro, os resultados dos testes de 90 dias indicaram que as diferenças nas resistências à compressão entre o vidro reciclado e os concretos de controle não foram significativas. Isso indica o período ótimo de reação do vidro substituído de concreto (Nassar e Soroushian, 2011; Omran e Tagnit-Hamou, 2016).

A diferença na resistência à compressão entre o controle e o concreto com 25% de vidro substituído aos 180 e 365 dias foi ainda mais reduzida e forneceu resistências à compressão média semelhantes. Nestes estágios 10, 15 e 25% de substituição de cimento deu maior resistência à compressão do que o concreto de controle, enquanto a resistência à compressão com 20% de substituição de cimento foi considerada a maior. Aos 180 e 365 dias, o concreto com adição de 20% de vidro deu resistências 10% e 14% maiores, respectivamente, do que o concreto de controle

#### 2.5.4.2 Absorção de água

De acordo com Rashad (2014), os estudos em se tratando de absorção de água possuem conclusões contraditórias. Alguns pesquisadores acreditam que a utilização de vidro em misturas de concreto reduz a absorção de água, devido à impermeabilidade do material. Por outro lado, outras pesquisas afirmam que o valor de absorção de água aumenta. O autor apresenta o Quadro 5 com um resumo das conclusões de pesquisas em se tratamento do efeito positivo na absorção de água. Muitos dos estudos elencados trabalharam com substituições parciais da areia por diferentes tipos de vidros.

**Quadro 5 –Efeito da utilização do pó de vidro na trabalhabilidade dos concretos**

<b>Autores</b>	<b>Porcentagem de vidro</b>	<b>Tamanho das partículas</b>	<b>Efeito positivo</b>
Taha e Nounu (2009)	50 e 100	<5	não
Taha e Nounu (2008)	50 e 100	<5	não
Tan e Du (2013)	25, 50, 75 e 100	ASTM C33	não
Park <i>et al.</i> (2004)	30, 50 e 70	5	não
Limbachiya (2009)	5, 10, 15, 20, 30 e 50	<5	não
Chen <i>et al.</i> (2006)	10, 20, 30, 40 e 50	0,038–0.3 e 40% <0,150	não
Ismail e Al-Hashmi (2009)	10, 15 e 20	4,75–0,15	não
de Castro e de Brito (2013)	5, 10 e 20	<4	sem efeito
Batayneh <i>et al.</i> (2007)	5, 10, 15 e 20	BS 882:1992	sim
Malik <i>et al.</i> (2013)	10–40	1,18–0	sim
Ali e Al-Tersawy (2012)	10, 20, 30, 40 e 50	5–0.075	sim
Sharifi <i>et al.</i> (2013)	10, 20, 30, 40 e 50	2,36–0,3	sim
Borhan (2012)	20, 40 e 60	3–0,5	sim
Terro (2006)	10, 25, 50 e 100	4,75–0,075	sim
Penacho <i>et al.</i> (2014)	20, 50 e 100	2,38–0,149	sim
Ling <i>et al.</i> (2011)	25, 50, 75 e 100	23% (5–10)	sim
Ling e Poon (2012)	50 e 100	5–0,15	sim
Ling e Poon (2011)	100	60% <2,36 e 40% 5–2,36	sim
Ling e Poon (2013)	100	<5	sim

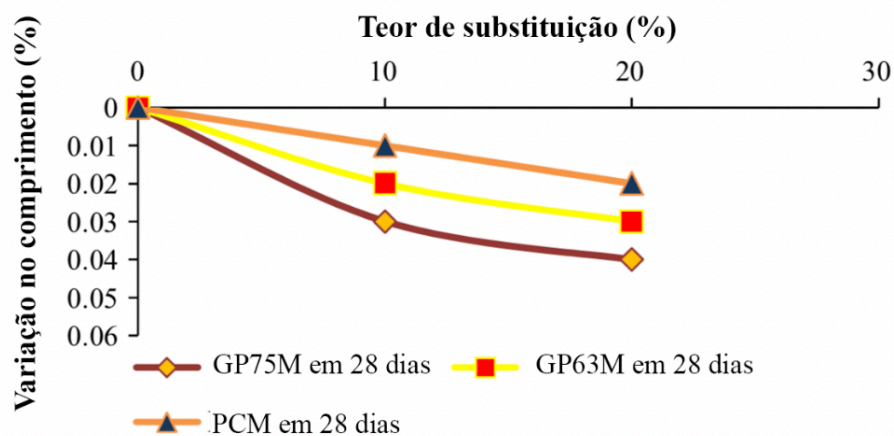
Fonte: Rashad (2014), adaptado pelo autor

### 2.5.4.3 Retração por secagem

Na pesquisa de Kalakada, Doh e Zi (2020) a maioria das misturas utilizando PDV apresentou maior retração do que a mistura controle, sendo que apenas algumas misturas tiveram menor encolhimento. Quando comparados com a controle, a maior retração foi de 9%, na amostra com 30% de PDV, enquanto que a menor retração foi de 5%, em uma outra amostra com mesmo teor de substituição. Todos valores relatados de retração por secagem ficaram dentro dos limites aceitáveis pela norma australiana AS 3600.

A Figura 20 apresenta os resultados da retração por secagem após 28 dias em misturas com dois tamanhos de partículas (75 $\mu$ m e 63 $\mu$ m) na substituição de 0%, 10%, 20% do cimento. Patel *et al.* (2019), mostram que a amostra com menor tamanho de partículas (GP63M) teve o menor valor de retração por secagem e está próximo à mistura controle (PCM). Apesar do valor aumentar à medida que o nível de substituição aumenta, as variações ficam dentro do valor limite de retração. Os autores destacam que esse fenômeno de aumento do valor de retração pode ser devido ao fato de os grãos finos de pó de vidro aderirem ao cimento, que por sua vez melhoraram o acúmulo de partículas finas no regime de interação cimento-vidro em pó, causando uma redução da demanda de água das misturas, e conseqüentemente, um aumento da retração por secagem.

**Figura 20 – Variação da retração em diferentes substituições de pó de vidro**

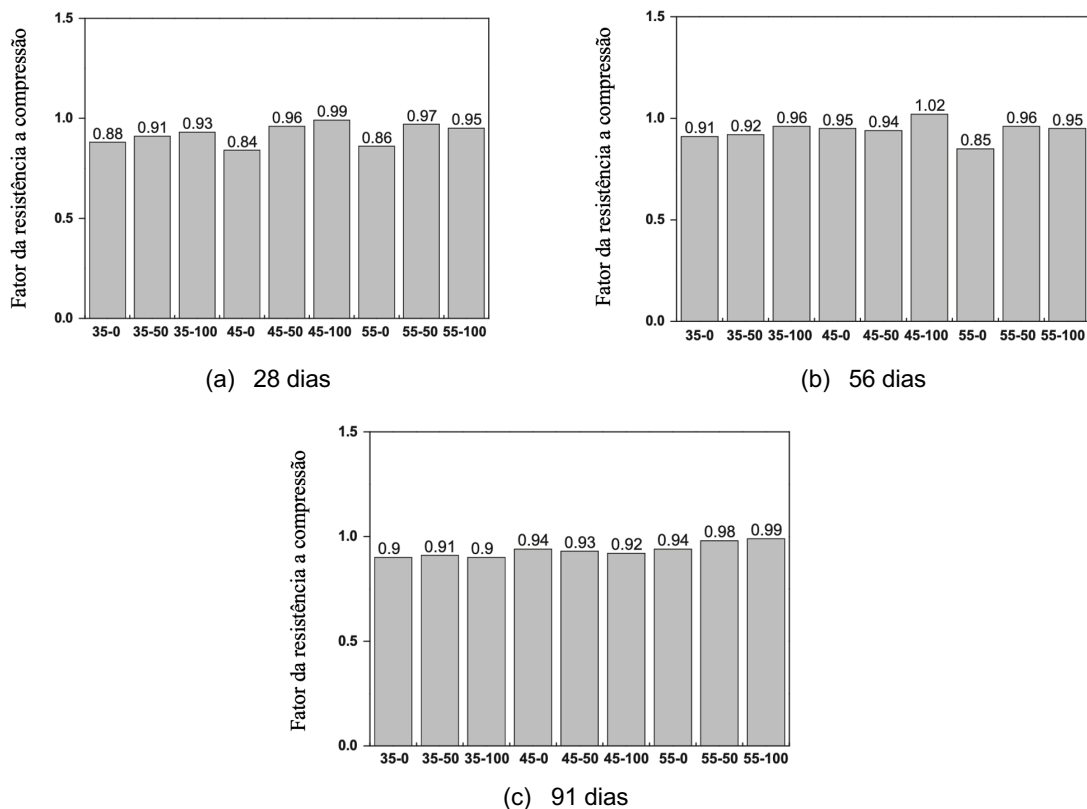


Fonte: Patel *et al.* (2019), adaptado pelo autor

### 2.5.5 Influência do resíduo de vidro no ataque de sulfatos

Alguns pesquisadores já trabalham com resíduos de vidro, avaliando seu desempenho na durabilidade de concretos. Kim, Choi e Yang (2018), por exemplo, avaliaram a durabilidade concretos com resíduo de monitores de tubos de raios catódicos (CRT), na substituição da areia nos teores de 0%, 50% e 100% e com teores de a/c de 0,35, 0,45 e 0,55, avaliaram a resistência a compressão nas idades de 7, 28 e 91 dias, absorção de água, peso, módulo de elasticidade dinâmico e realizaram a imersão de sulfatos de acordo com a JSTM C7401 (JSTM, 1999). Após a cura em câmara por 28 dias, as amostras cilíndricas de 10x20cm foram imersas em soluções de 10% de sulfato de sódio. Depois, avaliou-se a resistência a compressão e mudança de peso, comparando os resultados com os concretos em cura úmida, nas idades de 28, 56 e 91 dias. Os resultados foram expressos a partir da razão entre a resistência do concreto após imersão e o concreto com cura úmida, assim, quanto maior o valor, maior a resistência aos sulfatos.

**Figura 21 – Resistência a compressão em diferentes idades**



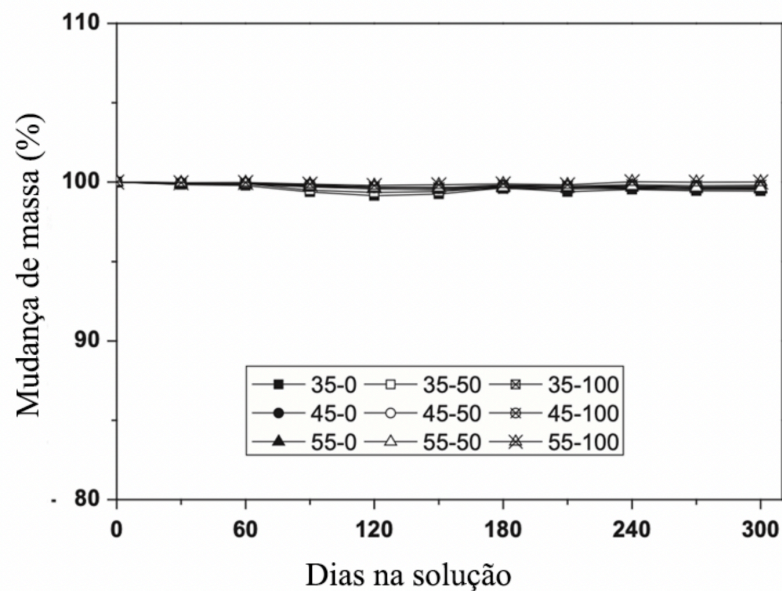
Fonte: Kim, Choi e Yang (2018), adaptado pelo autor

Conforme mostrado na Figura 21 acima, a comparação da resistência à compressão mostrou que a diminuição da resistência foi menor no concreto contendo resíduos de vidro do que no concreto sem resíduos de vidro. Esta tendência de diminuição da resistência à compressão foi verificada em todas as condições de mistura, sendo que à medida que a idade

aumentava, a diferença diminuía gradualmente. Os autores comentam que, como o resíduo de vidro é relativamente mais denso que a areia, a resistência aso sulfatos aumentou à medida que a substituição do vidro residual aumentou, sugerindo uma melhora da resistência ao ataque de sulfato.

A Figura 22 mostra a relação de mudança de peso, dependendo da relação a/c, e a relação de substituição de vidro residual, do concreto imerso em uma solução de sulfato de sódio a 10% para idades de cura de 28, 56 e 91 dias. A razão de mudança de peso do concreto em função do período de imersão mostrou que o peso não foi alterado significativamente pelo ataque de sulfato em todas as condições de mistura. Isso indica que o concreto contendo resíduos de vidro tem alta resistência ao sulfato, como também foi demonstrado por estudos anteriores.

**Figura 22 – Mudança de peso**



Fonte: Kim, Choi e Yang (2018), adaptado pelo autor

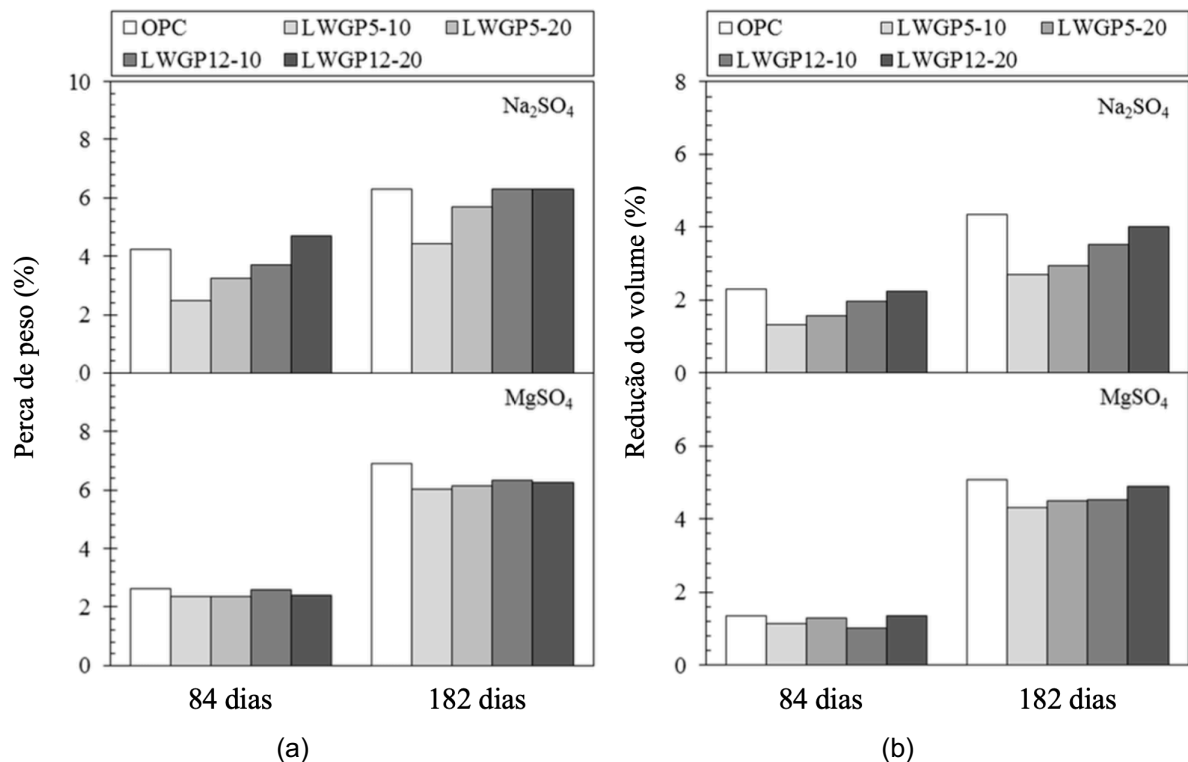
Kim e Hong (2019) pesquisaram concretos com dois tamanhos de partículas de vidro LCD (*Liquid Crystal Display*), 5  $\mu\text{m}$  e 12  $\mu\text{m}$ , com substituição ao cimento em 0, 10% e 20%. Avaliou-se a durabilidade através da imersão em duas soluções, uma com 5% de sulfato de sódio e outra preparada com 5% de sulfato de magnésio, baseadas na ASTM C1012 (ASTM, 2018). As amostras foram curadas por 28 dias em câmara úmida e imersas nas soluções. A partir disso, verificou-se a mudança do peso, volume e resistência a compressão em 84 e 182 dias de imersão.

Pela Figura 23 pode-se verificar as amostras com substituição apresentaram menor fator de redução do peso e de volume em relação ao traço piloto, independentemente do tipo de



sulfato. A influência do resíduo foi mais perceptível na solução  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Este fenômeno pode ser causado pela porosidade da matriz. Os íons sulfato que penetraram no concreto e reagiram com hidróxido de cálcio para formar etringita e gesso, que se acumularam continuamente nos poros. Por sua vez, as quantidades de produtos de hidratação causaram a dilatação do concreto e geraram uma tensão interna ao redor da matriz, seguida de fissuração.

**Figura 23 – (a) Mudança de peso/(b) redução do volume**



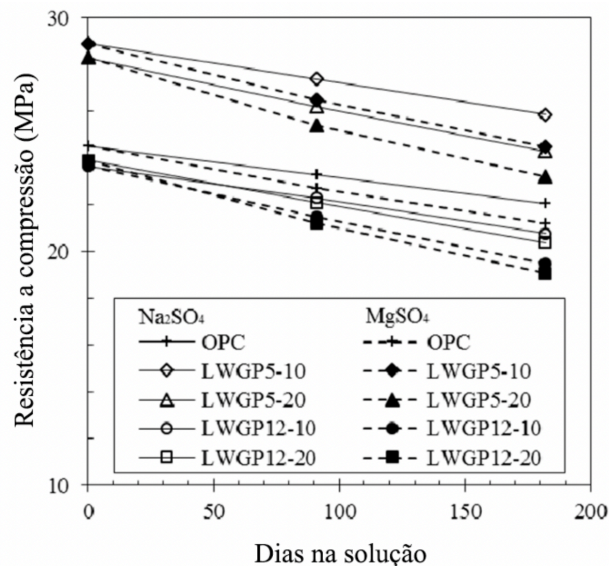
Fonte: Kim e Hong (2019), adaptado pelo autor

A depleção de hidróxido de cálcio induziu a descalcificação dos produtos de hidratação, resultando na dissolução do gel C-S-H e um subsequente aumento da porosidade da matriz. Conseqüentemente, as resistências à flexão e à compressão das estruturas de concreto seriam gradativamente reduzidas com o aumento da degradação da descalcificação, ao longo da qual a estrutura da matriz colapsava. No entanto, a taxa de transporte iônico é afetada pela estrutura dos poros, especialmente os capilares da matriz cimentícia. O concreto com a substituição, possuindo a menor porosidade nos capilares, pode realizar a entrada reduzida de íons agressivos no concreto, aumentando a resistência ao ataque de sulfato resultante da reação limitada entre os sulfatos e os hidratos. Independentemente do traço, a redução do peso e do volume para os concretos foram menores quando imersos na solução de  $\text{MgSO}_4$  do que na solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  em 182 dias. Os autores comentam que em maiores idades, o acúmulo de produtos da reação

com os íons magnésio aumentam a tensão interna no concreto, aumentando os valores quando comparado com a exposição ao sulfato de sódio.

A Figura 24 mostra a variação da resistência a compressão. As variações da redução da resistência com a utilização do resíduo foram menores do que as do traço piloto. A substituição não só preencheu os vazios fisicamente, com levou a uma maior densificação da matriz cimentícia causada pelas reações. Isso reduz a porosidade e aumenta a resistência ao ataque de sulfatos. Uma queda mais acentuada foi observada nas imersões com sulfato de magnésio, isso devido aos produtos formados, que limita a resistência devido a formação do gel M-S-H. Por fim, resistência teve uma tendência similar ao que foi observado nas alterações do peso e do volume (KIM e HONG, 2019).

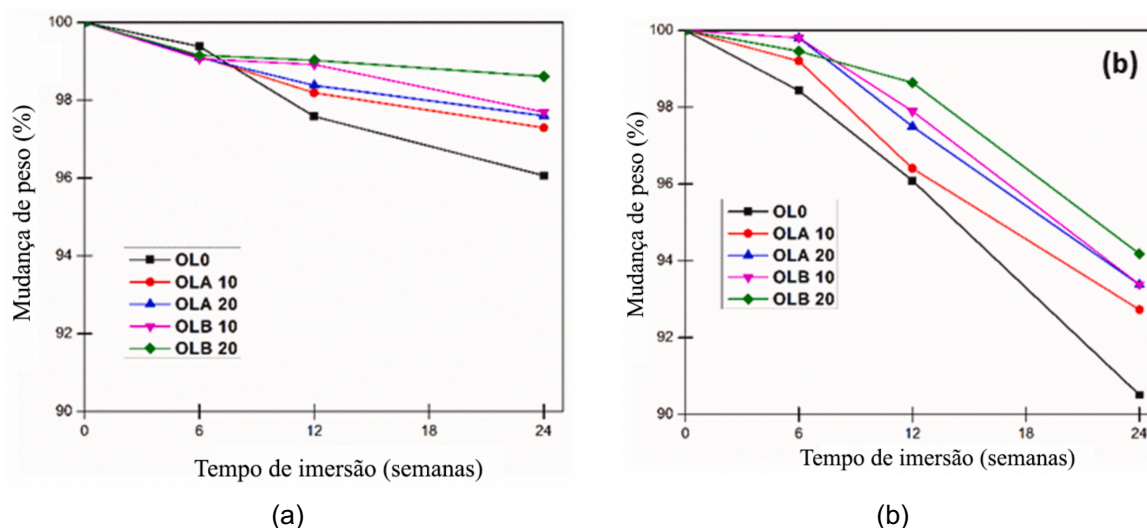
**Figura 24 – Resistência a compressão**



Fonte: Kim e Hong (2019), adaptado pelo autor

De forma semelhante, Yang, Usman e Hanif (2021), avaliaram a utilização de vidro LCD como um material substituto ao cimento em 0%, 10% e 20%, em dois tamanhos de partículas A (8,05  $\mu\text{m}$ ) e B (37,01  $\mu\text{m}$ ). Para avaliar a resistência aos sulfatos, os autores ensaiaram os concretos se baseando nos parâmetros dados para argamassas na ASTM C1012 (ASTM, 2018). Os corpos de prova passaram por cura úmida de 28 dias e depois imersos em duas soluções, uma de 5% de sulfato de sódio e outra com 5% de sulfato de magnésio. Cada solução foi repostada a cada quatro semanas e agitada regularmente para garantir sua uniformidade. Os autores aferiram a perda de peso em 6, 12 e 24 semanas, que pode ser verificada na Figura 25.

**Figura 25 – (a) Mudança de peso após imersão em sulfato de sódio / (b) Mudança de peso após imersão em sulfato de magnésio**



Fonte: Yang, Usman e Hanif (2021)

Verificou-se que os corpos de prova de concreto, de fato, perderam peso devido à deterioração. A substituição do cimento Portland pelo resíduo de LCD melhorou significativamente a resistência ao ataque de sulfato do concreto, independentemente do tamanho das partículas e da porcentagem de substituição. No entanto, a substituição de 20% com os dois tamanhos de partículas apresentou os melhores desempenhos, enquanto o LCD B foi considerado ainda melhor devido à sua gradação mais fina e melhor reatividade, como verificados pela termografia realizada pelos autores. Os resultados obtidos estão de acordo com os relatados por Kim e Hong (2019).

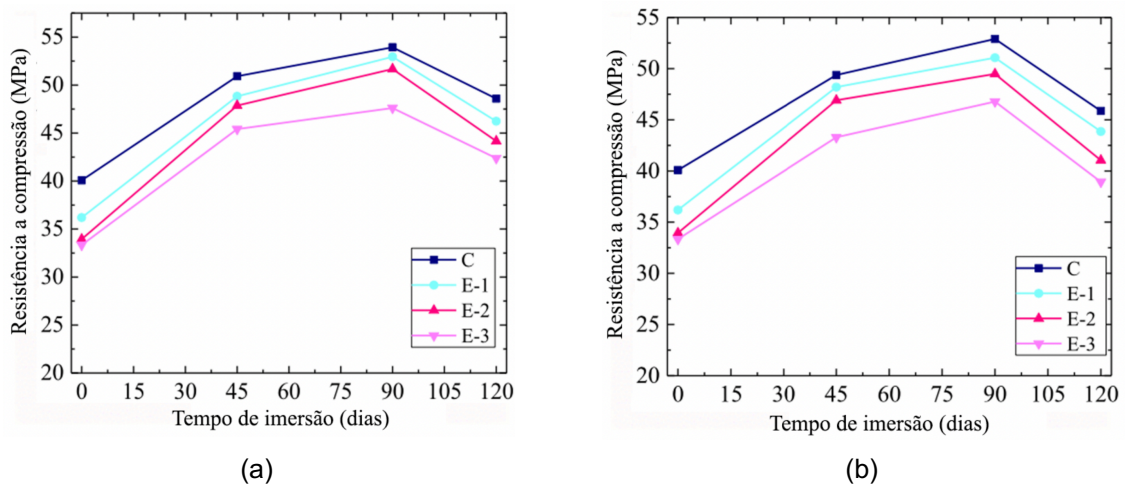
Ainda, observou-se que a solução de sulfato de magnésio tem efeito mais agressivo e prejudicial na deterioração do concreto. É evidente pelas medições de perda de massa, bem como pela inspeção visual dos corpos de prova de concreto após serem submetidos ao ataque de sulfato pelas respectivas soluções. Também, os corpos de prova de concreto imersos em soluções de sulfato de magnésio apresentaram maior erosão do material endurecido em relação aos seus homólogos imersos em solução de sulfato de sódio. O traço que aparentemente melhorou a resistência ao ataque de sulfato foi o com 20% de substituição, com tamanho B de partículas.

Na pesquisa de Liu, *et al.* (2018), avaliou-se a durabilidade de concretos utilizando um resíduo de vidro proveniente de televisores tubo, vidro CRT, como substituição à areia em 0%, 30%, 60% e 100%, respectivamente denominados C, E-1, E-2 e E-3. Os concretos, cúbicos de

lado igual a 10cm, foram imersos em soluções de 5% e 10% de sulfato de sódio, após um período de cura de 28 dias. Avaliou-se a resistência a compressão e o modo de elasticidade dinâmico das amostras em 45, 90 e 120 dias de imersão.

O desenvolvimento da resistência à compressão do concreto em solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  é ilustrado na Figura 26. Observa-se que a resistência à compressão de todos os traços apresenta uma tendência semelhante. Aumenta no estágio inicial, atinge um valor de pico e depois tende a diminuir. Os autores comentam que esta variação depende principalmente da cristalização contínua de sais e geração de gesso e etringita nos poros ou microfissuras do concreto. Na fase inicial, a expansão induzida pela cristalização e novos produtos podem preencher os poros e microfissuras, e aumentar a compacidade do concreto, o que leva a um aumento na resistência à compressão a nível macro. Em estágio avançados, no entanto, com maior cristalização do sal e formação de gesso e etringita, os poros ou microfissuras no concreto não podem acomodar mais expansão. Novas fissuras começam a aparecer e se desenvolver quando a tensão de expansão excede a resistência à tração. Como resultado, a resistência à compressão do concreto tende a diminuir.

**Figura 26 – (a) Resistência a compressão após imersão em 5% de sulfatos / (b) Resistência a compressão após imersão em 10% de sulfatos**

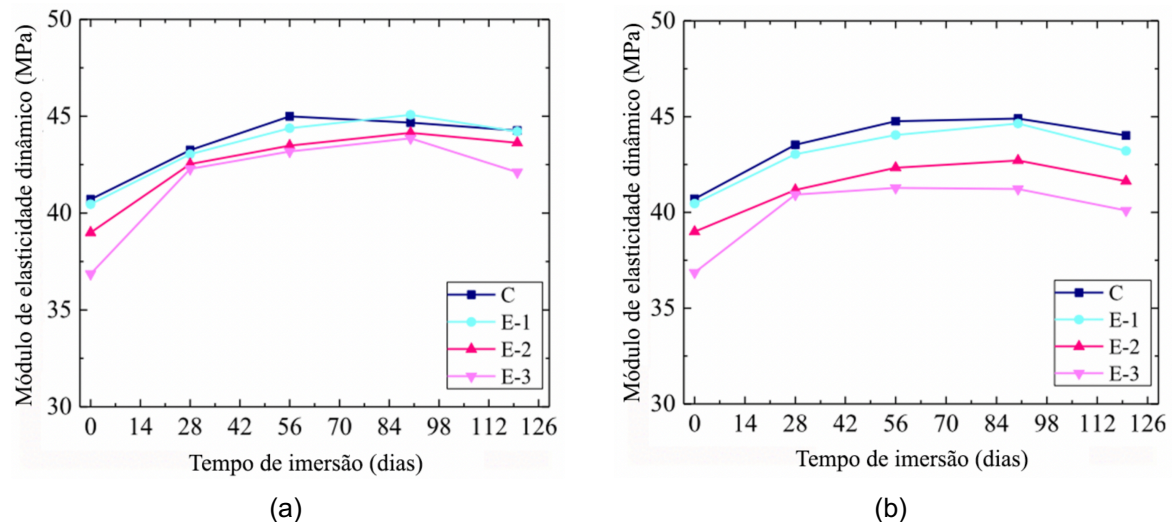


Fonte: Liu, *et al.* (2018), adaptado pelo autor

O módulo de elasticidade seguiu um comportamento semelhante ao da resistência a compressão, com um aumento no início, atingindo um pico e depois reduzindo (Figura 27). A ação dos sulfatos gerou mais influência na resistência do que no módulo de elasticidade, isso pode ter ocorrido devido ao diferença de medição entre os dois parâmetros. Enquanto o módulo é aferido mdindo a vibração elástica em pequenas deformações, a resistência a compressão é

obtida com a carga de pico. Assim, o processo de geração dos produtos da hidratação nos poros seguido pela expansão e fissuração é mais sensível na carga do que nas vibrações das pequenas deformações (LIU, *et al.*, 2018)

**Figura 27 - (a) Módulo de elasticidade dinâmico após imersão em 5% de sulfatos / (b) Módulo de elasticidade dinâmico após imersão em 10% de sulfatos**



Fonte: Liu, *et al.* (2018), adaptado pelo autor

## 2.6 RESULTADOS E ANÁLISES PRÉVIAS DA CARACTERIZAÇÃO DO PDV

Como citado anteriormente, alguns autores já estudaram o mesmo resíduo de vidro utilizado nesta pesquisa. A seguir, serão levantadas e analisadas as contribuições ao tema publicados por Moura (2018), Oliveira (2021) e Radke (2022). O levantamento dos dados e as análises se fizeram necessárias como tomada de decisão para a pesquisa, ou seja, entender quais traços serão pesquisados em idades avançadas e submetidos ao ataque de soluções agressivas.

