

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

ISADORA BEDUSQUI DE GOES RADKE

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE
LAMINAÇÃO DE VIDRO NA CONFECÇÃO DE CONCRETOS
ESTRUTURAIIS**

MARINGÁ

2022

ISADORA BEDUSQUI DE GOES RADKE

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE
LAMINAÇÃO DE VIDRO NA CONFECCÃO DE CONCRETOS
ESTRUTURAIIS**

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^ª. Dra. Silvia Paula Sossai Altoé

MARINGÁ

2022

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

R129v

Radke, Isadora Bedusqui de Goes

Viabilidade da utilização de resíduo de laminação de vidro na confecção de concretos estruturais / Isadora Bedusqui de Goes Radke. -- Maringá, PR, 2022.
133 f.: il., 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, 2022.

1. Resíduo de laminação de vidro. 2. Concreto com resíduo. 3. Substituição parcial de resíduo no aglomerante. 4. Concreto sustentável. 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. 693.5

ISADORA BEDUSQUI DE GOES RADKE

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE LAMINAÇÃO DE VIDRO
NA CONFEÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 30/06/2022, 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

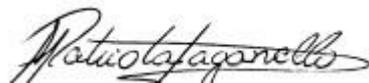
BANCA EXAMINADORA



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



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



Profa. Dra. Adriana Macedo Patriota Faganello
Curso de Graduação em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A Deus por todas as bênçãos que proporciona em
minha vida e a minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me abençoar e proteger.

Ao meu esposo Douglas que sempre me incentivou e apoiou durante essa jornada e por tudo que já passamos com muito amor e dedicação.

Ao meu filho Guilherme que mostrou o verdadeiro significado das palavras amor, dedicação e proteção e que hoje completa minha vida.

Aos meus pais José Antonio e Marcia que tanto me apoiaram e aconselharam com muito amor e paciência quando precisei e em todas as etapas de minha vida.

Ao meu irmão Vinícius, minha cunhada Patrícia e sobrinha Mikaelly pelo apoio e contribuição nessa extensa jornada.

A minha orientadora Silvia por toda orientação e ajuda ao longo de todo o caminho.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PCV) da UEM por proporcionar a oportunidade de aprendizado.

A todos que de alguma maneira participaram dessa caminhada apoiando e ajudando a cada dificuldade apresentada.

RESUMO

O concreto é o segundo material mais utilizado no mundo, perdendo apenas para a água. A massiva utilização de concreto nas mais diferentes obras a nível mundial faz com que os materiais utilizados em sua produção possam sofrer uma escassez. Visando uma questão econômica e sustentável este trabalho irá abordar a substituição parcial do aglomerante na confecção de concretos estruturais por resíduo do processo de laminação de vidro. O resíduo foi escolhido devido à sua grande produção e a indicação de vários estudos sobre uma possível melhora no desempenho do concreto quando utilizado como substituição do aglomerante. Nesta pesquisa foram adotados teores de substituição parcial de 10, 15, 20, 25 e 30% em massa do aglomerante pelo referido resíduo, que após os ensaios de caracterização tiveram os resultados comparados com os do traço referência. A caracterização do resíduo foi realizada pelos ensaios de granulometria, massa específica e unitária, tempo de pega, módulo de finura, Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de Raio-X (DRX) e dos concretos nos estado fresco e endurecido. Para isso foram realizados ensaios de consistência pelo abatimento do tronco de cone, massa específica no estado fresco e endurecido de resistência mecânica a compressão, absorção de água, microscopia eletrônica de varredura (MEV), velocidade da propagação da onda de ultrassom e módulo de elasticidade estático e dinâmico para análise dos 12 traços. Com base nos resultados obtidos foi determinado um teor ótimo de substituição, com base na caracterização mais próxima ao traço referência, ou seja, o traço que além de apresentar menores influências da substituição realizada, que foi o T11 com 25% de substituição e fator a/c 0,55. Além disto foi realizado um estudo sustentável onde chegou-se a reduções de 22% no custo do concreto e de 16,2% de emissões de CO_2 para o traço otimizado, viabilizando a substituição parcial do resíduo de pó de vidro na confecção de concreto estrutural.

Palavras chave: resíduo de pó de vidro; concretos com resíduos; substituição de aglomerante.

ABSTRACT

Concrete is the second most used material in the world, losing only to water. The massive use of concrete in the most different types of construction worldwide means that the materials used in its production can suffer a shortage. Aiming at an economic and sustainable issue, this work will show the partial replacement of the binder in the production of structural concrete with waste glass powder of lamination process. This waste was chosen because of its large production and the indication of several studies on a possible improvement in concrete performance when used as a binder replacement. In this research partial replacement levels of 10, 15, 20, 25 and 30% by mass of the binder were adopted by the mentioned waste, which after characterization tests had the results compared to the reference trace. The characterization of the waste was done through particle size, specific and unit mass, setting time, fineness modulus, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) tests, and on fresh and hardened concrete. Consistency tests will be performed by the slump test, specific mass in the fresh and hardened concrete, mechanical compressive strength, water absorption, scanning electron microscopy (SEM), velocity of propagation of the ultrasound wave and static and dynamic elastic modulus to analyze the 12 traces. According to results, an optimal substitution content was determined based on the closest characterization to the reference trace, in other words, the trace that was less influenced by the performed substitution, which was T11 with 25% substitution and factor a/c 0.55. In addition to this, a sustainable study was conducted where the cost of concrete reduced on 22% and 16,2% of CO₂ emissions reduction were achieved for the optimized trace, realizing that structural concrete with partial replacement of waste glass powder is viable.

Keywords: waste glass powder; concrete with waste; binder substitution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Forma direta.....	31
Figura 2 – Forma indireta.....	31
Figura 3 – Forma semidireta.....	31
Figura 4 – PDV.....	34
Figura 5 – Demanda mundial de vidro planos em 2011.....	35
Figura 6 –Estruturas do vidro.....	36
Figura 7 – Profundidade de penetração de água no concreto com diferentes quantidades de pó de vidro.....	45
Figura 8 – Absorção do concreto em função da idade e substituição de PDV.....	45
Figura 9 – Relação entre módulo de elasticidade e porcentagem de substituição para diferentes conteúdos de cimento.....	46
Figura 10 – Resistência do concreto em diferentes idades e substituição de vidro.....	47
Figura 11 - Resistência a compressão com substituição parcial do vidro marrom no cimento.....	48
Figura 12 – Resistência a compressão com substituição parcial do vidro verde no cimento.....	48
Figura 13 – Resistência a compressão com substituição parcial do vidro neon no cimento.....	48
Figura 14 – Desempenho CPV-ARI x Exigência da norma.....	55
Figura 15 – Fábrica Cristal Sete em Apucarana (PR).....	56
Figura 16 – Resíduo de lapidação de vidro.....	57
Figura 17 – Moedor de barras.....	57
Figura 18 – MEV.....	60
Figura 19 – Confecção dos corpos de prova.....	67
Figura 20 – Câmara úmida de armazenamento dos corpos de prova.....	68
Figura 21 – Prensa para ensaio de resistência à compressão.....	69
Figura 22 – Pesagem dos corpos de prova.....	70
Figura 23 – Secagem dos corpos de prova na estufa.....	71
Figura 24 – Imersão dos corpos de prova em água.....	72
Figura 25 – Ensaio de VPU.....	74
Figura 26 – Ensaio com Sonelastic.....	75
Figura 27 – Amostras coletadas dos corpos de prova.....	76
Figura 28 – Amostras para serem metalizadas.....	76
Figura 29 – Curva característica do agregado graúdo.....	78
Figura 30 – Curva característica do agregado miúdo.....	79
Figura 31 – Amostras de PDV.....	80

Figura 32 –Fases da amostra de PDV.....	82
Figura 33 – Lista de picos do PDV apresentadas pelo programa X’pert High Score.....	82
Figura 34 – Curva granulométrica.....	83
Figura 35 – Comparação de resistência à compressão.....	91
Figura 36 – Absorção de água por imersão média.....	94
Figura 37 – Índice de vazios médio.....	94
Figura 38 – Comparação Absorção x Índice de vazios.....	95
Figura 39 –Comparação entre as massas específicas médias.....	95
Figura 40 – Velocidade de propagação de onda de ultrassom média.....	97
Figura 41 – Módulos de elasticidade dinâmico.....	102
Figura 42 – Módulos de elasticidade estático.....	102
Figura 43 – MEV traços T1 à T6.....	104
Figura 44 –MEV traços T7 à T12.....	105
Figura 45 – Resistência à compressão x Módulo de elasticidade.....	107
Figura 46 – Resistência à compressão x Módulo de elasticidade.....	108
Figura 47 – Absorção de água x Resistência à compressão.....	110
Figura 48 – Absorção de água x Resistência à compressão.....	111
Figura 49 – Contribuição nas emissões de CO2 na fabricação de 1m ³ de Concreto T1 àT6.....	118
Figura 50 - Contribuição nas emissões de CO2 na fabricação de 1m ³ de Concreto T7 àT12.....	118

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Composição dos principais minerais do clínquer.....	24
Tabela 2 – Principais componentes do cimento Portland.....	25
Tabela 3 – Classes de resistência dos concretos estruturais.....	28
Tabela 4 – Principais famílias dos vidros.....	37
Tabela 5 – Composições típicas dos diversos tipos de vidros comerciais.....	38
Tabela 6 – Composição química do cimento e do pó de vidro.....	43
Tabela 7 – Traços e quantidades de corpos de prova com substituição parcial de PDV no aglomerante.....	53
Tabela 8 – Resultados dos testes.....	65
Tabela 9 – Traços em massa para os concretos com substituição parcial de PDV no aglomerante	66
Tabela 10 – Caracterização do agregado graúdo.....	78
Tabela 11 – Caracterização do agregado miúdo.....	79
Tabela 12 – Porcentagem passante (%).....	84
Tabela 13 – Classificação granulométrica segundo a ABNT NBR 6502:1995.....	84
Tabela 14 – Coeficiente de uniformidade e curvatura.....	85
Tabela 15 – Massa específica PDV.....	85
Tabela 16 – Teor de umidade PDV.....	85
Tabela 17 – Massa unitária PDV e cimento.....	86
Tabela 18 – Resultado do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (slump).....	88
Tabela 19 – Traços refeitos para ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (slump).....	88
Tabela 20 – Massa específica do concreto fresco.....	90
Tabela 21 – Resistência à compressão média.....	90
Tabela 22 – Classe dos traços estudados.....	92
Tabela 23 – Resultados ensaio de absorção.....	93
Tabela 24 – Resultados ensaio de VPU.....	96
Tabela 25 – Classificação relacionando velocidade de onda do ultrassom com qualidade do concreto.....	98
Tabela 26 – Módulos de elasticidade estático e dinâmico.....	99
Tabela 27 – Resultados Sonelastic e módulo de elasticidade pela NBR 8522:2021.....	100
Tabela 28 – Módulos de elasticidade pela velocidade de onda do ultrassom.....	101
Tabela 29 – Perca em porcentagem entre os módulos de elasticidade.....	103
Tabela 30 – Resistência à compressão x Módulo de elasticidade.....	107

Tabela 31 – Resistência à compressão x Módulo de elasticidade.....	108
Tabela 32 – Absorção de água x Resistência à compressão.....	110
Tabela 33 – Absorção de água x Resistência à compressão.....	111
Tabela 34 – Resistência à compressão x Slump.....	112
Tabela 35 – Resistência à compressão x Slump.....	112
Tabela 36 – Valores dos insumos.....	113
Tabela 37 – Valor do volume por traço.....	114
Tabela 38 – Cálculo de material de cada traço.....	115
Tabela 39 – Viabilidade de custos.....	115
Tabela 40 – Emissão de CO ₂ dos materiais componentes.....	117
Tabela 41 – Redução na emissão de CO ₂	117
Quadro 1 – Tipos de cimentos e suas composições.....	25
Quadro 2 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).....	54
Quadro 3 – Características cimento CPV-ARI marca LIZ.....	55
Quadro 4 – Classe de agressividade ambiental.....	64
Quadro 5 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.....	65
Quadro 6 – Classes de consistência.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS

Si	Silício
O ₂	Oxigênio
Na	Sódio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
DRX	Difração de Raio X
CaO	Óxido de cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
SiO	Óxido de silício
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro III
RAA	Reação álcali sílica
a/c	Água/cimento
PDV	Pó de vidro
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
3CaO.SiO ₂	Silicato tricálcico (C ₃ S)
2CaO.SiO ₂	Silicato dicálcico (C ₂ S)
3CaO.Al ₂ O ₃	Aluminato tricálcico (C ₃ A)
4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	Ferroaluminatotetracálcico (C ₄ AF)
Na ₂ O	Óxido de sódio
K ₂ O	Óxido de potássio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
SiO ₂	Dióxido de silício
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
Si(OH) ₄	Hidróxido de silício
K	Potássio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
VPU	Velocidade de propagação de onda de ultrassom
COMCAP	Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa – UEM
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	20
2 CONCRETO	22
2.1 CIMENTO	22
2.2 AGREGADOS DO CONCRETO	25
2.3 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO	27
2.3.1. TRABALHABILIDADE	27
2.3.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	27
2.3.3. MASSA ESPECÍFICA	28
2.3.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA	29
2.3.5. MÓDULO DE ELASTICIDADE	29
2.3.6. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA DE ULTRASSOM	30
2.3.7. MICROESTRUTURA	32
3. RESÍDUO DE LAMINAÇÃO DE VIDRO - PÓ DE VIDRO	34
3.1 VIDRO	34
3.2 GERAÇÃO DO RESÍDUO VÍTREO	38
3.2.1. RESÍDUO DE LAPIDAÇÃO DE VIDRO	39
3.3 CONCRETO PRODUZIDO COM RESÍDUOS DE VIDRO E SUAS PROPRIEDADES.	40
3.3.1. A UTILIZAÇÃO DO PÓ DE VIDRO NA CONFECÇÃO DOS CONCRETOS E A POZOLANICIDADE...	41
3.3.2. TRABALHABILIDADE DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO DE PDV	43
3.3.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA NO CONCRETO	44
3.3.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO COM PDV	46
3.3.5. RESISTÊNCIA DO CONCRETO CONFECIONADO COM PDV EM SUBSTITUIÇÃO AOS SEUS COMPONENTES BÁSICOS	46
3.3.6. DURABILIDADE DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE PDV	49
3.3.6.1 REAÇÃO ÁLCALI SÍLICA	51
4 MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL	52
4.2 MATERIAIS	54
4.2.1 AGLOMERANTE	54

4.2.2	AGREGADO GRAÚDO.....	56
4.2.3	AGREGADO MIÚDO.....	56
4.2.4	PDV.....	56
4.2.5	ÁGUA.....	58
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	58
4.3.1	AGREGADO GRAÚDO.....	58
4.3.2	AGREGADO MIÚDO.....	59
4.3.3	PDV.....	59
4.3.3.1	DIFRAÇÃO DE RAIO-X (DRX)	59
4.3.3.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	60
4.3.3.3	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	61
4.3.3.4	MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE UMIDADE	62
4.3.3.5	MASSA UNITÁRIA	63
4.3.3.6	TEMPO DE PEGA	63
4.3.3.7	MÓDULO DE FINURA	63
4.4	CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS COM PDV.....	63
4.4.1	DOSAGEM E DEFINIÇÃO DO TRAÇO EXPERIMENTAL DO CONCRETO.....	63
4.4.2	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	68
4.4.2.1	ENSAIO DE CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (SLUMP TEST).....	68
4.4.2.2	MASSA ESPECÍFICA.....	68
4.4.3	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO ENDURECIDO	69
4.4.3.1	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	69
4.4.3.2	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	70
4.4.3.3	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA DE ULTRASSOM (VPU).....	73
4.4.3.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - SONELASTIC.....	74
4.4.3.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	75
4.4.3.6	ANÁLISE SUSTENTÁVEL	77
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	78
5.1.1	AGREGADO GRAÚDO.....	78
5.1.2	AGREGADO MIÚDO.....	79
5.1.3	PDV.....	80
5.1.3.1	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	80
5.1.3.2	DRX.....	82
5.1.3.3	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	83
5.1.3.4	MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE UMIDADE	85
5.1.3.5	MASSA UNITÁRIA	86

5.1.3.6 TEMPO DE PEGA	87
5.1.3.7 MÓDULO DE FINURA	87
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS COM PDV	87
5.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	87
5.2.1.1 ENSAIO DE CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (SLUMP)	87
5.2.1.2 MASSA ESPECÍFICA	89
5.2.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO ENDURECIDO	90
5.2.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA	90
5.2.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA	93
5.2.2.3 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA DE ULTRASSOM (VPU)	96
5.2.2.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE	98
5.2.2.4.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE ABNT NBR 6118:2014	98
5.2.2.4.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE PELO SONELASTIC	99
5.2.2.4.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE PELA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA DE ULTRASSOM	100
5.2.2.4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS DE ELASTICIDADE	101
5.3 MEV	103
5.4 CORRELAÇÕES CARACTERÍSTICAS	107
5.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO X MÓDULO DE ELASTICIDADE	107
5.4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO X ABSORÇÃO DE ÁGUA	109
5.4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO X SLUMP	111
5.5 DEFINIÇÃO DOS MELHORES TRAÇOS	113
5.6 ANÁLISE SUSTENTÁVEL	113
5.6.1 VIABILIDADE DE CUSTO	113
5.6.2 EMISSÃO DE CO₂	116
6 CONCLUSÃO	119
6.1 TRABALHOS FUTUROS	120
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
APÊNDICE A - Resultados do ensaio de resistência à compressão	128
APÊNDICE B - Resultados do ensaio de absorção de água	129
APÊNDICE C - Resultados do ensaio de VPU	130
APÊNDICE D - Resultados dos módulos de elasticidade	131
APÊNDICE E - Cálculo de emissão de CO₂ por m³ concreto (a/c 0,6)	132
APÊNDICE F - Cálculo de emissão de CO₂ por m³ concreto (a/c 0,55)	133

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A construção civil aparece no desenvolvimento do país como uma atividade de grande importância trazendo muitos benefícios não apenas economicamente, mas também socialmente. Entretanto é um setor que apresenta grandes impactos ambientais que podem ser visto em todas as fases de sua produção(LARUCCIA, 2014).

De acordo com CBIC (2022) a construção civil teve um crescimento de 9,7% em 2021, após registrar uma queda de 6,4% em 2020 devido à pandemia. Esse foi o melhor desempenho desde 2010, que teve um crescimento de 13,1%. O PIB do Brasil registrou uma alta de 4,6% em 2021, onde a construção civil impulsionou esse valor.

Os materiais aplicados na construção civil são de diversas naturezas, dentre estes materiais está o concreto aplicado nas mais diferentes obras em tamanha quantidade que seu consumo mundial só perde para a água. Além de ser o setor que mais utiliza recursos naturais no mundo, consome muitas fontes não renováveis, em especial aqueles com origem mineral. Também tem uma participação significativa na geração de poluentes e um dos maiores produtores de resíduos sólidos urbanos (FERREIRA; LIMA, 2013).

O setor da construção civil apresenta quatro grupos de impactos ambientais, consumo de recursos naturais, consumo de energia, geração de resíduos e perdas e poluição ambiental (FERREIRA; LIMA, 2013). Os principais componentes do concreto são o cimento, areia, pedra e água. O que contribui para a crescente exploração de recursos naturais a cada ano é a necessidade de suprir o crescimento da quantidade de concreto na fabricação de estruturas.

No período de 2019/2020 foram vendidos 54,5 milhões de toneladas de cimento, no mesmo período de 2020/2021 64 milhões de toneladas e 2021/2022 63,8 milhões de toneladas. Essa queda na venda de cimento ocorreu devido a alta de juros e maior inflação no setor (SNIC, 2022).

Atualmente muitos estudos vêm sendo realizados sobre uso de resíduos na substituição de cimento ou agregado miúdo no concreto. Entre eles temos as cerâmicas, pó de vidro, cinza

de bagaço de cana, resíduos de garrafa PET, entre outros. No presente trabalho foi escolhido o resíduo da laminação de vidro como substituto parcial do aglomerante na confecção do concreto estrutural.

O processo de produção do cimento corresponde globalmente por 7% do gás carbônico emitido pelo homem. Com uma série de ações implementadas no setor o Brasil participa com aproximadamente 2,6%, sendo um dos países que emite a menor parcela de CO₂ por tonelada de cimento no mundo (SNIC, 2022).

O vidro e seus resíduos são materiais totalmente recicláveis, porém a sua destinação não é simples devido à logística e as partículas pequenas (de baixa granulometria), o que pode levar ao descarte impróprio gerando problemas ambientais. Portanto a utilização deste resíduo traria vantagens tanto para a preservação do meio ambiente quanto para a diminuição de utilização de recursos naturais.

De acordo com VGRESÍDUOS (2019), menos de 50% de embalagens de vidro são recicladas no Brasil, sendo que são enviadas a aterros sanitários cerca de 470 mil toneladas de embalagens de vidro usadas anualmente.

Pesquisas apontam que os resíduos de vidro podem ser uma boa solução já que quando empregados com o concreto podem melhorar propriedades mecânicas e relacionadas à durabilidade, devido as suas características químicas e físicas (GUIGNONE, 2017).

Várias pesquisas foram feitas nas últimas décadas sobre concreto com substituição de resíduos de vidro como agregado ou ligante. Pode-se observar que do ponto de vista técnico e da engenharia os resíduos de vidro podem ser utilizados na produção do concreto (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

Com os benefícios apresentados pode-se reconhecer que a necessidade dos estudos em que o resíduo de vidro seja aplicado sem abrir mão das propriedades originais do concreto, é não somente muito benéfico como também necessário em vista da possível escassez de matéria prima (ANTÔNIO, 2012).

Outrossim, com a utilização do resíduo de lapidação de vidro na confecção do concreto, seria resolvido um grande problema que é a destinação incorreta deste resíduo, para que não haja problemas ambientais com o descarte impróprio e ao mesmo tempo criando um

concreto com melhor qualidade para utilização e diminuindo a exploração desenfreada de recursos naturais para a confecção do concreto.