### 2.6.1 Granulometria

O resíduo incorporado no concreto nesta pesquisa possui as mesmas características granulométricas do material utilizado por Radke (2022). Portanto, a granulometria após moagem realizada pela autora foi em acordo com a ABNT NBR 7181 (ABNT, 1984), que prescreve a análise granulométrica de solos por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento. No estudo, utilizou-se ambas as formas. Isso pois o resíduo é

muito fino para se analisar apenas por peneiramento simples. Verificou-se pelo peneiramento que na peneira 200 (0,075mm), 92,80% do material passava, retendo apenas 7,2% (Tabela 13).

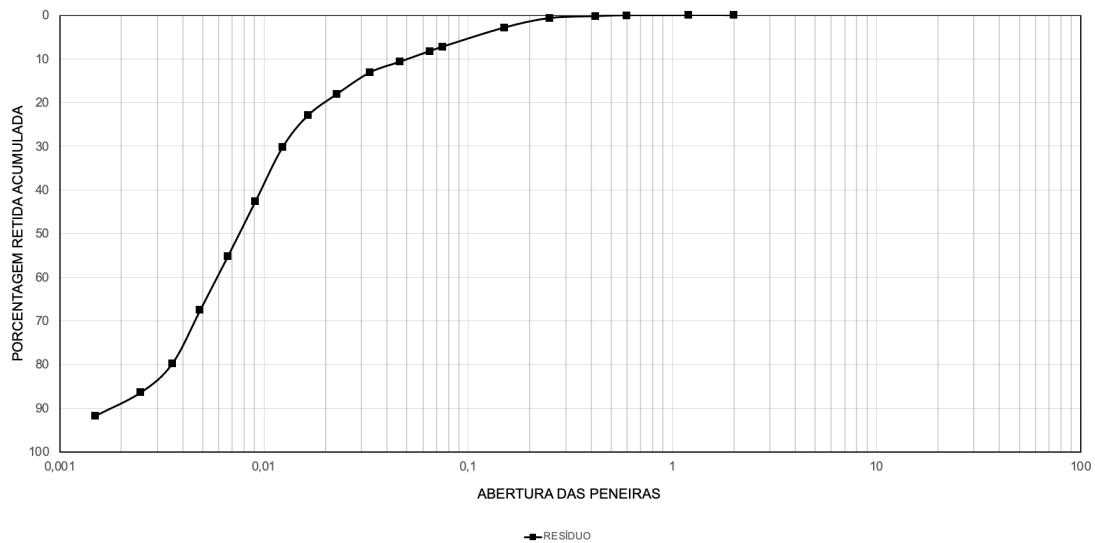
**Tabela 13 – Peneiramento do resíduo**

Abertura (mm)	Peneira N°	Massa retida e acumulada
1,2	16	0,00
0,6	30	0,03
0,42	40	0,23
0,25	60	0,68
0,15	100	2,85
0,075	200	7,20

Fonte: Radke (2022), adaptado pelo autor

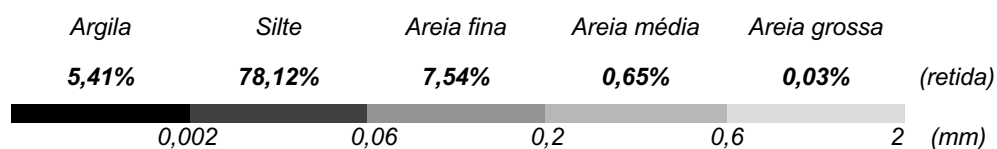
Em sequência, realizou-se o processo de sedimentação para que junto ao peneiramento, seja possível traçar a curva granulométrica do material, apresentada pela Figura 28.

**Figura 28 – Curva granulométrica do resíduo**



Fonte: Radke (2022), adaptado pelo autor

Quando a análise do resíduo é realizada pela ABNT NBR 6502 (ABNT, 2022), como se fosse um solo, verifica-se que o material possui granulometria semelhante ao silte, em que 78% do material fica retido entre 0,002mm a 0,06mm. A porcentagem do material retido, por faixa de diâmetro e classificação, está demonstrada na Figura 29.

**Figura 29 - Dimensão dos grãos e classificação do solo**

Fonte: Radke (2022), adaptado pelo autor

Ainda, outros valores que frequentemente acompanham a distribuição granulométrica podem ser calculados. São eles: diâmetro efetivo ( $D_e$  ou  $D_{10}$ ), coeficiente de não uniformidade ( $C_u$ ) e o coeficiente de curvatura do solo ( $C_c$ ). Pela Tabela 14, pode-se verificar tais valores recalculados para o resíduo de vidro e outros diâmetros pertinentes aos cálculos.

**Tabela 14 – Coeficientes da distribuição granulométrica do PDV**

Coeficiente	Descrição	Resultado ( $\mu\text{m}$ )	Parâmetro NBR 6502 (ABNT, 2022)
$D_{10}$ ou $D_{ef}$ (diâmetro efetivo)	Diâmetro tal que 10% do solo, em peso, tem diâmetros menores que ele	2,154	-
$D_{30}$	Diâmetro tal que 30% do solo, em peso, tem diâmetros menores que ele	4,599	-
$D_{50}$ (diâmetro mediano)	Diâmetro tal que 50% do solo, em peso, tem diâmetros menores que ele	7,647	-
$D_{60}$	Diâmetro tal que 60% do solo, em peso, tem diâmetros menores que ele	9,758	-
$D_{90}$	Diâmetro tal que 90% do solo, em peso, tem diâmetros menores que ele	51,297	-
$C_u$	Coeficiente de não uniformidade	4,529	<5, Muito uniforme
$C_c$	Coeficiente de curvatura do solo	1,005	$1 > C_c > 3$ , Bem graduado

Fonte: Radke (2022), adaptado pelo autor

Por tais resultados, o resíduo, após o tratamento realizado, pode ser considerado muito uniforme e bem graduado.

A partir disso, na Tabela 15, pode-se comparar os diâmetros percentuais entre o cimento e o resíduo. Como a granulometria do cimento utilizado não é comumente fornecido pelas empresas, utilizou-se para comparação os resultados de Cesapolucha (2016), cuja granulometria foi realizada pelo autor, por laser, em um cimento CPV ARI, mesmo cimento utilizado por Radke (2022), porém de marcas diferentes.

O que se observa é a proximidade dos parâmetros  $D_{50}$ , indicando que metade dos dois materiais possuem grãos menores que  $7\mu\text{m}$ , aproximadamente. As diferenças estão na parte fina, em que o  $D_{10}$  do cimento é menos da metade do que o do resíduo, e também na amostra como um todo, indicada pelo parâmetro  $D_{90}$ . Enquanto 90% do cimento possui diâmetro menor

do que 17,72 $\mu\text{m}$ , 90% do resíduo possui diâmetro menor do que 51,30 $\mu\text{m}$ , confirmando o que se verifica nas curvas granulométricas: o resíduo possui grãos maiores do que o cimento.

**Tabela 15 – Diâmetros da amostra**

<b>Coefficiente</b>	<b>Cimento CPV-ARI (<math>\mu\text{m}</math>) (CESAPOLUCHA, 2016)</b>	<b>Resíduo (<math>\mu\text{m}</math>) (RADKE, 2022)</b>
D <sub>10</sub>	0,93	2,15
D <sub>50</sub>	6,24	7,65
D <sub>90</sub>	17,72	51,30

Fonte: Radke (2022), Cesapolucha, (2016), adaptado pelo autor

Silva (2005) destaca que é importante as partículas utilizadas como adição em concreto que possa preencher os espaços vários entre os grãos de cimento, que contribui diretamente no desempenho do concreto e seu efeito de filler. Também, o autor comenta que em geral, o efeito pozolânico dos materiais não depende apenas da reação pozolânica mas também do efeito físico que ocorre ao preencher pequenas partículas na concreto. Assim, apesar do resíduo apresentar partículas que variam de 600 $\mu\text{m}$  a 1,4 $\mu\text{m}$ , 90% do material possui diâmetro menor que 51,3  $\mu\text{m}$ , muito próximo da faixa de 5 a 50  $\mu\text{m}$ , que é ideal para preencher os vazios deixados pelos grãos de cimento, causando um efeito físico dos grãos finos que permite um melhor empacotamento com as partículas de cimento, reduzindo a porosidade entre a pasta e o agregado e melhorando a matriz cimentícia.

## 2.6.2 Massa específica, teor de umidade e outros parâmetros

A Tabela 16 traz alguns parâmetros para o auxílio da caracterização do resíduo. Quando se analisa o resíduo pela norma ABNT NBR 12653 (ABNT, 2018), verifica-se que o resíduo atende aos requisitos de materiais pozolânicos que foram ensaiados. Cabe ressaltar que a norma traz outros parâmetros para enquadramento de classe de pozonalas que não foram verificados, como perca ao fogo e índice de atividade pozolânica.

Na tabela, foi possível também comparar as características do PDV com os requisitos da norma ABNT NBR 16697 (ABNT, 2018), que especifica as exigências dos cimentos Portland, como o tempo de início e fim de pega. Tais parâmetros foram necessários para entender o comportamento do concreto produzido a medida que se aumenta o teor de substituição do cimento pelo resíduo de vidro.



**Tabela 16 – Características do resíduo de vidro**

Propriedade	Autor	Norma para execução do ensaio	Resultado	Requisitos normativos/ Norma	Verificação
Massa específica	Radke (2022)	ABNT NBR 6458 (ABNT, 2016)	2,52 g/cm <sup>3</sup>	NE	-
Massa unitária	Radke (2022)	NBR 16972 (ABNT, 2021)	0,66 g/cm <sup>3</sup>	NE	-
Teor de umidade	Radke (2022)	ABNT 7211 (ABNT, 2022)	1,27%	<3 ABNT NBR 12653 (ABNT, 2018)	Ok
Índice de finura – peneira 75um	Radke (2022)	ABNT NBR 11579 (ABNT, 2012)	10%	NE	-
Tempo de pega (início)	Radke (2022)	ABNT NBR 16607 (ABNT, 2018)	85 minutos	≥ 60 minutos ABNT NBR 16697 (ABNT, 2018)*	Ok
Tempo de pega (fim)	Radke (2022)	ABNT NBR 16607 (ABNT, 2018)	525 minutos	≤ 600 minutos (NBR 16697 (ABNT, 2018)*	Ok

NE = Não existente

\* Considerando valores para cimento Portland

Fonte: Radke (2022), adaptado pelo autor

Quando se compara o resíduo com o cimento CPV-ARI utilizado, têm-se os valores em destaque na Tabela 17.

**Tabela 17 – Comparação cimento CPV e PDV**

Parâmetro	Resíduo	Cimento	Diferença
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,52 (Radke, 2022)	3,12 (Radke, 2022)	Cimento 19% maior que PDV
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	0,66 (Radke, 2022)	1,18 (Radke, 2022)	Cimento 44% maior que PDV
Tempo de pega- início (min)	85 (Radke, 2022)	137 (Cimentos Liz, 2022)	Cimento 38% maior que PDV
Tempo de pega – fim (min)	525 (Radke, 2022)	169 (Cimentos Liz, 2022)	PDV 211% maior que o cimento

Fonte: Radke (2022), Cimentos Liz (2022), adaptado pelo autor

A diferença entre a massa unitária dos materiais demonstra que o resíduo ocupa um maior volume do que o cimento, o que foi verificado na produção dos concretos. Também, o cimento possui um tempo de início de pega maior do que o resíduo, o que indica o endurecimento mais tardio do que o resíduo para se iniciar as reações da pasta. Já o tempo de fim de pega teve uma diferença muito grande entre os materiais. O resíduo demora 356 minutos a mais do que o cimento para deixar de ser pasta e enrijecer.

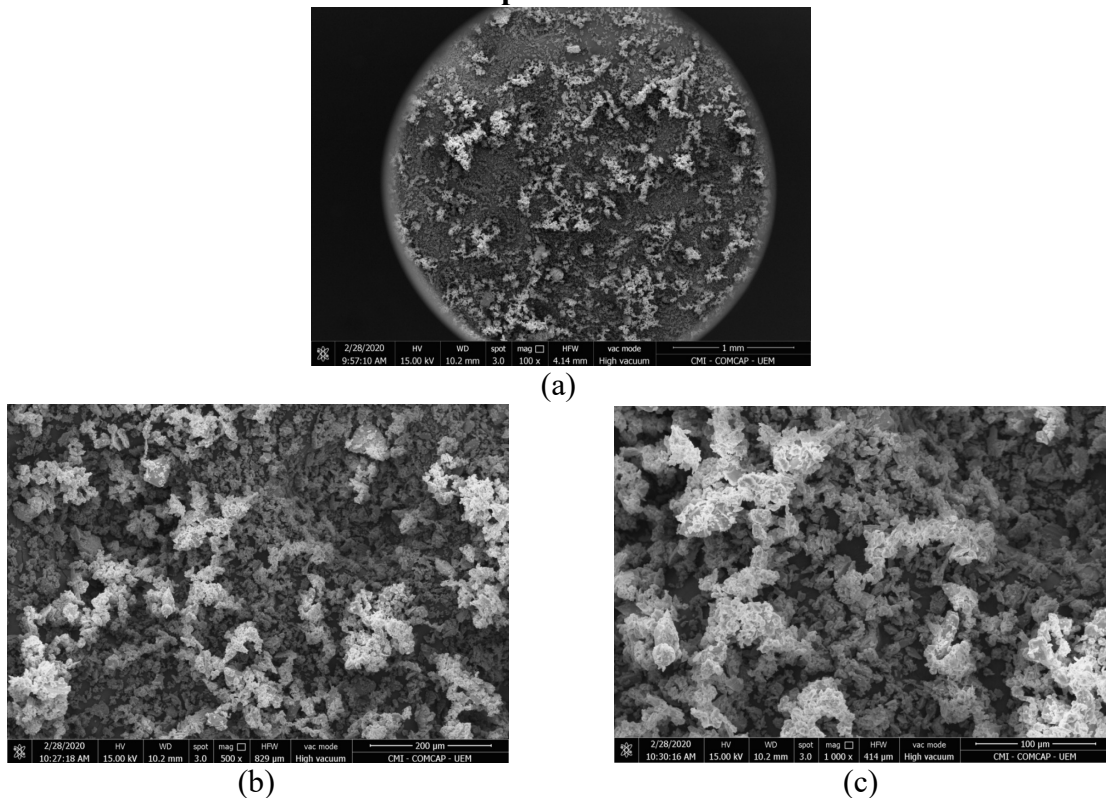
Entretanto, a combinação do cimento CPV-ARI, que tem como característica uma secagem mais rápida, com o resíduo, resultou, em geral, na secagem do concreto no estado

fresco muito rapidamente. No intervalo entre a aferição do slump até o início das moldagens já se observava que a pasta de concreto alterava sua consistência, ficando diferente do conteúdo retirado da betoneira. Isso pode ser devido ao tempo de início de pega do resíduo ser menor do que o do cimento. No tópico “Resultados” será abordada a influência da umidade do ar e temperatura na trabalhabilidade dos traços.

### 2.6.3 MEV

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), em inglês “*scanning electron microscopy*” (SEM), é um ensaio que analisa características micro e nanoestruturais de amostras sólidas. É uma ferramenta de destaque para estudo de materiais cimentícios, como argamassa e concreto. Com o ensaio, observa-se seções de amostras por meio de micrografias de alta resolução obtidas por elétrons retroespalhados (CORREIA, *et al.*, 2014). Com a análise do resíduo de vidro realizada por Radke (2022), por MEV, foi possível avaliar a morfologia de suas partículas. O resíduo apresentou partículas em formato irregular e superfície lisa, típica de materiais amorfos. Na Figura 30, verifica-se a amostra aumentada 100 vezes, 500 vezes e 1000 vezes.

**Figura 30 – (a) Amostra ampliada em 100 vezes/ (b) Amostra ampliada em 500 vezes/ (c) Amostra ampliada em 1000 vezes**



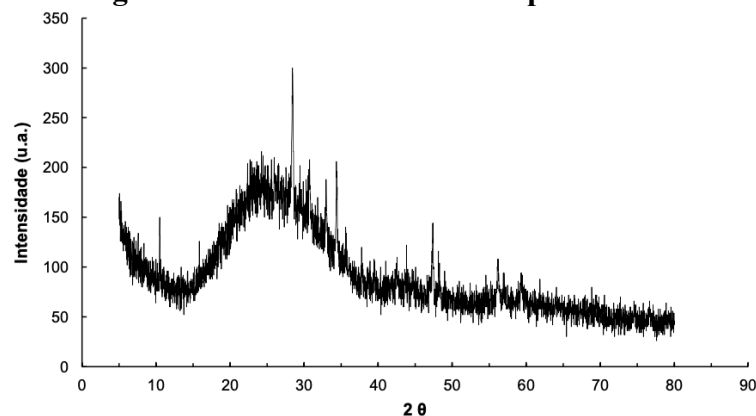
Fonte: Radke (2022)

## 2.6.4 Resultados DRX

O ensaio de Difração de raios X (DRX) analisa o nível de cristalinidade da amostra junto à identificação de fases quanto ao seu arranjo atômico. Assim, pode-se classificar o resíduo em amorfo ou cristalino e ainda, utilizar os resultados para quantificar elementos de constituição, desde que dentro de uma faixa adequada de concentração. Os dados gerados pelo ensaio podem ser comparados com um banco de dados específico contribuindo, portanto, para a caracterização da amostra (MOURA, 2018).

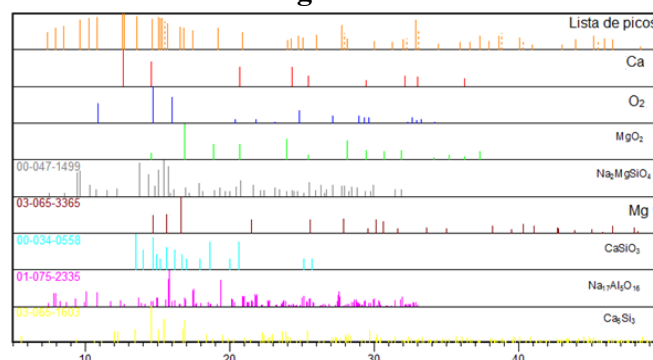
O ensaio de DRX foi realizado por Radke (2022) para identificar as fases do resíduo de pó de vidro. Pelo gráfico apresentado na Figura 31, pode-se constatar que a amostra não possui cristais e que tem uma fase amorfa. Se o material é amorfo, há um indício de pozolanicidade e assim, a utilização do resíduo em estudo na confecção do concreto substituindo o aglomerante torna-se mais viável. Também, a Figura 32 mostra a lista de picos e as fases encontradas na amostra do resíduo de vidro.

**Figura 31 - Fases da amostra de pó de vidro**



Fonte: Radke (2022)

**Figura 32 - Lista de picos da amostra de pó de vidro apresentadas do programa X'pert High Score**



Fonte: Radke (2022)

Assim, a estrutura amorfa do pó de vidro insinua uma probabilidade maior de um efeito pozolânico na hidratação do cimento, tendo uma maior interação entre as partículas e melhorando as características do cimento devido a vários motivos, como concentração total de grupos silanol (Si-OH), densidade de grupos silanol e solubilidade no meio básico (OERTEL *et al.*, 2014).

### 2.6.5 FRX

A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica que permite conhecer a composição química qualitativa e semi-quantitativamente de uma determinada amostra, ou seja, é possível identificar os elementos presentes nas amostras do material e determinar seus respectivos teores. Os resultados são expressos na base óxidos, considerando os óxidos mais estáveis dos elementos presentes na amostra (MOURA, 2018).

A partir dos resultados obtidos por Oliveira (2021), pelo equipamento EDX-7000, têm-se a composição química do resíduo representada pelas de quantidades de óxidos presentes descritos na Tabela 18 e comparados com os resultados publicados por Moura (2018), que utilizou o equipamento ZSXMini II, da marca Rigaku.

**Tabela 18 - Composição química do resíduo de vidros e parâmetros normativos**

Parâmetros	Resultados (Oliveira, 2021) (%)	Resultados Moura (2018) (%)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	53,28	62,0
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,57	1,5
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,54	7,2
<b>CaO</b>	20,3	25,2
<b>MgO</b>	17,56	0,0
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,29	0,0
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	n.e.	n.e.
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,68	1,2
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	1,17	2,8
<b>Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,06	0,0
<b>Cl<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b>	0,0	0,1
<b>SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	57,39 (ok para Classe E)	70,8 (ok para Classe E)
<b>SO<sub>3</sub></b> (NBR 12653 e ASTM C618)	0,29 (ok)	0,0 (ok)
<b>Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>*</b> (NBR 12653)	-	-
<b>CaO</b> (ASTM C618)	20,3 (ok para Classe E)	25,2 (ok para Classe E)

n.e. = não especificado

ok = atende a(s) norma(s)

não ok = não atende a(s) norma(s)

\*Equivalente Alcalino:  $Na_2O_{eq} = Na_2O + 0,658 K_2O$

Fonte: Oliveira (2021) e Moura (2018), adaptado pelo autor

Quando se analisa as duas publicações, pode-se verificar a concordância dos materiais com os requisitos mínimos dados pela norma ABNT NBR 12653 (ABNT, 2014), em que o somatório dos óxidos  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  deve ser no mínimo 70% para classes N e C, e 50% para Classe E (Tabela 7) e a quantidade de óxidos  $\text{SO}_3$  não deve exceder 4%. A quantidade de CaO, apesar de não ser citada na norma brasileira, é requisito na norma ASTM C618 (ASTM, 2022) com o valor mínimo de 18% para Classe C (Tabela 9), equivalente à Classe E. Assim, pelos resultados dos autores, o resíduo é considerado uma pozolana não tradicional, pertencendo ao mesmo grupo das escórias siderúrgicas ácidas, as cinzas de materiais vegetais e o rejeito de carvão mineral, entre outros. De acordo com ambas normas, tais materiais, que se enquadram na Classe E e diferem dos requisitos das outras classes, podem apresentar propriedades aglomerantes.

Apesar dos autores utilizarem o resíduo proveniente da mesma empresa, observa-se uma diferença na composição química entre as amostras. Moura (2018) comenta que em seu material há uma predominância de silício no material, que ganha destaque por possui um papel de relevância na formação de silicatos, influenciando no ganho de resistência à compressão. Ainda, o teor elevado de cálcio deve ser cuidadosamente considerado, já que o cimento Portland é predominantemente à base de compostos de cálcio.

Entretanto, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), os óxidos de cálcio e magnésio em teores elevados são elementos indesejáveis no cimento pois podem dar origem a reações expansivas por retardamento em sua hidratação. Apesar disso, existem diversas adições, que possuem altos teores de cálcio, como a cinzas de carvão que podem ter 15 a 35% de CaO.

Ao se comparar os resultados com a Tabela 11, levantada pela pesquisa, o resíduo de vidro analisado por Oliveira (2021) se diferencia pelo baixo teor do somatório dos óxidos  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  e altos teores de MgO (17,56%) e CaO (20,3%). Já na pesquisa de Moura (2018), o resíduo não teve MgO em sua composição. Assume-se que, apesar das duas pesquisas verificarem que o vidro é composto em sua maioria de  $\text{SiO}_2$ , a empresa modificou o tipo de vidro que produz entre os anos das pesquisas. Na literatura, apenas na pesquisa de Elaqra (2019) o resíduo possuía alto teor de CaO, de 18,55%, em que grande parte era proveniente de vidro laminado para janelas.

Observa-se que nos resultados de Oliveira (2021), há grande quantidade de óxidos MgO, que garante resistência ao vidro quando exposto a alterações de temperatura com grandes amplitudes. E, o alto teor de CaO auxilia na estabilidade contra ataque de agentes atmosféricos (FACTORI, 2009). Dessa forma, Oliveira (2021) comenta que como a empresa realiza o

processo de têmpera do vidro, supõe-se que os elevados teores de óxido de magnésio encontrados são necessários para que o vidro tenha uma boa performance em altas temperaturas e resfriamento instantâneos.

## 2.7 RESULTADOS E ANÁLISES PRÉVIAS DA CARACTERIZA O DO CONCRETO

Radke (2022) analisou dois conjuntos de traos de concreto. Utilizando a mesma proporao de agregados, variou-se as amostras com substituao do cimento pelo resíduo em 0, 10, 15, 20, 25 e 30%, com dois fatores a/c diferentes, 0,55 e 0,60, para verificar a influência de tal parâmetro no concreto principalmente na resistência a compressão. A proporao em massa utilizada nos traos foi de 1:1,96:2,72.

### 2.7.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone (slump test)

Na pesquisa da autora, alguns traos foram refeitos por terem atingido um slump muito baixo impossibilitando sua moldagem. Sendo assim, verificou-se a diferenaa entre a trabalhabilidade dos traos T0, T1 e T2 pela diferenaa da temperatura média do dia (Tabela 19). A classe de slump desejável era Classe S100, sem a utilizaao de aditivos.

**Tabela 19 – Verificaao do slump dos traos**

TRAO	a/c	Lote 1		Lote 2	
		Slump (cm)	Temperatura média do dia	Slump (cm)	Temperatura média do dia
<b>T0 (0%)</b>	0,55	7	30�C	16	22�C
<b>T1 (10%)</b>		6	30�C	14	22�C
<b>T2 (15%)</b>		7	30�C	12	22�C
<b>T3 (20%)</b>		13	31�C	-	-
<b>T4 (25%)</b>		11	31�C	-	-
<b>T5 (30%)</b>		10	31�C	-	-
<b>T7 (0%)</b>	0,60	18	31�C	-	-
<b>T8 (10%)</b>		17	31�C	-	-
<b>T9 (15%)</b>		15	31�C	-	-
<b>T10 (20%)</b>		15	22�C	-	-
<b>T11 (25%)</b>		14	22�C	-	-
<b>T12 (30%)</b>		12	22�C	-	-

Fonte: Radke (2020), adaptado pelo autor

### 2.7.2 Resistência a compressão em 28 dias

Os resultados da resistência a compressão média ( $f_{cm}$ ) em 28 dias de cura estão apresentados na Tabela 20, por traço (RADKE, 2022). Para complemento dos dados publicados pela autora, calculou-se a resistência estatística ( $f_{ckest}$ ) pela Equação 7, já que foram moldados seis exemplares para cada traço. De acordo com a ABNT NBR 12655 (ABNT, 2022), para o controle estatístico por amostragem parcial, em lotes com número de exemplares entre 6 e 20, o valor estimado da resistência característica a compressão ( $f_{ckest}$ ) na idade especificada, é dada por:

$$f_{ckest} = 2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m - 1} - f_m \quad \text{Equação 7}$$

Em que,

$n$  é o número de exemplares;

$m$  é  $n/2$

Ainda, deve-se atender a condição de  $f_{ckest} \geq \psi_6 \cdot f_1$ , sendo  $\psi_6$  dado pela Tabela 20.

**Tabela 20 – Valores de  $\psi_6$**

Condição de preparo	Número de exemplares (n)										
	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	$\geq 16$
A	0,82	0,86	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02
B ou C	0,75	0,8	0,84	0,87	0,89	0,91	0,93	0,96	0,98	1,00	1,02

Fonte: ABNT NBR 12655 (ABNT, 2022), adaptado pelo autor.

Dessa forma, aceita-se os lotes na condição do  $f_{ckest}$  ser maior ou igual ao  $f_{ck}$  de projeto. Para os cálculos, considerou-se a condição de preparo A, em que todos os materiais foram medidos em massa. A partir dessas análises, verificou-se também qual classe de concreto os traços se enquadram (Tabela 21).

Tabela 21 - Resistência a compressão estatística

Traço	a/c	fck est (resistência característica estatística)	fcm (resistência média)	Desvio padrão	Condição*		Classe de concreto para aceitação (fck estatístico)
T1 (0%)	0,55	31,3	36,8	3,5	29,1	ok	C30
T2 (10%)		31,5	33,8	1,0	29,3	ok	C30
T3 (15%)		31,2	33,5	0,9	29,5	ok	C30
T4 (20%)		26,0	28,7	3,0	24,4	ok	C20
T5 (25%)		28,3	30,6	1,3	26,8	ok	C20
T6 (30%)		27,4	29,0	1,5	25,6	ok	C20
T7 (0%)	0,60	30,6	31,9	1,2	28,4	ok	C30
T8 (10%)		31,1	32,7	1,2	28,8	ok	C30
T9 (15%)		27,8	30,2	0,8	26,6	ok	C20
T10 (20%)		23,6	27,8	2,1	23,2	ok	C20
T11 (25%)		24,1	26,4	1,3	22,8	ok	C20
T12 (30%)		25,3	26,1	0,5	23,4	ok	C20

\*  $f_{ckest} \geq \psi_6 \cdot f_1$

Fonte: Radke (2020), adaptado pelo autor

Guignone (2017) em sua pesquisa utilizou o fator a/c em 0,60 por configurar-se aquela que proporciona concretos com maior porosidade e maior potencialidade de avaliação dos efeitos de prevenção do ingresso de agentes agressivos com o uso do material pozolânico. Já Moura (2018), que utilizou o mesmo resíduo desta pesquisa, produziu os corpos de prova de argamassa com o fator de 0,52 e obteve bons resultados na resistência à compressão com substituição de 20%, com valores muito próximos aos da amostra controle. Kalakada, Doh e Zi (2020) utilizaram três fatores a/c e obtiveram melhores resultados em resistência e penetração de íons cloreto com o menor teor de a/c, de 0,39, assim como Zidol, Tognonvi, Tagnit-Hamou (2017), que tiveram melhoras na resistência com o fator de 0,4, na idade de 365 dias.

A partir do levantamento das propriedades do resíduo e das análises realizadas previamente, verifica-se que os traços com fator a/c de 0,55 obtiveram melhores resultados, sendo o T2 e T3 classificados na mesma classe que o traço piloto. Assim, foi possível seguir esta pesquisa com enfoque maior nos traços com fator a/c menor, de 0,55.

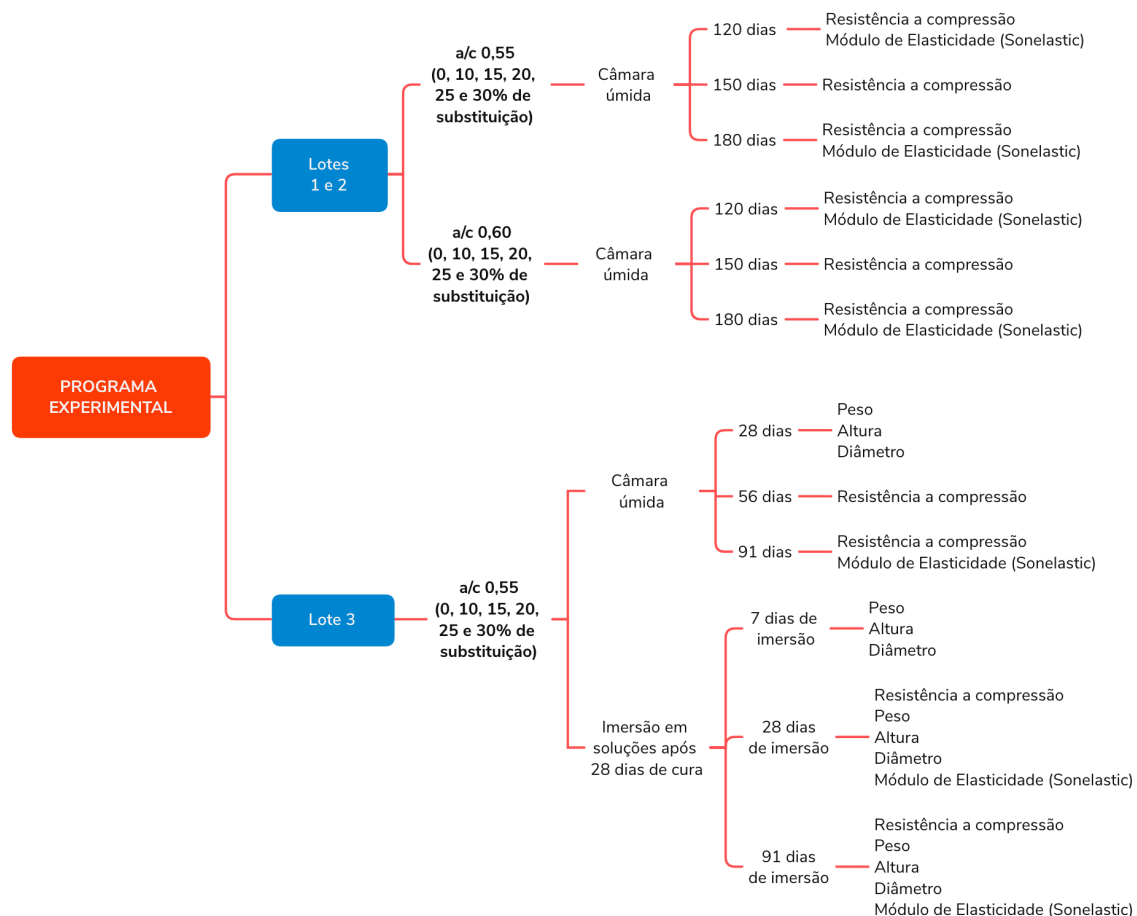


### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O enfoque desta pesquisa foi a análise da resistência a compressão de traços com teores de substituição do cimento por resíduo de vidro, em 0, 10, 15, 20, 25 e 30%, utilizando dois fatores a/c, 0,55 e 0,60, seu comportamento ao longo de diversas idades. Também, iniciou-se o estudo de durabilidade das amostras com a/c 0,55 imergindo-as em três soluções, uma com 5% de NaSO<sub>4</sub>, outra com 10% de NaSO<sub>4</sub> e a terceira com 5% de NaSO<sub>4</sub> + 3% de NaCl, já que obtiveram melhores resultados na resistência a compressão, quando comparados com os resultados com o fator a/c de 0,60. Na Figura 33, verifica-se o resumo do programa experimental e os ensaios que foram realizados para cada lote de fabricação de concreto. Cabe destacar que esta pesquisa é uma sequência do estudo realizado por Radke (2022), em que foram analisados os mesmos traços, com os mesmos teores de substituição, na idade de 28 dias.

**Figura 33 - Programa experimental resumido**



Fonte: O autor (2022)

## 3.2 MATERIAIS

Os materiais que serão utilizados para a realização da pesquisa são o resíduo de vidro, agregados, aglomerante e água, descritos a seguir.

### 3.2.1 Resíduo de Vidro (PDV)

O resíduo de vidro utilizado neste trabalho foi fornecido por uma empresa de vidros temperados, localizada no setor industrial da cidade de Apucarana– PR (Figura 34). Tal material é proveniente do corte de placas de vidro temperado, que são moldadas em diversos tamanhos, dependendo do pedido encomendado. O corte é realizado por jatos de água na placa e resultado é o resíduo misturado com água, que é conduzido em sequência através de canaletas até o setor que realiza o tratamento de efluentes da empresa, local onde ocorre a decantação e densificação com a adição de polímeros.

**Figura 34 - Empresa de vidro em Apucarana - PR**



Fonte: Moura (2018)

No final do processo de tratamento, sacos plásticos ficam dispostos sob valetas de modo a receber a combinação do resíduo pastoso decantado no fundo do funil e água. O operador controla de forma manual tal evento (Figura 35-a). A água em excesso que é liberada retorna para as caixas de água de armazenamento para serem utilizadas novamente pela indústria. Assim, acumulam-se diariamente diversos sacos com o resíduo (Figura 35-b).

**Figura 35 – (a) Válvulas para descarga de resíduo decantado / (b) Sacos com resíduo**



Fonte: O autor (2022)

### 3.2.2 Aglomerante

Na fabricação dos corpos de prova, utilizou-se o cimento de alta resistência inicial, CP V-ARI Premium, da marca Liz. De forma semelhante aos estudos de Guignone (2017) e Magalhães (2019), esse tipo de cimento foi escolhido por ser o cimento com maior percentual de clínquer disponível no mercado, ou seja, mais puro e com menor teor de adições evitando que outras adições possam reagir com o resíduo.

As características do cimento, especificados pela norma ABNT NBR 16697 (ABNT, 2018), são: a quantidade de escória granulada de alto-forno e material pozolânico é nula, os limites de clínquer e sulfatos de cálcio ficam entre 90 a 100%, em porcentagem de massa, e o de material carbonático varia de 0 a 10%. Além dessas características, alguns limites são propostos na norma. Verifica-se que todos os parâmetros são atendidos de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, que estão descritos e comparados no Quadro 6. Alguns parâmetros não possuem limites estabelecidos, mas são comumente informados pelos fabricantes.

**Quadro 6 – Dados cimento LIZ CPV-ARI**

Idades	R (01 dia)	R (03 dias)	R (07 dias)	R (28 dias)	Finuras		Tempo de Pega (minutos)	
					# 325 (%)	Blaine (m <sup>2</sup> /Kg)	Início de Pega	Fim de pega
<b>NBR 16697</b>	≥ 14	≥ 24	≥ 34	N.E.	N.E.	≥ 260	≥ 60	≤ 600
<b>CPV-ARI PREMIUM</b>	25,9	42,2	49,6	59,1	0,7	530	137	169

\* Valores das médias obtidas do Mapa de Qualidade no período de julho 2021.  
N.E. = não especificado

Fonte: Cimentos LIZ (2022), adaptado pelo autor

### **3.2.3 Agregado graúdo**

O agregado graúdo utilizado na confecção dos corpos de prova é proveniente da região de Maringá, e enquadrado como brita 1, com diâmetro máximo característico de 19mm.

### **3.2.4 Agregado miúdo**

O agregado miúdo que será utilizado é a areia proveniente de fornecedores da região de Maringá. Assunção (2002) verificou que os agregados miúdos utilizados na cidade são originários dos rios Paraná e Paranapenema e que, as areias facilmente encontradas no comércio são popularmente chamadas de média e grossa. Para a pesquisa, foi utilizado areia comercialmente denominada “fina”, enquadrada próxima ao limite inferior da zona utilizável e fora da zona ótima.

### **3.2.5 Água**

Para o amassamento do concreto foi adicionada à mistura água potável, proveniente da rede de abastecimento de água da cidade de Maringá, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR.

## **3.3 METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

Para a caracterização dos agregados graúdos e miúdos realizou-se ensaios para determinar a composição granulométrica, massa unitária e massa específica. Para a caracterização do resíduo de vidro, analisou-se principalmente os dados publicados por Radke (2022), assim como descrito anteriormente, e se descreveu o preparo detalhado do resíduo antes de sua incorporação ao concreto.

### **3.3.1 Ensaios de caracterização dos agregados**

#### **3.3.1.1 Composição Granulométrica**

A norma ABNT NBR 17054 (ABNT, 2022) descreve o método para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos para concreto. O procedimento foi

realizado no Laboratório de Materiais de Construção - P02 da Universidade Estadual de Maringá e consiste, de forma sucinta, em peneirar uma certa quantidade de material em uma série de peneiras padronizadas e com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo. A massa unitária foi determinada pela ABNT NBR 16972 (ABNT, 2021). E, utilizou-se a ABNT NBR 16916 (ABNT, 2021) e a ABNT NBR 16917 (ABNT, 2021) para determinar a massa específica dos agregados miúdo e graúdo, respectivamente.

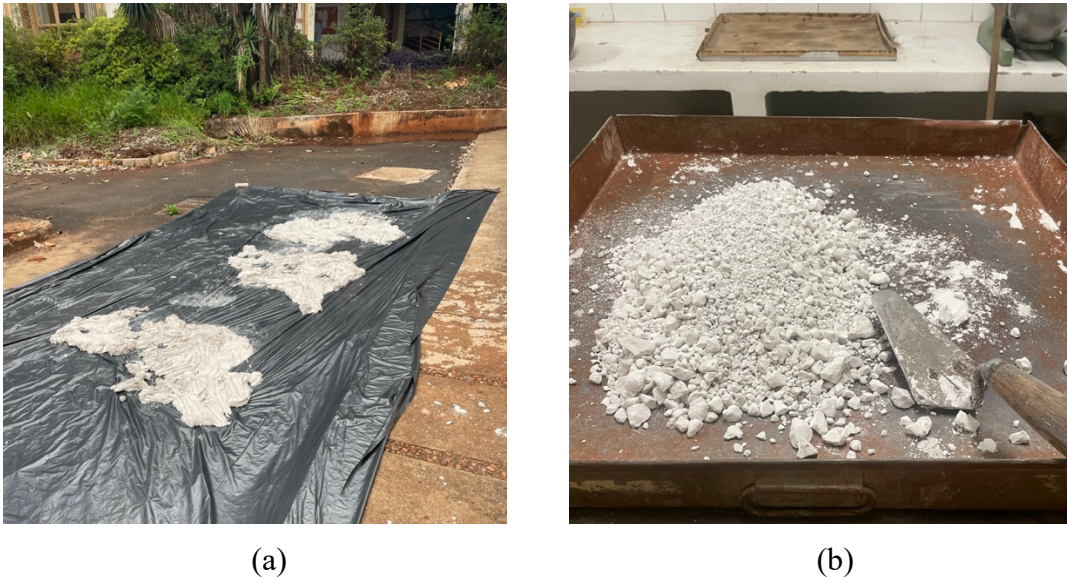
Pode-se ainda classificar a areia de acordo com a norma ABNT NBR 7211 (ABNT, 2018), que traz os limites para utilização das areias em concretos em zonas utilizáveis e zonas ótimas, além dos limites para os valores do módulo de finura.

### **3.3.2 Caracterização do resíduo de vidro**

Para a caracterização do resíduo, utilizou-se a pesquisa bibliográfica para levantar e comparar os dados de estudos que utilizaram o resíduo proveniente da mesma empresa. Isso se faz necessário para analisar os diferentes preparos do resíduo, suas características e sua forma de utilização nos concretos e argamassas. A seguir, destaca-se, de forma detalhada, a aquisição e preparo do resíduo e o ensaio de teor de umidade realizado.

#### **3.3.2.1 Preparo do resíduo**

Logo após a coleta da amostra na indústria, os sacos com resíduo foram abertos e espalhou-se a lama sobre uma lona plástica e deixou-se secar em área descoberta, ao sol, por dois dias, mantendo-a coberta durante a noite (Figura 36-a). Após esse período, verificou-se que a amostra se encontrava, visualmente, em estado seco, porém ainda muito rígido. Em sequência, iniciou-se o processo de destorramento manual com o auxílio de uma colher de pedreiro (Figura 36-b).

**Figura 36 – (a) Secagem da lama de vidro / (b) Destorroamento manual**

Fonte: O autor (2022)

Após o destorroamento da amostra, verificou-se que a dimensão dos grãos era maior do que se espera em se tratando de substituição ao cimento. Nesse momento, aproximadamente 50% do resíduo passava pela peneira 0,63mm. De acordo com a literatura, a dimensão média desejável seria de 150 $\mu$ m ou menor, para a substituição ao cimento. Sendo assim, a solução encontrada foi a utilização de um moinho de barras com a função de moer e reduzir a dimensão das partículas. Assim, inseriu-se 5kg de resíduo destorroado no moinho com 12 barras lisas finas, 11 barras lisas médias e 3 vergalhões, com peso respectivo de 0,562kg, 1,38kg e 3kg. Com a utilização do equipamento, durante um período de 20 minutos já se verificou que, aproximadamente, mais de 90% do resíduo já passava pela peneira 200 (75  $\mu$ m), chegando-se, portanto, à uma granulometria desejável.

Radke (2022) realizou o mesmo procedimento descrito. Outros autores que utilizaram o mesmo resíduo realizaram outros processos, como Oliveira (2021), que secou a amostra em estufa por 24 horas e não utilizou o processo de moagem. Já Moura (2018), utilizou um moinho de bolas para realizar a moagem e também realizou um processo de requeima do material, em fornos de alta temperatura.

### 3.4 DOSAGEM, PREPARAÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Após a caracterização e levantamento dos materiais, realizou-se a dosagem e preparação dos corpos de prova. Os parâmetros de dosagem adotados foram:

- a) O traço em massa de 1:1,96:2,72;
- b) Substituição do cimento por resíduo nos teores de 0% (piloto), 10%, 15%, 20%, 25% e 30%;
- c) Relação água/cimento, em massa, de 0,55 e 0,60;
- d) Abatimento do tronco de cone de  $10 \pm 2$  cm, buscando assim um concreto na classe S100;
- e) Condição de preparo: materiais medidos em massa, sem correção de umidade;
- f) Corpo de prova de concreto de 10x20cm.

No Quadro 7, verifica-se a dosagem em massa de cada traço.

**Quadro 7 - Traços em massa**

Traço	a/c	Cimento	Areia	Brita 1	Resíduo de vidro	
					Teor de substituição	Massa
T0	0,55	1,00	1,96	2,72	0%	0
T1		0,90	1,96	2,72	10%	0,10
T2		0,85	1,96	2,72	15%	0,15
T3		0,80	1,96	2,72	20%	0,20
T4		0,75	1,96	2,72	25%	0,25
T5		0,70	1,96	2,72	30%	0,30
T6	0,60	1,00	1,96	2,72	0%	0
T7		0,90	1,96	2,72	10%	0,10
T8		0,85	1,96	2,72	15%	0,15
T9		0,80	1,96	2,72	20%	0,20
T10		0,75	1,96	2,72	25%	0,25
T11		0,70	1,96	2,72	30%	0,30

Fonte: Radke (2020), adaptado pelo autor.

Os concretos foram produzidos seguindo a ABNT NBR 12655 (ABNT, 2022) e para cada traço proposto, moldou-se seis corpos de prova no laboratório, seguindo o recomendado pela ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015). Na betoneira, de capacidade de 320 litros, adicionou-se em ordem, brita, água, cimento, resíduo e areia. Os agregados utilizados estavam secos em umidade ambiente. O tempo total entre mistura e retirada do concreto ficou em torno de 5 minutos. Com o aumento da quantidade de resíduo, a quantidade de água após a brita era reduzido e utilizado parte após a inserção do PDV na betoneira. Depois, verificou-se o abatimento do concreto, conforme a norma ABNT NBR 16889 (ABNT, 2020). Cabe ressaltar que foi aplicada uma camada de desmoldante nos moldes dos corpos de prova antes de sua

utilização. Os CPs permaneceram em seus moldes por 24h e depois foram desmoldados e inseridos na câmara úmida até a idade necessária para execução dos ensaios pertinentes a pesquisa.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Em se tratando das idades, verifica-se que em 7 dias de cura, por exemplo, o ganho de resistência de concretos com o resíduo é bastante baixo. Zidol, Tognonvi, Tagnit-Hamou (2017) comentam que a resistência à compressão aumenta na presença do resíduo de vidro em longas datas. Tal comportamento reflete uma atividade pozolânica devagar e contínua do PDV. Portanto, como se já conhece o comportamento dos traços em 28 dias, de Radke (2022), deseja-se aprimorar o estudo com resíduo de vidro em outras idades.

Para os corpos de prova com a/c de 0,60 verificou-se a resistência a compressão nas idades de 120, 150 e 180 dias. Já para os traços com relação de 0,55, os valores da resistência a compressão em foram aferidos em 56, 91, 120, 150 e 180 dias.

Ainda, para o mesmo teor de 0,55, realiza-se um estudo inicial de durabilidade, imergindo cada um dos seis traços (T0 a T5) em três soluções agressivas diferentes, com concentrações em massa de:

- 5% de sulfato de sódio;
- 10% de sulfato de sódio;
- 5% de sulfato de sódio + 3% de cloreto de sódio.

Para tal ensaio, os corpos de prova foram curados por 28 dias em câmara úmida e depois imersos para verificação da influência das soluções no concreto a partir da resistência a compressão e das dimensões, nas idades de 28 e 91 dias.

Posto isso, na Tabela 22 é apresentado um resumo da quantidade de corpos de prova necessários para cada traço e ensaio. Como esta pesquisa trabalhou com 12 traços diferentes, para análise da resistência, e 6 traços para os ensaios de imersão, totalizou-se 252 corpos de prova.



Tabela 22 – Programa experimental

Fator água/cimento	0,55						0,60					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
<b>Traço</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>
<b>Teor de substituição (%)</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>
Resistência (56 dias)	3	3	3	3	3	3	-	-	-	-	-	-
Resistência (91 dias)	3*	3*	3*	3*	3*	3*	-	-	-	-	-	-
Resistência (120 dias)	3*	3*	3*	3*	3*	3*	3	3	3	3	3	3
Resistência (150 dias)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Resistência (180 dias)	4*	4*	4*	4*	4*	4*	4	4	4	4	4	4
Imersão Sulfatos 5% (28 dias de imersão)	3**	3**	3**	3**	3**	3**	-	-	-	-	-	-
Imersão Sulfatos 5% (91 dias de imersão)	3**	3**	3**	3**	3**	3**	-	-	-	-	-	-
Imersão Sulfatos 10% (28 dias de imersão)	3**	3**	3**	3**	3**	3**	-	-	-	-	-	-
Imersão Sulfatos 10% (91 dias de imersão)	3**	3**	3**	3**	3**	3**	-	-	-	-	-	-
Imersão Sulfatos 5% +3% cloretos (28 dias de imersão)	2**	2**	2**	2**	2**	2**	-	-	-	-	-	-
Imersão Sulfatos 5% + Cloretos 3% (91 dias de imersão)	2**	2**	2**	2**	2**	2**	-	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>												<b>252</b>

\* Realizou-se o ensaio de Módulo de Elasticidade pelo Sonelastic;

\*\* Realizou-se o ensaio de Módulo de Elasticidade pelo Sonelastic e a aferição do peso, altura e diâmetro. Antes da imersão, aferiu-se peso, altura e diâmetro

Fonte: O autor (2022)

Ainda, outros ensaios não destrutivos foram realizados. Nos traços com fator a/c de 0,55, realizou-se o módulo de elasticidade (Sonelastic) nas idades de 91, 120 e 180 dias para as amostras em câmara úmida. Já para os concretos imersos, aferiu-se, além do módulo de elasticidade, também por Sonelastic, suas dimensões (altura e diâmetro) e o peso. Para comparar a evolução ao longo das idades, utilizou-se como dados de partida os obtidos por Radke (2022) referentes ao módulo de elasticidade e resistência a compressão, curados em câmara por 28 dias. Assim, para a caracterização dos concretos, foram realizados ensaios descritos no Quadro 8.

Quadro 8 – Ensaio para caracterização do concreto

Material	Ensaio e normas
Concreto no estado fresco	ABNT NBR 16889:2020: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone ( <i>Slump test</i> )
Concreto no estado endurecido	ABNT NBR 5739:2018: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos
	Imersão em solução de 5% de sulfato de sódio
	Imersão em solução de 10% de sulfato de sódio
	Imersão em solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio
	Módulo de Elasticidade (Sonelastic)
	Verificação do peso, altura e diâmetro

Fonte: O autor (2022)

### **3.5.1 Ensaios para caracterização do concreto no estado fresco**

#### 3.5.1.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone (*Slump test*)

O ensaio de abatimento do tronco de cone será executado conforme recomenda a norma ABNT NBR 16889 (ABNT, 2020).

### **3.5.2 Ensaios para caracterização do concreto no estado endurecido**

#### 3.5.2.1 Resistência à compressão

A norma ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018), dita os procedimentos e padronizações necessárias para ensaiar a compressão em corpos de prova cilíndrico. Nas idades determinadas, e respeitando a tolerância permitido por norma, a quantidade de corpos de prova por traço de concreto foram retirados da câmara úmida ou imersão e submetidos ao ensaio mecânico de determinação da resistência à compressão simples. Para garantir a distribuição de tensões uniformemente na superfície do corpo de prova e compensar as irregularidades superficiais, o ensaio foi realizado com o auxílio de pratos de compressão.

A prensa hidráulica utilizada foi da marca Emic, modelo PCE1000C, com capacidade máxima de carga de 100.000 kgf, que faz parte do laboratório P02 da Universidade Estadual de Maringá (Figura 37). Após a ruptura de cada amostra, aferiu-se o valor de carga indicada no painel, dada em KN e depois transformada em MPa. Ainda, destaca-se que os corpos de prova que não romperam, que foram carregados até a carga de pico, são reaproveitados para a confecção de canteiro de calçadas na própria universidade. Já os que romperam foram colocados em caçamba para destinação final correta.

**Figura 37 - Prensa hidráulica para resistência a compressão**

Fonte: O autor (2022)

### 3.5.2.2 Ensaio por imersão em soluções agressivas

Para avaliar o desempenho dos concretos com as substituições por resíduo de vidro, realizou-se alguns ensaios para avaliar a resistência química do concreto. Os ensaios consistem, basicamente, na imersão dos corpos de prova a serem avaliados em soluções agressivas (Figura 38). No caso, utilizou-se três soluções: 5% de sulfato de sódio, 10% de sulfato de sódio e 5% de sulfato de sódio + 3% de cloreto de sódio. Essas soluções foram as mesmas utilizadas por Zhao, Li, Shao (2018). Os corpos de prova foram curados por 28 dias em câmara úmida e depois imersos por 28 dias e 91 dias. Nessas datas, foi aferido a resistência a compressão, módulo de elasticidade, peso e dimensões (altura e diâmetro). Vale ressaltar que os corpos de prova não sofreram nenhum tipo de tratamento prévio, como saturação em água, ou em cal, e também nenhuma impermeabilização em suas faces.

Como não há um ensaio padronizado referência, tal procedimento foi realizado conforme procedimento descrito nas pesquisas de Zhao *et al.* (2020a), Zhao *et al.* (2020b) e Zhao, Li, Shao (2018), além de ser baseado na norma japonesa JSTM C 7401 (JSTM, 1999), que descreve uma metodologia para determinar a resistência química do concreto em soluções agressivas.

**Figura 38 - Imersão das amostras**

Fonte: O autor (2022)

Ao longo do ensaio, a posição de cada amostra na imersão foi alterada a cada duas semanas, para garantir que todos os lados fossem expostos às soluções. Além disso, os compartimentos plásticos foram mantidos tampados e a solução foi renovada depois de 45 dias de imersão. Cabe ressaltar que se comparou a resistência, módulo de elasticidade, peso e dimensões após a imersão, com os corpos de prova antes da imersão, com idade de 28 dias e curados em câmara.

### 3.5.2.3 Módulo de Elasticidade

O ensaio para aferir o módulo de elasticidade foi realizado no laboratório P02 da Universidade Estadual de Maringá. Utilizou-se o Sistema Sonelastic® (Figura 39), que atende a norma ABNT NBR 8522-2 (ABNT, 2021) para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico (Ecd). O ensaio é dinâmico e a técnica utilizada é a técnica de excitação por impulso (TEI). De acordo com o fabricante, ATCP (2022), a execução do mesmo é feita em cinco partes:

- 1) Pesar e medir as dimensões do corpo de prova;
- 2) Aplicar as condições de contorno mecânicas;

- 3) Excitar e capturar a resposta acústica do corpo de prova;
- 4) Processar a resposta acústica para a identificação da frequência flexional;
- 5) Anotar o  $E_{cd}$  e estimar o  $E_{ci}$ .

Assim, com os valores de  $E_{cd}$  e densidade de cada amostra, é possível estimar o módulo de deformação tangente inicial ( $E_{ci}$ ) através da Equação 8.

$$E_{ci} = 0,107 E_{cd}^{1,4} \cdot \rho^{-1} \quad \text{Equação 8}$$

Em que,

$E_{ci}$  [Pa] é o módulo de deformação tangente inicial;

$E_{cd}$  [Pa] é o módulo de elasticidade dinâmico;

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] é a densidade do corpo de prova.

**Figura 39 - Realização do módulo de elasticidade**



Fonte: O autor (2022)

#### 3.5.2.4 Aferição do peso, altura e diâmetro

As amostras foram pesadas em uma balança eletrônica de precisão e as dimensões foram aferidas com o auxílio de um paquímetro pela média de três medidas, para maior precisão.

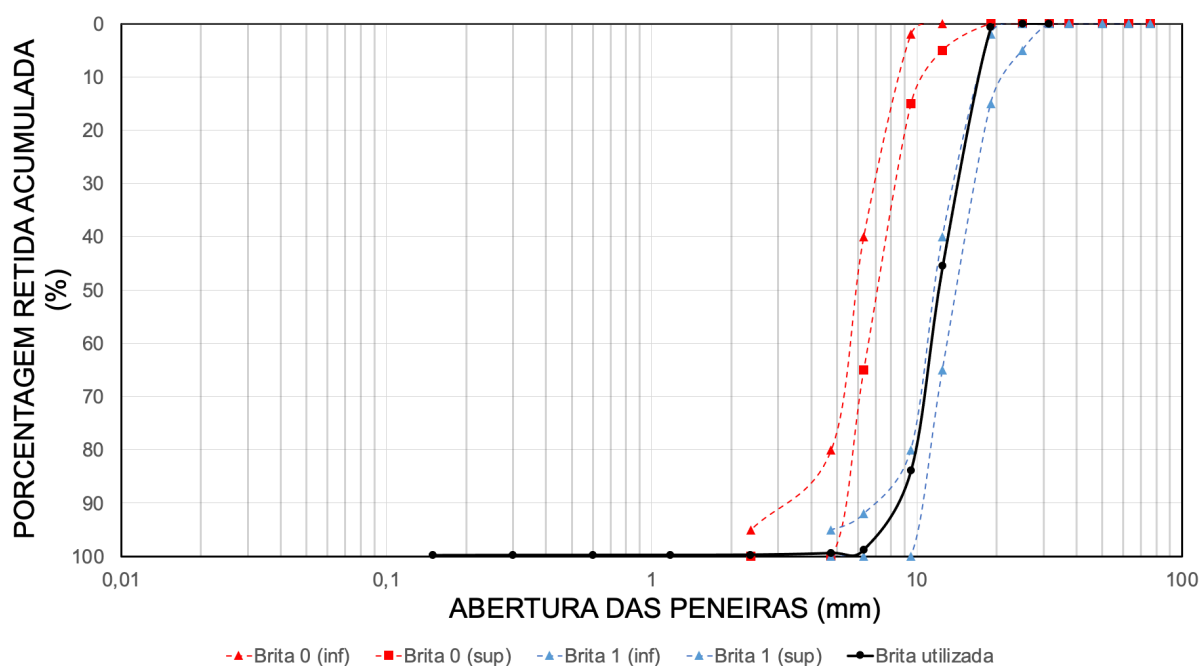
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

#### 4.1.1 Agregado Graúdo

Na caracterização do agregado graúdo utilizado, verificou-se que a massa específica foi de  $2,387 \text{ g/cm}^3$ , enquanto a massa unitária no estado solto foi de  $1,466 \text{ g/cm}^3$ . O diâmetro máximo característico da amostra foi de 19mm, o módulo de finura foi 6,82 e, pela Figura 40, a brita utilizada enquadra-se nos limites da brita 1. Ainda, a massa unitária no estado solto foi de  $1,466 \text{ g/cm}^3$  e a massa específica resultou em  $2,387 \text{ g/cm}^3$ .