O uso do pó de vidro pode melhorar a estrutura interna do concreto e aumentar o teor de silicato de cálcio hidratado com maiores idades utilizando uma substituição adequada. Esse efeito pode ser atribuído à reação pozolânica e ao efeito microfiller do pó de vidro. (HE et al., 2019).

Aumentar a quantidade de pó de vidro no concreto o influência tanto no estado fresco quanto endurecido. A resistência do concreto não apresentou aumento com 28 dias, porém apresentou um aumento significativo depois de 90 dias, podendo ser o progresso da reação pozolânica a origem desse aumento (ELAQRA; HALOUB; RUSTOM, 2019).

A proposta deste trabalho é substituir parcialmente o aglomerante por resíduos da laminação de vidro na confecção de concretos estruturais. Serão moldados corpos de prova para este estudo e então serão realizados ensaios. Serão realizadas análises do ponto de vista das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Os ensaios servirão para avaliar a viabilidade da substituição no aglomerante e qual traço será mais vantajoso do ponto de vista da utilização como um concreto estrutural e sustentável.

1.1 JUSTIFICATIVA

O crescimento da população mundial fez com que a quantidade de resíduos sólidos aumentasse de forma exponencial, já que esse aumento da população e a falta de conscientização foram a grande contribuinte para essa geração acelerada de resíduos. Com o passar dos anos pode ser visto cada vez mais a necessidade do descarte correto desses resíduos e sua reutilização. Com isso busca-se então que o material utilizado na fabricação dos bens de consumo seja reutilizado, reciclando-os.

O descarte indevido desses resíduos está afetando o meio ambiente, já que há o alto custo de destinação correta, dificuldade de logística e muitas vezes o descaso dos empresários em relação ao assunto. O compromisso com o descarte correto e uma conscientização sobre o a importância dessa destinação é necessário para que essa quantidade possa ser diminuída no futuro.

O vidro é um material 100% reciclável, porém nem todo ele pode ser reciclado por conta de impurezas, cores misturadas ou custo. Ele é uma substância amorfa, inorgânica e fisicamente homogênea obtida através do resfriamento de uma massa de óxidos ou derivados e misturas, onde têm-se a sílica ou óxido de silício como principal constituinte (ANTÔNIO, 2012).

O pó de vidro advém da lama da lapidação do vidro, que é seca e destorroada para que se obtenha então o pó de vidro que será incorporado no concreto. A indústria de beneficiamento de vidros produz uma quantidade expressiva de resíduos industriais, tendo em vista que a empresa onde se obteve o material para este estudo, processa aproximadamente 1000 m² de vidro por mês gerando cerca de 15 toneladas de resíduo.

De acordo com a empresa Cristal Sete, onde o resíduo foi coletado, nos anos de 2019, 2020 e 2021 foram gerados 75, 80 e 85 toneladas de resíduo de laminação de vidro respectivamente. Atualmente é gerado em torno de 6,5 toneladas por mês. Com a pandemia que assolou o mundo no ano de 2020 o volume de venda de vidro temperado caiu cerca de 30% nos primeiros meses, consequentemente afetando a produção do resíduo de lapidação de vidro. Porém passados esses primeiros meses voltou-se ao normal e não houve mais alteração. Pode-se perceber que nem uma pandemia global pode diminuir a quantidade de resíduo gerado.

A utilização do pó de vidro além de proporcionar melhorias em relação ao desempenho do concreto também beneficia o meio ambiente, já que colabora com sua destinação, que seria em grande parte descartado. Com a utilização do resíduo de vidro tem-se um aumento na vida útil do concreto, diminuindo a deterioração precoce das construções, aumentando assim o período de duração da edificação (GUIGNONE, 2017).

O reaproveitamento dos resíduos de vidro iria auxiliar na solução dos problemas em relação aos resíduos urbanos e industriais como também aparece como um novo material para a indústria do cimento, já que o vidro não é um material biodegradável e não auxilia com a questão dos aterros sanitários, desperdiça matéria-prima e energia além do custo da disposição (BARROS, 2016).

Além das melhorias já citadas, a utilização desse resíduo contribui na redução do consumo de recursos naturais, da emissão de CO₂ e do consumo energético, devido à

diminuição do consumo de cimento na confecção de matrizes cimentícias (GUIGNONE, 2017).

O vidro é amorfo e contém grandes quantidades de silício e cálcio. Teoricamente ele é pozolânico ou quando finamente moído possui a mesma natureza que a matriz cimentícia, assim ele pode ser utilizado na substituição de cimento no concreto (SHI; ZHENG, 2007).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é determinar a viabilidade da substituição parcial do aglomerante por resíduo de laminação de vidro, a partir de agora denominado PDV (pó de vidro), na fabricação de concreto estrutural, com base nas propriedades químicas e físicas e determinar qual o uso mais adequado para o resíduo de acordo com os resultados do concreto obtido.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar o PDV de acordo com suas características químicas (Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raio X (DRX), e físicas (granulometria, massa específica e massa unitária, tempo de pega, módulo de finura);

- Analisar a influência da substituição do aglomerante pelo PDV nas características físicas e mecânicas dos concretos estruturais. No estado fresco com a massa específica e teste do abatimento do concreto, também conhecido como teste de slump. No estado endurecido as análises de massa específica, resistência à compressão, absorção de água, MEV, velocidade de propagação da onda de ultrassom e módulo de elasticidade estático e dinâmico;

- Estabelecer os melhores teores de substituição do aglomerante e avaliar a melhor utilização, considerando os parâmetros de sustentabilidade do material, do resíduo de laminação para confecção de concretos estruturais.

1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos.

No Capítulo 1 foi introduzido a temática do trabalho, justificativa e objetivos geral e específico.

Nos Capítulo 2 aborda sobre o concreto, seus componentes e suas propriedades.

O capítulo 3 apresenta as características do pó de vidro para um melhor entendimento sobre o assunto a ser abordado.

O Capítulo 4 apresenta materiais e métodos.

Capítulo 5 mostra os resultados e discussão.

Por fim o capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho.

CAPÍTULO 2

CONCRETO

A facilidade de uso e a versatilidade do concreto é o que leva a arquitetos e engenheiros terem sua preferência na elaboração de projetos.

O cimento Portland quando adicionado água forma para a mistura de concreto uma pasta fluida, que muda dependendo da quantidade de água, que nas primeiras horas pode ser moldado e conforme o tempo passa endurece pela ação do cimento com a água, onde adquire resistência mecânica com desempenho estrutural sob vários ambientes (HELENE; ANDRADE, 2007).

Na confecção do concreto em escala macro é necessária uma grande quantidade de recursos naturais, que poderá levar a seu esgotamento. A utilização da incorporação de resíduos em matrizes cimentícias é uma opção que pode ser considerada para a diminuição da utilização desses recursos naturais, utilizando o resíduo na forma de adições e substituições, tanto parciais quanto totais de aglomerantes e agregados.

O concreto é uma mistura de quatro componentes de base, os quais são cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água. Com base em sua massa específica o concreto pode ser dividido em três grandes categorias, o de densidade normal (na ordem de 2400 Kg/m^3) que é o mais comum em ser utilizados em estruturas, concretos leves (com massa específica abaixo de 1800 Kg/m^3), mais utilizados em locais que priorizam a leveza e os concretos pesados (densidade superior a 3200 Kg/m^3) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1 CIMENTO

O cimento pode ser definido como um material com traços adesivos e coesivos que são capazes de unir partes minerais fragmentadas para uma unidade compacta (NEVILLE, 2016).

De acordo com a ABNT NBR 11172:1990 aglomerante pode ser de origem mineral, apresentado de forma pulverulenta e na presença de água cria uma pasta com características aglutinantes, hidráulica que a pasta endurece apenas com reação de água ou aéreo, cuja pasta só endurece por reações de hidratação ou ações químicas. De acordo com Diprotec os aglomerantes mais empregados são gesso, cal e o cimento Portland onde os mais utilizados são o CPII e o CPV-ARI.

O cimento Portland é um dos materiais mais empregados na construção no mundo graças à sua grande propriedade de utilização na engenharia e as técnicas de fabricação bem desenvolvidas (SHARIFI; AFSHOON; FIROOZJAIE, 2015).

O cimento Portland é o principal aglutinante do concreto, porém sua fabricação não favorece o meio ambiente, já que uma tonelada de sua produção gera quase 0,7 tonelada de CO₂ (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

A produção de cimento consome muita energia e é muito poluente, colaborando com 5 a 8% da emissão de gás carbônico (CO₂) na atmosfera, lançando uma tonelada de dióxido de carbono para uma tonelada de cimento produzido (BARROS, 2016).

Mehta e Monteiro (2014) consideram que o cimento Portland é um pó cinza com partículas angulares compostas pela moagem do clínquer, correspondendo a uma mistura heterogênea de diversos minerais alcançados a partir de reações a altas temperaturas entre óxido de cálcio, sílica, óxido de ferro e alumina.

O cimento não teve seu valor diminuído mesmo com o desenvolvimento de uma grande quantidade de materiais na construção civil, já que ele apresenta boas propriedades mecânicas, elevada durabilidade, valor baixo e uma grande flexibilidade de utilização e quando comparado a outros materiais exibem várias vantagens (BARROS, 2016).

Para a produção de concreto o cimento reage quimicamente com a água endurecendo, sendo então denominados cimentos hidráulicos. Estes são formados principalmente de silicatos e aluminatos de cálcio e podem ser classificados de forma geral como cimentos naturais, cimentos Portland e cimentos aluminosos (NEVILLE, 2016).

Do ponto de vista prático é importante definir o ponto de hidratação do cimento, já que determina a disponibilidade para que os trabalhadores utilizem o concreto fresco (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

O constituinte principal do cimento Portland é o clínquer Portland. De acordo com Battagin (2011) para produção do clínquer deve apresentar um material inicial contendo em sua composição química seus principais óxidos, que são CaO, SiO e Fe₂O₃. Esses componentes dificilmente são vistos em proporções corretas em uma única rocha, por isso é feita a mistura de dois ou mais tipos de rochas.

Segue na tabela 1 os principais minerais presentes no clínquer do cimento Portland comum.

Tabela 1. Composição dos principais minerais do clínquer

Composição	Constituição	Sigla	Propriedades Tecnológicas
Silicato tricálcio (alita)	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	Endurecimento rápido; Alto calor de hidratação; Alta resistência inicial.
β-Silicato dicálcico (belita)	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	Endurecimento lento; Baixo calor de hidratação; Baixa resistência inicial.
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	Pega muito rápida; Suscetibilidade ao ataque em meios de sulfatos; Alto calor de hidratação; Alta retração; Baixa resistência inicial.
Composição	Constituição	Sigla	Propriedades Tecnológicas
Ferroaluminatotetracálcico (celita)	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	Endurecimento lento; Resistência a meio sulfatado; Pouca contribuição para a resistência.
Cal livre	CaO	C	Aceitável em pequenas quantidades; Altos teores causam expansão e fissuração.
Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O		Controlador de pega

Fonte: Adaptada Armelin e Isaia (1991), apud Barros (2016)

Na tabela 2 são apresentados os principais componentes do cimento Portland.

Tabela 2. Principais componentes do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminatotetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Adaptada Neville (2016)

De acordo com Battagin (2011) os cimentos podem ser classificados de acordo com o quadro 1.

Quadro 1 – Tipos de cimentos e suas composições

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Fíler calcário
Comum	CPI	25, 32, 40	100	0		
Comum com Adição	CPI-S	25, 32, 40	99-95	1-5		
Composto com Escória	CPII-E	25, 32, 40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com Pozolana	CPII-Z	25, 32, 40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Fíler	CPII-F	25, 32, 40	94-90	0	0	6-10
Alto-Forno	CPIII	25, 32, 40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CPIV	25, 32	85-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	–	100-95	0	0	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25, 32, 40	(*)			
Baixo Calor de Hidratação	BC	25, 32, 40				
Branco Estrutural **	CPB	25, 32, 40	–	–	–	–

(*) A composição depende do tipo original do qual é derivado.

** Outro tipo de cimento branco é também produzido: Cimento Portland Branco não Estrutural (CPB).

Fonte: BATTAGIN (2011)

2.2. AGREGADOS DO CONCRETO

Agregados são definidos como materiais granulares, com dimensões e propriedades determinadas, sem forma e volume estabelecidos, como pedra britada, cascalho e areias

naturais obtida pela moagem de rocha. Argilas e outros substitutos como resíduos e outros também são utilizados na construção civil (CAMPOS et. al, 2007).

De acordo com a norma ABNT NBR 7211:2019 o agregado para concreto deve ser constituído por grãos de minerais duros, compactos, duráveis, estáveis, limpos que não afetem o endurecimento e a hidratação do cimento e a proteção contra corrosão da armadura.

Os agregados tem influência direta nas propriedades dos concretos, a massa específica dos agregados tem ligação direta com a massa específica dos concretos, ou seja, se existe a necessidade da utilização de concretos leves obrigatoriamente os agregados que o compõem devem ter massa específica reduzida. Já a resistência do concreto é afetada diretamente pela porosidade, forma e rugosidade dos agregados que o compõe, por isto estes materiais tem suma importância na confecção e dosagem desta matriz cimentícia (BUTTLER, 2003).

Os agregados podem ser classificados em relação a dimensões das partículas composição mineral, massa unitária e origem, que podem ser naturais, artificiais ou industrializados.

As características do agregado como tamanho, superfície, textura, graduação, forma e volume tem efeito na reologia do concreto (HU; WANG, 2011).

A qualidade do concreto será influenciada pela qualidade dos materiais utilizados, portanto é de suma importância que se conheça as características dos agregados através de ensaios laboratoriais (AZEVEDO et al., 2017).

As características e composição do agregado influenciam significativamente na reologia do concreto (HU; WANG, 2011). A trabalhabilidade do concreto depende do fator a/c e do formato dos grãos do agregado (AZEVEDO et al., 2017).

As propriedades do concreto fresco de concretos e argamassas são influenciadas pelas diversas formas dos grãos dos agregados. A textura do agregado interfere na sua aderência com a pasta de cimento (BARROS, 2016).

O agregado miúdo deve conter grãos de diferentes tamanhos, com boa distribuição granulométrica. A quantidade de água na mistura do concreto é um fator importante, então é necessário levar em conta a umidade presente no agregado. A necessidade do uso de água no concreto irá diminuir com o aumento do tamanho das partículas agregadas (HU; WANG, 2011).

A resistência do concreto em relação à compressão pode ser alterada de um agregado para outro devido a sua granulometria (AZEVEDO et al., 2017).

O agregado deve ser escolhido cuidadosamente para o concreto, já que o material pode ser reativo e causar danos na estrutura. Dentre esses processos um dos mais preocupantes é a reação álcali sílica (RAA), um processo químico complexo que ocorre no concreto endurecido (TECNOSIL, 2019). Os agregados naturais mais utilizados na construção são areia e brita, que são escolhidos de acordo com a utilização do concreto.

2.3. CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

2.3.1. Trabalhabilidade

Quando as características do concreto fresco são adequadas à obra de destino e aos métodos de adensamento, acabamento e lançamento que serão adotados sem apresentar segregação ou exsudação, ele é dito como trabalhável (SOBRAL, 2000).

A trabalhabilidade do concreto é influenciada pela relação água e materiais secos, traço, consumo e tipo de cimento, tamanho, textura e forma dos agregados, como por fatores externos (condição de transporte, densidade e distribuição de armaduras, entre outros (HELENE; ANDRADE, 2010). Para que o concreto fresco seja bem preparado é de grande importância a escolha do teor na sua preparação (SOBRAL, 2000). O parâmetro externo é o que vai determinar a consistência escolhida para o projeto.

A consistência do concreto é medida pelo ensaio de abatimento de tronco de cone ou slump test. Essa característica é afetada por três classes de fatores, as características do próprio concreto, condições de manipulação e condições de projeto (SOBRAL, 2000).

2.3.2. Resistência à Compressão

A resistência à compressão é um importante parâmetro em um projeto estrutural, já que ele irá garantir a qualidade e a segurança prevista em um projeto.

E em relação à classificação do concreto quanto à resistência mecânica eles são considerados de baixa resistência quando ela for menor que 20 MPa, moderada se a resistência for de 20 a 40 MPa e alta se a resistência à compressão for maior que 40 MPa.

A ABNT NBR 8953:2015 relaciona o concreto em dois grupos, onde o primeiro é referente aos concretos convencionais, resistências variando de 20 a 50 MPa e o segundo grupo de concretos de alta resistência, com resistência de 55 a 100 MPa, de acordo com a tabela 3 (BARROS, 2016).

Tabela 3. Classes de resistência dos concretos estruturais

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão (MPa)	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão (MPa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: ABNT NBR 8953 (2015)

2.3.3. Massa Específica

A massa específica de um material é a razão entre a massa e o volume do material. Ela é a propriedade da substância e não do corpo.

De acordo com a ABNT NBR 8953:2015 o concreto pode ser considerado normal (C) quando a massa específica seca for entre 2000 e 2800 Kg/m³, leve (CL) quando a massa específica seca for inferior a 2000 kg/m³ e pesado ou denso (CD) quando a massa específica seca for superior a 2800 Kg/m³.

A classificação do concreto de acordo com a massa específica será determinado de acordo com a necessidade da obra.

2.3.4. Absorção de Água

Para obter-se um concreto de qualidade é desejado que este absorva pouca água, já que a absorção está ligada a porosidade desse concreto. Quanto menos porosidade o concreto apresentar, menos água será absorvida por ele, com isso sua durabilidade e resistência poderão ser maiores.

Os vazios capilares são os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratada. O volume de vazios na pasta de cimento diminui quando o fator a/c é menor ou com o aumento da idade de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Os mesmos também falam que permeabilidade é a facilidade que sobre pressão o fluido pode passar pelo sólido, deixando claro que o tamanho e a continuidade dos poros na microestrutura de um sólido determinam sua permeabilidade.

Os poros capilares, que podem estar presente em qualquer parte da hidratação, é a parte total do volume que não foram preenchidos durante a hidratação. Na pasta de cimento a porosidade depende da relação água/cimento da mistura e do grau de hidratação (NEVILLE, 2016).

A água presente na mistura do concreto, a porosidade dos agregados utilizados, modificação na zona de contato entre a pasta e os agregados, fissuração e imperfeições na produção do concreto são os fatores que causam sua porosidade (CAMPITELI, 1987).

É necessário observar a umidade que o concreto absorve para que patologias ligadas à absorção de água não atrapalhem a estrutura.

2.3.5. Módulo de Elasticidade

Módulo de elasticidade ou módulo de Young é expresso pela razão entre a tensão aplicada em um corpo e sua deformação verificada imediata (PACHECO et al., 2014).

Como o módulo de elasticidade relaciona a deformação sofrida pelo concreto sobre o efeito das tensões, é uma propriedade mecânica do concreto que merece ser estudada e ponderada em um projeto.

Vários fatores podem afetar o módulo de elasticidade como agregado, cimento, porosidade, parâmetros de ensaio, porém a relação a/c é um dos mais significativos, já que interfere na resistência à compressão do concreto (PACHECO et al., 2014).

Quanto menor a porosidade e a absorção, maior são o módulo, rigidez e resistência do concreto.

2.3.6. Velocidade de Propagação de Onda de Ultrassom (VPU)

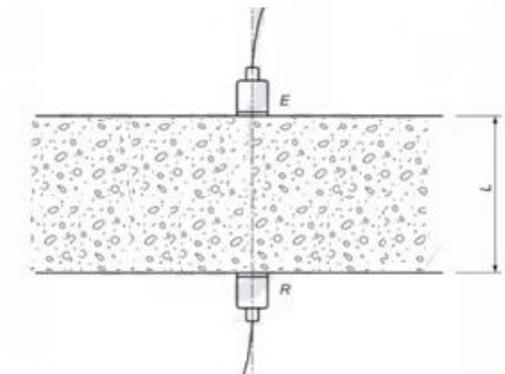
O ensaio VPU é considerado não destrutivo e tem a possibilidade de avaliar a qualidade do concreto. É medido o tempo de viagem das ondas e quanto maior o tempo de deslocamento menor é a qualidade do concreto, com maiores deficiências. Quando as ondas de ultrassom apresentam um menor tempo de viagem é relacionado a um concreto de qualidade com menos anomalias.

Com esse ensaio o concreto pode ser analisado por dentro, podendo averiguar a presença de fissuras, vazios ou outras imperfeições. Pode-se também detectar a profundidade das fissuras e mostrar a homogeneidade do concreto.

De acordo com a norma ABNT NBR 8802:2019, a medição pode ser realizada de três maneiras.

De forma direta, como mostra a figura 1.

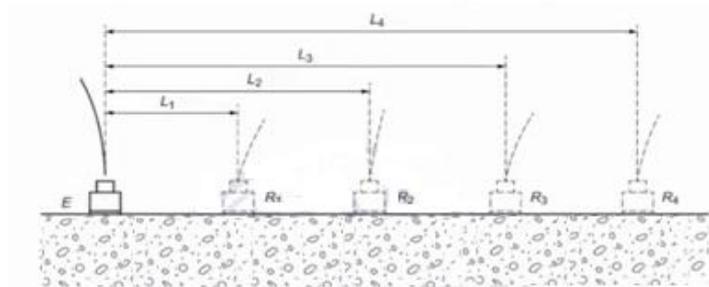
Figura 1 – Forma direta



Fonte: ABNT NBR 8802 (2019)

De forma indireta, como mostra a figura 2

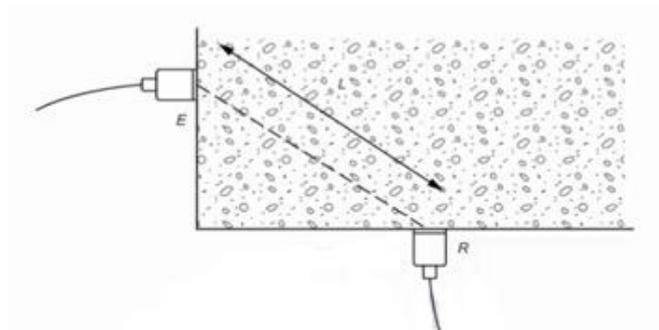
Figura 2 – Forma indireta



Fonte: ABNT NBR 8802 (2019)

De maneira semidireta, como mostra a figura 3.