Figura 40 – Curva granulométrica da brita



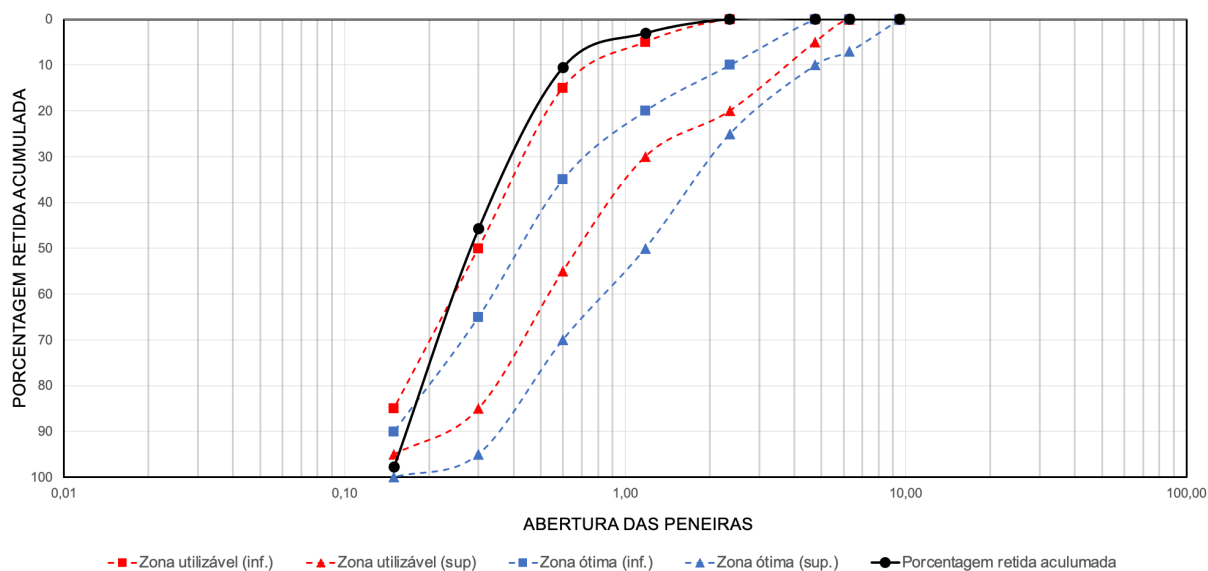
Fonte: O autor (2022)

#### 4.1.2 Agregado miúdo

Pela classificação da distribuição granulométrica do agregado miúdo, a areia utilizada, quando se analisa pelas zonas estabelecidas na norma NBR 7211 (ABNT, 2022), se enquadra fora da zona ótima e, praticamente, fora da zona utilizável em concretos. Isso ocorreu, pois, a

areia foi seca ao sol no chão, peneirada, e armazenada dentro do laboratório, onde permaneceu seca e com umidade ambiente.

**Figura 41 – Curva granulométrica da areia**



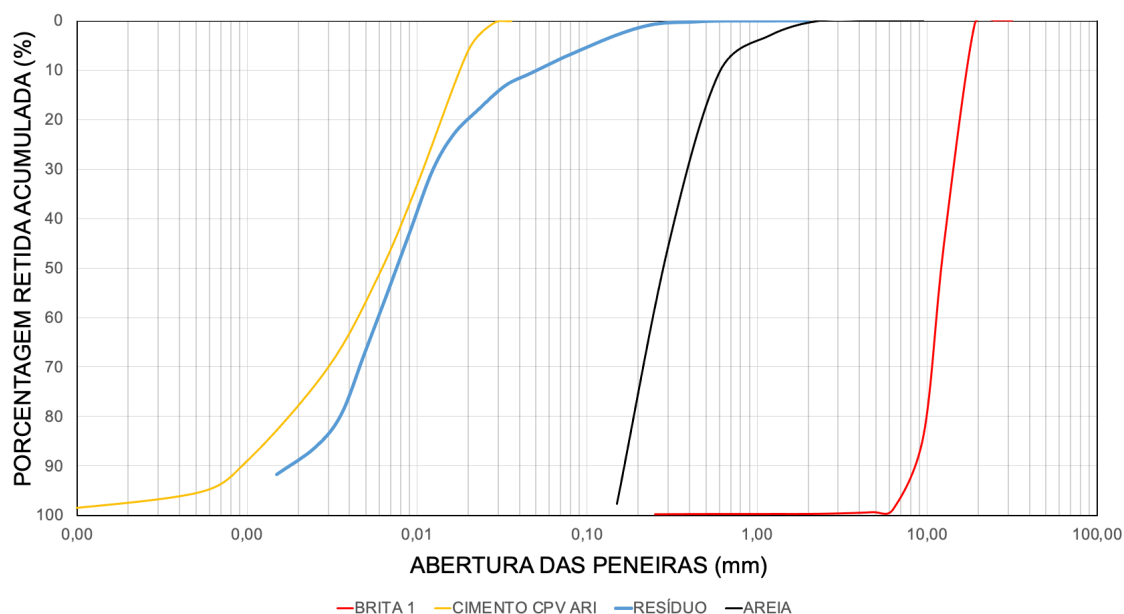
Fonte: O autor (2022)

A massa específica e a massa unitária no estado solto foram, respectivamente, iguais a 2,658 g/cm<sup>3</sup> e 1,52 g/cm<sup>3</sup>. O diâmetro máximo característico foi de 1,18 mm e o módulo de finura resultou em 1,57.

#### 4.1.3 Análise da granulometria dos materiais

Comparando as granulometrias dos agregados, aglomerantes e resíduo (Figura 42), observa-se que a distribuição das partículas do PDV, apresentados por Radke (2022), se compreende em uma região intermediária, entre a areia e o cimento, porém, está mais próxima à curva do cimento CPV do que a curva da areia, por exemplo. Verifica-se também que o cimento é mais fino do que o resíduo, devido a posição da curva.

Figura 42 – Curvas Granulométricas



Fonte: Radke (2022), Cesapolucha (2016), adaptado pelo autor.

Cabe ressaltar que o cimento CPV-ARI utilizado para a comparação foi pesquisado por Cesapolucha (2016) e cuja granulometria foi realizada pelo autor, por laser. Como foi utilizado um cimento de outra marca, espera-se que a distribuição granulométrica e parâmetros, como os diâmetros, sejam muito próximas entre as diferentes marcas existentes no mercado, desde que os cimentos sejam da mesma designação, assim como verificado por Queiroz (2018).

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

### 4.2.1 Abatimento do tronco de cone (slump)

Os corpos de prova moldados ao longo da pesquisa foram confeccionados em três lotes diferentes. Apesar de cada um destes tenha se comportado de forma particular na análise do slump, algumas tendências foram observadas. Cabe ressaltar que se optou por não utilizar aditivos que pudessem influenciar no resultado do abatimento com o objetivo de entender melhor o comportamento do resíduo na pasta.

Na confecção dos corpos de provas, verificou-se que, a medida em que se aumentava a quantidade de resíduo no concreto, diminuindo o cimento, o volume do concreto aumentava. O que já era esperado devido a diferença de volume entre o cimento e o resíduo, verificada aparentemente e visualmente na pesagem, e comprovada pela massa unitária. Como a massa unitária do resíduo é menor do que a do cimento, maior é o volume do material.



Ainda, verificou-se a grande influência da temperatura e umidade no abatimento do concreto, tanto no traço piloto quando nos traços com os resíduos. No traço piloto, cada lote foi moldado em condições climáticas diferentes e que resultaram em valor distintos de slump, de 7, 10 e 16 cm, sendo classificados em três classes de abatimento distintas (Quadro 9). Ou seja, o comportamento das amostras já no traço piloto foi adverso. Nas substituições, ocorreu a mesma situação, não sendo possível identificar um comportamento padronizado, mas sim apenas uma tendência, assim como será descrito a seguir.

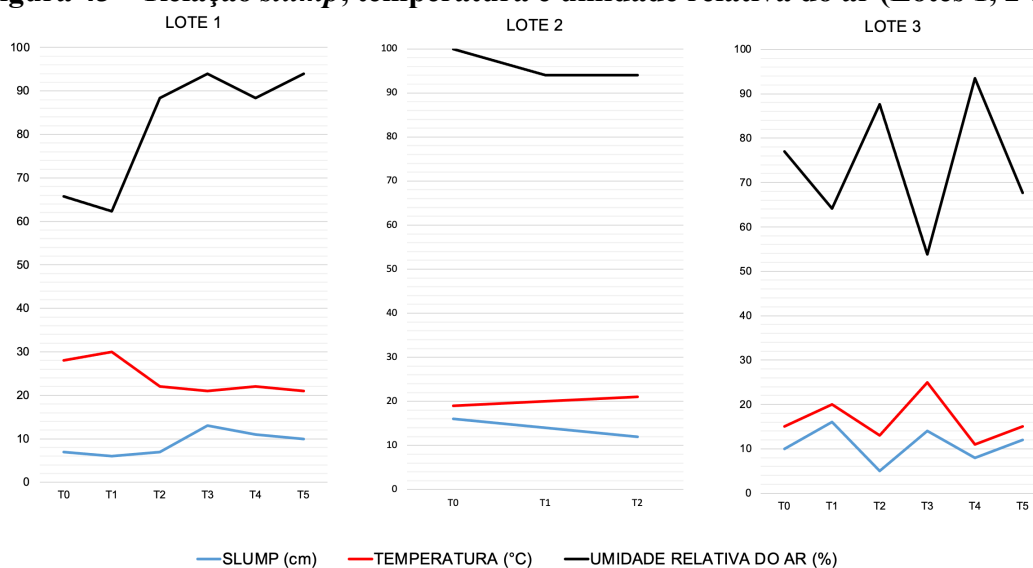
**Quadro 9 - Valores do *slump***

TRAÇO	Lote 1		Lote 2		Lote 3	
	Slump (cm)	Classe	Slump (cm)	Classe	Slump (cm)	Classe
<b>T0 (0%)</b>	7	S50	16	S160	10	S100
<b>T1 (10%)</b>	6	S50	14	S100	16	S160
<b>T2 (15%)</b>	7	S50	12	S100	5	S50
<b>T3 (20%)</b>	13	S100	-	-	14	S100
<b>T4 (25%)</b>	11	S100	-	-	8	S50
<b>T5 (30%)</b>	10	S100	-	-	12	S100

Fonte: O autor (2022)

Pela Figura 43, verifica-se que os traços T0, T1 e T2 do Lote 1 foram confeccionados em condições de muita variação em se tratando de temperatura e umidade relativa, sendo refeitos em condições climáticas mais estabilizadas e demonstradas no Lote 2. Já para o Lote 3, cada traço foi moldado em uma situação climática diferente, com muitas variações, mas que foi possível observar uma relação direta do slump com a temperatura, e inversa com a umidade relativa, diferente do que se observou no Lote 1.

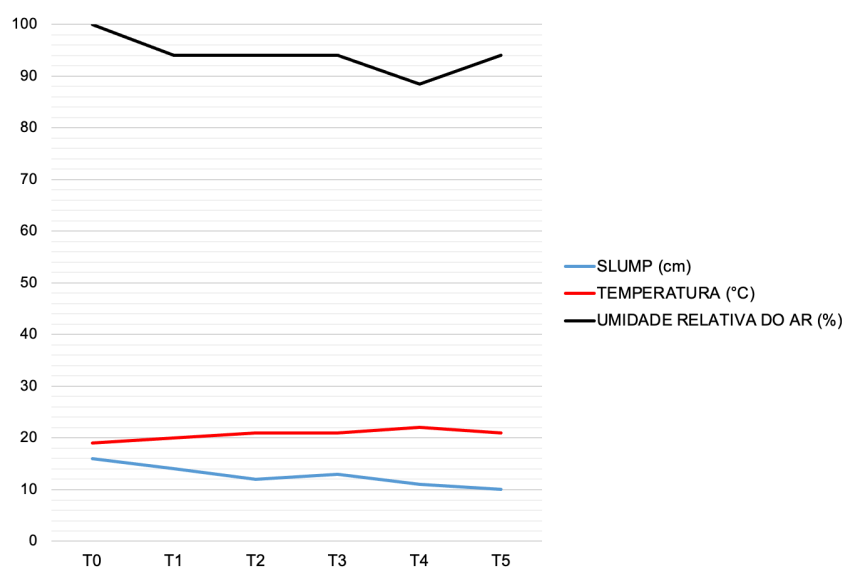
**Figura 43 – Relação *slump*, temperatura e umidade relativa do ar (Lotes 1, 2 e 3)**



Fonte: O autor (2022)

Assim, quando se analisa os traços refeitos T0, T1 e T2 do Lote 2 junto aos traços T3, T4 e T5 do Lote 1 (Figura 44), foi possível verificar que o slump dos traços variou de 10 a 16 cm, independente do teor de substituição, junto a pequena variação de umidade (>90%) e temperatura próxima a 20°C. Nessa situação, observou-se também uma leve tendência de diminuição do slump com o aumento do teor de resíduo dos concretos.

**Figura 44 – Relação slump, temperatura e umidade relativa do ar (Lotes 1 e 2)**



Fonte: O autor (2022)

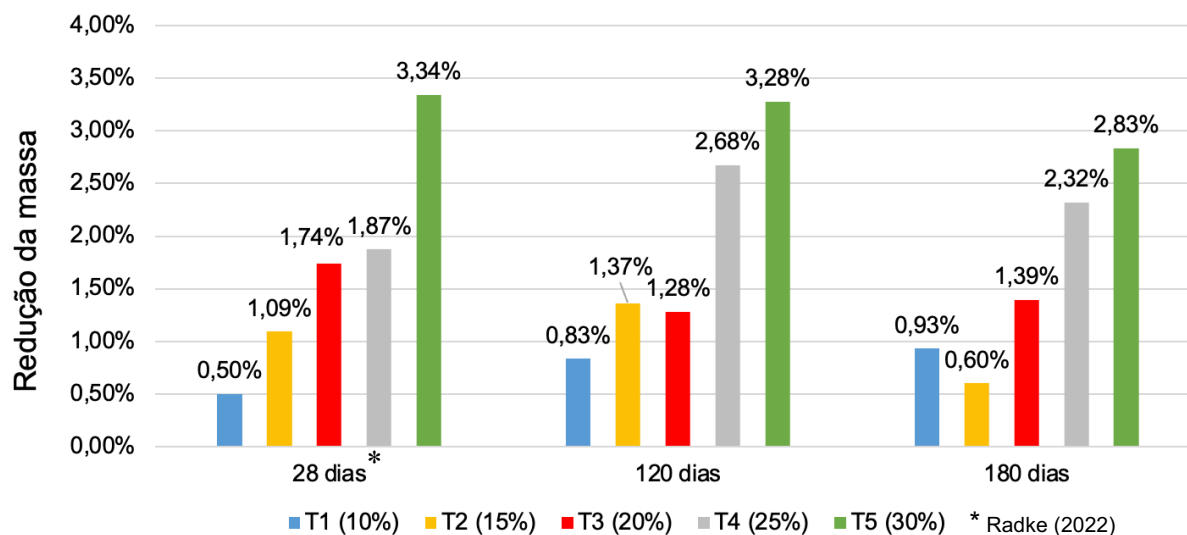
Sendo assim, é possível afirmar, a partir dessa análise, que em condições controláveis de temperatura, mantendo-a ambiente, com umidade acima de 90%, os traços com substituição se mantiveram na classe de consistência S100, com abatimento entre 10 e 16cm, ideais para elementos estruturais com lançamento convencional do concreto. Já para as condições climáticas diversas, não foi possível verificar uma tendência clara de comportamento da trabalhabilidade das substituições.

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

##### 4.3.1 Massa

Pela Figura 45, é possível verificar a redução percentual de massa dos concretos que utilizaram o resíduo de vidro quando comparados ao traço piloto. A redução ocorreu, pois, a massa específica do resíduo é menor do que a do cimento utilizado.

**Figura 45 – Redução percentual da massa**



Fonte: O autor (2022); Radke (2022)

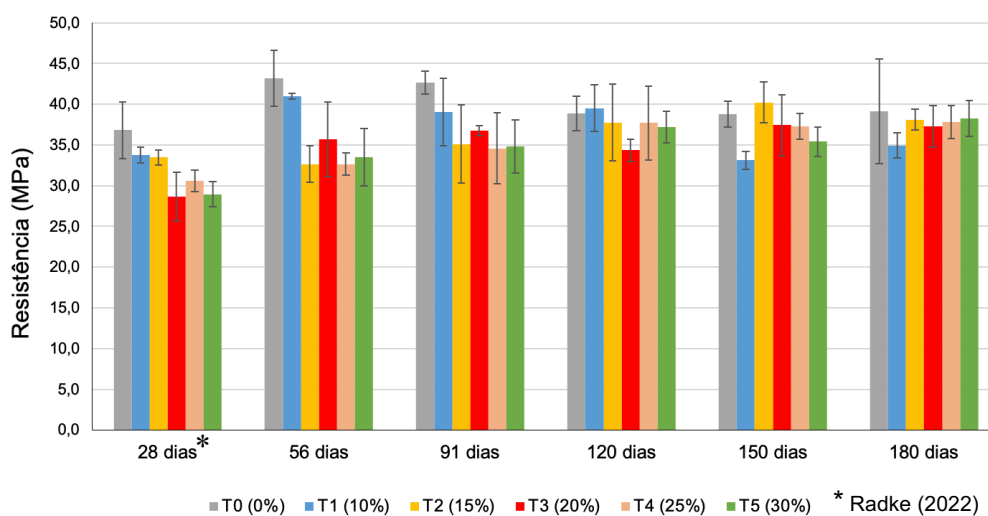
#### 4.3.2 Resistência a compressão

A seguir serão apresentados os resultados da resistência a compressão com os traços confeccionados com a relação água/cimento de 0,55 nas idades de 28, 56, 91, 120, 150 e 180 dias e para 0,60, as idades de 28, 120, 150 e 180. Os resultados em 28 dias utilizados para análise foram extraídos de Radke (2022).

##### 4.3.2.1 Resistência a compressão com fator a/c de 0,55

Os resultados da resistência a compressão com o fator a/c de 0,55 estão ilustrados na Figura 46. Observou-se que de 28 para 56 dias, todos os traços tiveram aumento de resistência, principalmente os traços T0 e T1. Em 91 dias, as resistências mantiveram um comportamento semelhante ao apresentado em 56 dias. Após 120 dias, as amostras variaram pouco sem um padrão bem definido, mas foi possível observar uma estabilização. Apesar de nenhuma amostra com substituição resultou em valor maior do que o piloto, em 180 dias, as substituições resultaram em valores muito próximos, na faixa de 34,9 MPa a 38,2 MPa, enquanto o piloto foi de 39,1 MPa.

Figura 46 – Resistência a compressão por idade



Fonte: O autor (2022)

Os valores também podem ser observados pela Tabela 23.

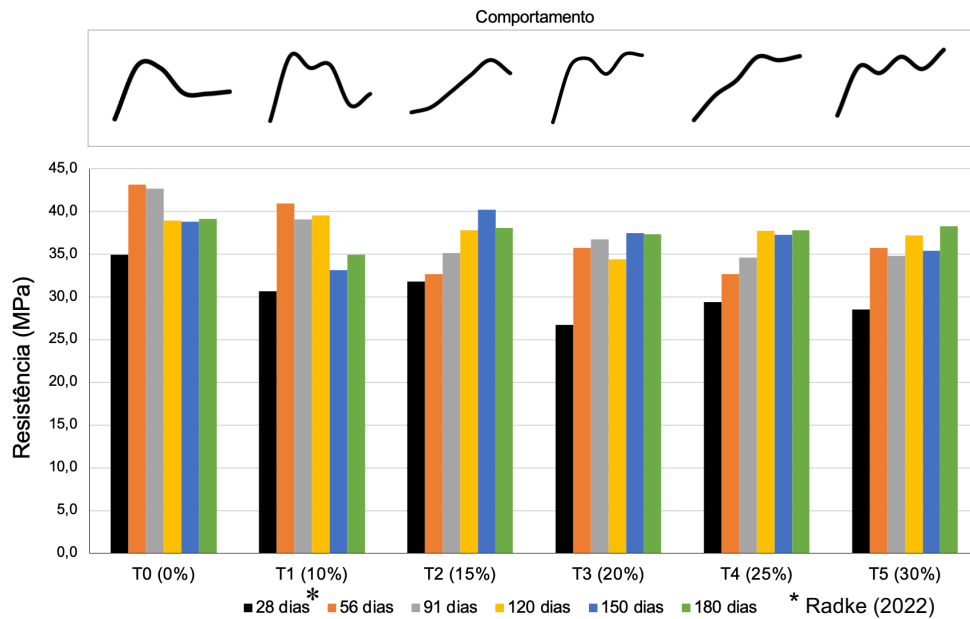
Tabela 23 - Resistência a compressão média e desvio padrão (MPa)

Traço	28 dias (Radke, 2022)		56 dias		91 dias		120 dias		150 dias		180 dias	
	fcm	Dp	fcm	Dp	fcm	Dp	fcm	Dp	fcm	Dp	fcm	Dp
T0 (0%)	36,8	3,5	43,2	3,4	42,7	1,4	38,9	2,1	38,8	1,6	39,1	6,4
T1 (10%)	33,8	1,0	41,0	0,4	39,1	4,2	39,5	2,9	33,1	1,1	34,9	1,5
T2 (15%)	33,5	0,9	32,6	2,2	35,1	4,8	37,8	4,7	40,2	2,5	38,1	1,3
T3 (20%)	28,7	3,0	35,7	4,6	36,8	0,6	34,4	1,4	37,4	3,7	37,3	2,5
T4 (25%)	30,6	1,3	32,6	1,4	34,6	4,4	37,7	4,5	37,3	1,6	37,8	2,0
T5 (30%)	29,0	1,5	33,5	3,6	34,8	3,3	37,2	1,9	35,4	1,8	38,2	2,2

Fonte: O autor (2022)

Quando se analisa o comportamento por traço, de forma separada, é possível verificar que a variação da resistência ao longo das idades foi distinta entre si, em que nenhum traço se comportou exatamente igual a outro (Figura 47). Porém, algumas tendências foram observadas. No traço T0(0%), por exemplo, é possível verificar um grande aumento de resistência em 56 dias, seguido por uma queda e estabilização do valor, o que também ocorreu no T1 (10%). A partir de 15% as amostras tendem a ter um crescimento até maiores idades sem que haja grandes percas de resistência. Ou seja, até 10% de substituição, a resistência se comporta semelhante ao traço piloto, com queda da resistência a partir de 56 dias e, a medida que se aumenta a porcentagem de substituição, a resistência tende a crescer de forma progressiva, a partir de 56 dias, sem grandes percas.

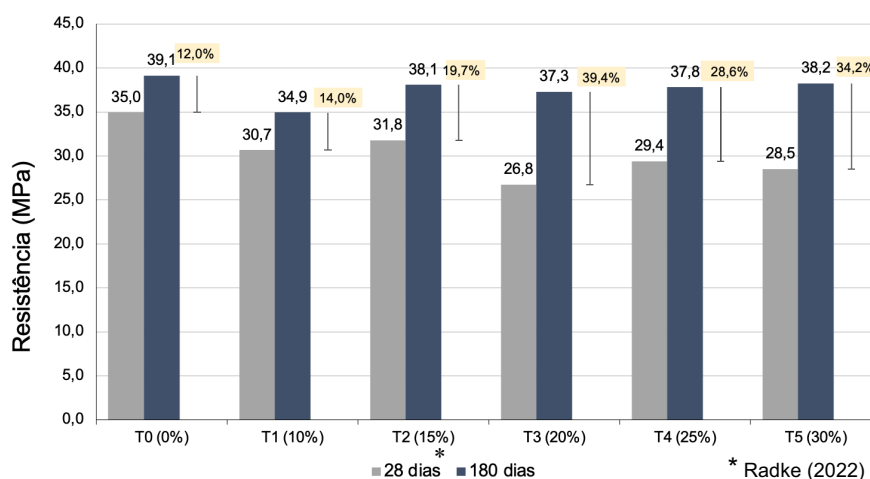
Figura 47 – Resistência a compressão por traço



Fonte: O autor (2022)

Ao analisar apenas as idades de 28 dias e 180 dias (Figura 48) verifica-se que todos os traços tiveram ganho de resistência e os com substituição tiveram maior variação de resistência do que o piloto. Assim, é possível afirmar que os concretos com resíduo de vidro ganham sua resistência em maiores idades. O traço T3 e T5 foram os que tiveram maior variação ao longo dos meses, chegando a 39,4% e 34,2% de aumento, respectivamente, enquanto o piloto teve aumento de 12%. Os traços que utilizaram a substituição tiveram um crescimento de resistência entre 14% e 39,4% sendo assim, 24,6% em média.

Figura 48 – Variação percentual entre 28 e 180 dias (a/c 0,55)



Fonte: O autor (2022)

Portanto, assim como verificado por Chandra, Šavija, Babafemi (2018) e Patel *et al.* (2019), a reação pozolânica realmente ocorre em maiores idades, densificando a microestrutura, o que será verificado pelo módulo de elasticidade também. Ao início, o resíduo se comporta como filer, apenas preenchendo os vazios do material. Somente com o aumento da formação de C-S-H, e com o tempo, a reação pozolânica do material ocorre de fato.

Ainda, na Tabela 24, verifica-se a variação percentual dos traços com o resíduo em comparação com os valores do traço piloto. Observa-se que o T5, por exemplo, inicia-se em 28 dias com uma resistência 27,23% menor do que sua referência e ao final de 180 dias, essa diferença passa a ser apenas 2,35%. Assim, quanto maior a substituição, menor foi a variação do valor em relação ao traço referência.

**Tabela 24 – Variação da resistência em relação ao traço piloto**

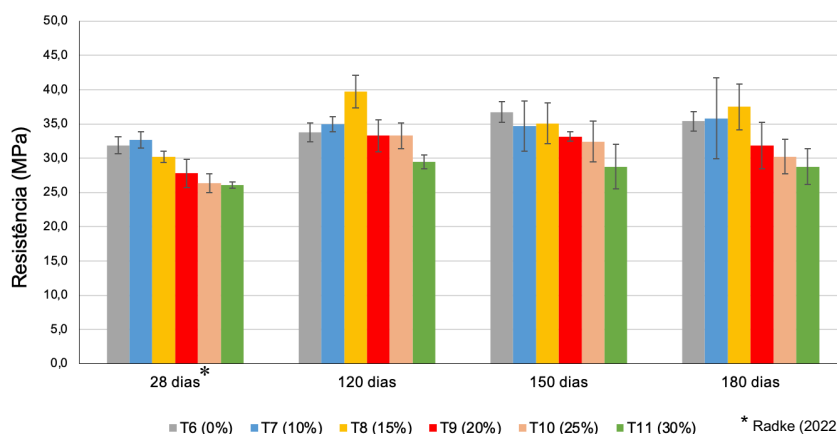
Traço	28 dias	56 dias	91 dias	120 dias	150 dias	180 dias
T1 (10%)	-9,14%	-5,41%	-9,35%	1,60%	-17,10%	-12,02%
T2 (15%)	-10,06%	-32,28%	-21,65%	-3,00%	3,48%	-2,64%
T3 (20%)	-28,49%	-20,92%	-16,19%	-13,19%	-3,65%	-4,92%
T4 (25%)	-20,44%	-32,28%	-23,41%	-3,18%	-4,11%	-3,53%
T5 (30%)	-27,23%	-28,86%	-22,70%	-4,57%	-9,60%	-2,35%

Fonte: O autor (2022)

#### 4.3.2.2 Resistência a compressão com fator a/c de 0,60

Para os traços moldados com o fator 0,60, tem-se os resultados apresentados pela Figura 49. Os valores em 120, 150 e 180 dias foram comparados com os dados iniciais em 28 dias, analisadas por Radke (2022). As idades de 56 e 91 dias não foram ensaiadas pois o enfoque maior dessa pesquisa foi nos traços com menos água em sua composição. Dessa forma, houve uma semelhança entre o comportamento dos traços em 28 e 150 dias, e entre 120 e 180 dias. O traço T8 (15%) ganhou destaque por resultar em valores maiores do que o piloto ao final de 180 dias. Também, o traço T7 (10%) se comportou de forma muito semelhante ao traço piloto. Os resultados também podem ser verificados pela Tabela 25.