Figura 3 – Forma semidireta



Fonte: ABNT NBR 8802 (2019)

2.3.7. Microestrutura

O concreto é o material estrutural mais utilizado, sua microestrutura é heterogênea e muito complexa. Ela é constituída pelo tipo, quantidade, tamanho, forma e distribuição das fases presentes em um sólido (MEHTA; MONTEIRO, 2014). As propriedades do concreto são influenciadas pela idade, umidade, histórico de carregamentos (grande parte em idade mais precoce) e temperatura (CHA et al., 2018).

Em uma seção transversal do concreto as duas fases que podem ser facilmente observadas são as partículas de agregados e o meio ligante (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O concreto pode ser considerado um material bifásico, em nível macroscópico, formado de partículas de agregado dispersas em uma matriz de pasta de cimento, macroestrutura é a estrutura de um material que pode ser visto em olho nu (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Também de acordo com Mehta e Monteiro (2014), em nível microscópico as complexidades da microestrutura do concreto não são homogeneamente distribuídas entre elas, nem homogêneas entre si. A microestrutura é a estrutura fina de um material que necessita da ajuda de um microscópio para ser visível.

Primeiramente o concreto era produzido apenas com a mistura de cimento, agregados e água, sendo o cimento quase sempre Portland. Para melhorar o estado ou propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto endurecido, pequenas quantidades de produtos químicos, chamados de aditivos, foram adicionadas (NEVILLE, 2016).

No campo dos materiais ocorreu progresso principalmente quando se teve conhecimento que as propriedades tem origem na microestrutura interna, ou seja, as propriedades de um material podem ser modificadas fazendo alterações em sua microestrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Mehta e Monteiro (2014) dizem que a microestrutura do concreto pode ter suas características resumidas em zona de transição na interface (pequena região próxima às partículas do agregado graúdo), agregado (principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional) e pasta de cimento hidratada (pastas de cimento Portland). Também segundo esses autores a pasta de cimento hidratada apresentam quatro

principais fases sólidas que são silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio, sulfoaluminatos de cálcio e grãos de clínquer não hidratados.

A pasta de cimento possui uma zona de transição, que é uma região com maior porosidade e heterogeneidade. A porosidade é originada na elevada relação água/cimento e da película de água que se forma no entorno do agregado. Nesta localidade são formados planos de ruptura a partir das falhas de aderência entre a pasta de cimento e o agregado (BARROS, 2016).

Devido a grande porosidade a zona de transição é considerada a zona mais fraca do composto, visto que quando o concreto é submetido a pequenos aumentos de carga, variações de volume e umidade, esta zona vai estar sujeita a uma microfissuração precoce (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A fase de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) constitui 50 a 60% do volume da pasta de cimento completamente hidratada, sendo a fase mais importante e determinando as propriedades da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

CAPÍTULO 3

RESÍDUO DE LAMINAÇÃO DE VIDRO - PÓ DE VIDRO

O resíduo utilizado neste trabalho é o de lapidação de vidro, PDV, como mostra a figura 4.

Figura 4 – PDV



Fonte: Autora (2022)

3.1 VIDRO

Considerado um material frágil por ter pouca resistência mecânica, o vidro pode ter novas aplicações que não seriam imaginadas tempos atrás. Dentre as aplicações dos vidros, que pertencem à classe de materiais cerâmicos, estão lentes, fibras de vidro (para reforço ou comunicação) fachadas, recipientes e janelas (BARROS, 2016). Os vidros porosos têm sido introduzidos com metais para formar fibras, que são supercondutores de eletricidade (AKERMAN, 2000).

Genericamente vidros ou corpos vítreos compreendem uma vasta variedade de substâncias e embora aparente ser um corpo sólido, devido à sua rigidez mecânica, não pode ser assim considerado já que precisam ter uma estrutura cristalina que define e caracteriza o estado sólido. Pelo ponto da estabilidade o vidro se assemelha a um sólido, no ponto de vista estrutural suas semelhanças são menos perceptíveis, fato que constitui a limitação de considerar os vidros um sólido. Em contrapartida também não pode ser aceito como líquido, ainda que justifique a designação de líquidos de viscosidade infinita, que é aplicado em muitas vezes (AKERMAN, 2000).

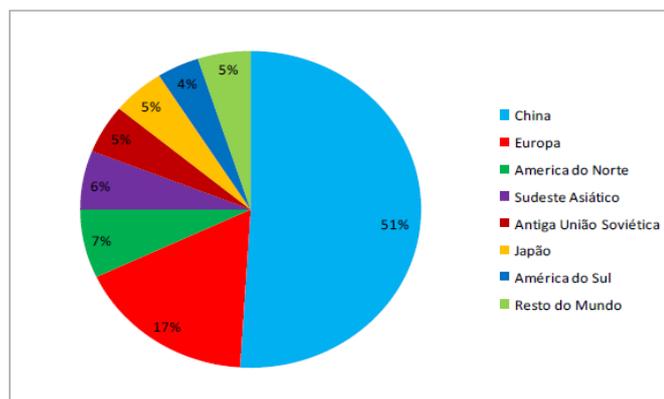
O vidro apresenta um escoamento viscoso, quando visto em altas pressões e mostram comportamentos semelhantes com dois estados da matéria. No estado líquido, quando referente à estrutura atômica e com o estado sólido, referente à rigidez dos átomos na estrutura (BARROS, 2016).

Alguns julgam o vidro como um sólido não cristalino ou um sólido amorfo. O material é amorfo quando não mostra ordem em longas distâncias. O vidro é um sólido não cristalino que exibe um fenômeno de transição vítrea (AKERMAN, 2000).

A construção civil e a indústria de automóveis são os principais mercados consumidores de vidro plano, mas também existem os de menor consumação como os eletrodomésticos e móveis (BARROS, 2016).

Na década de 1990 a China era responsável por um quinto do consumo mundial e hoje por metade do mercado global de vidros planos. Como visto na figura 5, a China, Europa e América do Norte reunidas são responsáveis por 75% da demanda mundial (MONTANO; BASTOS, 2014).

Figura 5 - Demanda mundial de vidros planos em 2011



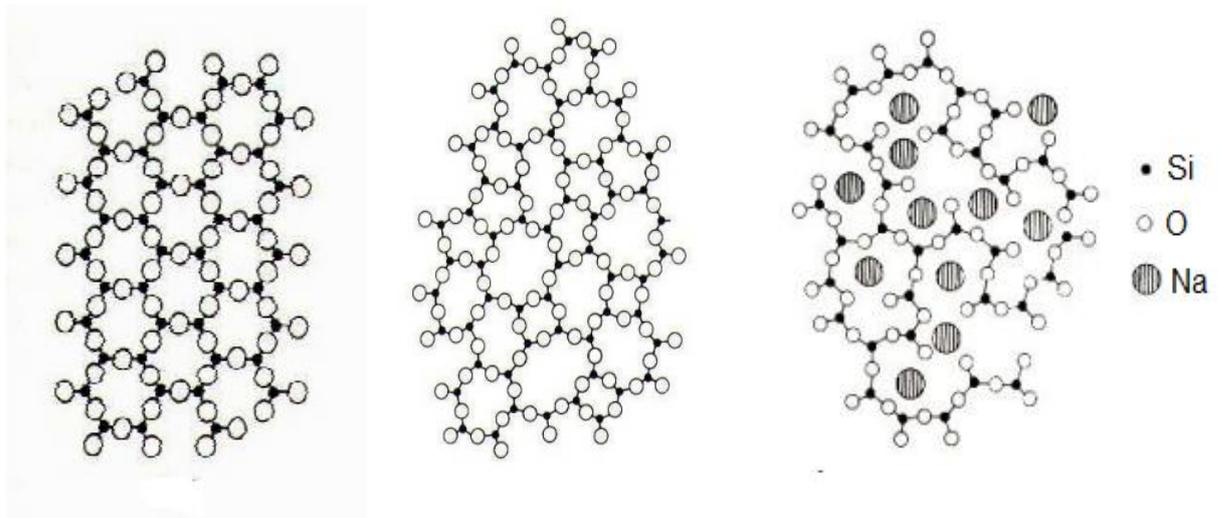
Fonte: Montano e Bastos (2014)

Como os outros materiais, as propriedades dos vidros dependem das características estruturais. Já a estrutura está vinculada principalmente à sua composição química e também pela história térmica, em uma escala menor (AKERMAN, 2000).

Os vidros mais comuns são feitos tendo a sílica como base e outros óxidos, principalmente CaO, Na₂O, K₂O e Al₂O₃, que determinam suas propriedades (BARROS, 2016).

Na figura 6 (a) segue a estrutura do quartzo (sílica cristalizada), (b) a estrutura da sílica vítrea, formados por ligações de silício e oxigênio e (c) mostra a estrutura do vidro sódio-cálcico.

Figura 6 – Estruturas do vidro



(a) Quartzo (sílica cristalizada)

(b) Sílica vítrea

(c) Vidro sódio-cálcico

Fonte: Akerman (2000)

Levando em conta sua composição, os vidros podem ser classificados nos seguintes grupos: sílica vítrea, silicatos alcalinos, vidros com soda-cal, vidros com borossilicato, vidros com chumbo, vidros com bário e vidros de aluminossilicato (SHI; ZHENG, 2007).

Chen et. al. (2002) realizou uma caracterização em laboratório em 32 diferentes tipos de vidros onde foi visto que sua composição química não varia consideravelmente pela cor ou origem, mas sim pela sua utilização. Uma das principais preocupações na produção do cimento, que é o conteúdo alcalino do vidro, varia de 0 a 22% (CHEN et al., 2002).

Quando o vidro é moído finamente possui a quantia de sílica amorfa (SiO_2) adequada e ao reagir com o hidróxido de cálcio dissolvido na água forma compostos hidratados de maneira equivalente aos materiais pozolânicos (BARROS, 2016).

O vidro apresenta muitas formulações, de acordo com o processo de produção, aplicação e matérias-primas. A tabela 4 apresenta como os vidros podem ser divididos em principais famílias.

Tabela 4 – Principais famílias dos vidros

Tipos de vidro	Utilização
Sílica vítrea	Pela extrema pureza obtida no processo de deposição de vapor, é utilizada na produção de fibras óticas.
Silicatos alcalinos	A adição de alcalinos diminui a resistência do vidro. Apresentando altas concentrações de álcalis o vidro vai ser solúvel na água, originando a base da indústria de silicatos solúveis.
Vidros sodo-cálcicos	Também usado pelos antigos egípcios, hoje em dia formam a maior parte das garrafas, frascos, potes, janelas, bulbos e tubos de lâmpadas.
Vidros ao chumbo	É o vidro nobre aplicado em copos e taças finas como "cristal", mesmo sabendo que o vidro não é um material cristalino
Vidros borossilicatos	Apresentam alta resistência ao choque térmico e a ataques químicos, por isso são utilizados em produtos de mesa que podem ser levados ao forno e equipamentos de laboratório.
Vidros alumino-borossilicato	Utilizados em tubos de combustão, fibras de reforço, vidros com alta resistência química e vitro-cerâmicos.

Fonte: Autora (2020)

A tabela 5 apresenta as composições típicas dos diversos tipos de vidros comerciais.

Tabela 5 - Composições típicas dos diversos tipos de vidros comerciais

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	PbO
Sodo-cálcicos	Embalagem	72,0	2,0	-	12,5	1,0	11,0	1,5	-
	Plano	71,0	1,0	-	13,5	0,5	10,0	4,0	-
	Lâmpada	73,0	1,0	-	16,5	0,5	5,0	4,0	-
Borossilicato	Pyrex	79,0	2,0	13,0	5,5	-	-	-	-
	Fibra de isolamento	66,0	1,5	3,5	15,5	1,0	8,0	4,0	-
Chumbo	Cristal	56,0	-	-	4,0	12,0	2,0	2,0	24,0
	Neon	63,0	1,0	-	8,0	6,0	-	-	22,0
	Lente	32,0	-	-	1,0	2,0	-	-	65,0
Aluminoborossilicato	Farmacêutico	72,0	6,0	11,0	7,0	1,0	1,0	-	-
	Fibra de reforço	55,0	15,0	7,0	-	-	19,0	4,0	-
	Tubo combustão	62,0	17,0	5,0	1,0	-	8,0	7,0	-

Fonte: Akerman (2000)

O vidro é um material frágil, mas não é fraco. Possui uma resistência a ruptura grande, podendo ser utilizado até em pisos, é duro e rígido, mas não tenaz, não sendo apropriado a aplicações sujeitas a impacto. O limite de resistência do vidro é igual ao limite da ruptura (AKERMAN, 2000).

3.2. GERAÇÃO DO RESÍDUO VÍTREO

O CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente considera que a geração de resíduos da construção civil deve seguir diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão desses resíduos para minimizar os impactos ambientais.

Para promover uma sustentabilidade na área de materiais de construção foi vista a necessidade de incorporar valor aos resíduos e utilizá-los na substituição de areia tanto em argamassas quanto em concreto (BHANDARI; TAJNE, 2013).

A gestão de resíduos sólidos não degradáveis como o vidro 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). Os vidros mais comuns são do tipo sílica vítrea, sodo-cálcico e boro silicatos.

Uma maneira de obter o pó de vidro sem moer é com o corte de vidros planos, lapidação e furos, em consequência do atrito entre a máquina de corte e a peça de vidro, produzindo grandes quantidades de resíduo de vidro (MOURA, 2018).

A lapidação do vidro ocorre para tirar suas partes cortantes e dar acabamento. Hoje em dia o pó de vidro gerado pelo processo de lapidação tem passado por um processo de tratamento pelas empresas antes de destiná-los da maneira mais adequada atualmente conhecida. No tratamento a água utilizada nos furos e lapidação que se mistura com o pó de vidro é colocada em decantadores onde são aplicados coagulantes e floculantes, para que o processo de decantação seja acelerado e depois da decantação retira-se o pó de vidro enquanto a água é filtrada e reutilizada no processo do corte e polimento do vidro (MOURA, 2018).

3.2.1. Resíduo laminação de vidro

De acordo com a Cristal Sete o processo de lapidação consiste em retirar o corte, rebarba do vidro, que sobra após ele ser cortado. Isso é feito através de máquinas que usam rebolos diamantados. O vidro passa por uma máquina com vários motores e cada motor tem um rebolo no qual entra em contato com as bordas do vidro fazendo o acabamento e tirando todo o corte necessário. Esse processo faz com que gere esse pó de vidro que sai junto com a água. Então toda a água com o pó de vidro vai para a central de tratamento onde é realizada a limpeza da água e ela é então reutilizada no processo, enquanto o pó de vidro gerado é descartado.

O lodo de resíduo de vidro é obtido através de produtos de vidros que foram cortados e polidos em seu processo de fabricação. Ele tem um grande teor de SiO_2 e Al_2O_3 e partículas muito finas, além de precisar de um menor esforço para obtenção de uma finura eficiente em relação ao pó de vidro, já que consiste em partículas finas de vidro com tamanho uniforme. Portanto quando ocorrer a substituição desse material no lugar do cimento na fabricação de concreto, podem ser esperadas melhoras nas propriedades mecânicas do concreto (KIM; YI; ZI, 2015).

O lodo de resíduo de vidro é composto de vidro amorfo com alto teor de sílica e partículas muito finas, sendo assim a incorporação desse resíduo no concreto irá melhorar suas características (KIM et al., 2014).

3.3. CONCRETO PRODUZIDO COM RESÍDUOS DE VIDRO E SUAS PROPRIEDADES

Os concretos produzidos com resíduos sólidos devem seguir uma série de exigências em relação à origem e utilização do resíduo para que esse concreto não tenha suas propriedades mecânicas prejudicadas. O intuito da utilização dos resíduos é a diminuição de descarte indevido e diminuir quantidade de agregado ou cimento, dependendo de onde o resíduo será substituído, utilizado na fabricação do concreto sem modificar suas propriedades mecânicas, mas também procurando uma forma de poder melhorá-las se possível.

Substituindo cimento por subprodutos industriais, além da redução de emissões relacionadas ao CO₂ também existe a redução do impacto ambiental relacionado a aterros e resíduos, impedindo a exploração de recursos naturais e reduzindo o consumo de produtos finitos(LEE et al., 2018). O vidro reciclado tem um grande potencial de utilização no concreto (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

Nem todo vidro usado pode ser reutilizado para produção de uma nova peça pelas impurezas, cores misturadas ou custo, porém há alguns anos começaram pesquisas sobre as possibilidades de utilização desses vidros residuais na produção de concreto (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

Visto que o concreto é o material sintético mais empregado no mundo, o desenvolvimento dos estudos para substituição desses resíduos de vidro no concreto diminuiria a necessidade de aterros para destinação desse material que não seria reciclado e reaproveitado.

Já Shi e Zeng (2007) apresentam alguns benefícios em utilizar o resíduo de vidro em concretos como eliminar custos de depósitos em aterros sanitários e seu aumento de vida útil, preservação do meio ambiente, diminuição da redução de dióxido de carbono (CO₂) além de outros poluentes emitidos na produção do clínquer, aumento da conscientização sobre reciclagem.

Os resíduos de vidros apresentam muitas vantagens no seu uso, já que é um dos materiais mais duráveis conhecidos e devido à baixíssima absorção de água, tem um grande potencial para utilização no concreto (BHANDARI; TAJNE, 2013). Na utilização do concreto os componentes mecânicos mais significativos são resistência a compressão e tração e módulo de elasticidade (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018). Portanto a utilização do

resíduo de vidro no concreto deve ser estudada para que essas propriedades não sejam afetadas.

O vidro com soda e cal é o tipo de vidro mais prevalente, usado para vidraças e recipientes de vidro para bebidas, alimentos e alguns itens de comodidade. Conforme a composição química dos vidros residuais, os vidros são principalmente formados de SiO_2 e tem a possibilidade de ser apropriado como matéria prima na produção do cimento (SHI; ZHENG, 2007).

Como potencial aplicação têm-se as usinas nucleares e lugares onde são eliminados resíduos radioativos, que são frequentemente localizados em regiões vulneráveis a ataques de cloreto e sulfato, podendo afetar a qualidade do concreto projetado para proteger a radiação (KIM; CHOI; YANG, 2018).

Shayan e Xu (2006) avaliaram que o pó de vidro pode ser acrescentado ao concreto de 40 MPa com taxas de 20 a 30% substituindo o cimento sem efeitos desfavoráveis.

3.3.1. A utilização do pó de vidro na confecção dos concretos e a pozolanicidade

A ABNT NBR 5752:2014 aceita como adição pozolânica quando o material é capaz de substituir 25% do cimento conservando o desempenho mecânico da argamassa, o que mostraria a ocorrência de interação ou reações químicas entre o pó de vidro e a pasta de cimento.

Com a caracterização do resíduo do pó de vidro realizada e constatada sua pozolanicidade, pode-se concluir que ele poderá ser substituto parcial do cimento na confecção do concreto.

Os resíduos de vidro podem ter várias aplicações no concreto, podendo ser utilizado como agregado de carga inerte (usado em tamanho de partículas maiores) ou material suplementar de cimentação substituindo uma fração do peso do cimento (LEE et al., 2018).

Foi estudado o uso de vidro triturado como agregado e avaliado a durabilidade e características e demonstrado que o tamanho das partículas é a chave para o controle de várias propriedades do concreto (CASTRO; BRITO, 2013).

Os resíduos de vidros triturados quimicamente contêm uma grande quantidade de silício e cálcio com estrutura amorfa, logo tem como atuar como material pozolânico ou cimentício. Então o resíduo de vidro pode ser utilizado no concreto como agregado ou substituição parcial de cimento (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

O cimento pode ser substituído parcialmente por resíduo de vidro, mas o tamanho de suas partículas são fatores importantes que influem consideravelmente nas propriedades físico mecânicas do novo concreto(DABIRI et al., 2018).

Partículas mais finas têm maior colaboração do que partículas grossas no mecanismo de reação, além das propriedades frescas e endurecidas do concreto (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

As propriedades que influenciam no comportamento das pozolanas em geral e dos resíduos de vidro são finura e composição (KHMIRI; CHAABOUNI; SAMET, 2013). As pozolanas são materiais que quando moídos de forma muito fina e na presença de água em temperatura ambiente reagem com o hidróxido de cálcio para produzir compostos com características aglomerantes (BARROS, 2016).

Poucos procedimentos são necessários para modificar alguns dos subprodutos industriais em pozolanas. Esses procedimentos normalmente consistem em moagem e classificação, que reduzem seu tamanho e aumentam a superfície das partículas (BARROS, 2016). A ABNT NBR 11768:2011 relaciona as pozolanas em materiais naturais e artificiais.

O resíduo de vidro reciclado tem dupla função na microestrutura do concreto. Ele é um material agregado e sua força e ligação com o cimento irá afetar a resistência, por outro lado, é pozolânico e seu acréscimo vai resultar em um aumento de força dos sólidos contribuintes e a interação entre essas duas influências opostas irá determinar o resultado da resistência à compressão (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

Shao et al. (2000) espera que se o vidro puder ser melhor moído, sua atividade pozolânica pode ser melhorada notavelmente.

Para poder usar esse concreto em grandes quantidades precisa é necessário conhecer suas propriedades (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

A tabela 6 apresenta a composição química do cimento e do pó de vidro realizado no estudo de Du e Tan (2017) para uma comparação de seus componentes e estudo da possibilidade de uso do pó de vidro no concreto.