Figura 49 – Resistência a compressão (a/c 0,60)



Fonte: O autor (2022)

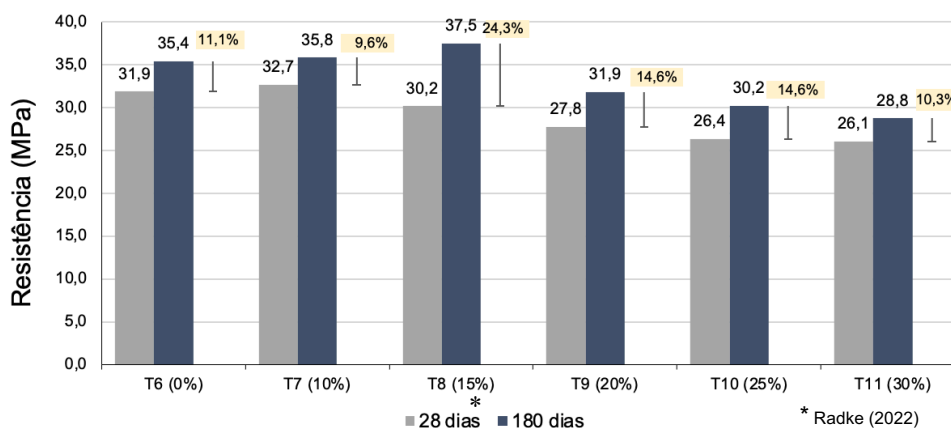
Tabela 25 - Resistência a compressão média e desvio padrão (MPa)

Traço	28 dias		120 dias		150 dias		180 dias	
	fcm	Dp	fcm	Dp	fcm	Dp	fcm	Dp
T6 (0%)	31,9	1,2	33,8	1,4	36,7	1,5	35,4	1,4
T7 (10%)	32,7	1,2	35,0	1,1	34,7	3,6	35,825	5,9
T8 (15%)	30,2	0,8	39,7	2,4	35,1	3,0	37,5	3,3
T9 (20%)	27,8	2,1	33,3	2,3	33,2	0,7	31,85	3,4
T10 (25%)	26,4	1,3	33,3	1,9	32,4	3,0	30,225	2,5
T11 (30%)	26,1	0,5	29,5	1,0	28,8	3,3	28,775	2,6

Fonte: O autor (2022)

Entre 28 e 180 dias não se verificou grande ganho de resistência com o tempo. O traço que teve maior variação da resistência foi o T8, variando 24,3% entre as idades. Assim, para esse fator a/c, a substituição de 15% foi a que obteve melhores resultados.

Figura 50 - Variação percentual entre 28 e 180 dias (a/c 0,60)



Fonte: O autor (2022)

Ainda, pode-se verificar pela Tabela 26 a diferença percentual entre os traços com o resíduo com o traço piloto. Verifica-se que a resistência fica com valores muito menores, ainda mais quando comparado aos resultados obtidos com o fator a/c de 0,55. Entretanto, foi possível atingir valores maiores do que o piloto com os traços T6 (10%) e T7 (15%).

**Tabela 26 - Variação da resistência em relação ao traço piloto (a/c 0,60)**

Traço	28 dias	120 dias	150 dias	180 dias
T6 (10%)	2,50%	3,43%	-5,86%	1,19%
T7 (15%)	-5,64%	15,02%	-4,75%	5,60%
T8 (20%)	-14,70%	-1,50%	-10,75%	-11,15%
T9 (25%)	-20,86%	-1,40%	-13,26%	-17,12%
T10 (30%)	-22,17%	-14,46%	-27,69%	-23,02%

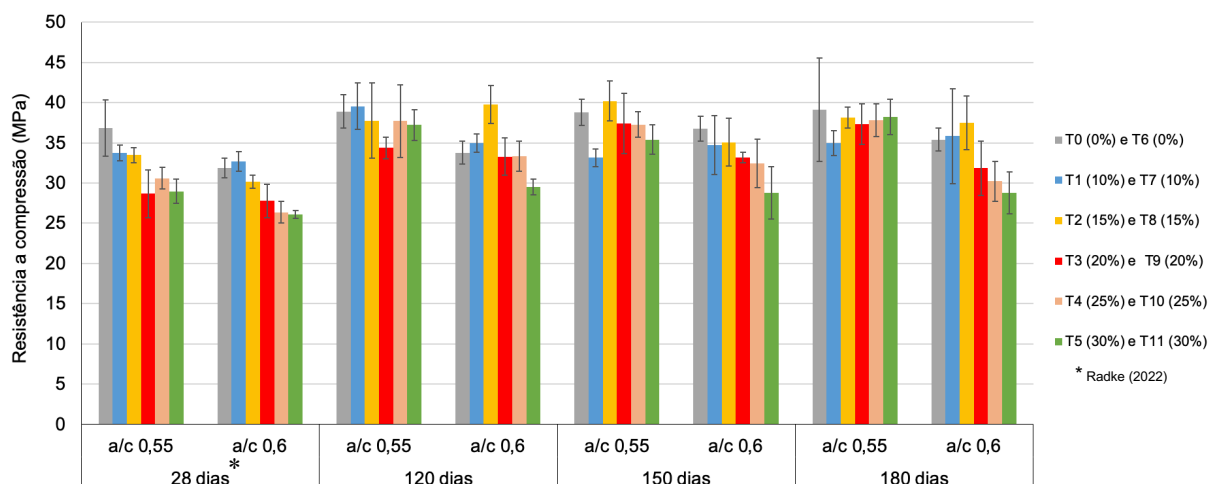
Fonte: O autor (2022)

#### 4.3.2.3 Comparação das resistências com a/c 0,55 e 0,60

A Figura 51 traz os dados das resistências a compressão dos traços moldados utilizando o fator a/c de 0,55 comparados com os resultados com a/c de 0,60. Tal imagem ilustra a redução na resistência quando se aumenta a quantidade de água no traço, que foi observado já em 28 dias por Radke (2022) e confirmados em maiores idades por esta pesquisa, principalmente em teores altos de substituição. As resistências nos traços com a/c 0,55 permaneceram superiores praticamente em todas as amostras e em todas as idades. Em 180 dias, os traços com substituição maiores do que 20% se comportaram de formas distintas entre os dois fatores, em 180 dias. Os traços que se destacaram com a/c de 0,60 foram o T7 (10%) e T8 (15%), que se mantiveram com maiores resistências, inclusive maiores do que o traço piloto (T6). Porém, quando comparados aos valores com a/c 0,55, foram menores do que os traços T2, T3, T4 e T5.

Não se verificou um comportamento idêntico entre os dois fatores ao longo das substituições, e nem no traço piloto. Para o piloto, é possível verificar que a partir de 120 dias, o valor da resistência se estabilizou, independente do fator. Cabe destacar a grande diferença entre a T5 e T11, ambos com 30% de substituição. Enquanto em 28 dias os valores são próximos, a partir de 120 dias eles se diferem bastante, demonstrando a tendência de utilizar grandes substituições à medida que se reduz a quantidade de água da mistura.



**Figura 51 - Resistência a compressão em 28, 120, 150 e 180 dias com a/c de 0,55 e 0,60**

Fonte: O autor (2022)

Kalakada, Doh e Zi (2020), em sua pesquisa, já verificaram que os concretos com os menores fatores de a/c resultaram em maiores valores de resistência a compressão. Isso pode ocorrer devido a diferença na quantidade de cimento do concreto, quando menor o fator, conseqüentemente maior a quantidade de aglomerante. Também, como o PDV é um material praticamente impermeável e sua hidratação é tardia, o fator a/c que efetivamente ocorre nas primeiras idades é maior do que o real e que foi utilizado na mistura. O que se espera ao longo das idades é a hidratação progressiva do resíduo até se chegar na proporção de água e cimento previamente determinada. Assim, para o fator 0,60, supõe-se que há um excesso de água inicial não utilizado nem na hidratação do cimento, e nem em maiores idades, absorvido pelo resíduo, já que não houve aumento de resistência, principalmente em maiores teores de substituição.

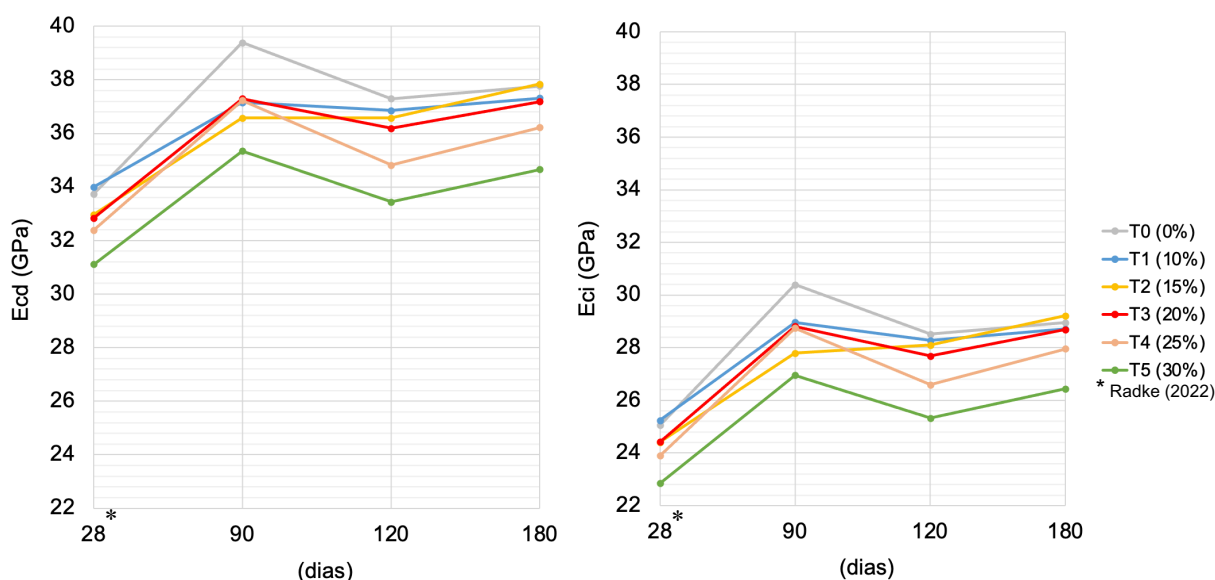
### 4.3.3 Módulo de Elasticidade

A seguir serão apresentados os resultados do módulo de elasticidade obtidos pelo aparelho Sonelastic®, normatizado pela ABNT NBR 8522-2 (ABNT, 2021), com traços confeccionados com a relação água/cimento de 0,55 nas idades de 28, 91, 120, e 180 dias e para 0,60, as idades de 28, 150 e 180. Os resultados em 28 dias utilizados para análise foram os publicados por Radke (2022).

#### 4.3.3.1 Módulo de elasticidade com fator a/c de 0,55

Pela Figura 52, é possível verificar o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{cd}$ ) e o módulo de deformação tangencial inicial ( $E_{ci}$ ). Ambos possuem o mesmo comportamento ao longo das idades. Observou-se um aumento do módulo em 90 dias, seguido por uma queda em 120 dias e um leve aumento em 180 dias. Apesar das variações no traço piloto ao longo das idades, ao final do estudo, os valores do T0, T1, T2 e T3 ficaram muito próximos entre si, apenas o T4 e o T5 que resultaram em valores menores. Tal resultado se comportou um pouco diferente da resistência a compressão, em que T2, T3, T4 e T5 tiveram valores muito próximos.

**Figura 52 – Módulo de elasticidade e deformação tangencial (a/c 0,55)**

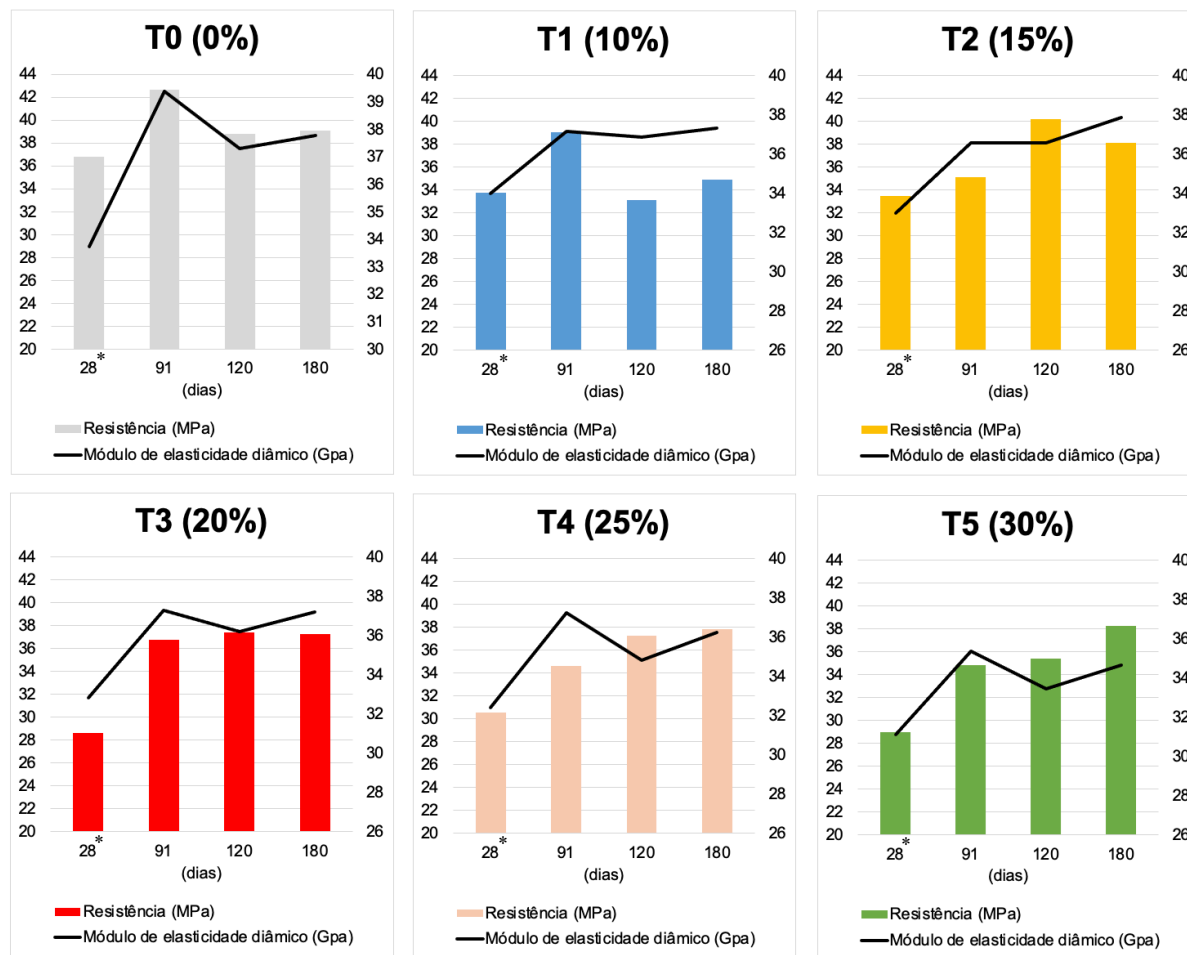


Fonte: O autor (2022)

Quando se avalia o traço piloto, verifica-se que há um grande ganho seguido de queda em que, não se retorna ao valor de pico ao final de 180 dias. Já nos traços com substituição, há um ganho inicial em 90 dias, da mesma forma, porém ao final de 180 dias, eles retomam a valores próximos ou maiores de módulo de elasticidade.

Para esse fator, já se verifica uma mudança entre o T0 e T1. A substituição de 10% não obteve bons resultados na resistência, quando comparado aos outros, mas seu módulo se comportou semelhante aos outros, inclusive semelhante ao traço piloto. Enquanto no T0 há um aumento brusco no seu valor do módulo primeiras idades, essa mudança é mais suave no T1 e se mantém constante nas outras idades. O comportamento do módulo diferiu do que ocorreu na resistência, em que não só T2 e T3 tiveram valores muito próximos, mas também T4 e T5. Ao final de 180 dias, o T0 ficou muito próximo dos valores de T2 a T5.

**Figura 53 - Correlação resistência a compressão e módulo de elasticidade dinâmico (a/c 0,55)**



\* Radke (2022)

Fonte: O autor (2022)

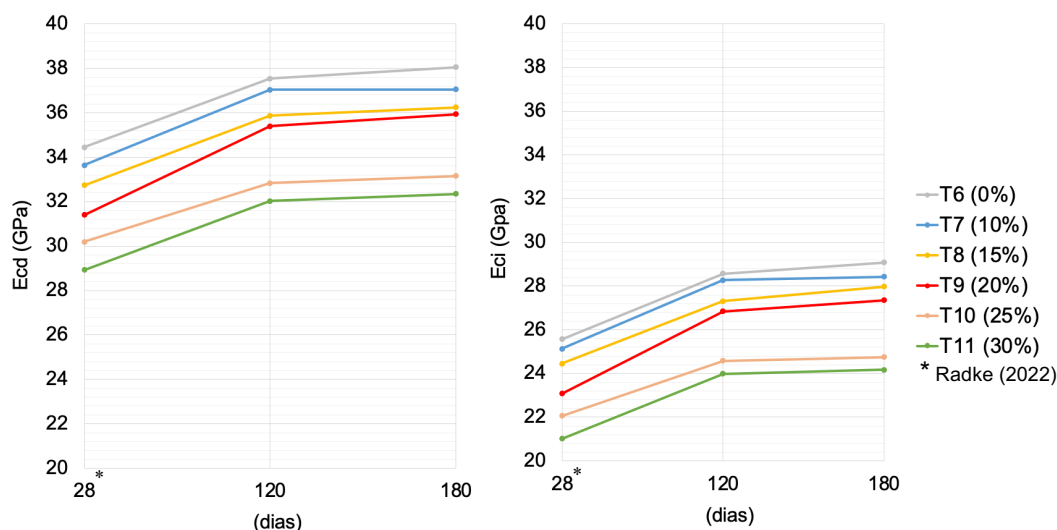
Ficou evidente que o resíduo age de forma tardia e na microestrutura do concreto. Assim como destacado por Liu, Zon e Song (2018), enquanto o módulo mede a vibração elástica ao longo de pequenas deformações da amostra, a resistência a compressão é obtida com a carga de pico, em um cenário geral, sendo portanto, o módulo um parâmetro do comportamento com ênfase no que ocorre nas menores partes da estrutura.

#### 4.3.3.2 Módulo de elasticidade com fator a/c de 0,60

Pela Figura 54, é possível verificar o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{cd}$ ) e o módulo de deformação tangencial inicial ( $E_{ci}$ ) dos traços moldados com a/c 0,60. O que ficou evidente foi, com o aumento do teor de substituição, menor foi o valor dos módulos. Tal fenômeno não

se verificou claramente nos concretos com menor fator. Observa-se um pequeno crescimento entre 28 e 120 dias e depois uma estabilização até 180 dias, ou seja, em maiores idades, o resíduo não surtiu um efeito pozolânico refletindo no ganho de resistência tardio.

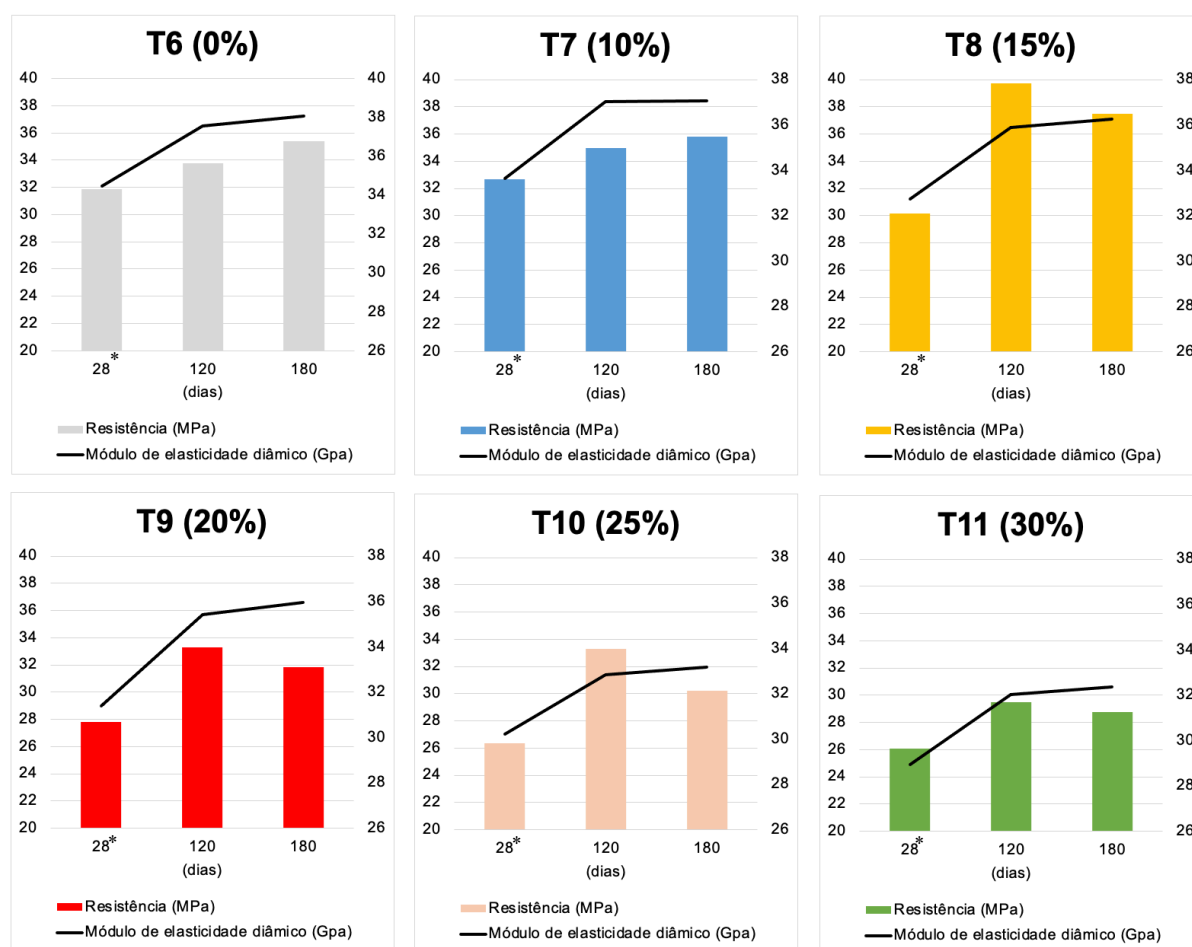
**Figura 54 - Módulo de elasticidade e deformação tangencial (a/c 0,60)**



Fonte: O autor (2022)

Os valores de módulo e resistência a compressão estão em acordo. Em geral, com o aumento da substituição, reduziu-se o valor da resistência e, da mesma forma, reduziu-se o valor do módulo (Figura 55). Diferente do que ocorreu com a/c de 0,55, ficou evidente que, em todas as idades, o módulo dos traços T6 até T9 (0% a 20%) foram muito próximos um do outro e que o T10 (25%) e T11 (30%) tiveram valores menores do que os outros. Assim, para o fator de água de 0,60, a partir da verificação da resistência e do módulo de elasticidade, pode-se afirmar que a substituição fica limitada em 15%. Teores maiores que esse resultaram em prejuízos na matriz cimentícia, reduzindo seu desempenho.

**Figura 55 – Correlação resistência a compressão e módulo de elasticidade dinâmico (a/c 0,60)**



\* Radke (2022)  
Fonte: O autor (2022)

#### 4.3.4 Variação percentual da resistência e módulo em relação ao traço piloto

As substituições tem como objetivo principal resultarem em valores muito próximos, ou até maiores, do que o traço referência, sem o resíduo. Assim, a Tabela 27 traz os valores de comparação das substituições ao longo das idades de dois parâmetros, do módulo de elasticidade dinâmico e da resistência a compressão, para o fator 0,55. Nesse caso, quanto menor a variação, mais próximos são os resultados do concreto produzido sem o resíduo. Como já verificado, a resistência ficou mais próxima do traço piloto à medida que se aumentava o teor e com idades mais tardias. O que também ocorreu no módulo na maioria dos traços. O módulo teve uma redução de 9% para o traço T5 e de 0,2% para o T2.

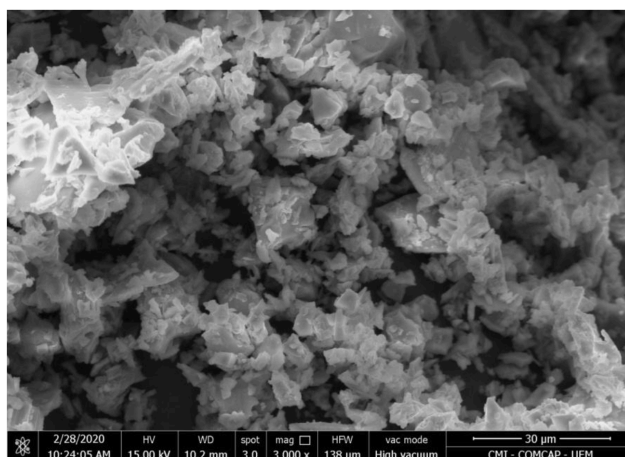
**Tabela 27 -Variação percentual módulo de elasticidade e resistência a compressão**

Traço	28 dias		91 dias		120 dias		180 dias	
	Res.	Mod.	Res.	Mod.	Res.	Mod.	Res.	Mod.
T1 (10%)	-9,1%	0,7%	-9,3%	-6,0%	-17,1%	-1,2%	-12,0%	-1,2%
T2 (15%)	-10,1%	-2,4%	-21,7%	-7,7%	3,5%	-2,0%	-2,6%	0,2%
T3 (20%)	-28,5%	-2,8%	-16,2%	-5,6%	-3,7%	-3,0%	-4,9%	-1,6%
T4 (25%)	-20,4%	-4,2%	-23,4%	-5,8%	-4,1%	-7,1%	-3,5%	-4,3%
T5 (30%)	-27,2%	-8,5%	-22,7%	-11,4%	-9,6%	-11,5%	-2,4%	-9,0%

Fonte: O autor (2022)

#### 4.3.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A título de comparação, pelo que foi apresentado por Radke (2022), o resíduo de vidro individualmente possui formato irregular, típico de materiais amorfos, assim como verificado na Figura 56 com ampliação da amostra em 3000x.

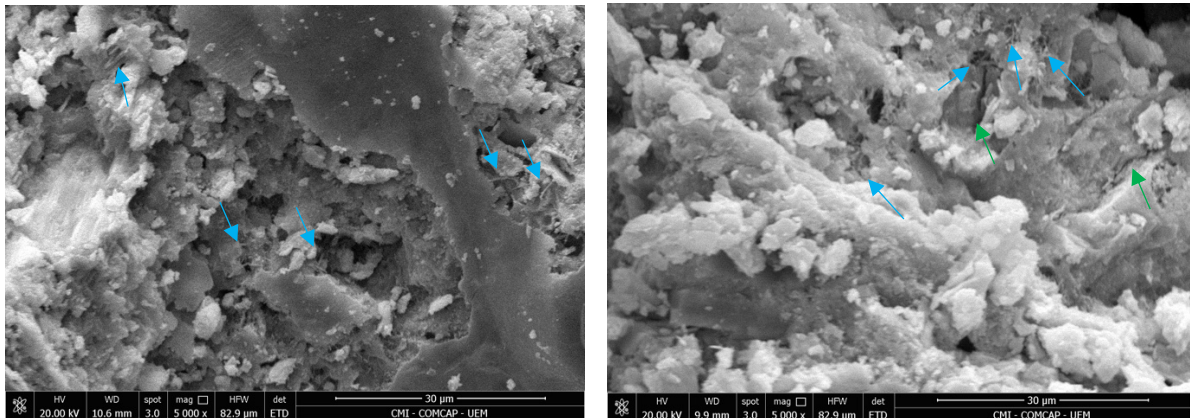
**Figura 56 – Pó de vidro**

Fonte: Radke (2022)

As figuras a seguir (Figura 57, Figura 58, Figura 59, Figura 60, Figura 61, Figura 62) trazem os resultados do MEV dos traços confeccionados com fator  $a/c$  de 0,55 nas idades de 120 e 180 dias, todas na ampliação de 5000x. Comparando a imagem do resíduo com as figuras da microscopia, não foi possível distinguir o resíduo de elementos como portlandita, por exemplo, o que indica um encapsulamento das partículas do vidro pela pasta de cimento hidratada, ou vice-versa. Foram destacados alguns itens que são visíveis na análise. Cabe ressaltar que são apenas suposições, pois a análise foi realizada de forma visual dos elementos das fases de hidratação e não por análise da composição química. Nas imagens, as setas verdes



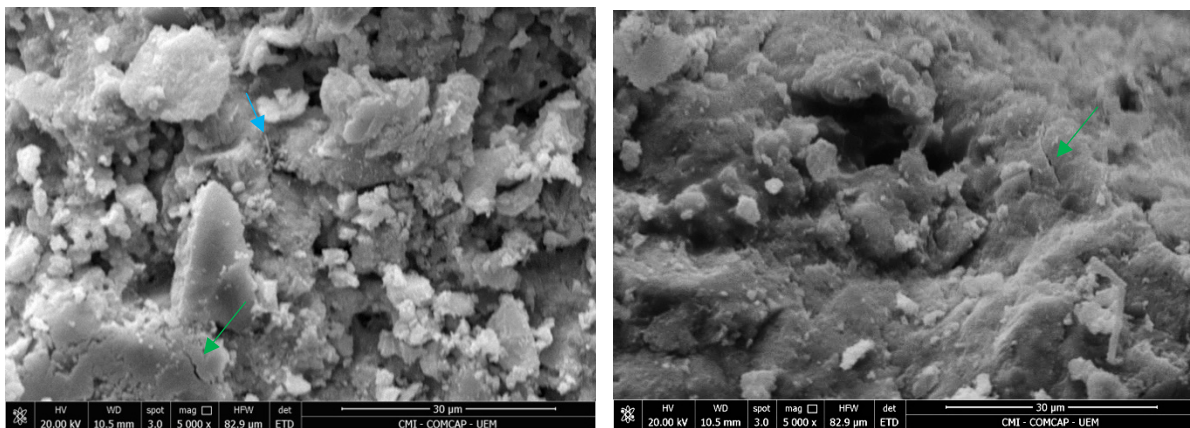
**Figura 60 - Traço T3 (20%) em (a) 120 e (b) 180 dias**



→ Microfissuras (a)      → Etringita      → Portlandita      → C-S-H (b)

Fonte: O autor (2022)

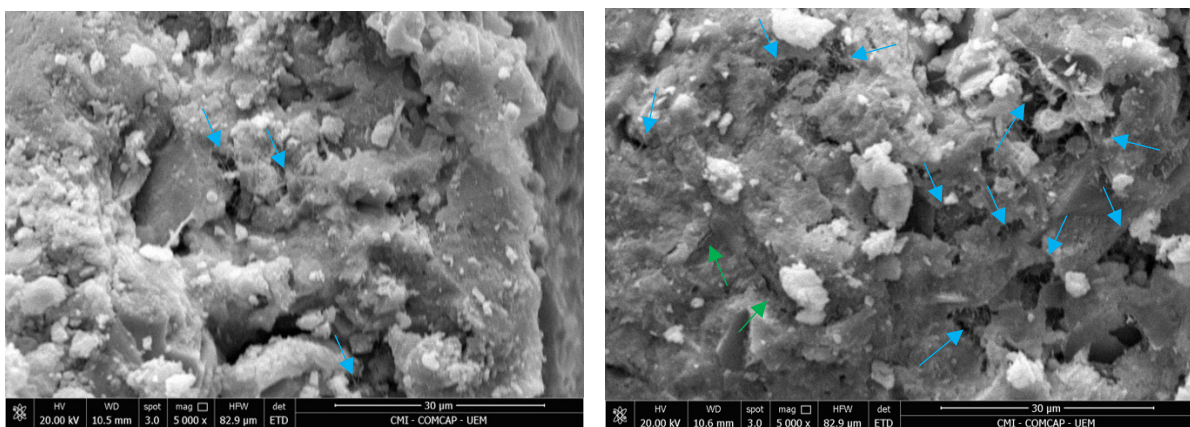
**Figura 61 - Traço T4 (25%) em (a) 120 e (b) 180 dias**



→ Microfissuras (a)      → Etringita      → Portlandita      → C-S-H (b)

Fonte: O autor (2022)

**Figura 62 - Traço T5 (30%) em (a) 120 e (b) 180 dias**



→ Microfissuras (a)      → Etringita      → Portlandita      → C-S-H (b)

Fonte: O autor (2022)



Assim, foi possível verificar etringita formada em praticamente todas as amostras em todas as idades. Verificou-se que com o aumento do teor de substituição, houve menos fissuras nas amostras e com menor extensão. No traço piloto e nos traços até 20% as fissuras se apresentaram mais extensas e com maior espessura. Para o T4 e T5, observou-se poucas e pequenas fissuras, o que pode explicar os valores das resistências se manterem altos. Ainda, verifica-se que o T5 apresentou muita etringita nos microporos da estrutura. Hojo e Martins (2017) comentam que a formação de mais etringita e portlandita em concretos pode reduzir a resistência a compressão, porém tal fenômeno não se verificou. Sendo assim, supõe-se que apesar da grande quantidade de etringita formada em 180 para o T5, por exemplo, há também uma formação do C-S-H que mantém as resistências muito próximas ao traço piloto.