Tabela 6. Composição química do cimento e do pó de vidro

Composição (%)	Cimento	Pó de vidro
SiO ₂	20.8	72.08
Al ₂ O ₃	4.6	2.19
Fe ₂ O ₃	2.8	0.22
CaO	65.4	10.45
MgO	1.3	0.72
SO ₃	2.2	–
Na ₂ O	0.31	13.71
K ₂ O	0.44	0.16
TiO ₂	–	0.1
Cr ₂ O ₃	–	0.01

Fonte: Adaptado de Du e Tan (2017)

A maior preocupação quando se fala em substituir agregado por vidro no concreto é a reação química entre a microsílca do vidro e o material alcalino na mistura de concreto, que é conhecida como reação álcali sílica (DABIRI et al., 2018).

Nas reações álcali-sílca os tamanhos maiores das partículas de vidro nos agregados levantaram preocupações (SIAD et al., 2017).

3.3.2. Trabalhabilidade do concreto com substituição de PDV

Segundo os estudos de Castro e Brito (2013), a trabalhabilidade do concreto é muito afetada pelo tamanho da partícula do PDV, levando a um aumento na relação a/c. Se a substituição na proporção de agregados finos aumentar e ocorrer uma perda de trabalhabilidade quer dizer que precisa aumentar a proporção de a/c para alcançar o slump necessário (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

A medida em que o vidro é adicionado a essa mistura de concreto, ocorre uma diminuição do slump, o que pode estar relacionado a sua granulometria (AL-ZUBAID et al.,

2017). Também segundo o autor o ensaio de slump, que testa a fluidez do concreto e é realizado quando este está fresco, apresenta diversos comportamentos de acordo com a quantidade de pó de vidro adicionada à mistura de concreto

Como pó de vidro é mais fino que areia, isso pode melhorar a disposição dos agregados grossos reduzindo a porosidade. O pó de vidro tem baixa absorção de água e uma superfície lisa, que colabora para um maior slump. O mais importante para o concreto são as propriedades frescas, endurecidas e durabilidade (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

Como esperado, conforme a finura do resíduo de vidro aumenta, têm-se a necessidade de aumentar a água na mistura do concreto para que a plasticidade da mistura seja constante (KHMIRI; CHAABOUNI; SAMET, 2013). Neste estudo provaram que esses resíduos quando moídos mais finos que 20 μm , apresenta um comportamento pozolânico.

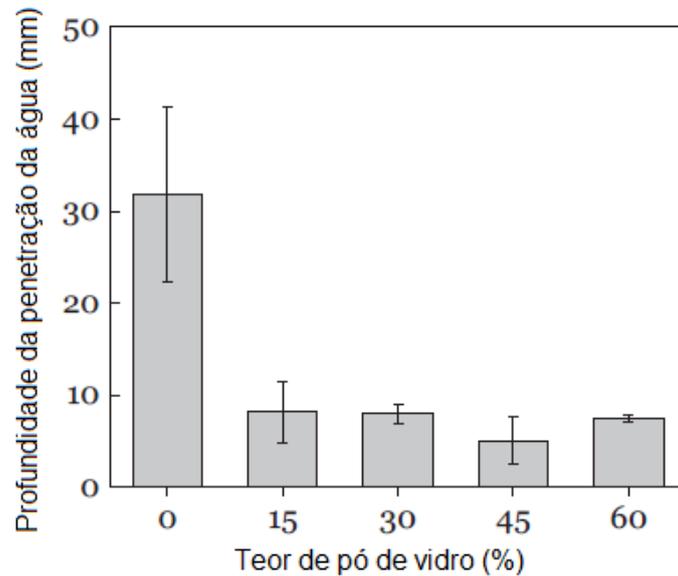
Quanto mais fino o resíduo de vidro utilizado na substituição de cimento, mais eficiente o concreto será (SILVA et al., 2017). Devido à superfície mais fina e angular das partículas do pó de vidro o maior consumo de água será necessário para melhorar a lubrificação e melhorar a trabalhabilidade da mistura de concreto.

3.3.3. Absorção de água no concreto

A geração de pressão de dilatação no interior do concreto aparenta ser graças à alternância e amolecimento dos grãos dos agregados pela propagação interna de metais alcalinos e íons hidroxila acompanhado de absorção de água com o desenvolvimento da pressão osmótica relevante e eventual falha de tração e fissuração da matriz circundante (SHI; ZHENG, 2007).

Na Figura 7, Du e Tan (2017) mediram a profundidade de penetração da água no concreto que teve o cimento substituído parcialmente por resíduo de vidro. Pode-se ver que a menor porcentagem de absorção de água foi no concreto com substituição de 40 e 50% de pó de vidro.

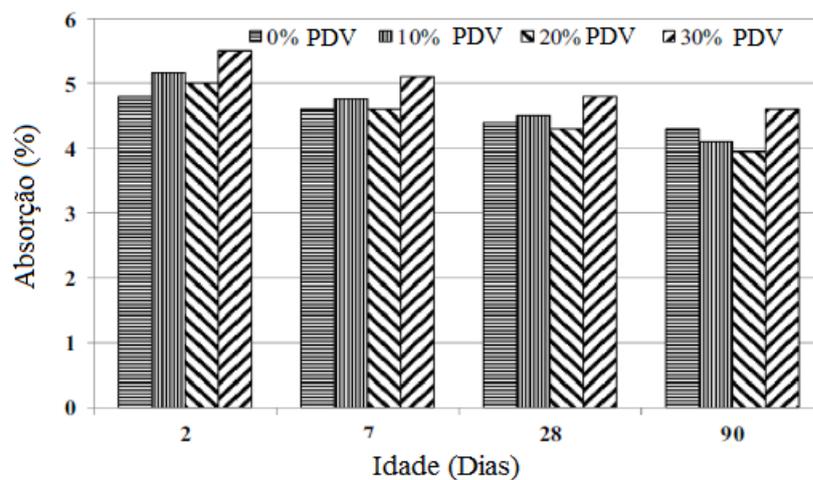
Figura 7. Profundidade de penetração da água no concreto com diferentes quantidades de pó de vidro



Fonte: Adaptado de Du e Tan (2017)

Na figura 8 Elaqra et. al (2019) apresenta a absorção de acordo com as substituições de PDV.

Figura 8 – Absorção do concreto em função da idade e substituição de PDV



Fonte: Adaptado Elaqra et al. (2019)

A atividade da pozolana no vidro reciclado exerce um papel fundamental na absorção de água do concreto. A estrutura dos poros, permeabilidade e elementos agregados do

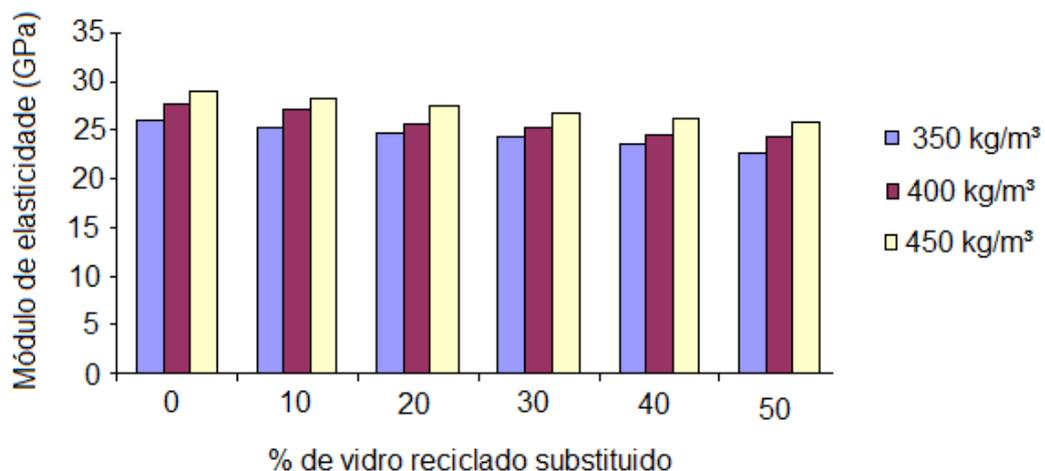
concreto com vidro reciclado pode influenciar a propagação do cloreto do compósito (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

Considera-se um concreto de boa qualidade quando ele possui uma absorção de água inferior a 10%. A absorção de água diminui quando aumenta a quantidade de agregado de vidro (TUAUM; SHITOTE; OYAWA, 2018).

3.3.4. Módulo de elasticidade do concreto com PDV

Como pode ser observado na Figura 9, o módulo de elasticidade diminui conforme a porcentagem de pó de vidro na mistura aumenta.

Figura 9. Relação entre módulo de elasticidade e porcentagem de substituição para diferentes conteúdos de cimento



Fonte: Adaptado Ali; Al-Tersawy (2012)

3.3.5. Resistência do concreto confeccionado com PDV em substituição aos seus componentes básicos

Diversos estudos apresentam que a resistência do concreto tende a melhorar com a substituição parcial do pó de vidro no concreto.

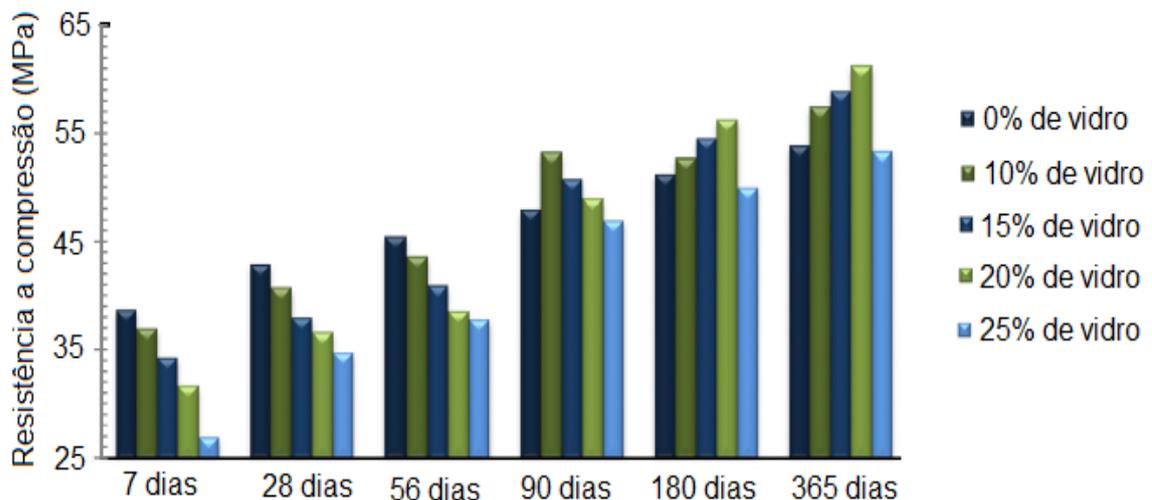
Dabiri et. al (2018) mostram em seus resultados que a substituição de agregado por partículas de vidro além de 30% aumenta a resistência de compressão do concreto, também avaliaram que o peso do concreto foi o mesmo em todas suas amostras e que a porcentagem ideal para a substituição de agregados de vidro é de 50%.

A substituição de cimento pelo pó de vidro melhora a resistência mecânica (compressão e flexão), especialmente com 91 dias e mais. Esse concreto com substituição pode continuar melhorando com o tempo desde que a água fornecida para cura seja suficiente para completar a reação pozolânica do pó de vidro (CASTRO; BRITO, 2013).

Para Silva et al. (2017), a adição de pó de vidro aos cimentos confeccionados constatou sua eficácia como adição na forma de filer, visto que quanto menor o diâmetro do pó, maior será a resistência obtida.

Como mostrado na Figura 10, depois de 90 dias a resistência à compressão do concreto diminui com o aumento do pó de vidro. Entretanto, um pequeno aumento na resistência foi observado na substituição de pó de vidro até 20%.

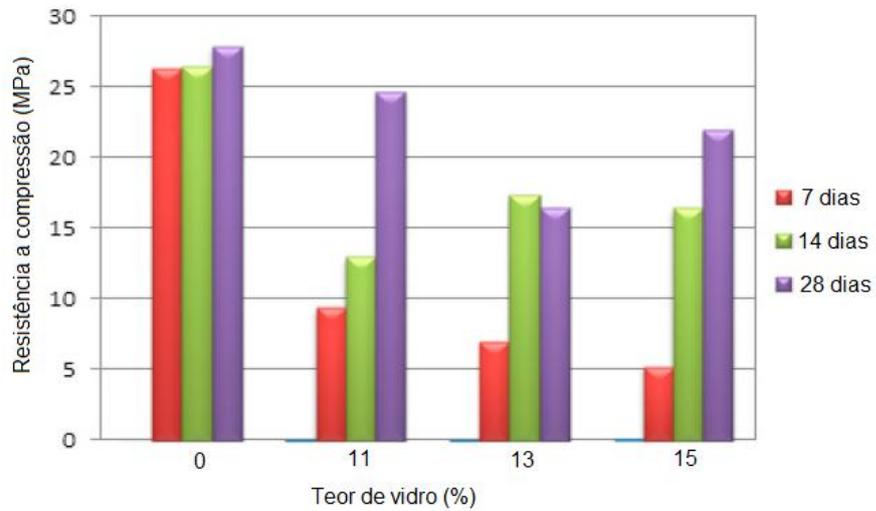
Figura 10. Resistência do concreto em diferentes idades e substituição de vidro



Fonte: Adaptado Islam; Rahman; Kazi (2017)

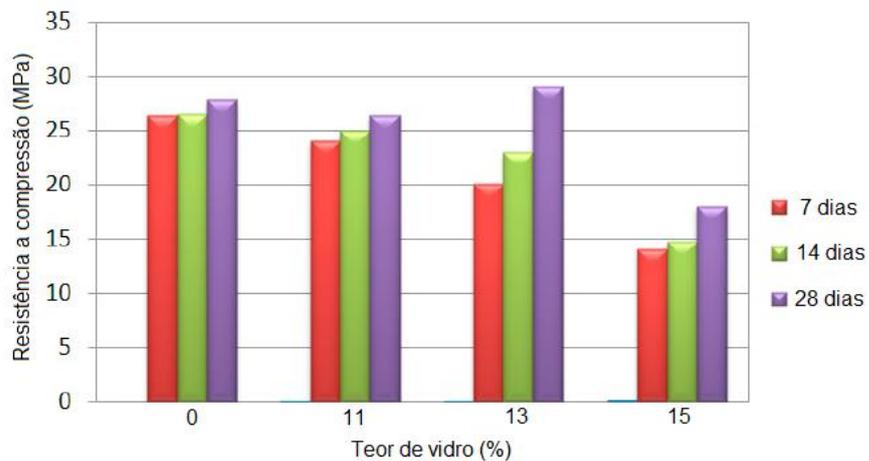
Como mostrado nas Figuras 11, 12 e 13, a compressão do concreto é influenciada pelo tipo de pó de vidro que será usado na substituição do cimento.

Figura 11. Resistência à compressão com substituição parcial do vidro marrom no cimento



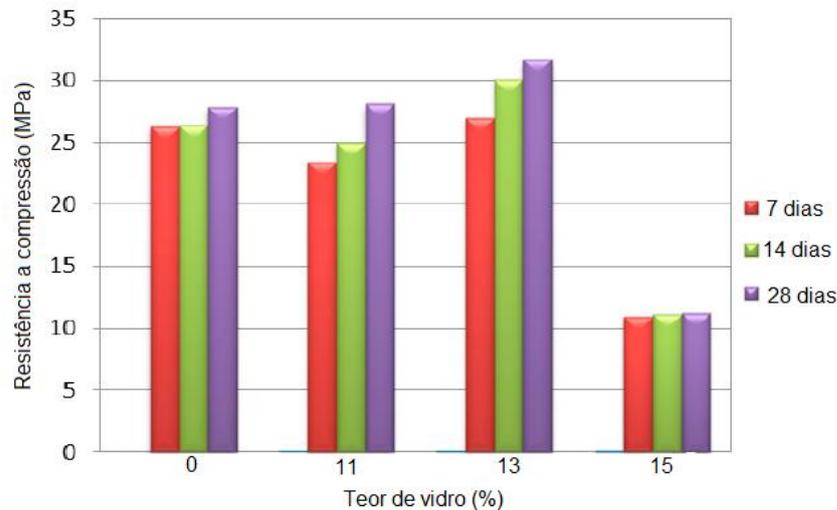
Fonte: Adaptado Al-Zubaid et al. (2017)

Figura 12. Resistência à compressão com substituição parcial do vidro verde no cimento



Fonte: Adaptado Al-Zubaid et al. (2017)

Figura 13. Resistência à compressão com substituição parcial do vidro neon no cimento



Fonte: Adaptado Al-Zubaid et al. (2017)

A resistência elevada à compressão vista na Figura 11, com 13% de substituição parcial do vidro neon pode ser conferido devido à grande quantidade de carbonato de cálcio (CaCO_3), que influencia na resistência à compressão.

A resistência do concreto com substituição de pó de vidro é maior quanto mais velho ele é. Contudo, alguns estudos mostraram que uma substituição máxima de 20 e 30% de pó de vidro pode ser feita no concreto, como agregado ou ligante, sem que haja prejuízo na resistência à compressão (KHAN; KHAN, 2017).

3.3.6. Durabilidade do concreto com substituição parcial de PDV

Na produção do concreto com substituição de resíduo de vidro a maior preocupação é em relação e como os álcalis nos vidros irão afetar os minerais no clínquer de cimento. Vários testes foram realizados para diminuir ou excluir a expansão das argamassas e concreto que contém resíduos de vidros (SHI; ZHENG, 2007). Estudos mostram que conforme a quantidade de pó de vidro inserida no cimento não se constata efeitos que prejudicam a longo prazo (BHANDARI; TAJNE, 2013).

O hidróxido de cálcio, presente no cimento, apresenta um alto grau de solubilização, onde na presença de água é o primeiro a ser hidratado, mas diferente dos silicatos e aluminatos, colabora muito pouco para a aglomeração da pasta de cimento hidratada, mas

produz benefícios nesse sentido, pois é consumido pela pozolana melhorando a resistência mecânica e a durabilidade das argamassas e concretos (BARROS, 2016).

Com o aumento do pó de vidro no concreto a permeabilidade ao oxigênio diminui devido às composições químicas e a estrutura da sílica, beneficiando uma maior ação pozolânica. Essa reação reduz a permeabilidade e porosidade do concreto. A medida das partículas de pó de vidro foi compreendido como um fator de permeabilidade do oxigênio (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

A partir de estudos de durabilidade do concreto com resíduos de vidro CRT (Tubo de raios catódicos) contendo metais pesados e utilizados como agregado fino. Os resultados dos estudos sobre resistência ao congelamento-degelo, ataque a sulfato e penetração de cloretos foram satisfatórios, porém a resistência à compressão e flexão do concreto diminuiu (KIM; CHOI; YANG, 2018).

O pó de vidro possui uma estrutura amorfa e é rico em sílica que quando reage com o hidróxido de cálcio do cimento forma um gel de silício. Dentro da pasta de cimento esse gel absorve a água e incha causando uma pressão de dilatação que é capaz de provocar microfissuras, expansão e deterioração do concreto (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

Se tiver poros que permitam a reação de expansão, produtos podem ser colocados nos poros para reduzir ou eliminar a expansão. Resultados laboratoriais mostram que introduzir ar ou utilizar um agregado leve poroso é eficaz para reduzir ou eliminar essa expansão (SHI; ZHENG, 2007).

Independente do tipo de vidro utilizado, a taxa de expansão aumenta com o aumento da quantidade de pó de vidro. A reatividade das microfissuras residuais depende do seu tamanho (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

Os concretos contendo pó de vidro tiveram desempenho satisfatório quanto à retração por secagem e reatividade alcalina. Existiram indicações que o pó de vidro reduz a penetração dos íons de cloreto, diminuindo a ameaça de corrosão das armaduras de concreto (SHAYAN; XU, 2006).

A reação pozolânica e a capacidade de enchimento dos poros com pó de vidro fez a resistência do concreto em relação à penetração de cloretos melhorarem. Um importante

parâmetro para ver a durabilidade do concreto é avaliar a entrada de oxigênio e a resistência à carbonatação (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018).

Tuaum, Shitote e Oyawa (2018) constataram em seu estudo que o concreto contendo agregados de vidro é claramente mais durável que o concreto convencional.

3.3.6.1. Reação álcali sílica

Um fator crítico que limita uma maior incorporação de pó de vidro é a reação álcali-sílica. A sílica amorfa do vidro é sujeita ao ataque alcalino para formar um monômero Si(OH)_4 , que poderia reagir ainda mais com álcalis como Na^+ , K^+ e Ca_2^+ para formar o gel da reação álcali-sílica. Este gel pode absorver água e inchar dentro da microestrutura do concreto resultando em um estresse. Quando a resistência interna excede a resistência do concreto graves rachaduras e danos podem ocorrer no concreto (DU; TAN, 2013).

Em estudos experimentais tiveram provas que o potencial problema de reação álcali sílica diminuía quando se reduzia o tamanho às partículas do agregado de vidro (TUAUM; SHITOTE; OYAWA, 2018).

A reação álcali sílica pode levar à corrosão do concreto armado. Uma das melhores soluções para impedir essa reação é usar material pozolânico como microsílica na mistura de concreto (DABIRI et al., 2018). O vidro pode satisfazer os requerimentos básicos para ser pozolânico se puder ficar fino o suficiente, para pacificar a reação álcali-sílica e ativar o comportamento pozolânico (SHAO et al., 2000).

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

A finalidade deste trabalho foi avaliar o desempenho do concreto com vários teores de substituição do aglomerante pelo PDV e para isso foi desenvolvido um planejamento experimental para serem estudadas as características do resíduo e do novo concreto nos estados fresco e endurecido, conforme definido nos objetivos.

4.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste trabalho foram analisadas as características do resíduo para que seja possível entender como a substituição do aglomerante pelo PDV irá interferir no concreto, tanto no estado fresco como endurecido.