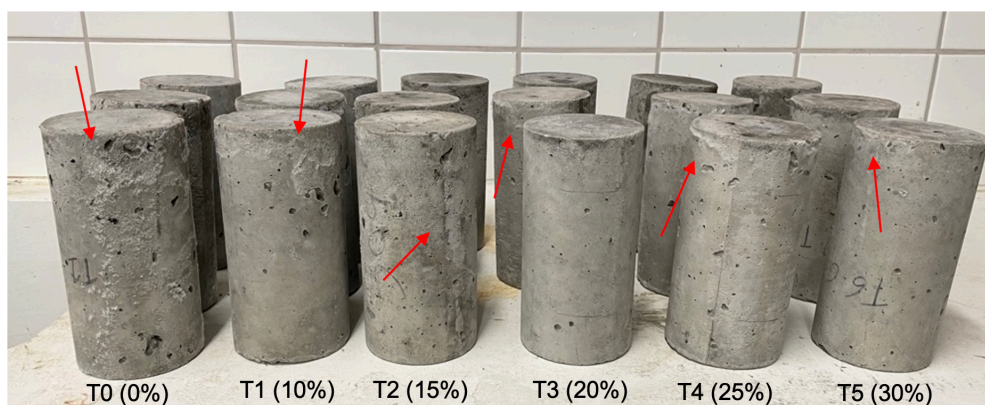
#### 4.4 ATAQUE DE SULFATOS E CLORETOS

A seguir, serão abordados alguns parâmetros para avaliar a resistência dos concretos estudados ao ataque de sulfatos e sulfatos com cloretos. Para maior facilidade, em alguns momentos serão utilizadas algumas siglas, “CAM” para as amostras na câmara mantidas em câmara úmida, “5S” para solução de 5% de sulfato de sódio, “10S” para solução com 10% de sulfato de sódio e “5S+3C” para a solução mista, de 5% de sulfatos e 3% de cloretos.

##### 4.4.1 Inspeção visual

Ao longo do período de exposição, não se verificou nenhuma fissura ou desprendimento de parte do concreto em nenhuma amostra. O que se observou foi o acúmulo superficial de sulfatos ao redor de todas as amostras imersas em 10% de sulfatos e em 91 dias de imersão. Na Figura 63 é possível ver diversos pontos de acúmulo do material, principalmente no traço piloto. Era evidente que havia mais material acumulado no traço piloto do que nos outros corpos de prova (Figura 64).

**Figura 63 – Inspeção visual CPs imersos em 10% de sulfatos, em 91 dias**



Fonte: O autor (2022)

**Figura 64 – Inspeção visual traço piloto (Solução de 10% de sulfatos)**



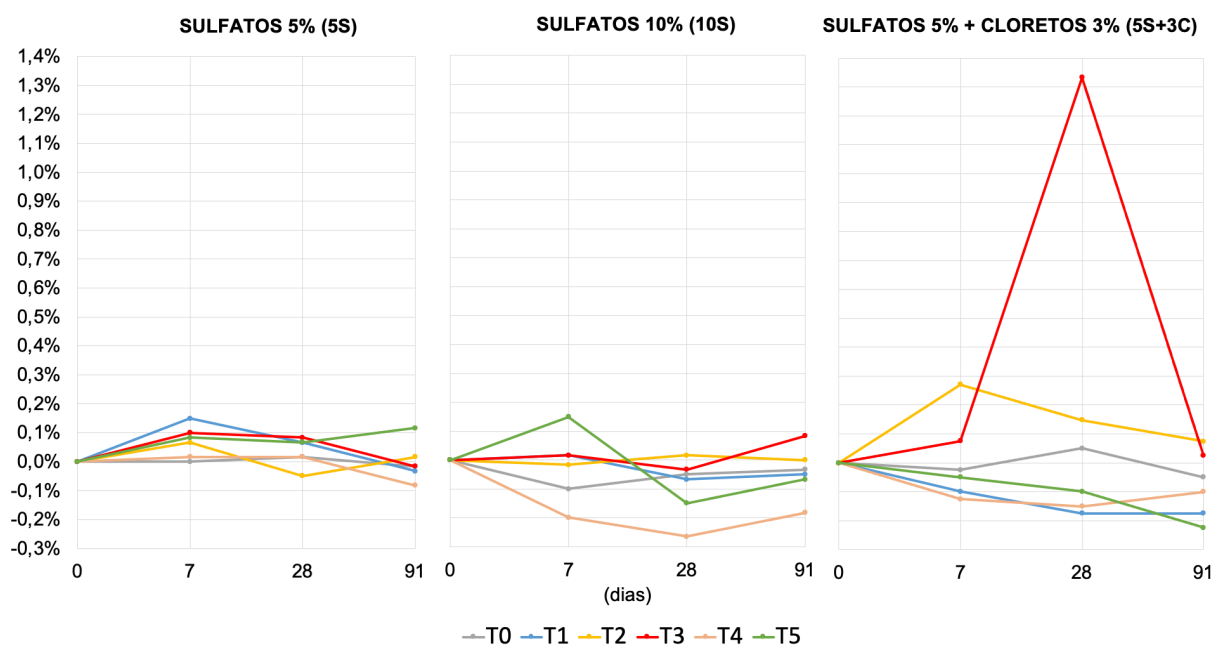
Fonte: O autor (2022)

#### **4.4.2 Variação dimensional e do peso**

##### **4.4.2.1 Variação da altura**

A variação percentual da altura foi medida comparando os valores após o tempo de imersão com o valor inicial, antes da imersão (Figura 65).

Figura 65 – Variação percentual da altura



Fonte: O autor (2022)

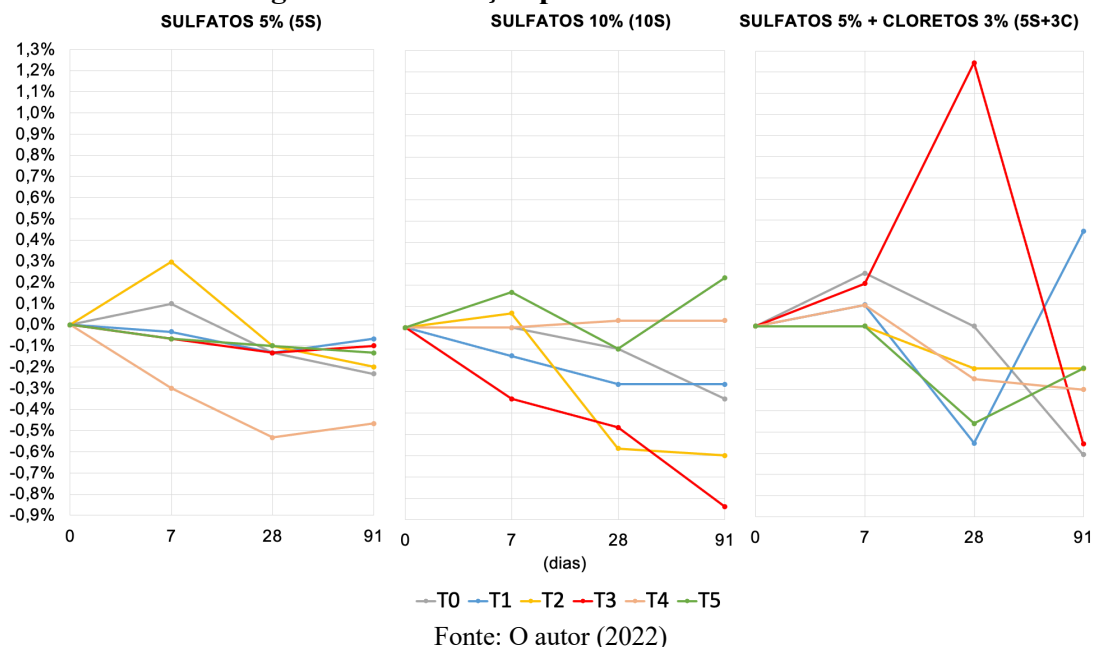
Assim, verifica-se que para a solução de 5% de sulfatos, os traços variaram muito pouco, entre 0,2% e -0,1%. Na solução 10S, a variação também não foi alta, variando entre 0,2% e -0,3%, com uma perda maior para o traço T4. Já para a solução mista, houve uma variação grande no traço T3 em 28 dias, aumentando sua altura em 1,3% e depois reduzindo-a. Tal evento também será verificado a seguir em seu diâmetro.

#### 4.4.2.2 Variação do diâmetro

A variação do diâmetro do corpo de prova foi verificada ao longo do período de imersão e comparada ao valor do diâmetro antes da imersão (Figura 66). Não foi possível observar uma tendência de acordo com o teor de substituição ou solução ao qual as amostras estavam submetidas. Porém, verifica-se que as variações foram maiores do que as constatadas na altura. Para a solução 5S, de 28 a 91 dias os diâmetros variaram muito pouco, com exceção do T4 (25%), que chegou a reduzir 0,5% de seu diâmetro. Na solução de 10%, cada traço se comportou diferente, porém com uma tendência de diminuição do diâmetro. Destaque ao T3, que perdeu cerca de 0,8% de sua altura e teve um comportamento peculiar na solução mista, assim como na variação da altura. Houve um grande ganho em 28 dias (1,1%), seguido por uma perda em 91 dias (0,5%). Os outros traços na solução mista também se comportaram de diferente, mas

com uma tendência de redução. T1, por exemplo teve uma queda de 0,6% de sua altura em 28 dias e depois um ganho em 91 dias de 0,4%.

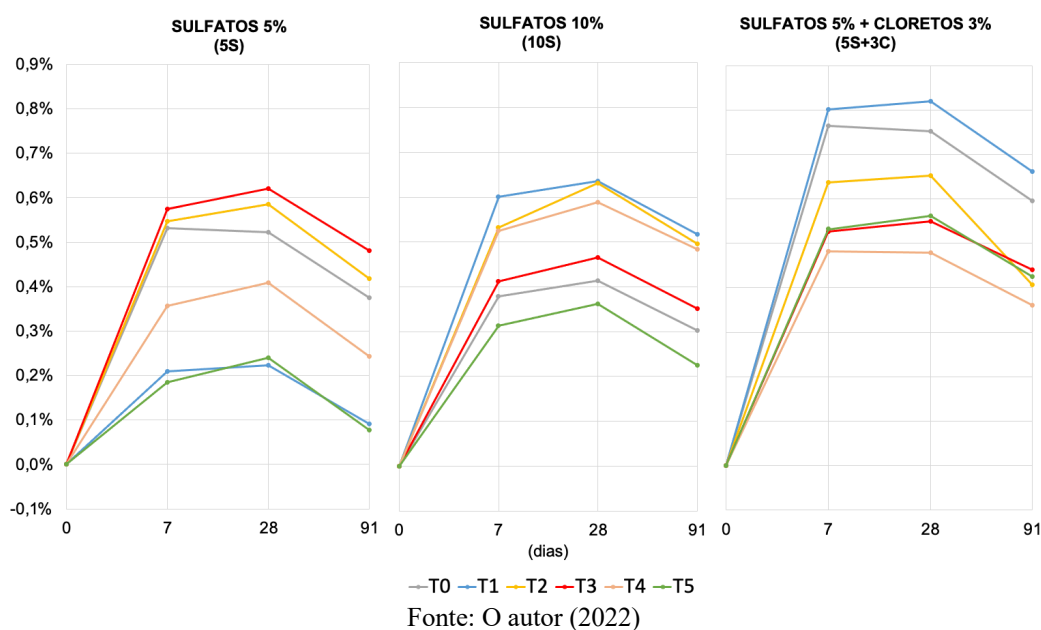
**Figura 66 – Variação percentual do diâmetro**



#### 4.4.2.3 Variação do peso

Em se tratando da variação do peso das amostras, comparando o peso antes da imersão com o peso após a exposição às soluções (Figura 67) verifica-se um grande aumento de peso entre todas as soluções de 0 para 7 dias, isso ocorreu principalmente pois as amostras não estavam saturadas antes da imersão.

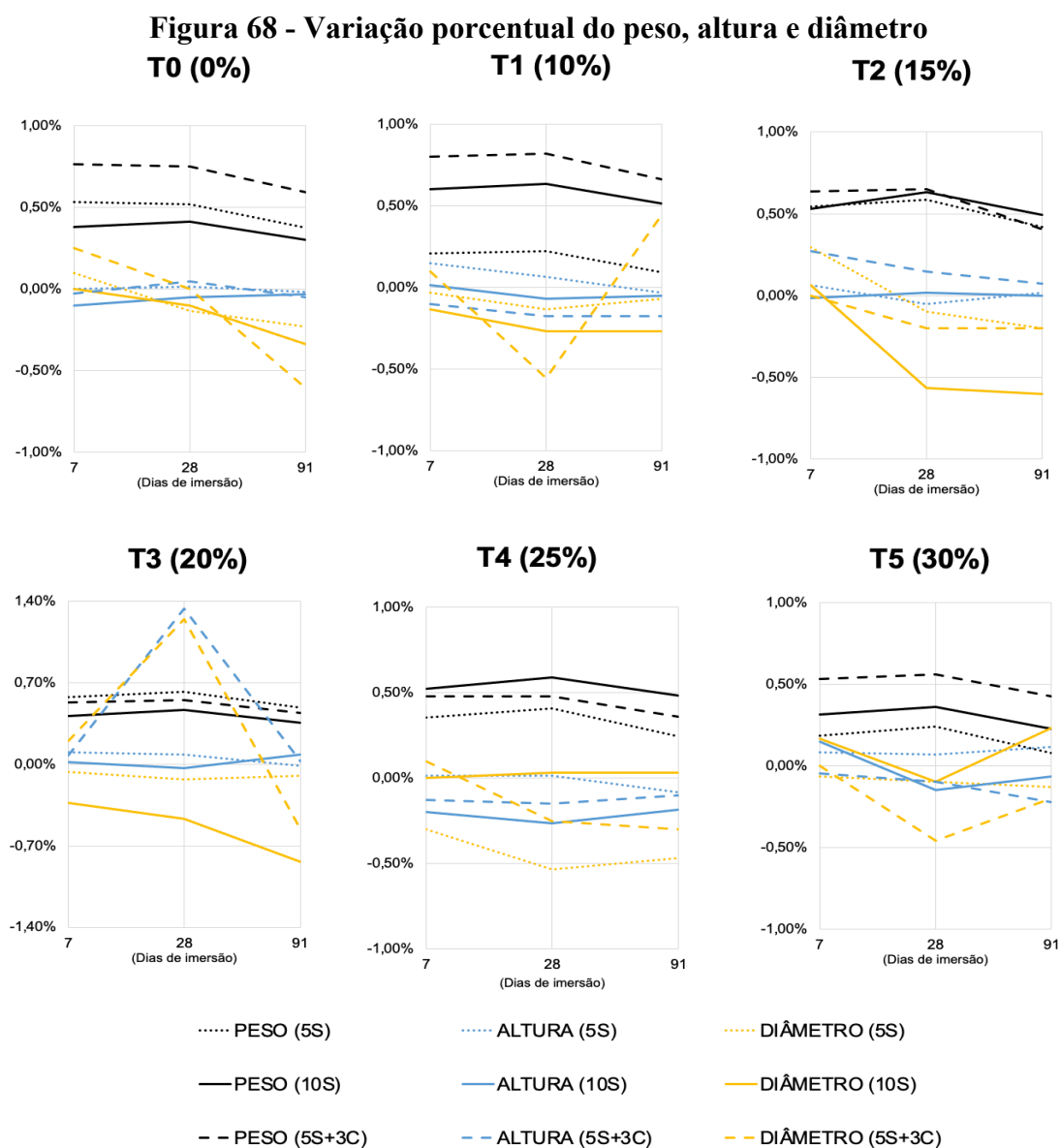
**Figura 67 – Variação percentual do peso das amostras**



De 7 para 28 dias as amostras se mantiveram estáveis, com pouco ganho de massa, e a partir de 28 dias, percebeu-se o início da perda de peso para todas as soluções. Cada traço se comportou diferente para cada solução, com exceção do T2 (15%), em que, independente da solução em que estava exposto, o ganho e perda de massa ocorreram de forma similar, na mesma magnitude. Cabe destacar que o ganho de peso das amostras na solução mista foi maior do que nas outras soluções.

#### 4.4.2.4 Correlação peso, altura e diâmetro por traço

A partir da Figura 68, é possível verificar o comportamento do peso, altura e diâmetro em cada uma das soluções, por traço, em 7, 28 e 91 dias de imersão.



Fonte: O autor (2022)

Os gráficos trazem a variação percentual de cada parâmetro em relação aos valores antes da imersão, com 28 dias de cura. Verifica-se que na maioria dos traços, a altura foi o parâmetro que teve menor variação, com exceção do T3. O peso variou de forma muito próxima nas três soluções para os traços T2 (15%) e T3 (20%), indicando que independente da solução agressiva, a influência sobre a perda de peso que ocorre devido as microfissuras e expansão dos produtos das reações é mínima. Entretanto, ocorreu uma grande variação do diâmetro nesses dois traços. O comportamento do diâmetro e altura do T3 na solução mista foi excepcional, ou pode ter sido um erro de leitura no ensaio, já que não refletiu em grandes efeitos na resistência a compressão, como será verificado a seguir.

O diâmetro foi o parâmetro que mais oscilou. Isso pode ter ocorrido pois o entorno dos corpos de prova é mais exposto as soluções, devido a uma maior área de contato. Assim, como os produtos das reações se iniciam nas camadas mais externas, pode ter sido mais perceptíveis seus efeitos no diâmetro pois é uma dimensão com praticamente metade do valor da altura.

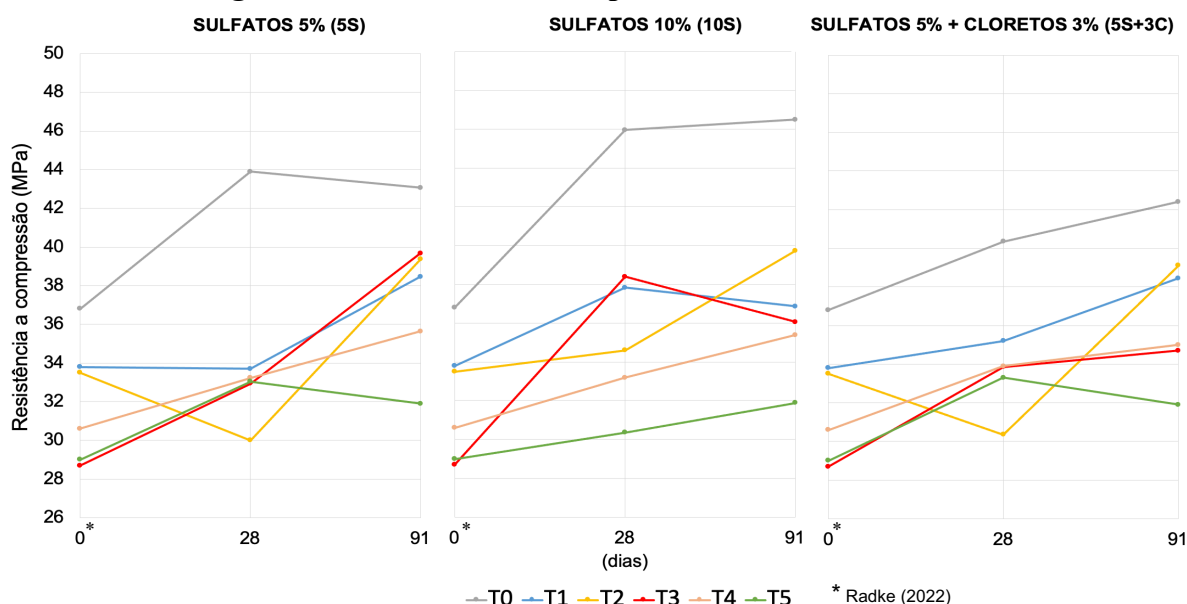
Na pesquisa de Kim e Hong (2019), os resultados dos autores em imersão de sulfatos foram apenas de redução, sem expansão de volume, com grandes valores, chegando a 2% de redução em 84 dias e 4% de redução em 180 dias. Já para o peso, os resultados chegaram a 4% e 6%, nas datas respectivas. Ou seja, os resultados geraram grandes variações quando comparado a essa pesquisa. De forma semelhante, Yang, Usman e Hanif (2021) também tiveram maiores percas de peso, chegando a 3% perda de peso para o piloto e 1% a 2% com as substituições. Assim, considerando que, em todos os parâmetros a expansão não passou de 1,4% e as reduções percentuais ficaram em aproximadamente 0,5%, os resíduos tiveram influência positiva no controle de grandes variações de peso e dimensões. Destaca-se os traços T4 e T5, que tiveram as menores variações, e que apresentam, em geral, uma tendência de estabilidade.

#### **4.4.3 Resistência a compressão**

Na Figura 69, verifica-se a resistência a compressão ao longo do tempo de solução. Cabe destacar que os valores de 0 dias de imersão são referentes aos valores de resistência em 28 dias de cura em câmara úmida, publicados por Radke (2022). Assim, o comportamento da resistência a compressão será analisado a partir de traços curados 28 dias em câmara úmida e depois imersos nas soluções, verificados em 28 e 91 dias de imersão. Pela Tabela 28 pode-se verificar os valores das resistências e do desvio padrão das amostras.

Na solução com 5% de sulfatos, todos os traços demonstraram uma tendência de crescimento, tanto em de 0 a 28 dias, com exceção do traço T2 (15%), quanto de 28 para 91 dias, com exceção do traço T0 (0%) e T5 (30%), que mostraram uma tendência de queda. Já para a solução com 10% de sulfatos, observou-se que o crescimento foi, em geral, em todas as amostras. Para a solução mista, o traço T2 se comportou de forma semelhante a solução com apenas 5% de sulfatos. O T0 apresentou uma tendência de redução a partir de 28 dias e, as outras amostras apresentaram, em sua maioria, uma tendência de crescimento de 0 a 91 dias. Cabe ressaltar que o T0 (0%), apesar de já partir de um valor inicial maior, em geral, resultou em maiores valores do que os outros traços em todas as soluções, principalmente em 5% e 10% de sulfatos.

**Figura 69 – Resistência a compressão das amostras imersas**



Fonte: O autor (2022)

**Tabela 28 - Resistência e desvio padrão após imersão**

TRAÇO	DIAS EM IMERSÃO	5S		10S		5S+3C	
		fcm	desv. pad.	fcm	desv. pad.	fcm	desv. pad.
T0	28	43,9	2,7	46,0	2,9	40,4	5,2
	91	43,1	2,8	46,5	2,4	42,4	1,7
T1	28	33,7	5,3	37,8	2,2	35,2	3,4
	91	38,5	4,5	36,9	5,4	38,5	3,9
T2	28	30,0	2,2	34,6	2,2	30,4	0,5
	91	39,4	3,0	39,7	1,0	39,1	2,3
T3	28	32,9	2,6	38,4	2,2	33,9	1,5
	91	39,7	0,1	36,1	6,5	34,7	6,6
T4	28	33,2	3,4	33,2	4,6	33,9	0,1
	91	35,6	2,8	35,4	3,4	35,0	1,0
T5	28	33,0	1,1	30,4	1,8	33,3	6,8
	91	31,9	0,7	38,0	1,4	32,7	1,3

Fonte: O autor (2022)

Cabe agora analisar alguns pontos. Como já verificado, o ganho de resistência dos traços com substituição na câmara úmida, principalmente a partir de 15%, ocorre em maiores idades, em contraste com o traço piloto, que já tem sua estabilidade por volta de 120 dias. A partir desses gráficos, é difícil prever exatamente o comportamento de cada traço. O ganho de resistência era previsto de acordo com a literatura e foi verificado nesta pesquisa. No estudo de Liu, Zou e Song (2018), que também utilizou resíduo de vidro, os traços chegaram ao pico em 90 dias e iniciaram a perda de resistência. Essa variação da resistência ocorre devido a contínua cristalização dos sais e formação de gesso e etringita nos poros e/ou microfissuras do concreto que, em idades iniciais, aumenta a compactação do concreto, e conseqüentemente, aumenta a resistência em um cenário macro. Ainda, os autores afirmam que a resistência a compressão é menor nos traços com substituição, o que também foi verificado.

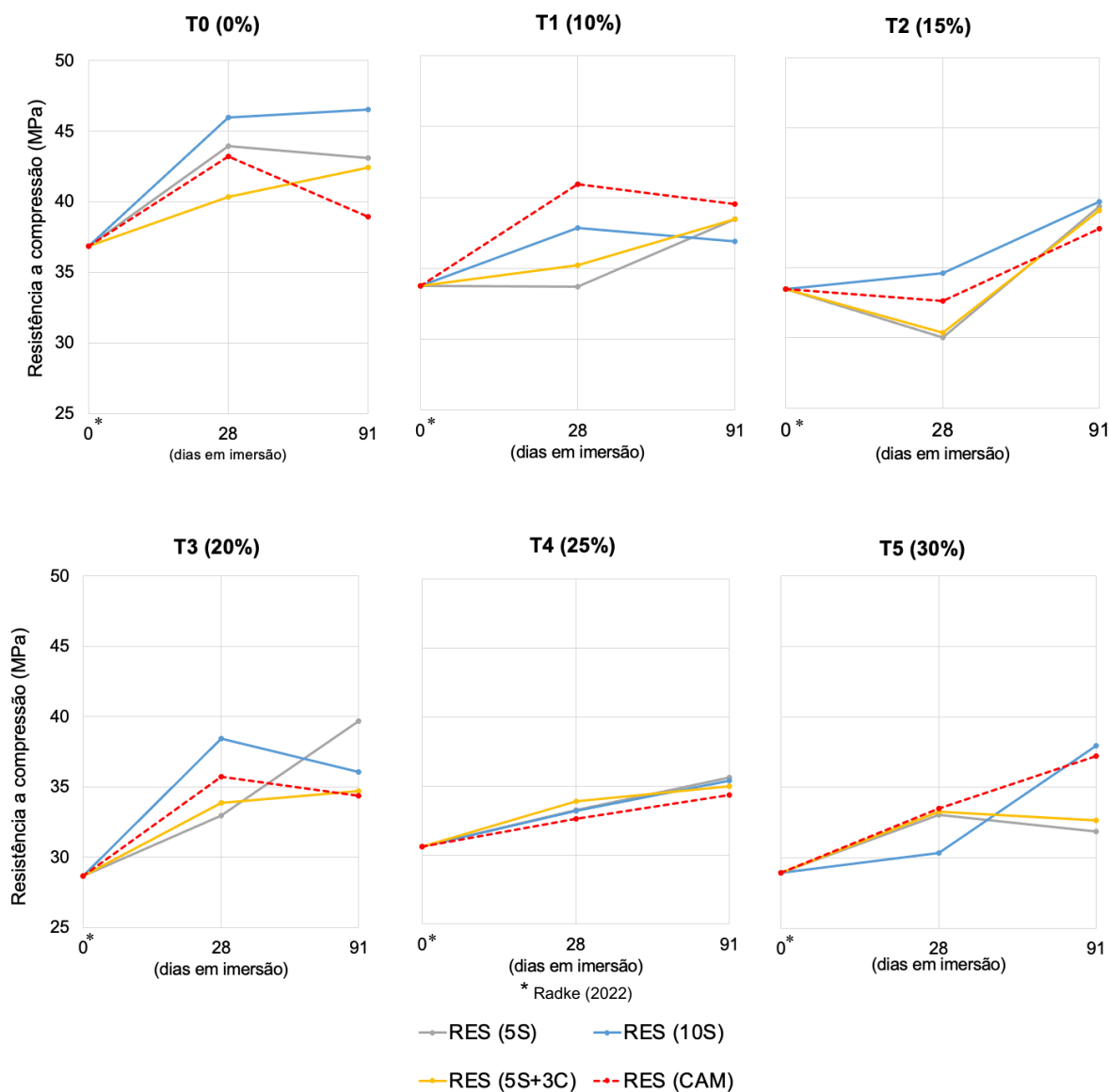
Porém, cabe verificar se o ganho de resistência dos traços com substituição ocorre devido ao seu ganho tardio de resistência, é resultado dos produtos da corrosão por sulfatos ou dois efeitos juntos. Para melhor análise, a seguir será feita uma verificação por traço individual comparando os valores de resistência com concretos imersos com os dados dos concretos na câmara úmida em 56 dias e 120 dias, representado pela linha pontilhada. Isso porque um concreto com 28 dias de imersão possui, na verdade, 56 dias de idade, sendo 28 dias de cura e 28 dias de imersão. Da mesma forma, as amostras imersas em 91 dias possuem 120 dias de idade pois foram curadas por 28 dias antes da imersão. Ainda, os dados de partida em 0 dias de imersão são os resultados em 28 dias na câmara úmida, publicados por Radke (2022). Os gráficos a seguir (Figura 70) trazem o resultado das resistências na câmara por traço, em termos gerais, segue da seguinte forma:

- T0 (0%): Nas imersões em sulfatos, houve um maior ganho de resistência do que o concreto curado na câmara, com exceção da solução mista;
- T1 (10%): Todas as amostras imersas tiveram resistências menores do que os concretos na câmara;
- T2 (15%): Com exceção do 10S, as outras soluções tiveram valores menores do que o curado na câmara em 28 dias, porém depois resultaram em valores maiores em 91 dias;
- T3 (20%): Valores próximos em todas as soluções e câmara, mas com valores maiores em 10S;



- T4 (25%): Todas as amostras se comportaram de forma semelhante nas idades estudadas e resultaram em valores muito próximos em 91 dias;
- T5 (30%): Tendência de queda da resistência nas soluções com 5S e mista, e aumento na solução 10S, semelhante aos concretos na câmara.