Para atingir tais objetivos foi delimitado um programa experimental apresentado na Tabela 7, que apresenta os traços e os ensaios a serem realizados, bem como a quantidade de corpos de prova e idades dos mesmos, para os concretos confeccionados com substituição parcial do aglomerante pelo pó de vidro.

As seguintes características analisadas em relação ao desempenho técnico:

1. Estado Fresco
 - Massa Específica
 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump Test)
2. Estado Endurecido
 - Resistência à compressão
 - Absorção de água
 - Velocidade de propagação da onda de ultrassom (Ultrassom)
 - Módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom e sonelastic
 - Módulo de elasticidade estático por equação relacionando ultrassom e sonelastic
 - Análise da microestrutura do concreto (Microscopia eletrônica de varredura)

Já os parâmetros do processo a serem analisados foram:

- *Índice de substituição do resíduo no aglomerante:* As substituições a serem realizadas serão de 10, 15, 20, 25 e 30% em massa, que serão estabelecidos de acordo com a trabalhabilidade e slump test cada traço estabelecido. Para as combinações de dosagem foi utilizado o traço desenvolvido por (CAMARGO, 2020), e então adaptado às necessidades deste trabalho. O traço utilizado foi na ordem de 1:1,96:2,72. Consumo de cimento para fator a/c 0,6 foi de 357,47 kg/m³ e para fator a/c 0,55 foi de 363,98 kg/m³.
- *Quantidade de água:* O fator a/c escolhido foi de 0,55 e 0,60.
- *Idade do concreto:* Os ensaios pré estabelecidos em relação ao desempenho técnico serão realizados com 28 dias.
- *Tipo de cura:* Os corpos de prova são colocados em uma câmara úmida até o dia dos ensaios.

Tabela 7 – Traços e quantidades de corpos de prova com substituição parcial de PDV no aglomerante

Teor de Substituição	Fator a/c	Ensaio de compressão (28 dias)	Ensaio de absorção (28 dias)	Ensaio de ultrassom (28 dias)	Ensaio de módulo de elasticidade (28 dias)	MEV (28 dias) Amostras	Total	
Família 1	0	0,6	6	3	3*	3*	1	9
	10	0,6	6	3	3*	3*	1	9
	15	0,6	6	3	3*	3*	1	9
	20	0,6	6	3	3*	3*	1	9
	25	0,6	6	3	3*	3*	1	9
	30	0,6	6	3	3*	3*	1	9
Família 2	0	0,55	6	3	3*	3*	1	9
	10	0,55	6	3	3*	3*	1	9
	15	0,55	6	3	3*	3*	1	9
	20	0,55	6	3	3*	3*	1	9
	25	0,55	6	3	3*	3*	1	9
	30	0,55	6	3	3*	3*	1	9
TOTAL							108	

* Os corpos de prova serão reaproveitados para ensaio

Fonte: Autora (2022)

Foram realizados os testes utilizando a família 1 para fator a/c 0,6 e família 2 para fator a/c 0,55, que posteriormente foram renomeadas para traços de T1 à T6 na família 1 e T7 à T12 para a família 2.

4.2.MATERIAIS

4.2.1. Aglomerante

Na fabricação dos corpos de prova foi utilizado o cimento CPV ARI da marca LIZ. O CPV ARI foi escolhido por ser um cimento sem adições, já que o objetivo é analisar uma adição de resíduo no concreto. No quadro 2 pode-se observar a composição dos cimentos Portland e o motivo da escolha do CPV ARI para utilização neste trabalho.

Quadro 2–Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5		
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto forno ^b	CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland pozolânico ^c	CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a	ARI		90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB		75 – 100	—	—	0 – 25
	Não estrutural			—	—	—	26 – 50

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.
^b O teor máximo da somatória de adições (escória granulada de alto –forno e material carbonático) deve ser de 75%.
^c O teor máximo da somatória de adições (material pozolânico e material carbonático) deve ser de 55%.

Características do cimento CPV ARI de acordo com o fabricante LIZ. O quadro 3 mostra as características do cimento de acordo com o Mapa de Qualidade no período de Julho de 2021.

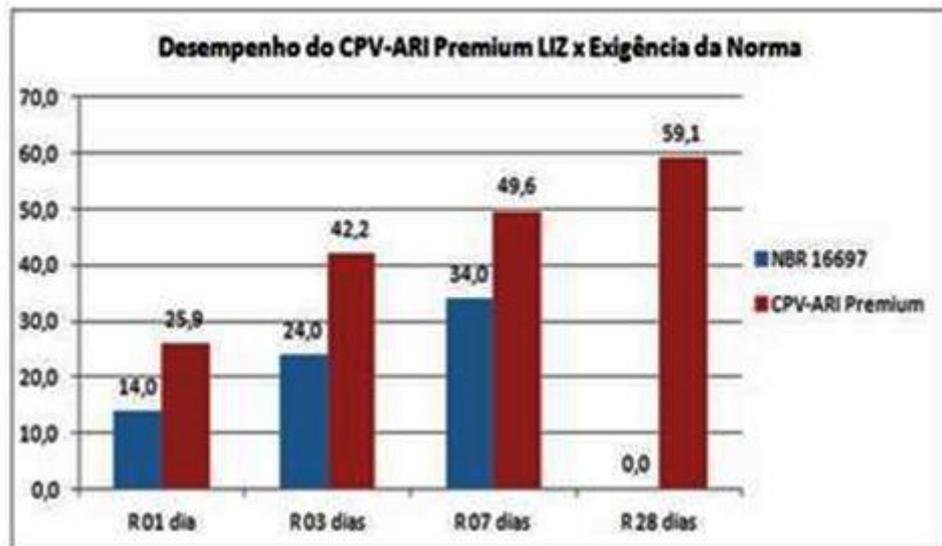
Quadro 3 – Características cimento CPV-ARI marca LIZ

CARACTERÍSTICAS								
					Finuras		Tempo de Pega (minutos)	
Idades	R 01 dia	R 03 dias	R 07 dias	R 28 dias	# 325 (%)	Blaine (m ² /Kg)	Início da Pega	Fim de Pega
NBR 16697	14	24	34	—	—	≥ 260	≥ 60	≤ 600
CPV-ARI PREMIUM	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.								

Fonte: Cimentos LIZ (2022)

Já a figura 14 mostra o gráfico de desempenho do cimento CPV ARI em relação a norma ABNT NBR 16697:2019.

Figura 14 – Desempenho CPV-ARI x Exigência da Norma



Fonte: Cimentos LIZ (2022)

4.2.2. Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado na confecção dos corpos de prova é proveniente da região de Maringá. Para uma primeira caracterização este material é definido como brita 1, com diâmetro entre 5 e 19mm.

Para sua caracterização foram realizados ensaios de composição granulométrica, massa específica e massa unitária de acordo com procedimentos estabelecidos pelas normas vigentes.

4.2.3. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia média proveniente de fornecedores da região de Maringá. Para uma primeira caracterização pode-se dizer que o material tem origem de quartzo.

Para sua caracterização foram realizados ensaios de composição granulométrica, massa específica e massa unitária de acordo com procedimentos estabelecidos pelas normas vigentes.

4.2.4. PDV

A amostra para estudo foi coletada na empresa de vidros temperados Cristal Sete, localizada no setor industrial da cidade de Apucarana – PR.

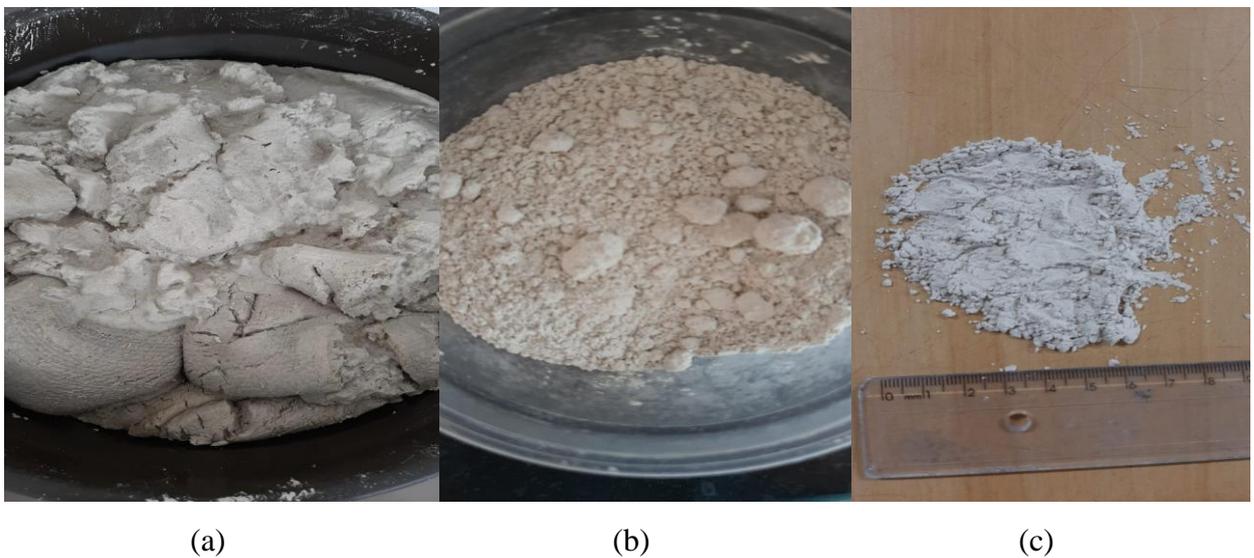
Figura 15 – Fábrica Cristal Sete em Apucarana (PR)



Fonte: Cristal Sete (2022)

Quando coletada ela tem uma textura pastosa, então foi necessário que ela passasse por um processo de secagem de uma semana. Nesse processo a pasta de PDV foi aberta sobre uma lona e deixada para secar ao sol, como mostra a figura 16 (a). Quando estava seco o PDV foi destorroado e então se transformou em um pó, como mostra a figura 16 (b). Para este trabalho procurou-se que o PDV estivesse o mais fino possível para gerar possíveis resultados melhorados, o pó gerado do destorroamento foi colocado em um moedor. O resultado é mostrado na figura 16 (c).

Figura 16 – Resíduo de Lapidação de Vidro



Fonte: Autora (2022)

Para chegar nesse módulo de finura foram colocados 10 kg de resíduo no moedor por 40 minutos.

Figura 17 – Moedor de barras



Fonte: Autora(2022)

Os dados apresentados a seguir foram informados pela empresa Cristal Sete. O resíduo que foi utilizado neste trabalho é originário do corte de placas de vidro temperado. No fim do processo de lapidação ele é enviado para uma empresa especializada de destinação de resíduos de produtos químicos. O recolhimento do material foi realizado antes da adição de polímeros para manutenção de suas características primárias.

4.2.5. 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.

4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.3.1. Agregado Graúdo

O agregado graúdo que será utilizado para a confecção dos corpos de prova foi caracterizado de acordo com os ensaios descritos nas seguintes normas:

- Determinação da composição granulométrica: ABNT NBR NM 248:2003.
- Determinação da massa unitária - ABNT NBR NM 45:2006.
- Determinação da massa específica – ABNT NBR NM 53:2009.

4.3.2. Agregado Miúdo

O agregado miúdo que será utilizado para a confecção dos corpos de prova foi caracterizado de acordo com os ensaios descritos nas seguintes normas:

- Determinação da composição granulométrica: ABNT NBR NM 248:2003.
- Determinação da massa unitária - ABNT NBR NM 45:2006.
- Determinação da massa específica – ABNT NBR NM 52:2009.

4.3.3. PDV

As amostras foram analisadas em ensaios de difração de raios-x (DRX), massa específica e unitária, análise granulométrica, tempo de pega, módulo de finura e MEV para assim caracterizá-lo e determinar a possibilidade de sua utilização na confecção do concreto.

Uma pré-caracterização do mesmo foi realizada por Oliveira (2021) onde foram realizados dois ensaios importantes para a determinação de uma possível atividade pozolânica, para tanto foram adotados os procedimentos determinados pelo Método de Chapelle modificado e A Fluorescência de Raios-X.

A atividade pozolânica é medida pelo consumo de sendo o consumo de Ca(OH)_2 por grama de material analisado, sendo que pela a ABNT NBR 15895:2010 o consumo deve ser da ordem 750mg/g para que o material seja considerado pozolânico, enquanto Raverdyet *al* (1980) sugere 436 mg/g. Oliveira (2021) em seus ensaios determinou um consumo de 833 mg/g de Ca(OH)_2 , o que evidencia atividade pozolânica no resíduo avaliado.

A Fluorescência de Raios-X busca conhecer a composição química do material e de acordo com os teores de cada composto pode-se avaliar o comportamento químico do mesmo. Segundo os resultados obtidos por Oliveira (2021) o PDV 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, uma vez que apresenta o somatório dos óxidos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ igual a 57,39%, já que o requisito mínimo exigido pela norma ABNT NBR 12653:2014 é de 50% para classe E, descrita acima.

4.3.3.1. Difração de Raio-X(DRX)

O objetivo deste ensaio é a identificação de fases sólidas (orgânicas e inorgânicas) pelo método do pó, permitindo assim a identificação dos minerais presentes no resíduo de lapidação de vidro em relação às suas cristalinidades.

Os difratogramas de raios X presentes nesse trabalho foram obtidos utilizando um difratômetro himadzu (XRD-7000), com radiação $\text{Mo}(\lambda = 0,7093019 \text{ \AA})$ presente nas instalações do Grupo de Desenvolvimento de Dispositivos Multifuncionais (GDDM) da Universidade Estadual de Maringá, e um difratômetro Bruker modelo D8 Advance com radiação $\text{Mo}(\lambda = 0,7093019 \text{ \AA})$ e detector linear PSD. Medidas à temperatura ambiente no modo contínuo com velocidade de $1\text{ grau}/\text{min}$, no intervalo de 5° à 50° foram feitas para

identificação de fase. Foi então utilizado o programa X'pert High Score para análise dos resultados.

4.3.3.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) possui alta resolução e grande capacidade de foco. Ela emite feixes de elétrons onde esses são projetados na amostra formando diferentes sinais, como elétrons secundários e elétrons retroespalhados, dentre outros (MOURA, 2018).

A análise de microestrutura do pó de vidro foi conduzida em um microscópio eletrônico de varredura FEI (QUANTA -250) localizado no Complexo de Apoio à Pesquisa da Universidade Estadual de Maringá (COMCAP-UEM). Na figura 18 (a) temos o equipamento onde o MEV foi realizado e na figura 18 (b) temos a amostra que foi preparada para o ensaio.

Figura 18 – MEV



(a) Equipamento MEV



(b) Amostra para ensaio MEV

Fonte: Autora (2020)

4.3.3.3. Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada seguindo a ABNT NBR 7181:1988. Foi determinada por meio da sedimentação e peneiramento e com os resultados obtidos montada uma curva granulométrica.

As curvas granulométricas permitem a avaliação da uniformidade e coeficiente de curvatura, calculando de acordo como descrito abaixo.

Grau de Uniformidade

O grau de uniformidade é determinado conforme a ABNT NBR 6502:1995, sendo definido pela Equação 4.1:

$$U = \frac{D60}{D10} \quad (4.1)$$

Onde:

D60 – diâmetro de partículas correspondente aos 60% mais finos na curva granulométrica (mm).

D10 – diâmetro de partículas correspondente aos 10% nesta mesma curva (mm).

O grau de uniformidade representa a variedade de dimensões que as partículas que o material possui, é diretamente proporcional a inclinação da curva granulométrica conforme a expressão acima, quanto maior a inclinação da curva, mais bem graduado é o material, segundo a classificação da ABNT NBR 6502:1995 (Rochas e Solos):

$U < 5$ muito uniforme

$5 < U < 15$ uniformidade média

$U > 15$ desuniforme

Coeficiente de Curvatura (CC):

O coeficiente de curvatura está relacionado à curva granulométrica entre D60 e D10, e pode ser descrito pela Equação 4.2:

$$CC = \frac{(D30)^2}{(D10 \cdot D60)} \quad (4.2)$$

Onde:

D30 – diâmetro de partículas correspondente aos 30% mais finos na curva

granulométrica (mm).

Em solos bem graduados $1 < CC < 3$.

4.3.3.4. Massa Específica e Teor de umidade

O PDV é um material muito fino, portanto sua massa específica é determinada pela ABNT NBR 6508:1984. Foram pesadas duas amostras de resíduo e então colocadas na estufa para secar por 24 horas. Posteriormente foram colocadas 50g de resíduo em dois recipientes e hidratados com água destilada para preparação da amostra úmida. Após 24 horas foram medidas as temperaturas dos dois recipientes, pesadas as amostras secas (que estavam na estufa) e foram realizados os cálculos.

Para o teor de umidade foi pesado uma amostra e a cápsula onde se encontra a amostra e então ela é colocada na estufa por 24 horas. Após a secagem a amostra é pesada novamente e então são realizados os cálculos. A equação 4.3 mostra como o cálculo é realizado.

$$U = \left(\frac{Mu}{Ms} \right) \cdot 100 \quad (4.3)$$

Onde:

U = Teor de umidade (%)

Mu = Massa úmida(g)

Ms = Massa seca (g)

4.3.3.5. Massa Unitária

A massa unitária foi calculada de acordo com a ABNT NBR NM 45:2006. O ensaio consiste em pesar a massa do PDV em um recipiente, que é colocado em 3 camadas sendo que cada uma recebe 25 golpes. Posteriormente a massa do recipiente é dividida pelo valor de seu volume.

4.3.3.6. Tempo de Pega

O tempo de pega foi calculado de acordo com a ABNT NBR NM 65:2002. Para o ensaio foi utilizado o aparelho Vicat. O início da pega é constatado quando a agulha estacionar a (4 ± 1) mm da placa de vidro e anotar o horário.

Para o tempo do fim de pega é necessário trocar a agulha do Vicat utilizada anteriormente. O fim da pega é constatado quando a agulha penetrar pela primeira vez apenas 0,5 mm na pasta e anotar o horário.

4.3.3.7. Módulo de Finura

O módulo de finura foi calculado de acordo com a ABNT NBR 11579:2013. A amostra deve ser peneirada em uma primeira etapa até que os grãos mais finos passem quase totalmente pela peneira, limpando a peneira e o fundo para a segunda etapa. Em uma segunda etapa deve ser peneirado por mais 15 a 20 minutos e depois limpo novamente para o peneiramento final.

Esse terceiro peneiramento deve ser feito com movimentos rápidos por 60 segundos, girando a peneira em torno de 60° a cada 10 segundos.

4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS COM PDV

4.4.1. Dosagem e definição do traço experimental do concreto

A dosagem dos corpos de prova foi realizada a partir do estudo realizado por Camargo (2020), que fez um estudo para chegar a um traço otimizado para concretos estruturais, com resistência à compressão característica de 30 Mpa, aproximadamente. O traço utilizado foi da ordem de 1:1,96:2,72. Foram realizados testes para adaptação do traço com a substituição do PDV.

Primeiramente utilizamos o traço definido por Camargo (2020) com o fator a/c de 0,48 não se atingiu a consistência onde o concreto pudesse ser trabalhado, portanto adicionou-se água e decidiu-se começar o estudo com um fator a/c de 0,6.

Conforme foi substituído resíduo no concreto, diminuiu a consistência, fazendo com que quando se chegou à adição de 25% foi necessário aumentar o fator a/c para 0,63 para atingir uma consistência aceitável para o concreto. Com base nesse traço optou-se por utilizar um fator a/c maior para viabilizar a utilização do resíduo.

Foi decidido usar um fator a/c de 0,63 para que pudesse chegar à substituição de 30% de resíduo no aglomerante. Observou-se a consistência do concreto aumentou consideravelmente, como é mostrado na tabela 8. O quadro 4 mostra a classe de agressividade ambiental e o quadro 5 mostra a correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto respectivamente.

Quadro 4- Classe de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes e indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 12655 (2015)

Quadro 5 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m ³	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado.
CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ABNT NBR 12655 (2015)

Como o fator a/c de 0,63 estava classificado como uma classe de agressividade I, ou seja fraco, optou-se por parar os estudos na substituição de 20%, já que por estar nessa classe de agressividade não convinha continuar até a substituição de 30%.

Para os testes foram moldados 3 corpos de prova para cada traço para avaliar a resistência à compressão com 28 dias. A tabela 8 mostra os resultados dos testes dos traços. Os testes foram realizados no dia 15 de fevereiro de 2022 no laboratório P02 na Universidade Estadual de Maringá. O valor do slump era avaliado pelo ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone seguindo a ABNT NBR NM 67:1998. Esse ensaio consiste em verificar o espalhamento do material para avaliar a fluidez.

Tabela 8 – Resultados dos testes

Traço	Fator a/c	Resíduo (%)	Slump	Resistência à compressão	Temperatura (°C)	Condição climática
T1	0,6	0	13	29,2	36	Quente e seco
T2	0,6	10	12	27,3	36	Quente e seco
T3	0,6	20	9	28,43	36	Quente e seco
T4	0,63	25	8	26,5	36	Quente e seco
T5	0,55	0	2	Não moldou	36	Quente e seco
T6	0,63	0	16	18,6	36	Quente e seco
T7	0,63	10	15	25	36	Quente e seco
T8	0,63	15	15	27,1	36	Quente e seco
T9	0,63	20	14	24,2	36	Quente e seco

Fonte: Autora (2022)

O traço T5 não foi moldado devido o slump ser 2, então não havia trabalhabilidade no concreto para que pudesse ser feita a moldagem dos corpos de prova.

Depois de terminados os testes foram definidos que os fatores a/c utilizados nessa pesquisa seria de 0,6 e 0,63. No dia da moldagem dos corpos de prova para a pesquisa o clima estava quente, porém mais ameno que no dia dos testes.

Foi iniciada a confecção dos corpos de prova com fator a/c 0,6. Todavia foi avaliado o slump pelo ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone e o valor obtido foi de 18 ao invés de 13 como havia dado no dia do teste. Continuou-se com a confecção e com 10% de resíduo o slump obtido foi de 17 e não 12 como havia dado anteriormente no teste.

Previamente nos testes foi possível chegar em 20% de substituição, mas no dia da confecção conseguiu-se chegar à 30% de substituição. Com essa mudança no valor de slump do dia dos testes foi decidido não utilizar deixar o fator a/c 0,63.

Como o teste de abatimento do tronco do cone estava resultando em um slump relativamente alto, foi decidido tentar o traço piloto (0% de resíduo) com um fator a/c de 0,45 até chegar a um valor aceitável de 0,55 então foi decidido que o segundo fator a/c utilizado nessa pesquisa seria esse. Foi definido então que seriam estudadas duas famílias com a substituição de 0, 10, 15, 20, 25 e 30%, sendo a primeira família com fator a/c 0,6 e a segunda com fator a/c 0,55.

A Tabela 9 mostra os traços para confecção dos corpos de prova com a substituição do resíduo do pó de vidro sendo feita no lugar do aglomerante. O traços de T1 à T6 pertencem à FAMÍLIA 1 e de T7 à T12 pertencem à FAMÍLIA 2 referente nos estudos.

Para os testes de dosagem foi utilizada uma betoneira manual de 150 litros e no dia da moldagem uma de 400 litros.

Tabela 9 – Traços em massa para os concretos com substituição parcial de PDV no aglomerante

TEOR DE SUBSTITUIÇÃO EM MASSA (%)						
Traço	Fator a/c	Cimento (kg)	PDV (kg)	Areia (kg)	Brita(kg)	
T1	0%	0,60	1,00	0,00	1,96	2,72
T2	10%	0,60	0,90	0,10	1,96	2,72
T3	15%	0,60	0,85	0,15	1,96	2,72
T4	20%	0,60	0,80	0,20	1,96	2,72
T5	25%	0,60	0,75	0,25	1,96	2,72
T6	30%	0,60	0,70	0,30	1,96	2,72
T7	0%	0,55	1,00	0,00	1,96	2,72
T8	10%	0,55	0,90	0,10	1,96	2,72
T9	15%	0,55	0,85	0,15	1,96	2,72
T10	20%	0,55	0,80	0,20	1,96	2,72
T11	25%	0,55	0,75	0,25	1,96	2,72
T12	30%	0,55	0,70	0,30	1,96	2,72

Fonte: Autora (2022)

A Moldagem dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Maringá, Bloco P02, onde os corpos de prova permaneceram 24 horas na forma até o momento da desmoldagem. A figura 19 mostra os corpos de prova sendo confeccionados.

Figura 19 – Confeção dos corpos de prova



Fonte: Autora (2022)

Após a desmoldagem os corpos de prova foram levados para a câmara úmida do laboratório onde permaneceram até a data da realização dos ensaios de caracterização dos concretos. A figura 20 mostra a câmara úmida onde os corpos de prova foram armazenados.

Figura 20 – Câmara úmida de armazenamento dos corpos de prova



Fonte: Autora (2022)

4.4.2. Caracterização do concreto no estado fresco

4.4.2.1. Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump Test)

O ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone segue a ABNT NBR NM 67:1998 e consiste em pegar o concreto fresco e colocar no cone em 3 camadas distintas. A cada camada é necessário dar 25 golpes. Quando termina de colocar o concreto deve tirar o excesso e alisar o topo. O cone é então levantado e colocado ao lado do concreto. Com uma barra colocada sobre o cone e uma régua é medido quantos mm o concreto abaixou. Esse valor é o slump.

4.4.2.2. Massa específica

A massa específica é calculada pela massa compacta dividida pelo volume que ela ocupa expressa na equação 4.4.

$$\mu = \frac{m}{v} \quad (4.4)$$

Onde:

μ = massa específica em g/cm³

m = massa em g

v = volume do recipiente em cm³

4.4.3.Caracterização do concreto endurecido

4.4.3.1.Ensaio de resistência à compressão

O ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 5739:2018. A figura 21 mostra a prensa utilizada para o ensaio disponibilizada no laboratório P02 na Universidade Estadual de Maringá.

Para o ensaio de resistência à compressão foram confeccionados 6 corpos de prova para cada traço definido com 28 dias , totalizando 72 corpos de prova no tamanho de 10 x 20 cm.

Figura 21 – Prensa para ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autora (2022)

4.4.3.2. Ensaio de absorção de água

O ensaio será realizado de acordo com a ABNT NBR 9778:2009. Para o ensaio serão utilizados 3 corpos de prova para cada traço na idade de 28 dias.

Para a realização desse ensaio foi realizada a pesagem dos corpos de prova como mostra a figura 22.

Figura 22 – Pesagem dos corpos de prova



Fonte: Autora (2022)

Após a pesagem eles foram secos em uma estufa durante 72 horas, como mostra a figura 23.

Figura 23 – Secagem dos corpos de prova na estufa



Fonte: Autora (2022)

Depois da secagem na estufa os corpos de prova foram resfriados a temperatura ambiente e pesados. Após a pesagem eles foram imersos em um tanque com água, com temperatura de $23 \pm 5^\circ\text{C}$ por mais 72 horas e novamente pesados, como mostra a figura 24.

Figura 24 – Imersão dos corpos de prova em água



Fonte: Autora (2022)

Após a pesagem dos corpos de prova retirados da imersão eles foram levados para fervura com auxílio de um fogareiro industrial. Foram fervidos por 5 horas e posteriormente aguardou-se cerca de 19 horas para resfriamento e então foram realizadas novas pesagens.

Posteriormente foi realizada a pesagem dos corpos de prova imersos em água com auxílio de um cesto de arame.

Para realizar os cálculos de absorção de água, índice de vazios, massas específicas seca, saturada e real segue as equações de acordo com a NBR 9778:2005.

O cálculo de absorção de água por imersão pode ser feito de acordo com a equação 4.5.

$$A = \left(\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \right) \cdot 100 \quad (4.5)$$

Onde:

A = absorção de água por imersão (%)

M_{sat} = massa saturada

M_s = massa seca

O cálculo do índice de vazios se dá pela equação 4.6.

$$Iv = \left(\frac{Msat - Ms}{Msat - Mim} \right) \cdot 100 \quad (4.6)$$

Onde:

Iv = Índice de vazios (%)

Msat = massa saturada

Ms = massa seca

Mim = massa imersa

O cálculo da massa específica amostra seca, massa específica saturada e massa específica real se dão pelas equações 4.7, 4.8 e 4.9 respectivamente.

$$\rho = \left(\frac{Ms}{Msat - Mim} \right) \quad (4.7)$$

$$\rho_s = \left(\frac{Msat}{Msat - Mim} \right) \quad (4.8)$$

$$\rho_r = \left(\frac{Ms}{Ms - Mim} \right) \quad (4.9)$$

Onde:

ρ = massa específica

ρ_s = massa específica saturada

ρ_r = massa específica real

Msat = massa saturada

Ms = massa seca

Mim = massa imersa

4.4.3.3. Velocidade de propagação de onda de ultrassom (VPU)

O ensaio de VPU permite avaliar a qualidade da matriz do cimento. Ele foi realizado na idade de 28 dias conforme ABNT NBR 8802:2019. Foram utilizados 3 corpos de prova de cada traço para o ensaio, totalizando 36. Com os resultados obtidos pelo ensaio pode-se avaliar a qualidade do concreto e calcular módulo de elasticidade.

Primeiramente os transdutores do equipamento são calibrados através de uma barra de referência. O local onde foi colocado os transdutores para o ensaio é aplicado um gel para uma transmissão de onda mais eficiente.

O ensaio foi realizado no laboratório P02 na Universidade Estadual de Maringá. O aparelho utilizado foi o Ultrassom do tipo Pundit fabricado pela empresa Proceq, transdutores de 50 mm e 54 kHz de frequência. A figura 25 mostra o ensaio sendo realizado.

Figura 25 – Ensaio de VPU



Fonte: Autora (2022)

Para realização do ensaio foi utilizado um suporte para evitar o movimento do corpo de prova.

4.4.3.4. Módulo de elasticidade dinâmico –Sonelastic

Módulo de elasticidade é um parâmetro que proporciona a medida de rigidez de um material, associado às propriedades mecânicas como tensão de ruptura e tensão de escoamento. Para o ensaio foram utilizados 3 corpos de prova de cada traço na idade de 28 dias, totalizando 36.

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico com o Sonelastic foi realizado no laboratório P02 na Universidade Estadual de Maringá. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 8522-2:2021.

Para realização do ensaio era necessário saber a massa, diâmetro e altura de cada corpo de prova para inserir no programa. A figura 26 mostra o ensaio com o equipamento Sonelastic sendo feito.

Figura 26 – Ensaio com Sonelastic



Fonte: Autora (2022)

Para realização do ensaio é necessário marcar em cada extremidade do corpo de prova a medida de $0,224 \times L$, sendo L o comprimento do corpo do prova para poder posicionar corretamente no equipamento. O microfone responsável por captar as vibrações emitidas pelo corpo de prova em uma extremidade a uma distância aproximada de 2cm.

Os dados sobre o corpo de prova são inseridos no programa e então na outra extremidade estimulou-se o corpo de prova por meio de uma leve batida com o auxílio de um pulsador manual. O software fez os cálculos com base nas frequências naturais de vibração emitidas pelo corpo de prova e apontou os resultados em uma planilha no programa.

4.4.3.5. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Com o objetivo de analisar a microestrutura do concreto nos diferentes traços confeccionados foram coletadas amostras de superfície de fratura dos corpos de prova

rompidos nos ensaio de resistência à compressão com idade de 28 dias. A figura 27 mostra as amostras coletadas dos corpos de prova.

Figura 27 – Amostras coletadas dos corpos de prova



Fonte: Autora (2022)

As amostras foram colocadas na estufa por 24 horas, pois não pode haver sinais de umidade para a leitura do microscópio. Depois de secas as amostras foram levadas para o COMCAP na Universidade Estadual de Maringá, onde o MEV foi realizado.

Todas as amostras foram metalizadas para que no dia seguinte pudessem ser feitas as imagens no microscópio. O equipamento utilizado foi o Microscópio Eletrônico de Varredura FEI Quanta 250. Ele é um equipamento de alta resolução que tem capacidade de fazer imagens em alto vácuo, pressão variável e modo ambiental. A figura 28 mostra as amostras de cada traço mais do PDV para serem metalizadas.

Figura 28 – Amostras para serem metalizadas



Fonte: Autor (2022)

4.4.3.6. Análise sustentável

Uma análise sustentável foi realizada em relação aos custos e a economia gerada pela diminuição de cimento de acordo com os traços realizados e um estudo sobre a emissão de CO₂ conforme a quantidade de cimento foi reduzindo com os traços.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão demonstrados os resultados obtidos através dos ensaios propostos e discutidos de acordo com o planejamento experimental.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1. AGREGADO GRAÚDO

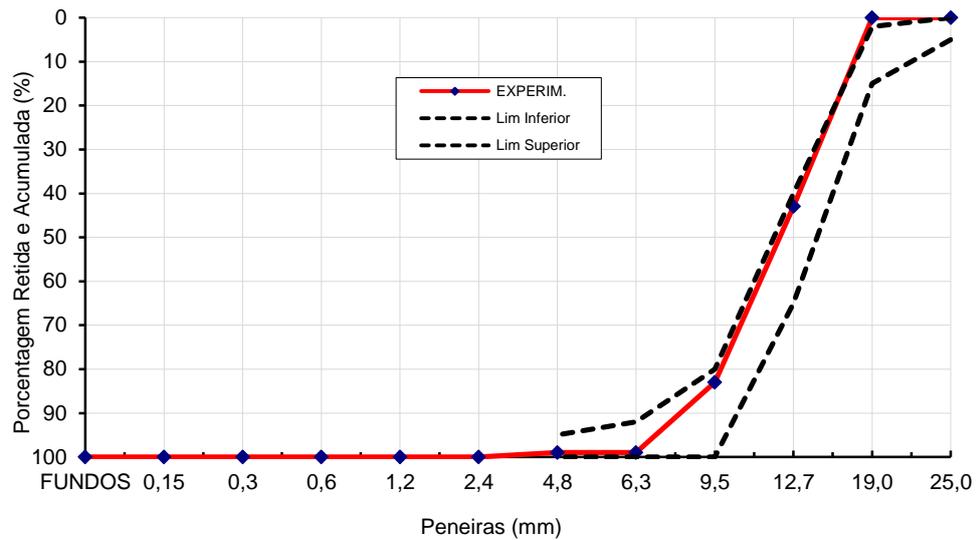
A caracterização do agregado graúdo consta na Tabela 10. Já a curva característica do agregado é mostrada na figura 29.

Tabela 10 – Caracterização do Agregado Graúdo

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	VALORES
Massa Específica	g/cm ³	2,387
Massa unitária no estado solto	g/cm ³	1,466
Diâmetro Máximo Característico	mm	19
Módulo de Finura	—	6,82

Fonte: Autora(2022)

Figura 29 – Curva característica do agregado graúdo



Fonte: Autora(2022)

5.1.2. AGREGADO MIÚDO

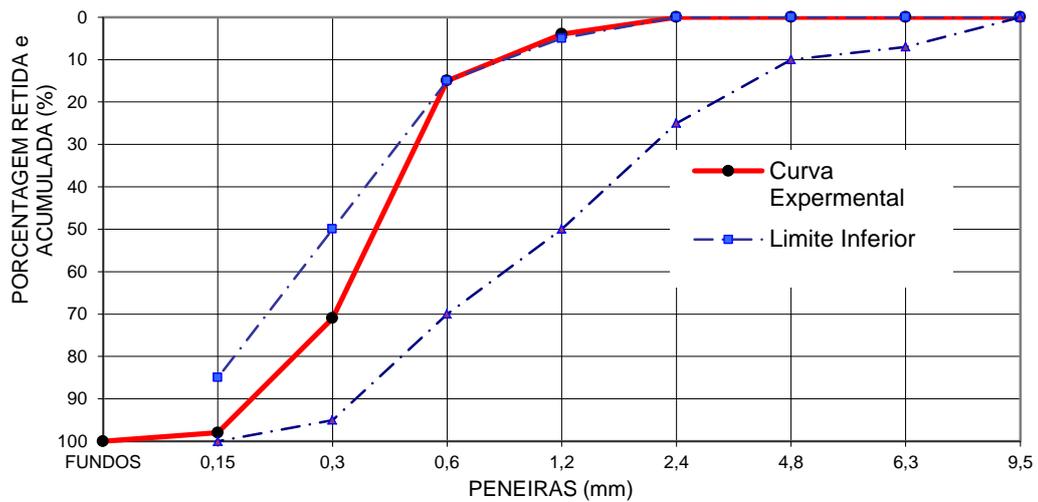
A caracterização do agregado miúdo consta na Tabela 11. Já a curva característica do agregado é mostrada na figura 30.

Tabela 11 – Caracterização do Agregado miúdo

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	VALORES
Massa Específica	g/cm ³	2,658
Massa unitária no estado solto	g/cm ³	1,52
Diâmetro Máximo Característico	mm	1,2
Módulo de Finura	—	1,88

Fonte: Autora (2022)

Figura 30 – Curva característica do agregado miúdo



Fonte: Autora (2022)

5.1.3. PDV

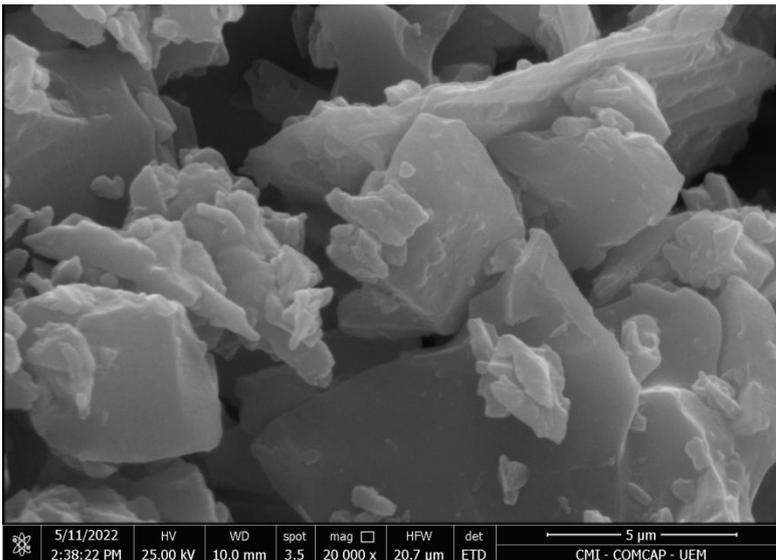
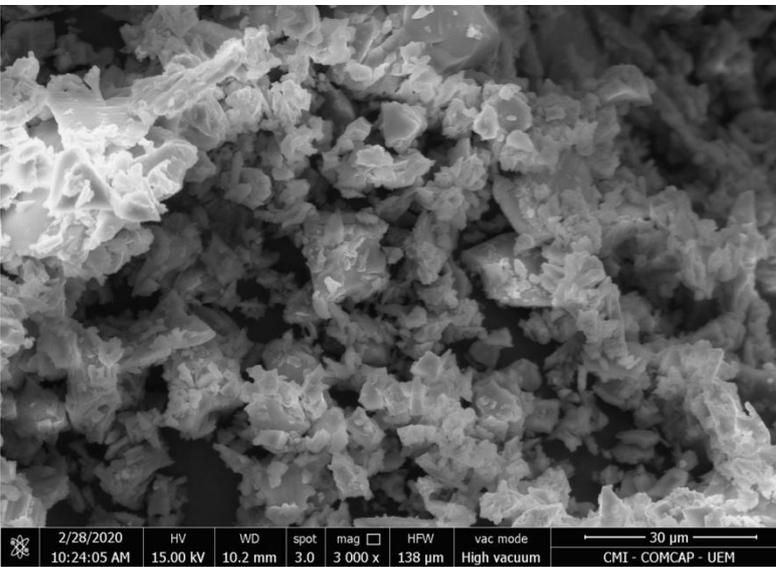
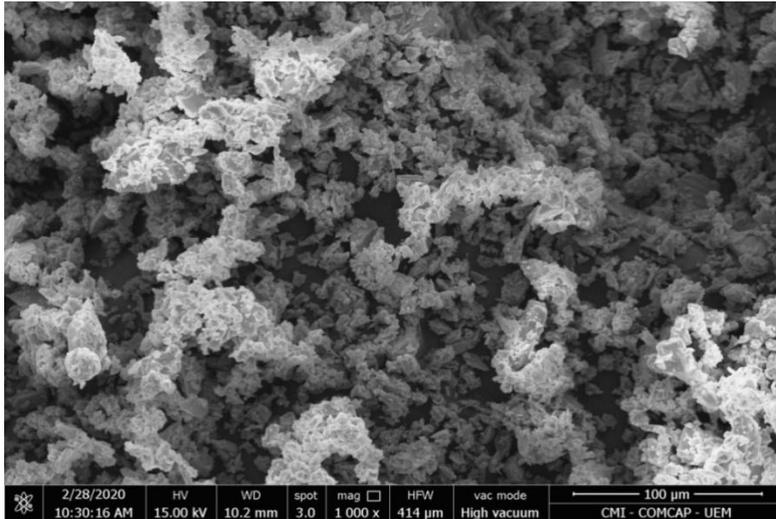
5.1.3.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Com a análise do resíduo de pó de vidro feita no MEV foi possível avaliar a morfologia de suas partículas. O resíduo apresentou partículas em formato irregular típica de materiais amorfos.

De acordo com He et al. (2019) o formato das partículas de PDV são irregulares e angular, o que colabora para um aumento de resistência no concreto endurecido, porém prejudica a trabalhabilidade do concreto fresco.

Na figura 31 (a) temos a amostra aumentada 1000 vezes, na 31 (b) a amostra 3000 vezes aumentada e na amostra 31 (c) 20000 vezes aumentada respectivamente.

Figura 31 – Amostras de PDV

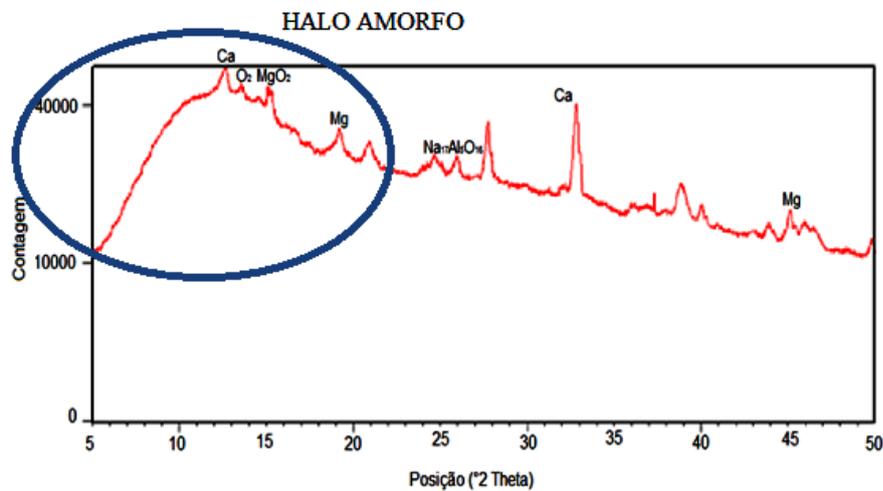


Fonte: Autora (2022)

5.1.3.2. DRX

O ensaio de DRX foi realizado para identificar as fases do resíduo de pó de vidro. Pelo gráfico apresentado na figura 31 pode-se constatar que a amostra não possui fase cristalina e que tem uma fase amorfa. O resultado indica que o material analisado apresenta fase amorfa, característica de materiais com propriedades pozolânicas, podendo então ser empregados como aglomerantes. Na figura 32 tem-se o gráfico gerado com as fases da amostra de pó de vidro.