**Figura 70 – Resistência a compressão após a imersão por traço e na câmara úmida**



Assim, verifica-se que não houve um padrão muito claro entre os traços e seu comportamento nas soluções. É possível afirmar que o traço piloto teve as maiores resistências nas soluções, talvez por estar mais suscetível aos sulfatos, assim como verificado na pesquisa de Zhao *et al.* (2020b). Nesse traço, ficou evidente que os cloretos na solução influenciam na penetração dos íons sulfato, diferente de todos os outros traços com teores de substituição, em

que o comportamento entre a solução 5S e solução mista foi muito semelhante ao longo do tempo. Isso pode ter ocorrido devido a influência positiva do PDV, não permitindo que ocorra grande aumento de resistência em relação a penetração dos íons cloretos, como verificado na bibliografia.

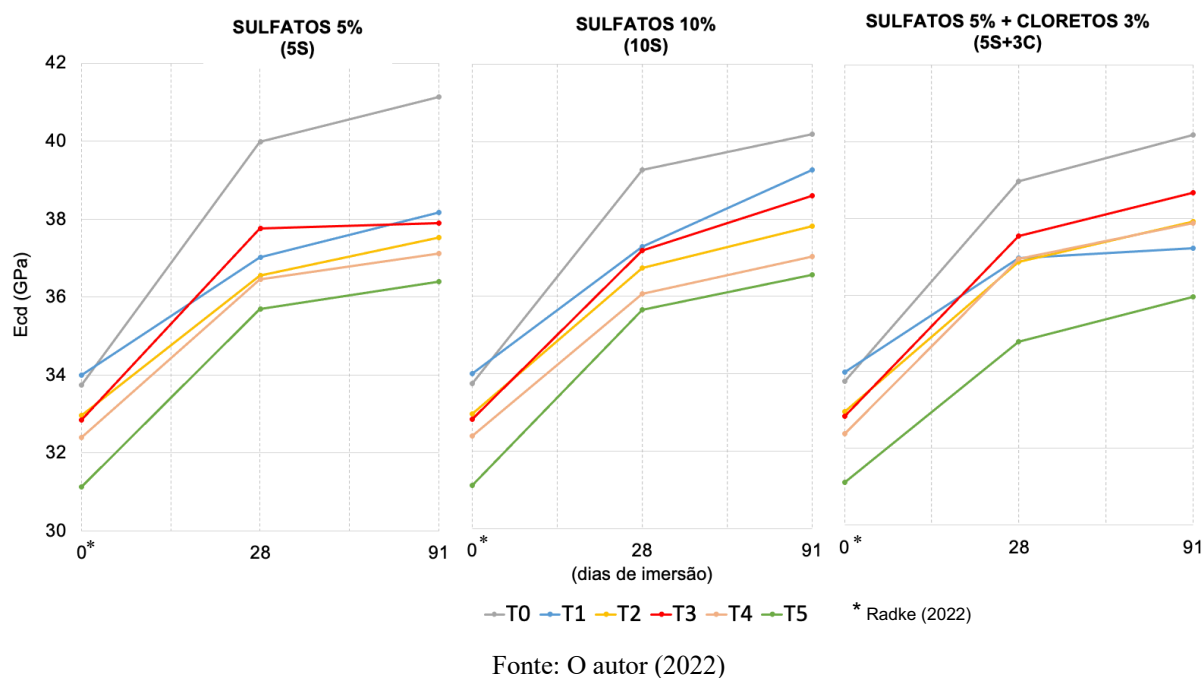
Ainda, pode-se afirmar que o traço T4 (25%) foi o que mais resistiu aos efeitos dos produtos da corrosão ao longo das idades analisadas, sendo os resultados muito próximos aos corpos de prova mantidos na câmara úmida. Dessa forma, o traço manteve sua resistência ao longo do tempo, independente do ambiente ao qual foi exposto. Portanto, para esse caso, assume-se que o ganho de resistência inicial que ocorre nos concretos submetidos a sulfatos não surtiu efeito em 25% de substituição e, o ganho de resistência tardio continua acontecendo à medida que o concreto atinge maiores idades.

Liu, Zou e Song (2018) destacam um efeito diferente em relação aos teores de substituição. Como o resíduo de vidro possui uma baixa absorção de água, o fator a/c efetivo no concreto aumenta com o aumento do teor, ou seja, o fator a/c real que foi utilizado para fazer a mistura de concreto demora para surtir seus efeitos devido a baixa hidratação do resíduo, o que pode ser verificado pelo tempo de pega, por exemplo. Com esse aumento temporário e inicial do fator a/c, a porosidade do concreto aumenta, resultando em um ambiente que facilita a penetração de sulfatos. Por outro lado, o caminho de difusão dos sulfatos pelo concreto é “bloqueado” pelas partículas de vidro que são praticamente impermeáveis, desfavorecendo a penetração. Dessa forma, a utilização de PDV possui, ao mesmo tempo, efeito positivo e negativo ao ataque de sulfatos. Tal fato pode ser uma explicação do comportamento diferenciado de cada traço nas imersões. Ainda, nas pesquisas é possível verificar tendência apenas com maiores idades, a partir de 200 a 300 dias.

#### 4.4.4 Módulo de Elasticidade

A Figura 71 traz os gráficos do Módulo de elasticidade dinâmico obtidos por Sonelastic das amostras antes e ao longo da imersão. Verificou-se que todas as amostras com substituição tiveram valores menores do que o traço piloto. Assim como ocorreu na pesquisa de Liu, Zou e Song (2018), os traços imersos aumentaram o valor do módulo de elasticidade até 90 e depois tiveram queda em seu valor. Supõe-se que a partir dos 91 dias de imersão, as amostras irão refletir a agressividade das soluções em seu módulo de elasticidade, reduzindo-o.

Figura 71 - Módulo de elasticidade dinâmico após imersão



Também, na Tabela 29 pode ser verificado os valores em tabela tanto do Ecd, módulo de elasticidade dinâmico, quanto o módulo tangencial inicial (Eci).

Tabela 29 – Módulo de elasticidade e tangencial

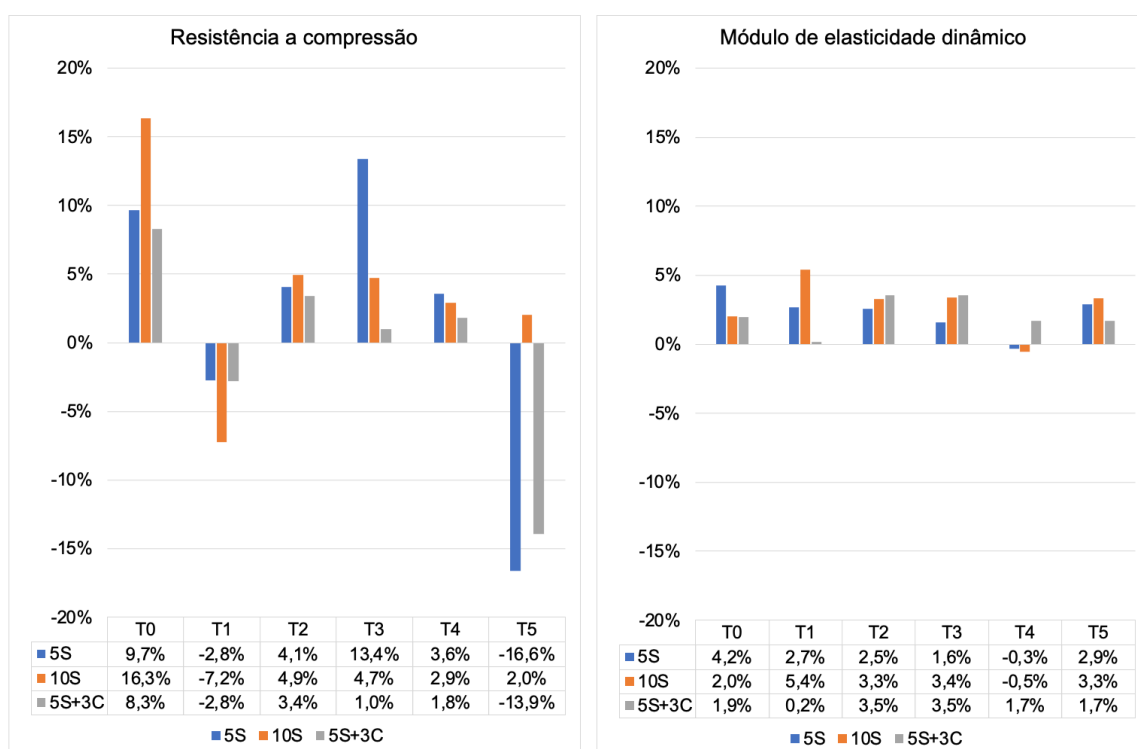
Ecd (GPa)									
Traço	5S			10S			5S + 3C		
	0 dias	28 dias	91 dias	0 dias	28 dias	91 dias	0 dias	28 dias	91 dias
T0	33,747	39,975	41,139	33,747	39,271	40,201	33,747	38,954	40,176
T1	34,000	37,021	38,169	34,000	37,281	39,262	34,000	36,970	37,216
T2	32,967	36,546	37,526	32,967	36,729	37,817	32,967	36,864	37,916
T3	32,837	37,750	37,892	32,837	37,179	38,594	32,837	37,542	38,657
T4	32,393	36,446	37,116	32,393	36,070	37,035	32,393	36,950	37,868
T5	31,117	35,690	36,392	31,117	35,657	36,555	31,117	34,783	35,945
Eci (GPa)									
Traço	5S			10S			5S + 3C		
	0 dias	28 dias	91 dias	0 dias	28 dias	91 dias	0 dias	28 dias	91 dias
T0	24,092	30,539	31,838	24,340	30,095	31,133	24,562	30,027	31,404
T1	25,020	28,125	29,392	25,173	28,456	30,633	25,197	28,331	28,642
T2	24,129	27,711	28,806	24,205	27,980	29,187	24,167	28,075	29,276
T3	23,873	28,840	29,032	24,101	28,545	30,111	24,296	29,146	30,398
T4	23,580	27,698	28,460	23,698	27,384	28,445	23,645	28,292	29,316
T5	22,709	27,448	28,254	22,583	27,228	28,232	22,845	26,550	27,838

Fonte: O autor (2022) e Radke (2022)

#### 4.4.5 Análise do módulo de elasticidade e resistência

Na Figura 72, tem-se a variação percentual do módulo de elasticidade dinâmico e a resistência a compressão após 91 dias de imersão. Realizou-se a comparação entre os dados dos traços imersos em cada solução por 91 dias de imersão, que foram curados por 28 dias, com os mesmos traços, porém mantidos em câmara úmida por 120 dias. Nessa avaliação, observa-se que em geral, o módulo sofreu menores variações do que a resistência a compressão. Enquanto a maior variação foi de 5,4% no T1 para o módulo de elasticidade, para a resistência, o T5 chegou a 16,6%. Também, cada traço se comportou de uma forma diferente para cada solução. As amostras que tiveram as maiores variações foram o T0, T3 e T5, enquanto os traços T2 e T4 mantiveram poucas variações nos dois parâmetros em relação as amostras na câmara. O T4 (25%) ganha ainda mais destaque por ter sido o que menos variou, independente da solução agressiva que foi exposta. Ou seja, quando este traço é imerso em soluções com sais agressivos, ao final de 91 dias, ele se comporta como se não tivesse sido exposto, da mesma forma que o concreto curado em câmara.

**Figura 72 – Variação percentual da resistência a compressão e módulo de elasticidade por traço**



Fonte: O autor (2022)

As menores variações podem indicar que a progressão do ganho de resistência tardio equilibra os efeitos das reações, ou que ainda o resíduo, em quantidades específicas, impede que as reações aconteçam. Isso porque o resíduo tem uma função de melhorar o empacotamento do concreto, que impede parcialmente o fluxo de água pelos poros, além de ser um material praticamente impermeável e com hidratação tardia, assim como Kalakada, Doh e Zi (2020) comentam, que pode estar atrasando qualquer efeito das reações de corrosão do concreto.

## 5 CONCLUSÕES

A partir do estudo bibliográfico, resultados e da análise apresentada, nota-se o potencial que o resíduo de vidro incorporado no concreto possui e quão promissor é o estudo do material, já que é tema de diversas pesquisas recentes, como nos estudos de Patel *et al.* (2019), Kalakada, Doh e Zi (2020) e Yang, Usman e Hanif (2021). Essa pesquisa estudou parâmetros introdutórios para verificar a viabilidade de aplicação do PDV em concretos estruturais, e sua durabilidade. A contribuição desse estudo é uma iniciativa sustentável para uma destinação alternativa do resíduo produzido por uma indústria de lapidação de vidros, que conseqüentemente está diretamente relacionado à redução de emissão de gases do efeito estufa, tanto no próprio transporte do resíduo até o aterro, quanto, principalmente, na redução da utilização do cimento, e também, propõe uma finalidade diferente no ciclo de vida do material.

Radke (2022) já atestou a aplicabilidade do PDV como substituto ao cimento em concretos na idade de 28 dias, e essa pesquisa reiterou o que foi apresentado pela autora, em maiores idades. Em se tratando da resistência a compressão, confirmou-se o que se esperava de acordo com a literatura: um ganho de resistência progressivo e tardio quando se utiliza resíduo de vidro nos concretos. Até 91 dias, para o traço com a/c de 0,55, os traços com maiores substituições resultaram em valores menores do que o traço piloto. A partir disso e ao final de 180 dias, as resistências dos traços com substituição continuaram menores, porém muito próximas ao do traço piloto. Nesse sentido, pode-se afirmar que a pequena perda de resistência devido a substituição é irrisória, de 2,35%, já que se consegue atingir resistências parecidas com a dos concretos tradicionais mesmo em teores altos, como 30%, de cimento por resíduo de vidro.

Para o fator a/c de 0,60, devido a maior quantidade de água na mistura, esperava-se por menores resistências, o que se verificou. Todos os valores foram menores do que os resultados utilizando o fator de a/c de 0,55. Ao final de 180 dias, as resistências em todos os traços aumentaram. Destaca-se os traços com 10% e 15%, que resultaram valores maiores do que do piloto, ao final desse período. Assim, afirma-se uma tendência de melhores resultados à medida que se reduz a quantidade de água na produção dos concretos, que pode ser devido a redução de adesão entre as partículas do resíduo e a pasta de cimento hidratada.

Em relação ao módulo de elasticidade, as amostras com resíduos e a/c 0,55 resultaram em valores muito próximos ao traço piloto, principalmente até 25% de substituição. Isso indica que o resíduo não influenciou na elasticidade do material, que está diretamente ligada à

resistência e durabilidade. Apesar da queda do valor em 120 dias, os resultados em 180 dias demonstram uma tendência de crescimento do módulo com o tempo. Já para o fator a/c de 0,60, verificou-se que as amostras com substituição ficaram com valores próximos ao piloto, mas não da mesma forma do outro fator. A partir de 15% já se observa uma grande diferença aos valores do traço referência, que está em acordo com os resultados da resistência a compressão.

Não se verificou um padrão no slump na produção dos concretos para essa pesquisa. Porém, analisando os dados de Radke (2022), foi possível perceber uma tendência em condições de temperatura ambiente e alta umidade, de pouca variação do slump independente do teor de substituição.

A partir do ensaio de microscopia (MEV), foi possível verificar a presença fissuras menores e menos extensas nas amostras com maiores teores de substituição. Apesar de ficar evidente a grande quantidade de etringita nos poros nesses traços, a resistência a compressão não reduziu seu valor.

Para a durabilidade dos traços com a/c de 0,55, os comportamentos foram distintos entre os traços, com algumas tendências evidentes. O que se avaliou em relação a variação do peso, altura e diâmetro foi que, as soluções 10S e 5S+3C tiveram mais influência nos traços, resultando em maiores variações. Dos parâmetros, existe uma tendência de continuação de perda do peso a partir de 91 dias de imersão. Isso pode ser devido ao acúmulo dos produtos da corrosão até 28 dias e que a partir dessa idade estão começando a reagir e consumir parte da pasta hidratada de cimento, fenômeno que se iniciou nas camadas superficiais e que progride até o interior. Cabe ressaltar que alguns traços com substituição variam menos do que o traço piloto, como 30% (T5), nas soluções 5S e 10S.

Para a resistência a compressão, esperava-se uma tendência de aumento nas primeiras idades devido a formação dos produtos da corrosão que, evidentemente, aumentariam o peso das amostras. Isso ocorreu em praticamente em todas as amostras. Para esse parâmetro, destaca-se aqui o traço T4 (25%) que resultou em poucas variações, independente da solução agressiva, resultando em valores muito próximos ao mesmo traço mantido em câmara úmida. Ao final de 91 dias, todos os traços tiveram poucas variações no módulo de elasticidade dinâmico em relação ao mesmo traço em câmara. Isso pode ter ocorrido pois como o ataque ocorre primeiro nas camadas externas, a resistência dessa parte reduz, e influencia de forma mais acentuada na resistência, no momento do rompimento.

Portanto, a partir dessa pesquisa, é possível confirmar que a utilização de resíduo de vidro em concretos, como substituto parcial do cimento, é promissória. Não só um dos

principais parâmetros, como a resistência a compressão, ficou muito próxima ao traço piloto, quanto a durabilidade desses concretos, em relação à imersão em soluções agressivas, teve um desempenho melhor ainda do que o traço referência. É justificável, assim, a pouca perda de resistência que ocorre quando se utiliza o resíduo, em troca dos benefícios que a proposta pode proporcionar, sendo eles principalmente no âmbito ambiental e de redução de custos. Pode-se concluir que, em um panorama geral, a partir das conclusões apresentadas, o melhor traço entre os estudados foi o T4, com 25% de substituição do cimento e fator a/c de 0,55.

Para entender melhor ainda o comportamento do PDV, propõe-se a seguir algumas sugestões que se fazem pertinentes e necessárias ao assunto, e que podem complementar e incrementar os resultados descritos nesse estudo.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Verificar todos os requisitos físicos e químicos do PDV para seu enquadramento em pozolanas, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014);
- 2) Avaliar o resíduo de vidro em uma granulometria mais fina, incorporado ao concreto como substituto ao cimento;
- 3) Avaliar a utilização do resíduo de vidro como substituto ao cimento em outros traços e/ou em outros tipos de cimento;
- 4) Avaliar a utilização do resíduo na confecção de argamassas ou em outros elementos estruturais;
- 5) Verificar o comportamento de traços moldados em condições de temperatura e umidade controladas, com correção da umidade dos materiais, tendo como objetivo a utilização de menores fatores de água/cimento, 0,47 ou 0,50, por exemplo;
- 6) Avaliar a utilização de fatores baixos de água/cimento em concretos com PDV junto a utilização de aditivos para controle do slump, com enfoque em outros tipos de concreto, como o auto-adensável;
- 7) Imergir o concreto em outras soluções agressivas, como o sulfato de magnésio ou cálcio, em diferentes concentrações, para verificar o comportamento da resistência e variação dimensional;
- 8) Realizar o ensaio de imersão em soluções agressivas em condições extremamente controladas como temperatura, umidade, ph da solução, entre outros;
- 9) Verificar a influência da cura inicial e impermeabilizações dos corpos de prova antes da imersão nas soluções;



- 10) Realizar os ensaios de imersão em soluções agressivas e compará-los com concretos imersos em apenas água;
- 11) Realizar os ensaios de imersão com ciclos de exposição de molhagem e secagem;
- 12) Verificar a influência das soluções agressivas em maiores tempos de imersão, como 180 a 300 dias;
- 13) Verificar ensaios de ataques combinados AIE, adicionando sulfatos internamente na mistura e expondo-os ao ataque externo.

---

## BIBLIOGRAFIA

ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro. **Manual Técnico do Vidro Plano para Edificações**. São Paulo: Abividro, 2016. Disponível em: <[https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2019/01/Abividro\\_Manual\\_Tecnico-do-Vidro\\_Plano\\_Edificacoes.pdf](https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2019/01/Abividro_Manual_Tecnico-do-Vidro_Plano_Edificacoes.pdf)>. Acesso em: 07 ago de 2021.

ABRAVIDRO - Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro Plano. **O mercado vidreiro em números- Edição 2020**. Disponível em: <<https://pdf.magtab.com/leitor/136/edicao/20919>>. Acesso em: 07 ago de 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 201. **Guide to Durable Concrete** (ACI PRC-201.2-16 82). Farmington Hills: Aci Committee, 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-08: **Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary**. Farmington Hills: Aci Committee, 2014.

ÁGUAS, M. F. F. **Influência da adição de cinza de bagaço de cana na reação álcali-sílica**. 2014. 138 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014

ALIABDO, A. A.; ELMOATY, A. D.; ABOSHAMA, A. Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 124, 2016.

ALVES, O. L.; GIMENEZ, I. F.; MAZALI, I. O. **Vidros**. Revista Química Nova na Escola, São Paulo. Ed. Especial, p. 9 -20, mai /2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

---

\_\_\_\_\_. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 6502:** Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522-2:** Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 11579:** Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653:** Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

\_\_\_\_\_. **NBR 13583:** Cimento Portland — Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 15900:** Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 16607:** Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

---

\_\_\_\_\_. **NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

\_\_\_\_\_. **NBR 16916** Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSUNÇÃO, J. W. **Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivados confeccionados com materiais da região noroeste do Paraná**. 2002. 254 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**: ASTM C 618. Philadelphia, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration**: ASTM C 1202. Philadelphia, 1992.

ATCP PHYSICAL ENGINEERING SONELASTIC® DIVISION. **Determinação dos módulos de elasticidade do concreto empregando a Técnica de Excitação por Impulso (ABNT NBR 8522-1&2:2021)**. 2022. Disponível em:

---

<<https://www.sonelastic.com/images/downloads/ITC-07-IET-MOE-Concretos-PT-v1.5.pdf>>.  
Acesso em: 25 out. 2022.

BARROS, L. M. **Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado**. 2016. 202 f. Dissertação (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2016.

BRASIL. Resolução CONAMA no 307, 05 de julho de 2002. **Lex**: Disponível em <[http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=305](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=305)> .  
Acesso em: 02 jul. 2021.

BRASIL. **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico e do Setor de Transformação de Não Metálicos**. Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos>>. Acesso em 25 de setembro de 2022.

BRASIL. **Índice de reciclagem no Brasil é de apenas 4%, diz Abrelpe**. Agência Brasil, 2022. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-06/indice-de-reciclagem-no-brasil-e-de-4-diz-abrelpe>>. Acesso em 10 de outubro de 2022.

BENDIXEN, M., BEST, J., HACKNEY, C., IVERSEN, L.L. Time Is Running Out for Sand. **Nature**, v. 571, n. 1, p. 21–31, Jul, 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02042-4>. Acesso em: 02 jul. 2021.

CALLISTER Jr, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CESAPOLUCHA, A. **Estudo experimental de concreto auto-adensável utilizando areia 100% artificial e filer calcário como substituição parcial do cimento portland**. 2016. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

---

CIMENTOS LIZ. **Desempenho do cimento CPV-ARI LIZ**. 2021 Disponível em: <<https://www.cimentosliz.com.br/cimento/ensaioCimento>>. Acesso em 15 de outubro de 2022.

CHANDRA PAUL, S.; ŠAVIJA, B.; BABAFEMI, A. J. A comprehensive review on mechanical and durability properties of cement-based materials containing waste recycled glass. **Journal of Cleaner Production**, v. 198, p. 891–906, 2018.

CNQ – Conferência Nacional do Ramo Químico – **Panorama setor de vidro**. Jan. 2015.

Disponível em:

<<http://cnq.org.br/system/uploads/publication/b2a03b701c902f59b717ce1e7395502e/file/panorama-vidros.pdf>>. Acesso em 05 ago. 2021.

COLLEPARDI, M. A state-of-the art review on delayed ettringite attack on concrete. **Cement and concrete research**, 2003.

CORREIA, L. S.; MATOS, W. B.; SANTOS, G.; DEZANET, A.; STRINGARI, D.; SCHACKOW, A.; SEGADÃES, M. A. **Uso de análise de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura para caracterização de materiais de construção contendo rejeitos de tijolos**. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Cuiabá, 2014.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. 2004. 246 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

DEUTSCHES INTITUT FUR NORMUNG. **DIN 4030**: Assessment of water, soil and gases for thei aggressiveness to concrete: principles and limiting values. Berlin, 2008.

DYER, T. **Concrete Durability**. 1a Edição. Boca Raton: CRC Press, 2014. 420 f.

DIETRICH, Y. P. **Durabilidade de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons cloreto**. 2015. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2015.

---

ELAQRA, H. A. *et al.* Effect of immersion time of glass powder on mechanical properties of concrete contained glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 206, 2019.

FACTORI, I. M. Processamento e propriedades de compósitos de poliamida 6.6 reforçada com partículas de vidro reciclado. 2009. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009

GAO, X. *et al.* Assessing the modification efficiency of waste glass powder in hydraulic construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 263, p 50-55, 2020.

GUIGNONE, C. G. **DESEMPENHO DE CONCRETOS COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA LAPIDAÇÃO DO VIDRO COMO SUBSTITUTOS PARCIAIS AO CIMENTO**. 2017. 268 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2017.

GUO, P.; MENG, W.; NASSIF, H; *et al.* New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. **Construction and Building Materials**, v. 257, 2020.

HOJO, L. Y. C. P.; MARTINS, C. H. Utilização da substituição parcial do cimento por cinza leve do bagaço de cana-de-acúcar em concretos. **Revista em agronegócio e meio ambiente – RAMA**, v. 10, n. 4, p 1205-1224, 2017.

ISLAM, G. M. S.; RAHMAN, M. H.; KAZI, N. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 1, p. 37–44, 2017.

JAIN, K. L.; SANCHETI, G.; GUPTA, K. L. Durability performance of waste granite and glass powder added concrete. **Construction and Building Materials**, v. 252, 2020.

JSTMC 7401. Method of Test for Chemical Resistance of Concrete in Aggressive Solution; Japanese Industrial Standard: Tokyo, Japan, 1999

---

KALAKADA, Z.; DOH, J.; ZI, G. Utilisation of coarse glass powder as pozzolanic cement—A mix design investigation. **Construction and Building Materials**, v. 240, 2020.

KAMALI, M.; GHAREMANINEZHAD, A. Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 98, 2015.

KIM, I. S.; CHOI, S. Y.; YANG, E. I. Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 269-277, 2018.

KIM, S.; HONG, W. High Sulfate Attack Resistance of Reinforced Concrete Flumes Containing Liquid Crystal Display (LCD) Waste Glass Powder. **Materials**, 2019.

LIU, T. *et al.* Experimental investigation on the durability performances of concrete using cathode ray tube glass as fine aggregate under chloride ion penetration or sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 634-642, 2018.

LEE, H. *et al.* Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. **Construction and Building Materials**, v. 170, p. 683-693, 2018.

MAGALHÃES, T. A. **Análise da penetração de íons cloreto em compósitos cimentícios contendo diferentes teores de escória de alto-forno**. 2019. 221 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2019.

MAES, M.; BELIE, N. Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulfate. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 59-72, 2014.

MATOS, L. W. Análise dos métodos de redução de emissão de CO<sub>2</sub> em uma indústria de cimento. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 11., 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2015.



---

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. HASPARYK, N. P. (Ed. Trad.). 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

MIRZAHOSSEINI, M.; RIDING, K. A. Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM). **Cement and Concrete Composites**. v. 56, p. 95–105, 2015.