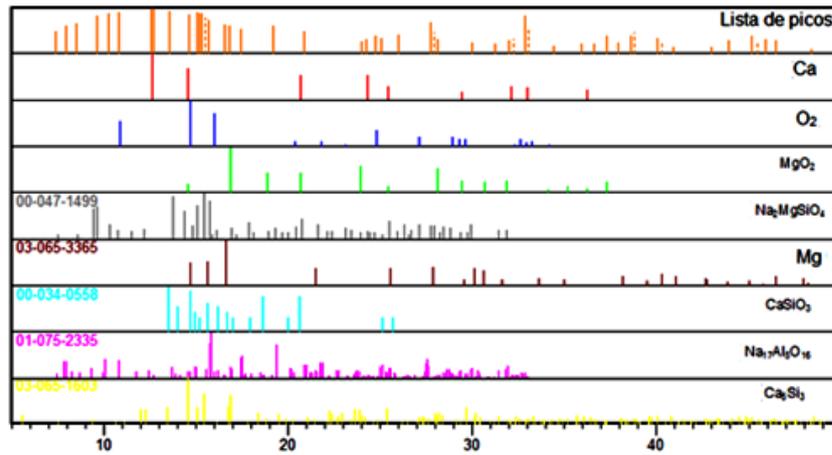
Figura 32 – Fases da amostra de PDV



Fonte: Autora (2020)

A figura 33 mostra a lista de picos e as fases encontradas na amostra do resíduo de lapidação de vidro.

Figura 33 – Lista de picos do PDV apresentadas do programa X'pert High Score



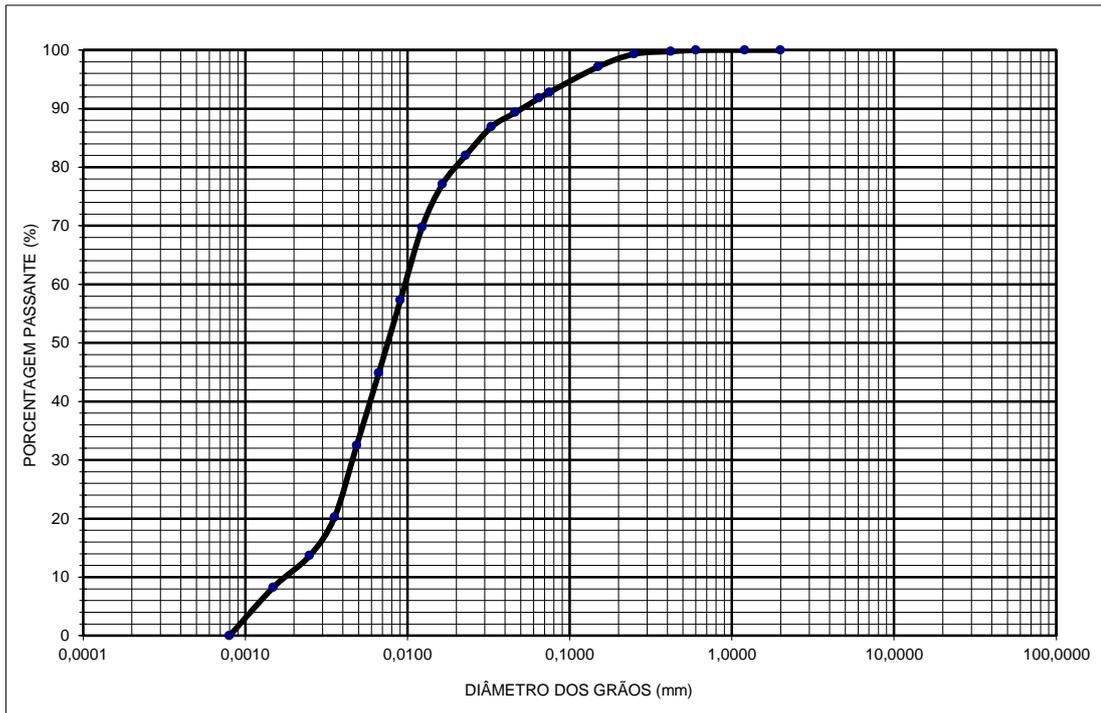
Fonte: Autora (2020)

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).

5.1.3.3. Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada pela combinação entre peneiramento e sedimentação seguindo a ANBT NBR 7181:1984. A figura 34 mostra a curva granulométrica formada através do ensaio.

Figura 34 – Curva granulométrica



Fonte: Autora (2022)

Tabela 12 – Porcentagem passante (%)

Diâmetro dos grãos (mm)	Porcentagem (%)
2	100
0,6	99,97
0,2	99,32
0,06	91,78
0,002	13,66
0,001	8,25

Fonte: Autora (2022)

Tabela 13 – Classificação granulométrica segundo a ABNT NBR 6502:1995

ABNT NBR 6502:1995	Porcentagem retida (%)
0,6 a 2 mm - areia grossa	0,03
0,2 a 0,6 mm - areia média	0,65
0,06 a 0,2 mm - areia fina	7,54
0,002 a 0,06 mm - silte	78,12
≤0,002 mm - argila	5,41

Fonte: Autora (2022)

Tabela 14 – Coeficiente de uniformidade e curvatura

Coeficiente	Valor
D60	0,01
D30	0,0062
D10	0,0021
U	4,76
CC	1,83

Fonte: Autora (2022)

Observando a curva granulométrica e a tabela 13 que mais de 75% do PDV ficou retido na peneira de 0,002 a 0,06mm e segundo a NBR 6502:1995 o PDV é semelhante ao silte. A tabela 14 apresenta que o grau de uniformidade é de 4,76 e sendo menor que 5 a NBR 6502:1995 considera um material muito uniforme. Já o coeficiente de curvatura resultou em 1,83 e como está entre 1 e 3 o PDV é considerado um material bem graduado.

5.1.3.4. Massa específica e Teor de umidade

A tabela 15 mostra o resultado do ensaio de determinação da massa específica dos grãos de acordo com a ABNT NBR 6508:1984. A tabela 16 mostra o teor de umidade do PDV.

Tabela 15 – Massa específica PDV

ENSAIO N°	1	2
PICNÔMETRO N°/ CAPACIDADE (ml)	23 / 500	24/500
AMOSTRA ÚMIDA (g)	50	50
AMOSTRA SECA (g)	49,37	49,37
PICNÔMETRO + PDV + ÁGUA (g)	634,37	640,78
PICNÔMETRO + ÁGUA (g)	604,53	611
TEMPERATURA DE ENSAIO (°C)	26	25,8
MASSA ESP. DA ÁGUA (g/cm ³)	0,9968	0,9969
MASSA ESP. DOS GRÃOS (g/cm ³)	2,52	2,51
MASSA ESP. DOS GRÃOS (Médio) (g/cm ³)	2,52	

Fonte: Autora (2022)

Tabela 16 – Teor de umidade PDV

DETERMINAÇÃO DO TEOR UMIDADE			
CAPSULA Nº	63	119	62
AMOSTRA ÚMIDA + CÁPSULA (g)	48,34	61,12	58,18
AMOSTRA SECA + CÁPSULA (g)	47,98	60,67	57,57
MASSA DA CÁPSULA	19,29	26,24	19,68
UMIDADE (%)	1,25	1,31	1,26
UMIDADE MÉDIA (%)	1,27		

Fonte: Autora (2022)

A tabela 15 mostra que a massa específica do PDV é 2,52g/cm³ enquanto do cimento é de 3,12 g/cm³. Ao substituir PDV no cimento, podemos obter um concreto mais leve conforme aumenta o teor de substituição.

Foram feitos ensaios para o teor de umidade do resíduo em dois dias distintos, já que a mudança das condições climáticas e da umidade do ar poderiam ter afetado. A primeira determinação do teor de umidade foi realizada quando o dia estava quente e não havia chovido, e resultou em um teor de umidade de 1,27%. No dia seguinte à essa medição estava chovendo mais de 24 horas quando foi realizada uma nova medição de teor de umidade que resultou em 1,72%, o que representa um aumento de 35,44% entre um dia e outro. O aumento da umidade do PDV pode interferir na consistência do concreto, o que pode interferir na resistência do concreto endurecido.

5.1.3.5. Massa unitária

A massa unitária do PDV e do cimento CPV – ARI foram calculadas e comparadas na tabela 17.

Tabela 17 – Massa unitária PDV e Cimento

MASSA UNITÁRIA PDV		
MASSA (g)	VOLUME RECIPIENTE (cm ³)	MASSA UNITÁRIA (g/cm ³)
1980	3000	0,66
MASSA UNITÁRIA CIMENTO		
MASSA (g)	VOLUME RECIPIENTE (cm ³)	MASSA UNITÁRIA (g/cm ³)
3540	3000	1,18

Fonte: Autora (2022)

A massa unitária do PDV é de $0,66 \text{ g/cm}^3$ enquanto do cimento é $1,18 \text{ g/cm}^3$. Quer dizer que a massa unitária do cimento tem um aumento de 78,79% em relação ao do PDV, ou seja, o PDV se apresenta como um material mais leve que o cimento.

5.1.3.6. Tempo de pega

O tempo de início de pega se deu com 85 minutos, que é maior que 60 minutos estipulado pela norma. Já o tempo de fim de pega se deu com 525 minutos, que é menor que 600 minutos, estipulado pela norma. Já o cimento que o tempo de início de pega de 137 minutos e fim de pega de 169 minutos.

Portanto o PDV tem seu início de pega 52 minutos antes do cimento e fim de pega 356 minutos após o cimento. Isso pode justificar a perda de trabalhabilidade nos concretos feitos com altos teores de PDV, porém podem acarretar um ganho de resistência tardia por terem a pega mais atrasada.

5.1.3.7. Módulo de finura

Da amostra de 500g o ensaio apresentou resultados com 448,28g de massa passante, 51,72g de amostra retida. A finura do PDV foi de 10%, onde o máximo deve ser de 12% pela norma.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS COM PDV

5.2.1. Caracterização do concreto no estado fresco

5.2.1.1. Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (slump)

A moldagem dos corpos de prova foi realizada durante 4 dias consecutivos, onde a temperatura e clima mudaram e alteraram o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco

de cone. A tabela 18 mostra os resultados obtidos. Os traços T1, T2 e T3 foram moldados no dia 28 de março.

Tabela 18 – Resultados do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (slump)

Traço	Fator a/c	Slump	Temperatura e Data	Condição climática
T1	0,6	18	30°C - 28/03	SOL
T2		17	30°C - 28/03	SOL
T3		15	30°C - 28/03	SOL
T4		15	31°C - 29/03	SOL
T5		14	31°C - 29/03	SOL
T6		12	31°C - 29/03	SOL
T7	0,55	7	31°C - 29/03	SOL
T8		6	31°C - 30/03	SOL
T9		7	31°C - 30/03	SOL
T10		13	22°C - 31/03	CHUVA
T11		11	22°C - 31/03	CHUVA
T12		10	22°C - 31/03	CHUVA

Fonte: O autor (2022)

Optou-se por refazer os traços 7, 8 e 9 devido a mudança brusca nas condições climáticas e na influência notada das mesmas na consistência dos concretos. A tabela 19 mostra o resultado do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone refeito. Os agregados utilizados estavam secos.

Tabela 19 – Traços refeitos para ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (slump)

Traço	Fator a/c	Slump	Temperatura e Data	Condição climática
T7	0,55	16	22°C - 31/03	CHUVA
T8		14	22°C - 31/03	CHUVA
T9		12	22°C - 31/03	CHUVA

Fonte: O autor (2022)

Com o novo ensaio realizado pode-se então constatar que a temperatura do dia estava afetando diretamente o teste de abatimento de tronco do cone dos concretos confeccionados.

Pode-se resgatar no item 5.1.3.4 a diferença do teor de umidade da amostra de PDV nos dias de sol e chuva. Outra observação importante durante a moldagem dos corpos de prova, no que diz respeito a absorção de umidade ou água pelo resíduo, pode ser notado que no intervalo entre a realização do slump test e a moldagem propriamente dita era perceptível a perda de consistência conforme o tempo passava.

Outro fator importante que se destacou foi a diferença em relação ao volume do concreto confeccionado. Quanto mais se adicionava o PDV à mistura de concreto, mais seu volume aumentava. Isso se deve à diferença de massa específica entre o resíduo e o cimento.

A ABNT NBR 8953:2015 apresenta classes de consistência do concreto que é apresentada no quadro 6.

Quadro 6 – Classes de consistência

Classe	Abatimento mm	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras
NOTA 1 De comum acordo entre as partes, podem ser criadas classes especiais de consistência explicitando a respectiva faixa de variação do abatimento. NOTA 2 Os exemplos desta Tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de aplicações.		

Fonte: ABNT NBR 8953 (2015)

De acordo com o quadro 6 os traços T1, T2, e T7 fazem parte da classe S160. Já o restante dos traços faz parte da classe S100, entretanto levando em consideração os traços T7, T8 e T9 moldados no dia quente, esses se enquadrariam na classe S50. A classificação de consistência utilizada no concreto estrutural depende de sua aplicação designada em projeto.

5.2.1.2. Massa específica

A massa específica do concreto fresco foi calculada e a tabela 20 mostra os resultados.

Tabela 20 – Massa específica do concreto fresco

Traço	PDV (%)	Massa do concreto fresco (kg)	Massa específica do concreto fresco (g/cm ³)	Redução em relação ao traço piloto (%)
T1	0	3,93	2,50	0,00
T2	10	3,80	2,42	3,20
T3	15	3,76	2,39	4,40
T4	20	3,72	2,37	5,20
T5	25	3,72	2,37	5,20
T6	30	3,62	2,30	8,00
T7	0	3,78	2,41	0,00
T8	10	3,78	2,41	0,00
T9	15	3,76	2,39	0,83
T10	20	3,76	2,39	0,83
T11	25	3,70	2,36	2,07
T12	30	3,61	2,30	4,56

Fonte: Autora (2022)

Pode-se constatar que a massa específica do concreto no estado fresco vai diminuindo de acordo com o aumento de substituição de PDV na mistura de concreto, isso quer dizer que o peso da estrutura diminuirá utilizando o concreto dos traços com substituições de PDV. Pela tabela apresentada pode-se constatar que a massa específica dos traços com fator a/c 0,6 (T1 à T6) tem uma diminuição maior em relação ao traço piloto do que os traços com fator a/c 0,55 (T7 à T12).

5.2.2. Caracterização do concreto no estado endurecido

5.2.2.1. Resistência à compressão média

Para a determinação da resistência à compressão foram ensaiados 6 corpos de prova com idade de 28 dias. Os resultados dos ensaios são mostrados na tabela 21, e os resultados detalhados de cada traço são apresentados no Apêndice 1.

Tabela 21 – Resistência à compressão média

Traço	Fator a/c	PDV (%)	Resistência à compressão média (MPa)	Varição de resistência em relação ao traço piloto (%)	Desvio padrão	Coefficiente de variação(%)
T1	0,6	0	31,2	Piloto	3,5	11,23
T2		10	31,75	1,76	1,65	5,18
T3		15	29,7	-4,81	1,85	6,22
T4		20	26,5	-15,06	3,31	12,5
T5		25	26,3	-15,7	1,35	5,13
T6		30	23,8	-23,72	2,18	9,17
T7	0,55	0	34,95	Piloto	4,59	13,13
T8		10	30,65	-12,3	4,62	15,07
T9		15	31,8	-8,93	1,47	4,63
T10		20	26,75	-23,46	3,47	12,97
T11		25	29,4	-15,88	2,23	7,6
T12		30	28,5	-18,45	1,51	5,32

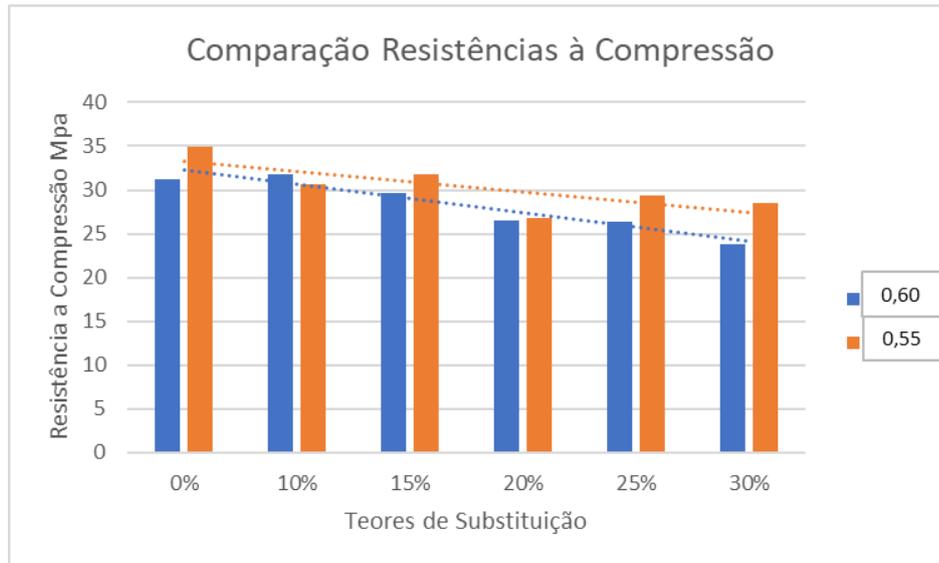
Fonte: Autora (2022)

Pode-se constatar que as resistências médias com o concreto de fator a/c 0,55 apresentaram melhores resultados e mesmo com uma alta substituição de 30% de cimento sua resistência não foi menor que 28 MPa. Esse resultado já era esperado pela Lei de Abrams, ou seja, existe uma relação direta entre o fator a/c e a resistência dos concretos, quanto maior a quantidade de água utilizada, menor será sua resistência.

O desvio padrão da amostra mostra o grau de variação do conjunto de resistência, ou seja, o quanto os valores dos quais extraíram a média são próximos ou distantes da própria média de resistência. Já o coeficiente de variação expressa a variação dos dados em relação à sua média e quanto menor o seu valor, menor a dispersão dos dados analisados.

A figura 35 mostra o gráfico de comparação de resistência à compressão.

Figura 35 – Comparação de resistência à compressão



Fonte: Autora (2022)

Apesar do concreto com fator a/c 0,6 apresentar um aumento no valor da resistência com uma substituição de 10% de PDV, não pode contar como melhoria já que o aumento foi de menos de 2%, porém com a substituição de 15% não houve uma queda considerável em relação ao traço piloto.

Já o concreto com fator a/c 0,55 apresentou diminuição na resistência média em relação ao traço piloto, porém essa variação entre a resistência do traço 7 sem substituição de PDV e do traço 12 com 30% de substituição de PDV foi de 6,45 MPa. Essa diferença é de 18,45% no valor da resistência com uma substituição significativa de 30% de aglomerante.

As linhas de tendência mostram uma redução nas resistências e o comportamento é semelhante para os dois fatores a/c. Também pode-se avaliar que a proximidade das resistências com teores altos de substituição e o traço referência. E mesmo os traços com substituição não atingirem as resistências dos traços pilotos, esses valores ainda se apresentam altos e com uma diminuição no consumo de cimento, conforme será mostrado posteriormente.

De acordo com a ABNT NBR 8953:2015 concretos que apresentam acima de 20 MPa são considerados estruturais. Conforme os resultados obtidos e as classificações dos concretos os traços estudados são classificados de acordo com a tabela 22.

Tabela 22 – Classe dos traços estudados

Traço	PDV (%)	Classe concreto
T1	0	C30
T2	10	C30
T3	15	C25
T4	20	C25
T5	25	C25
T6	30	C20
T7	0	C30
T8	10	C30
T9	15	C30
T10	20	C25
T11	25	C25
T12	30	C25

Fonte: Autora (2022)

5.2.2.2. Absorção de água, Índice de vazios e Massas específicas

O ensaio de absorção de água foi realizado em 3 corpos de prova de cada traço com idade de 28 dias. Os resultados médios de absorção de água, índice de vazios e massas específicas constam na tabela 23. Os dados completos do ensaio estão no Apêndice 02.

Tabela 23 – Resultados ensaio de absorção

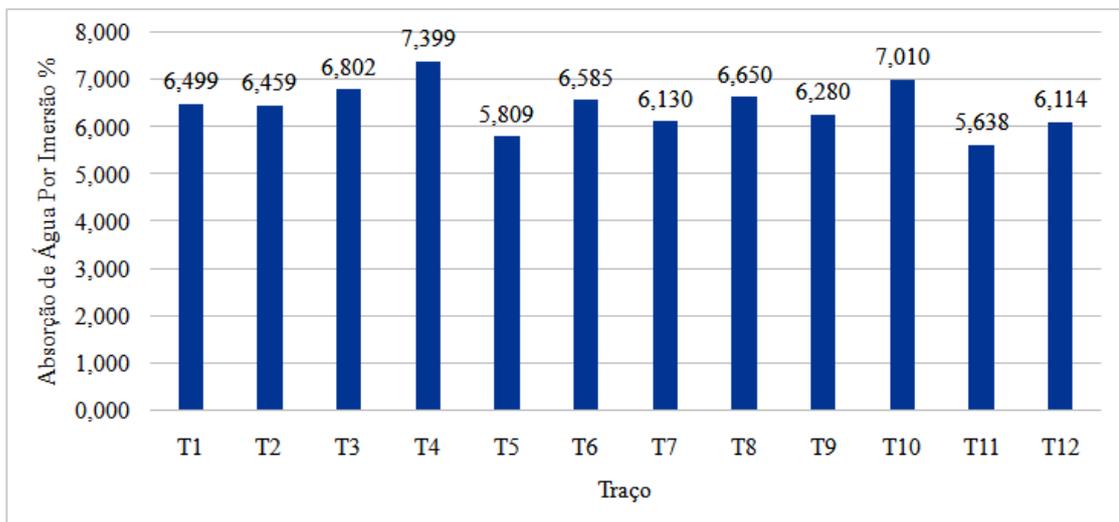
Traço	Absorção de água por imersão média (%)	Índice de vazios médio (%)	Massa específica da amostra seca média (g/cm ³)	Massa específica saturada média (g/cm ³)	Massa específica real média (g/cm ³)
T1	6,499	14,961	2,298	2,453	2,709
T2	6,459	14,647	2,267	2,408	2,657
T3	6,802	14,906	2,214	2,375	2,61
T4	7,399	16,129	2,218	2,341	2,599
T5	5,809	12,703	2,179	2,314	2,505
T6	6,585	14,446	2,177	2,32	2,553
T7	6,13	13,808	2,254	2,394	2,613
T8	6,65	14,938	2,252	2,4	2,641
T9	6,28	14,07	2,24	2,381	2,607
T10	7,01	15,553	2,219	2,374	2,627
T11	5,638	12,576	2,231	2,357	2,552
T12	6,114	13,486	2,228	2,341	2,545

Fonte: Autora (2022)

Para concretos fabricados com agregados naturais a ABNT NBR 6136:2006 diz que o limite de absorção média de água é de até 10% para concretos confeccionados com agregados naturais, portanto todos os traços estão dentro do limite estabelecido. Pode-se também observar que tanto para o fator a/c 0,6 quanto para o 0,55, os traços T5 e T11 com 25% de substituição de resíduo apresentaram os melhores resultados em relação a essa propriedade avaliada. A substituição do aglomerante pelo PDV não influenciou de forma significativa os resultados. O índice de vazios também se manteve quase que constante apresentando uma queda com os traços T5 e T11, com 25% de substituição de PDV.