MOURA, A. A. **Argamassa com substituição parcial do cimento por resíduos industriais**. 2018. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina. 2018.

NASSAR, R.U.D., SOROUSHIAN, P. Field investigation of concrete incorporating milled waste glass. **Journal of Solid Waste Technology and Management**. v. 37 (4), p. 307–319, 2011.

NEGREDO, A. S. **Durabilidade de concretos com resíduo de marmoraria sob a ação combinada de carbonatação e cloretos**. 2018. 145 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília. Brasília. 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. - Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 448p. 2013.

OERTEL, T.; HUNTER, F.; HELBIG, U.; SEXTL, G. Amorphous silica in ultra-high performance concrete: First hour of hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 58, p. 131-142, 2014.

OLIVEIRA, C. D. **Estudo da penetração de cloretos em compósitos cimentícios produzidos com aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar**. 2018. 110 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte. 2018.

---

OLIVEIRA, R. C. de. **Avaliação do comportamento mecânico de um solo tratado com resíduo de vidro**. 2021. 116 f. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2021.

OMRAN, A., TAGNIT-HAMOU, A. Performance of glass-powder concrete in field applications. **Construction and Building Materials**. v. 109, p. 84–95, 2016.

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, 2020.

PINTO, S. D. A. **Correlações entre ensaios de penetração de cloretos e análise da influência do uso da sílica ativa na durabilidade do concreto armado**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Univerisdade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

PONTES, R. T. de. **Efeitos dos sulfatos na degradação do concreto**. 2019. 127 f. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba João Pessoa, 2019.

QUEIROZ, I. S. O. **Desenvolvimento de concretos de ultra-alta resistência com uso de materiais dispo-níveis na região do norte de minas gerais**. 2018. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Cen-tro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2018.

RADKE, I. B. de G. **Viabilidade da utilização de resíduo de laminação de vidro na confecção de concretos estruturais**. 2022. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2022.

RASHAD, A. M. Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 72, 2014.

SANTOS, D. D. dos; GODINHO, D. dos S. da S. **Análise da evolução das propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo**. Artigo (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2017.

---

SCHMALZ, R. **Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da adição da nanossílica**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com adição do resíduo de polímero do porcelanato**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito de permeação de água e da adição de microssílica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SILVA, R. T. de. **Estudo da durabilidade de concretos com a substituição do cimento por cinza de casca de arroz sob ação de sulfatos**. 2019. 68 f. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2019.

SOUZA, R. B. de. Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – Método de ensaio acelerado. 2006. 131 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Produção nacional de cimentos por região e estados 2019**. Rio de Janeiro. 2019. Disponível em: <<http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1597673255.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2022.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Produção nacional de cimentos por região e estados 2020**. Rio de Janeiro. 2020a. Disponível em: <<http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1627312640.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2022.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Produção nacional de cimentos por região e estados 2021**. Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: <<http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1660573969.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2022.

---

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual**. Rio de Janeiro. 2020b. Disponível em:

<[http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2020.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf)>. Acesso em: 12 out. 2022.

TOZETTO, A. E.; BREKAILO, F. PEREIRA, E.. **Análise crítica dos ensaios acelerado de expansão de barras de argamassa de cimento portland no ataque externo por sulfatos de sódio pela NBR 13583/2014 e ASTM C 1012/2018**. In Encontro Anual de Iniciação Científica – EAIC, 28, 2019, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: 2019.

TUAUM, A.; SHITOTE, S.; OYAWA, W. Experimental study of self-compacting mortar incorporating recycled glass aggregate. **Buildings**, v. 8, n. 2, 2018.

YANG, H. J.; USMAN, M.; HANIF, A. Suitability of liquid crystal display (LCD) glass waste as supplementary cementing material (SCM): Assessment based on strength, porosity, and durability. **Journal of Building Engineering**, v. 42, 2021.

ZHAO, G. *et al.* Degradation of cast-in-situ concrete subjected to sulphate-chloride combined attack. **Construction and Building Materials**, v. 241, 2020a.

ZHAO, G. *et al.* Degradation mechanisms of cast-in-situ concrete subjected to internal-external combined sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 248, 2020b.

ZHAO, G.; LI, J.; SHAO, W. Effect of mixed chlorides on the degradation and sulfate diffusion of cast-in-situ concrete due to sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 49-58, 2018.

ZIDOL, A.; TOGNONVI, M. T.; TAGNIT-HAMOU, A. Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability. **New Journal of Glass and Ceramics**, v. 7, p 34-47, 2017.

## ANEXO A – DADOS DOS CORPOS DE PROVA EM CÂMARA ÚMIDA

**Tabela I - Resistência a compressão (fator a/c de 0,55)**

IDADE	TRAÇO	CP1	CP2	CP3	CP4	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
56 dias	T0	39,5	43,7	46,3	-	43,2	3,4
	T1	40,7	41,2	41	-	41,0	0,3
	T2	31,6	35,2	31,1	-	32,6	2,2
	T3	30,6	39,6	36,9	-	35,7	4,6
	T4	34,1	32,4	31,4	-	32,6	1,4
	T5	30,1	37,2	33,2	-	33,5	3,6
90 dias	T0	41,7	43,7	-	-	42,7	1,4
	T1	36,1	42	-	-	39,1	4,2
	T2	38,5	31,7	-	-	35,1	4,8
	T3	36,3	37,2	-	-	36,8	0,6
	T4	31,5	37,7	-	-	34,6	4,4
	T5	37,1	32,5	-	-	34,8	3,3
120 dias	T0	38,7	41,1	36,9	-	38,9	2,1
	T1	42,6	39,1	36,9	-	39,5	2,9
	T2	34	36,3	43	-	37,8	4,7
	T3	32,8	35,2	35,1	-	34,4	1,4
	T4	42,9	35,4	34,8	-	37,7	4,5
	T5	39,4	36,1	36,1	-	37,2	1,9
150 dias	T0	37	39,3	40,1	-	38,8	1,6
	T1	31,9	33,5	34	-	33,1	1,1
	T2	37,6	40,4	42,6	-	40,2	2,5
	T3	33,3	38,4	40,6	-	37,4	3,7
	T4	37,5	38,7	35,6	-	37,3	1,6
	T5	33,4	36,9	35,9	-	35,4	1,8
180 dias	T0	42,6	43,1	31,7	39,1	39,1	6,4
	T1	33,9	34,2	36,7	34,9	34,9	1,5
	T2	36,9	39,1	39,4	37,1	38,1	1,3
	T3	37,5	33,7	39,5	38,5	37,3	2,5
	T4	37,7	40,6	35,9	37	37,8	2,0
	T5	40,4	38,3	36	38,2	38,2	2,2

Fonte: O autor (2022)

**Tabela II - Resistência a compressão (fator a/c de 0,60)**

IDADE	TRAÇO	CP1	CP2	CP3	CP4	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
120 dias	T6	34,9	34,2	32,2	-	33,8	1,4
	T7	35,4	33,7	35,8	-	35,0	1,1
	T8	37,2	40,1	41,9	-	39,7	2,4

	T9	34,7	34,5	30,6	-	33,3	2,3
	T10	34,8	33,9	31,2	-	33,3	1,9
	T11	30,5	29,5	28,5	-	29,5	1,0
150 dias	T6	37,3	35	37,9	-	36,7	1,5
	T7	38,9	32,6	32,6	-	34,7	3,6
	T8	34,1	32,7	38,4	-	35,1	3,0
	T9	32,5	33,2	33,8	-	33,2	0,7
	T10	35,9	30,7	30,7	-	32,4	3,0
	T11	28,4	32,2	25,7	-	28,8	3,3
180 dias	T6	33,3	36,4	36,2	35,7	35,4	1,4
	T7	31,9	42,3	29,9	39,2	35,8	5,9
	T8	39,2	32,5	39,5	38,8	37,5	3,3
	T9	32,8	36	30,6	28	31,9	3,4
	T10	33,3	31,1	28,8	27,7	30,2	2,5
	T11	24,9	30,5	29,6	30,1	28,8	2,6

Fonte: O autor (2022)

**Tabela III - Módulo de elasticidade dinâmico e tangencial inicial (fator a/c 0,55)**

idade	Massa (g)	Massa Média (g)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$ médio (kg/m <sup>3</sup> )	Ecd (Gpa)	Ecd médio (Gpa)	Eci (Gpa)
90 dias	3754,24	3767,295	2,39	2400	39,042	39,393	30,392
	3780,35		2,41		39,744		
	-		-		-		
	3630,01	3643,62	2,31	2320	36,930	37,152	28,964
	3657,23		2,33		37,373		
	-		-		-		
	3704,55	3714,945	2,36	2365	37,098	36,574	27,797
	3725,34		2,37		36,050		
	-		-		-		
	3731,02	3733,185	2,38	2345	37,917	37,551	28,811
	3735,35		2,38		37,184		
	-		-		-		
	3714,99	3681,02	2,37	2345	37,640	37,296	28,746
	3647,05		2,32		36,951		
	-		-		-		
	3663,38	3650,085	2,33	2325	35,689	35,347	26,955
	3636,79		2,32		35,004		
	-		-		-		
120 dias	3677,5	3720,993	2,34	2370	37,205	37,296	28,508
	3750,57		2,39		37,103		
	3734,91		2,38		37,581		
	3673,44	3689,893	2,34	2350	37,058	36,860	28,281
	3696,73		2,35		36,655		
	3699,51		2,36		36,866		
	3605,12	3670,147	2,3	2340	37,543	36,578	28,098
	3736,6		2,38		36,183		
	3668,72		2,34		36,008		
	3670,97	3673,257	2,34	2340	36,031	36,194	27,686
	3654,94		2,33		36,183		
	3693,86		2,35		36,368		

180 dias	3671,2	3621,37	2,34	2307	34,735	34,810	26,594
	3595,5		2,29		35,196		
	3597,41		2,29		34,498		
	3554,65	3598,987	2,26	2290	32,718	33,441	25,324
	3588,25		2,28		33,397		
	3654,06		2,33		34,208		
	3725,13	3731,79	2,37	2375	37,620	37,770	28,955
	3738,45		2,38		37,920		
	-		-		-		
	3672,2	3697,04	2,34	2355	37,160	37,320	28,715
	3721,88		2,37		37,480		
	-		-		-		
	3705,89	3709,275	2,36	2360	37,517	37,844	29,219
	3712,66		2,36		38,170		
	-		-		-		
	3657,87	3679,74	2,33	2345	37,168	37,186	28,692
	3701,61		2,36		37,203		
	-		-		-		
	3655,83	3645,26	2,33	2320	36,237	36,223	27,956
	3634,69		2,31		36,209		
-	-		-				
3632,8	3626,03	2,31	2305	34,580	34,652	26,444	
3619,26		2,30		34,723			
-		-		-			

Fonte: O autor (2022)

**Tabela IV - Módulo de elasticidade dinâmico e tangencial inicial (fator a/c 0,60)**

idade	Massa (g)	Massa Média (g)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$ médio (kg/m <sup>3</sup> )	Ecd (Gpa)	Ecd médio (Gpa)	Eci (Gpa)
120 dias	3767,59	3748,643	2,40	2387	37,951	37,547	28,576
	3730,33		2,37		36,884		
	3748,01		2,39		37,806		
	3719,86	3716,037	2,37	2367	36,857	37,037	28,271
	3716,98		2,37		37,463		
	3711,27		2,36		36,792		
	3726,73	3683,277	2,37	2343	36,248	35,874	27,305
	3672,1		2,34		35,757		
	3651		2,32		35,616		
	3674,32	3673,657	2,34	2340	35,644	35,401	26,840
	3689,26		2,35		34,945		
	3657,39		2,33		35,613		
	3601,85	3616,223	2,29	2300	32,928	32,837	24,579
	3615,31		2,30		32,455		
	3631,51		2,31		33,129		
	3591,55	3577,267	2,29	2277	32,129	32,036	23,987
3523,21	2,24		32,22				
3617,04	2,30		31,759				
180 dias	3773,85	3756,295	2,40	2390	37,982	38,062	29,085
	3738,74		2,38		38,142		

-		-		-		
3712,39		2,36		36,044		
3688,05	3700,22	2,35	2355	38,06	37,052	28,427
-		-		-		
3680,38		2,34		36,443		
3618,51	3649,445	2,30	2320	36,052	36,248	27,982
-		-		-		
3680,32		2,34		36,077		
3692,13	3686,225	2,35	2345	35,803	35,940	27,356
-		-		-		
3638,47		2,32		33,495		
3622,44	3630,455	2,31	2315	32,815	33,155	24,751
-		-		-		
3598,84		2,29		32,28		
3602,14	3600,49	2,29	2290	32,42	32,350	24,175
-		-		-		

Fonte: O autor (2022)



## ANEXO B – DADOS DOS CORPOS DE PROVA IMERSOS EM SOLUÇÕES AGRESSIVAS

**Tabela V – Resistência a compressão após imersão nas soluções agressivas**

TRAÇO	DIAS EM IMERSÃO	5S				10S				5S+3C		
		CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CP1	CP2	MÉDIA
T0	28	40,8	45,6	45,3	43,9	44,0	49,3	44,6	46,0	36,7	44,0	40,4
	91	42,3	40,7	46,2	43,1	49,2	44,8	45,5	46,5	43,6	41,2	42,4
T1	28	36,0	27,6	37,5	33,7	38,2	39,8	35,5	37,8	32,8	37,6	35,2
	91	35,5	43,7	36,2	38,5	40,9	30,7	39,0	36,9	35,7	41,2	38,5
T2	28	31,8	27,6	30,6	30,0	35,5	36,2	32,1	34,6	30,7	30,0	30,4
	91	38,8	36,7	42,6	39,4	40,0	40,6	38,6	39,7	37,5	40,7	39,1
T3	28	30,5	35,6	32,7	32,9	35,9	39,2	40,1	38,4	32,8	34,9	33,9
	91	39,6	39,6	39,8	39,7	38,8	40,8	28,6	36,1	30,0	39,4	34,7
T4	28	37,1	31,7	30,9	33,2	38,0	32,8	28,8	33,2	34,0	33,8	33,9
	91	38,1	32,6	36,2	35,6	31,8	35,8	38,6	35,4	34,3	35,7	35,0
T5	28	34,0	31,9	33,2	33,0	31,1	28,3	31,7	30,4	38,1	28,5	33,3
	91	32,4	32,2	31,1	31,9	36,6	39,3	38	38,0	33,6	31,7	32,7

Fonte: O autor (2022)

**Tabela VI – Módulo de elasticidade de tangente inicial nas soluções**

Traço	Solução	Corpo de prova	28 dias			91 dias		
			Ecd (GPa)	Ecd médio (GPa)	Eci (GPa)	Ecd (GPa)	Ecd médio (GPa)	Eci (GPa)
T0	5S	CP1	40,587	39,975	30,539	41,472	41,139	31,838
		CP2	39,680			40,991		
		CP3	39,658			40,953		
	10S	CP1	39,545	39,271	30,095	40,515	40,201	31,133
		CP2	39,957			40,723		
		CP3	38,310			39,366		
	5S+3C	CP1	39,218	38,954	30,027	40,727	40,176	31,404
		CP2	38,689			39,625		
	T1	5S	CP1	37,302	37,021	28,125	38,570	38,169
CP2			37,470	38,671				
CP3			36,292	37,267				
10S		CP1	37,239	37,281	28,456	38,580	39,262	30,633
		CP2	37,627			39,981		
		CP3	36,976			39,226		
5S+3C		CP1	36,466	36,814	28,331	33,771	36,194	28,642

		CP2	37,162			38,616		
T2	5S	CP1	36,975	36,546	27,711	37,763	37,526	28,806
		CP2	36,482			37,616		
		CP3	36,180			37,200		
	10S	CP1	36,685	36,729	27,980	37,990	37,817	29,187
		CP2	36,643			37,692		
		CP3	36,859			37,769		
	5S+3C	CP1	36,920	36,931	28,075	37,295	37,966	29,276
		CP2	36,942			38,637		
	T3	5S	CP1	38,526	37,750	28,840	38,393	37,892
CP2			36,644	37,474				
CP3			38,081	37,809				
10S		CP1	37,006	37,179	28,545	37,896	38,594	30,111
		CP2	37,192			38,058		
		CP3	37,339			39,828		
5S+3C		CP1	38,010	37,724	29,146	39,044	38,689	30,398
		CP2	37,438			38,334		
T4		5S	CP1	35,983	36,446	27,698	36,905	37,116
	CP2		36,128	37,343				
	CP3		37,227	37,100				
	10S	CP1	36,565	36,070	27,384	37,748	37,035	28,445
		CP2	35,599			36,400		
		CP3	36,046			36,956		
	5S+3C	CP1	37,516	37,390	28,292	38,422	38,285	29,316
		CP2	37,263			38,148		
	T5	5S	CP1	35,811	35,690	27,448	36,453	36,392
CP2			35,251	35,984				
CP3			36,007	36,740				
10S		CP1	35,633	35,657	27,228	36,614	36,555	28,232
		CP2	35,499			36,344		
		CP3	35,840			36,707		
5S+3C		CP1	35,008	34,346	26,550	36,776	35,640	27,838
		CP2	33,683			34,503		

Tabela VII – Peso das amostras ao longo da imersão

Traço	Solução	CP	PESO (g)			
			0 dias	7 dias	28 dias	91 dias
T0	5S	CP1	3860,84	3872,26	3872,79	3868,24
		CP2	3781,43	3803,41	3802,71	3796,8
		CP3	3780,72	3808,38	3807,45	3801
		MÉDIA	3807,66	3828,02	3827,65	3822,01
	10S	CP1	3756,11	3768,56	3769,5	3766,4
		CP2	3788,46	3809,75	3810,08	3805,63
		CP3	3774,45	3783,77	3786,41	3781,32
		MÉDIA	3773,01	3787,36	3788,66	3784,45
	5S+3C	CP1	3768,75	3795,58	3795,77	3789,64
		CP2	3683,55	3714,14	3712,97	3707,28

		<i>MÉDIA</i>	3726,15	3754,86	3754,37	3748,46
T1	5S	CP1	3712,30	3729,71	3730,84	3726,04
		CP2	3738,03	3740,06	3739,68	3734,91
		CP3	3722,96	3726,90	3727,68	3722,57
		<i>MÉDIA</i>	3724,43	3732,22	3732,73	3727,84
	10S	CP1	3686,22	3704,85	3707,1	3702,18
		CP2	3702,48	3715,96	3716,42	3713,4
		CP3	3716,68	3751,73	3752,9	3747,5
		<i>MÉDIA</i>	3701,79	3724,18	3725,47	3721,03
	5S+3C	CP1	3673,95	3704,52	3704,5	3698,62
		CP2	3661,93	3690,61	3692,04	3686,18
		<i>MÉDIA</i>	3667,94	3697,57	3698,27	3692,40
	T2	5S	CP1	3688,15	3710,89	3713,02
CP2			3720,05	3738,98	3739,25	3734,45
CP3			3687,93	3707,23	3709,1	3702,52
<i>MÉDIA</i>			3698,71	3719,03	3720,46	3714,25
10S		CP1	3688,85	3718,46	3722,44	3716,89
		CP2	3693,64	3713,73	3717,72	3713,88
		CP3	3678,97	3688,42	3691,64	3685,82
		<i>MÉDIA</i>	3687,15	3706,87	3710,60	3705,53
5S+3C		CP1	3662,46	3685,09	3685,38	3672,86
		CP2	3723,21	3747,90	3748,78	3742,97
		<i>MÉDIA</i>	3692,84	3716,50	3717,08	3707,92
T3		5S	CP1	3737,89	3754,17	3756,63
	CP2		3683,77	3715,30	3716,75	3710,05
	CP3		3731,66	3748,33	3749,51	3745,85
	<i>MÉDIA</i>		3717,77	3739,27	3740,96	3735,75
	10S	CP1	3656,65	3691,90	3694,17	3689,24
		CP2	3695,43	3701,09	3702,49	3698,92
		CP3	3695,63	3700,45	3702,68	3698,58
		<i>MÉDIA</i>	3682,57	3697,81	3699,78	3695,58
	5S+3C	CP1	3665,15	3696,83	3697,29	3692,89
		CP2	3640,77	3647,73	3649,02	3645,34
		<i>MÉDIA</i>	3652,96	3672,28	3673,16	3669,12
	T4	5S	CP1	3687,52	3700,05	3702,24
CP2			3700,49	3707,13	3709,24	3702,61
CP3			3690,71	3711,16	3712,65	3706,59
<i>MÉDIA</i>			3692,91	3706,11	3708,04	3701,93
10S		CP1	3672,53	3696,68	3699,7	3696,34
		CP2	3675,34	3688,30	3688,99	3686,73
		CP3	3676,10	3697,13	3700,62	3694,55
		<i>MÉDIA</i>	3674,66	3694,04	3696,44	3692,54
5S+3C		CP1	3669,11	3686,21	3685,51	3682,02
		CP2	3696,70	3715,26	3715,8	3710,5
		<i>MÉDIA</i>	3682,91	3700,74	3700,66	3696,26
T5		5S	CP1	3616,85	3623,35	3623,76
	CP2		3621,50	3636,89	3639,61	3631,46
	CP3		3636,06	3634,37	3637,15	3632,14

		<i>MÉDIA</i>	3624,80	3631,54	3633,51	3627,61
	10S	CP1	3658,29	3668,87	3670,68	3666,85
		CP2	3636,99	3653,08	3654,87	3649,73
		CP3	3639,75	3647,44	3649,13	3643,05
		<i>MÉDIA</i>	3645,01	3656,46	3658,23	3653,21
	5S+3C	CP1	3648,95	3671,73	3672,26	3667,25
		CP2	3557,28	3573,04	3574,64	3569,79
		<i>MÉDIA</i>	3603,12	3622,39	3623,45	3618,52

Fonte: O autor (2022)

**Tabela VIII – Altura das amostras ao longo da imersão**

Traço	Solução	CP	ALTURA (cm)			
			0 dias	7 dias	28 dias	91 dias
T0	5S	CP1	20,14	20,14	20,13	20,14
		CP2	20,12	20,12	20,14	20,10
		CP3	20,18	20,18	20,18	20,19
		<i>MÉDIA</i>	20,15	20,15	20,15	20,14
	10S	CP1	20,21	20,13	20,18	20,20
		CP2	20,05	20,10	20,07	20,07
		CP3	20,21	20,18	20,19	20,18
		<i>MÉDIA</i>	20,16	20,14	20,15	20,15
	5S+3C	CP1	20,16	20,16	20,17	20,11
		CP2	20,06	20,05	20,07	20,09
		<i>MÉDIA</i>	20,11	20,11	20,12	20,10
	T1	5S	CP1	20,01	20,05	20,05
CP2			20,17	20,23	20,18	20,17
CP3			20,17	20,16	20,16	20,16
<i>MÉDIA</i>			20,12	20,15	20,13	20,11
10S		CP1	20,03	20,03	20,04	20,04
		CP2	20,00	20,00	19,98	20,00
		CP3	20,14	20,15	20,11	20,10
		<i>MÉDIA</i>	20,06	20,06	20,04	20,05
5S+3C		CP1	20,28	20,26	20,16	20,26
		CP2	19,95	19,93	20,00	19,90
		<i>MÉDIA</i>	20,12	20,10	20,08	20,08
T2		5S	CP1	20,16	20,16	20,17
	CP2		20,25	20,20	20,22	20,25
	CP3		20,20	20,29	20,19	20,20
	<i>MÉDIA</i>		20,20	20,22	20,19	20,21
	10S	CP1	20,15	20,16	20,16	20,16
		CP2	20,33	20,31	20,33	20,32
		CP3	20,10	20,10	20,10	20,10
		<i>MÉDIA</i>	20,19	20,19	20,20	20,19
	5S+3C	CP1	20,29	20,30	20,23	20,23
		CP2	20,18	20,28	20,30	20,27
		<i>MÉDIA</i>	20,24	20,29	20,27	20,25
	T3	5S	CP1	20,03	20,02	20,06

		CP2	20,07	20,13	20,10	20,11	
		CP3	20,14	20,15	20,13	20,10	
		<i>MÉDIA</i>	20,08	20,10	20,10	20,08	
	10S	CP1	20,11	20,11	20,13	20,11	
		CP2	20,03	20,04	20,03	20,02	
		CP3	19,94	19,94	19,90	20,00	
		<i>MÉDIA</i>	20,03	20,03	20,02	20,04	
	5S+3C	CP1	20,02	20,03	20,23	20,02	
		CP2	19,94	19,96	20,27	19,95	
		<i>MÉDIA</i>	19,98	20,00	20,25	19,99	
	T4	5S	CP1	20,16	20,15	20,16	20,12
			CP2	20,12	20,15	20,13	20,12
CP3			20,38	20,37	20,38	20,37	
<i>MÉDIA</i>			20,22	20,22	20,22	20,20	
10S		CP1	20,04	20,02	20,10	20,17	
		CP2	20,34	20,31	20,32	20,32	
		CP3	20,20	20,13	20,00	19,98	
		<i>MÉDIA</i>	20,19	20,15	20,14	20,16	
5S+3C		CP1	19,94	19,90	19,89	19,90	
		CP2	20,04	20,03	20,03	20,04	
		<i>MÉDIA</i>	19,99	19,97	19,96	19,97	
T5		5S	CP1	20,03	20,02	20,04	19,97
	CP2		20,00	20,13	20,10	20,10	
	CP3		20,07	20,00	20,00	20,10	
	<i>MÉDIA</i>		20,03	20,05	20,05	20,06	
	10S	CP1	20,05	20,16	20,06	20,05	
		CP2	20,10	20,08	20,06	20,07	
		CP3	20,19	20,19	20,13	20,18	
		<i>MÉDIA</i>	20,11	20,14	20,08	20,10	
	5S+3C	CP1	20,23	20,20	20,20	20,23	
		CP2	20,05	20,06	20,04	19,96	
		<i>MÉDIA</i>	20,14	20,13	20,12	20,10	

Tabela IX – Diâmetro das amostras ao longo da imersão

Traço	Solução	CP	DIÂMETRO (cm)			
			0 dias	7 dias	28 dias	91 dias
T0	5S	CP1	10,13	10,15	10,10	10,10
		CP2	10,05	10,06	10,05	10,04
		CP3	10,03	10,03	10,02	10,00
		<i>MÉDIA</i>	10,07	10,08	10,06	10,05
	10S	CP1	10,00	10,00	9,98	10,00
		CP2	10,10	10,10	10,09	10,00
		CP3	9,90	9,90	9,90	9,90
		<i>MÉDIA</i>	10,00	10,00	9,99	9,97
	5S+3C	CP1	10,00	10,02	10,00	9,98
		CP2	9,90	9,93	9,90	9,80
		<i>MÉDIA</i>	9,95	9,98	9,95	9,89

T1	5S	CP1	10,07	10,07	10,05	10,08
		CP2	10,05	10,05	10,04	10,03
		CP3	10,01	10,00	10,00	10,00
		MÉDIA	10,04	10,04	10,03	10,04
	10S	CP1	10,03	10,00	10,00	10,00
		CP2	10,09	10,09	10,08	10,10
		CP3	10,06	10,05	10,02	10,00
		MÉDIA	10,06	10,05	10,03	10,03
	5S+3C	CP1	10,01	10,03	10,00	10,10
		CP2	10,00	10,00	9,90	10,00
		MÉDIA	10,01	10,02	9,95	10,05
	T2	5S	CP1	10,07	10,06	10,06
CP2			10,10	10,11	10,08	10,06
CP3			10,10	10,19	10,10	10,10
MÉDIA			10,09	10,12	10,08	10,07
10S		CP1	10,18	10,17	10,08	10,07
		CP2	9,95	9,97	9,90	9,90
		CP3	10,02	10,03	10,00	10,00
		MÉDIA	10,05	10,06	9,99	9,99
5S+3C		CP1	10,13	10,12	10,10	10,10
		CP2	9,91	9,92	9,90	9,90
		MÉDIA	10,02	10,02	10,00	10,00
T3		5S	CP1	9,99	10,07	10,06
	CP2		9,98	9,97	9,95	9,95
	CP3		10,05	9,96	9,97	9,94
	MÉDIA		10,01	10,00	9,99	10,00
	10S	CP1	10,02	9,86	9,88	9,88
		CP2	10,00	9,96	10,00	9,97
		CP3	10,00	10,10	10,00	9,92
		MÉDIA	10,01	9,97	9,96	9,92
	5S+3C	CP1	9,95	9,99	10,10	9,94
		CP2	9,90	9,90	10,00	9,80
		MÉDIA	9,93	9,95	10,05	9,87
	T4	5S	CP1	10,17	10,08	10,05
CP2			9,97	9,99	9,95	9,95
CP3			10,02	10,00	10,00	10,00
MÉDIA			10,05	10,02	10,00	10,01
10S		CP1	10,00	10,00	10,00	10,00
		CP2	10,00	9,97	9,98	10,00
		CP3	10,07	10,10	10,10	10,08
		MÉDIA	10,02	10,02	10,03	10,03
5S+3C		CP1	10,05	10,05	10,03	10,02
		CP2	10,03	10,05	10,00	10,00
		MÉDIA	10,04	10,05	10,02	10,01
T5		5S	CP1	10,10	10,08	10,08
	CP2		10,10	10,10	10,09	10,10
	CP3		10,00	10,00	10,00	9,98
	MÉDIA		10,07	10,06	10,06	10,05
	10S	CP1	10,13	10,13	10,10	10,12

---

		CP2	9,90	9,92	9,90	9,98
		CP3	10,00	10,03	10,00	10,00
		<i>MÉDIA</i>	10,01	10,03	10,00	10,03
	5S+3C	CP1	10,10	10,10	10,01	10,00
		CP2	10,00	10,00	10,00	10,06
		<i>MÉDIA</i>	10,05	10,05	10,00	10,03