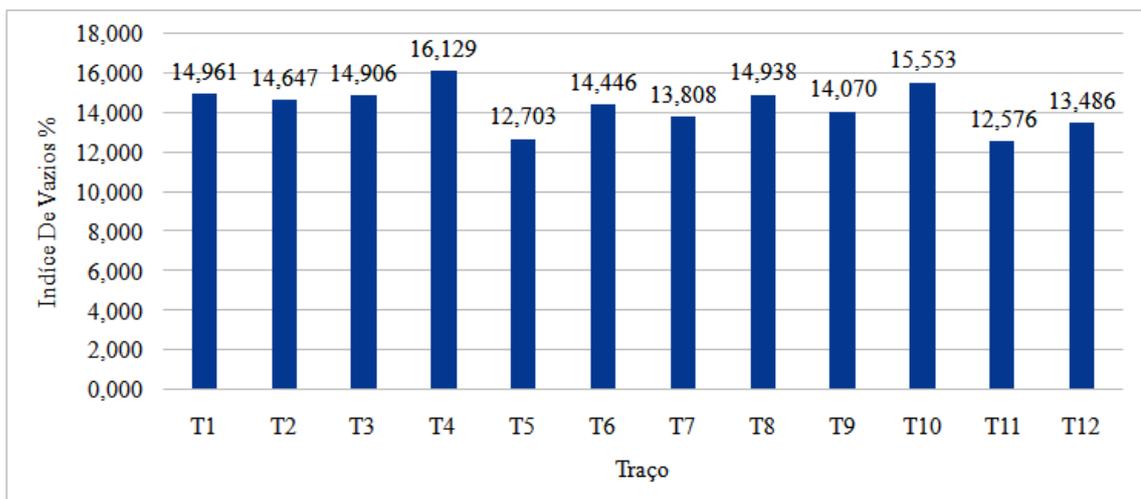
As figuras 36 e 37 mostram no gráfico os resultados obtidos.

Figura 36 – Absorção de água por imersão média



Fonte: Autora (2022)

Figura 37 – Índice de vazios média

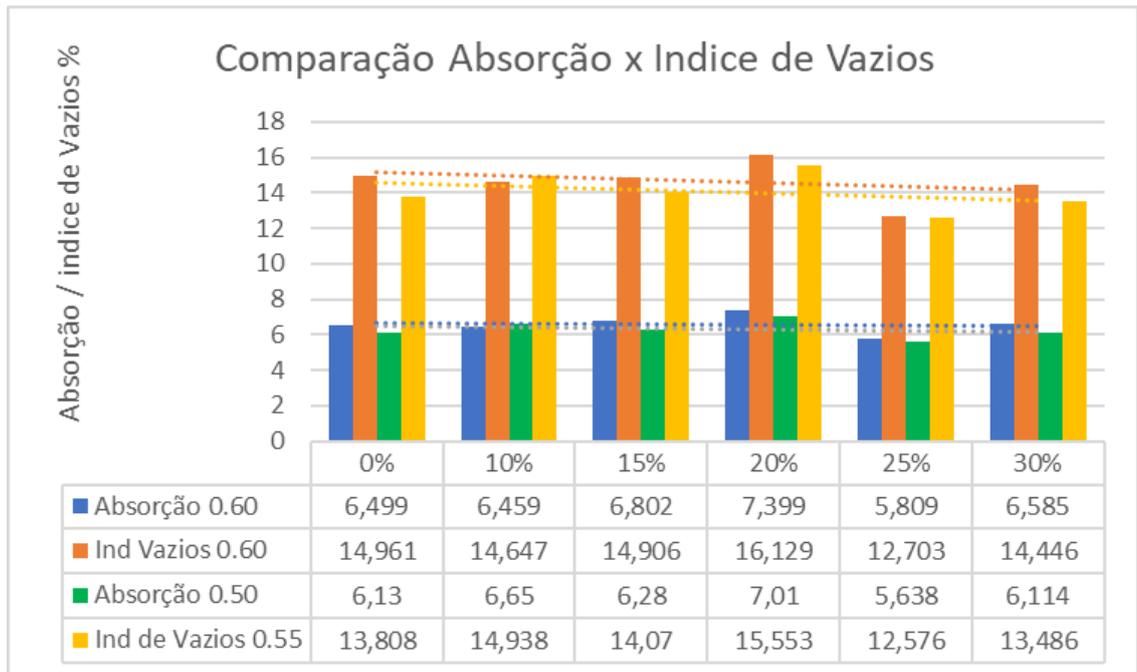


Fonte: Autora (2022)

Pelas figuras 36 e 37 pode-se observar que os traços das duas famílias com 25% de substituição apresentam menores índices de absorção e vazios. Já os traços com 20% de substituição são os que apresentam maiores índices de absorção de água e vazios.

A figura 38 mostra a comparação dos resultados de absorção e índice de vazios e suas linhas de tendência.

Figura 38 – Comparação Absorção x Índice de vazios

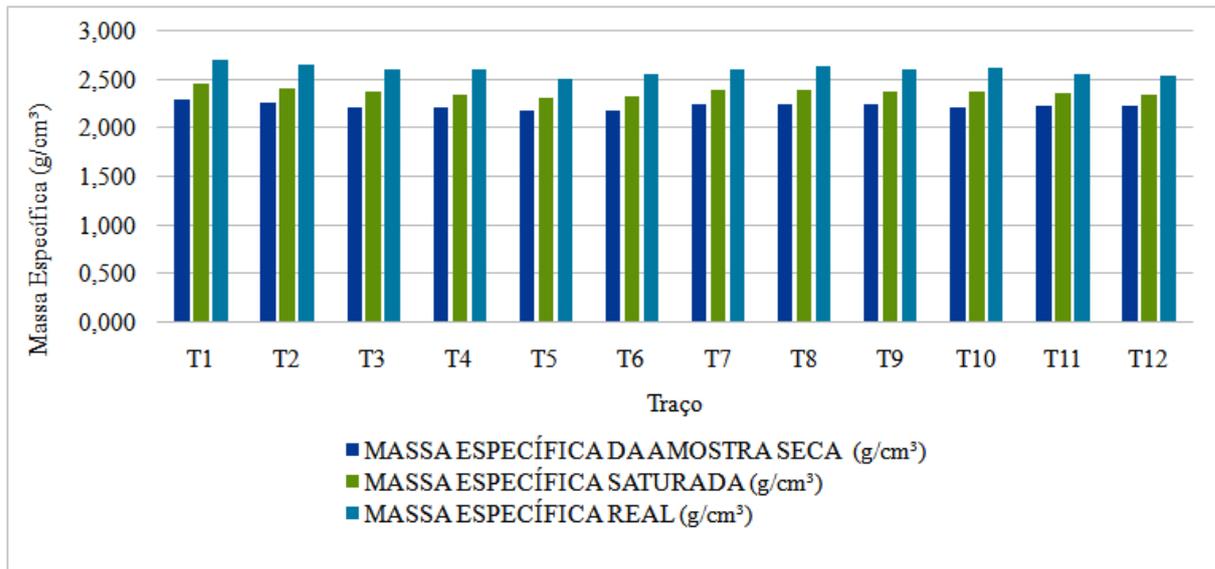


Fonte: Autora (2022)

Tanto para a absorção quanto para o índice de vazios a linha de tendência se manteve quase horizontal.

De acordo com a ABNT NBR 8593:2015 os concretos dos 12 traços estudados são classificados como normal (C), massa específica seca compreendida entre 2.000 kg/m³ e 2800 kg/m³. A figura 39 apresenta a comparação entre as massas específicas médias.

Figura 39 – Comparação entre as massas específicas médias



Fonte: Autora (2022)

As massas específicas vão diminuindo conforme a substituição de PDV vai aumentando. Os concretos dos 12 traços estudados foram classificados como normal, que são os mais utilizados na construção. Como já citado, os concretos com maior substituição possuem uma menor massa específica, o que acarreta em uma estrutura mais leve.

A diferença entre T1 e T6, 0 e 30% de substituição de PDV respectivamente, apresentam uma diferença de 121 kg/m³, ou seja, uma redução de 5,26% do peso do concreto na estrutura por m³. Já a diferença entre T7 e T12, 0 e 30% de substituição de PDV respectivamente, foi de 26 kg/m³ que representa uma redução de 1,15% do peso por m³ de concreto utilizado.

5.2.2.3. Velocidade de propagação de onda de ultrassom (VPU)

O ensaio de VPU foi realizado com 3 corpos de prova de cada traço com idade de 28 dias. A tabela 24 apresenta os resultados obtidos no ensaio. Os dados completos do ensaio estão no apêndice 03.

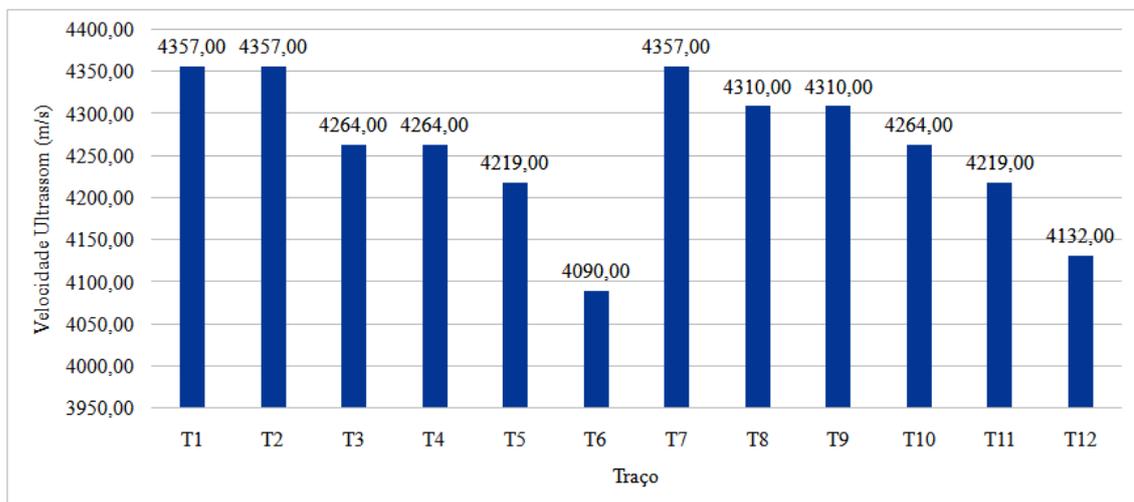
Tabela 24 – Resultados ensaio de VPU

Traço	PDV (%)	Velocidade de ultrassom (m/s)	Varição velocidade de ultrassom (%)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
T1	0	4357	Piloto	95,01	2,18
T2	10	4357	0	96,56	2,22
T3	15	4264	-2,13	0,00	0,00
T4	20	4264	-2,13	45,50	1,07
T5	25	4219	-3,17	50,23	1,19
T6	30	4090	-6,13	64,27	1,57
T7	0	4357	Piloto	71,69	1,65
T8	10	4310	-1,08	26,56	0,62
T9	15	4310	-1,08	26,56	0,62
T10	20	4264	-2,13	0,00	0,00
T11	25	4219	-3,17	68,85	1,63
T12	30	4132	-5,16	42,50	1,03

Fonte: Autora (2022)

Os resultados do VPU mostram que a velocidade da onda de ultrassom teve uma variação de 4090 a 4357 m/s. A figura 40 mostra no gráfico as leituras realizadas.

Figura 40 – Velocidade de propagação de onde de ultrassom média



Fonte: Autora (2022)

O gráfico mostra que quanto maior a substituição de PDV, menor a velocidade de onda de ultrassom. Observando a tabela 24 e a figura 40 pode-se avaliar que os dois traços pilotos apresentaram a mesma velocidade de onda, indicando que o fator a/c não influenciou nesse ensaio.

A tabela 25 apresenta uma classificação da qualidade do concreto de acordo com a velocidade de onda do ultrassom.

Tabela 25 – Classificação relacionando velocidade de onda do ultrassom com qualidade do concreto

Velocidade da Onda Ultra-sônica (m/s)	Qualidade do Concreto
V > 4500	Excelente
3500 < V < 4500	Ótimo
3000 < V < 3500	Bom
2000 < V < 3000	Regular
V < 2000	Ruim

Fonte: Rincon et al (1998) apud Valin Jr et al (2017).

De acordo com a tabela 25 pode-se avaliar que a qualidade do concreto é classificada como ótimo, já que as velocidades dos traços ficaram entre 4090 m/s e 4357m/s, porém a queda de velocidade evidencia uma perda de qualidade do concreto.

5.2.2.4. Módulo de elasticidade

Os dados completos dos resultados do ensaio e equações estão no Apêndice 04.

5.2.2.4.1. Módulo de elasticidade ABNT NBR 6118:2014

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014 o módulo de elasticidade pode ser calculado com o valor de resistência à compressão de acordo com as equações 5.1 e 5.2 para o módulo de elasticidade dinâmico e estático respectivamente.

$$E_{ci} = \alpha e \cdot 5600 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

Onde:

E_{ci} = Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)

αe = 1,2 para basalto

$$E_{cs} = E_{ci} \cdot \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \right) \leq 1 \quad (5.2)$$

Onde:

E_{cs} = Módulo de elasticidade estático (GPa)

E_{ci} = módulo de elasticidade dinâmico (GPa)

f_{ck} = resistência à compressão do concreto (MPa)

A tabela 26 mostra os resultados para os módulos de elasticidade dinâmico e estático a partir das equações 5.1 e 5.2.

Tabela 26 – Módulos de elasticidade estático e dinâmico

Traço	PDV (%)	ABNT 6118:2014	
		E_{ci} (GPa)	E_{cs} (GPa)
T1	0	37,54	32,96
T2	10	37,87	33,3
T3	15	36,62	32,02
T4	20	34,59	29,97
T5	25	34,46	29,84
T6	30	32,78	28,18
T7	0	39,73	35,25
T8	10	37,2	32,61
T9	15	37,9	33,33
T10	20	34,76	30,13
T11	25	36,44	31,83
T12	30	35,87	31,26

Fonte: Autora (2022)

Os traços com fator a/c 0,55 possuem maiores módulos que os traços com fator 0,6. Os módulos de elasticidade foram feitos por estimativa da resistência para servirem de parâmetro para os métodos experimentais que serão apresentados a seguir.

5.2.2.4.2. Módulo de elasticidade pelo Sonelastic

O ensaio utilizando o Sonelastic pode-se obter os valores do módulo de elasticidade dinâmico. Para a obtenção do módulo de elasticidade estático foi utilizada a fórmula da norma ABNT NBR 8522:2021 expressa pela equação 5.3.

$$E_{ci} = \frac{0,4275}{\rho} \cdot E_{cd}^{1,4} \quad (5.3)$$

Onde:

E_{ci} = módulo de elasticidade estático (GPa)

ρ = massa específica

E_{cd} = módulo de elasticidade dinâmico (GPa)

Os resultados obtidos pelo ensaio com o Sonelastic e a partir da equação 5.3 é expresso na tabela 27.

Tabela 27 – Resultados Sonelastic e módulo de elasticidade pela NBR 8522:2021

Traço	PDV (%)	Sonelastic	
		Ecd	Eci
T1	0	34,49	25,64
T2	10	33,49	25,36
T3	15	32,8	24,52
T4	20	31,35	22,92
T5	25	29,93	21,85
T6	30	28,81	20,94
T7	0	33,57	25,22
T8	10	33,87	25,11
T9	15	33,11	24,42
T10	20	33,08	24,5
T11	25	32,49	23,89
T12	30	31,46	22,93

Fonte: Autora (2022)

Pode-se observar pelos resultados que os módulos de elasticidade diminuem à medida que a substituição de PDV aumenta.

Os valores entre os traços T1 e T6 apresentam uma diminuição 16,47% e 6,28% entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático respectivamente, e entre os traços T7 e T12 uma diminuição de 18,33% e 9,08% respectivamente.

5.2.2.4.3. Módulo de elasticidade pela velocidade de onda de ultrassom

Com os valores do ensaio de velocidade de onda de ultrassom pode-se obter o valor do módulo de elasticidade dinâmico pela equação dada pela ASTM C597-16 com a equação 5.4.

$$E_{us} = \frac{V^2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}{(1 - \mu)} \quad (5.4)$$

Onde:

E_{us} = módulo de elasticidade dinâmico (GPa)

ρ = massa específica

V = velocidade de onda de ultrassom

μ = coeficiente de Poisson, que é 0,2 estipulado pela norma.

Já o módulo de elasticidade estático é obtido também através da equação 5.4. Os valores obtidos dos módulos são apresentados pela tabela 28.

Tabela 28 – Módulos de elasticidade pela velocidade de onda do ultrassom

Traço	PDV (%)	ULTRASSOM	
		Ecd	Eci
T1	0	40,49	32,1
T2	10	39,3	31,72
T3	15	37,8	29,91
T4	20	37,33	29,75
T5	25	36,37	28,83
T6	30	33,87	26,34
T7	0	40,49	32,1
T8	10	39,29	31,03
T9	15	38,95	30,93
T10	20	38,29	30,06
T11	25	37,01	29,03
T12	30	35,77	27,48

Fonte: Autora (2022)

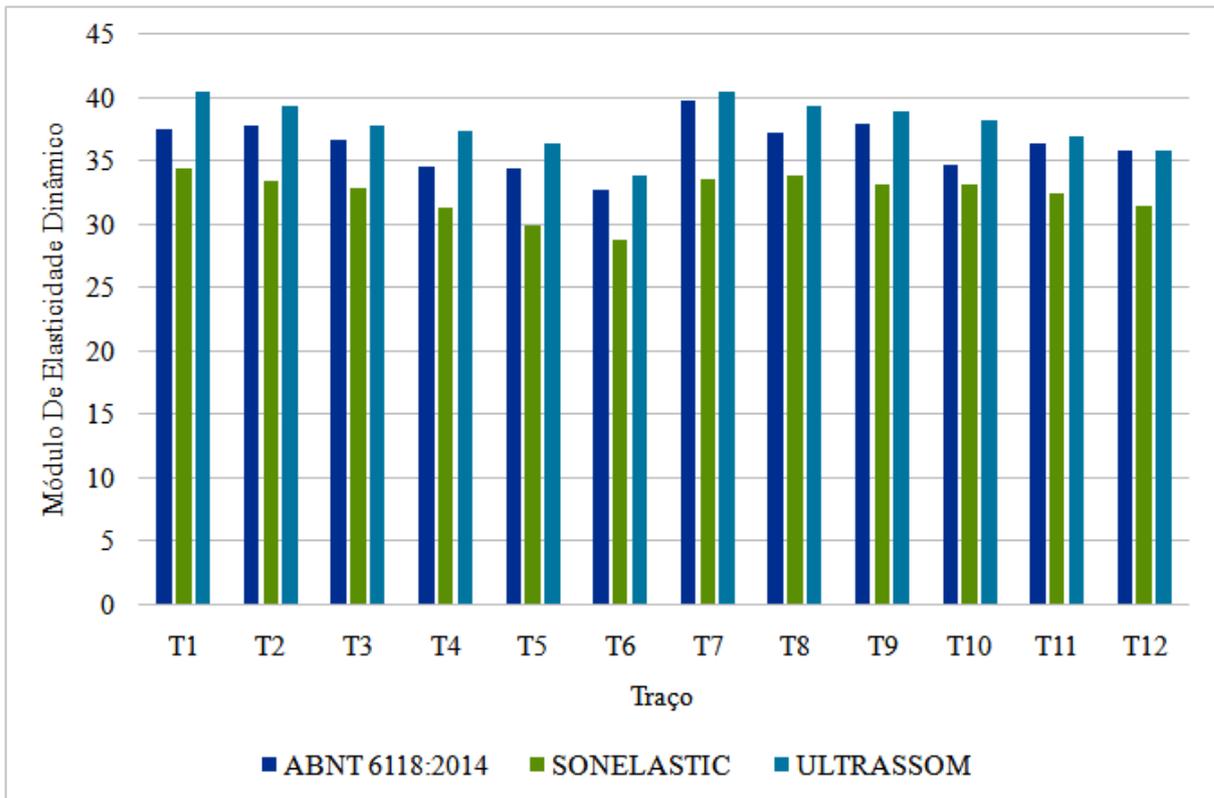
Os valores dos módulos de elasticidade diminuem conforme a substituição de PDV vai aumentando.

Pode-se observar que os valores entre T1 e T6 diminuiram 16,35% para o módulo dinâmico e 17,94% para o módulo estático. Já os traços entre T7 e T12 diminuiram 11,66% e 14,39% para os módulos dinâmico e estático respectivamente.

5.2.2.5. Comparação entre os módulos de elasticidade

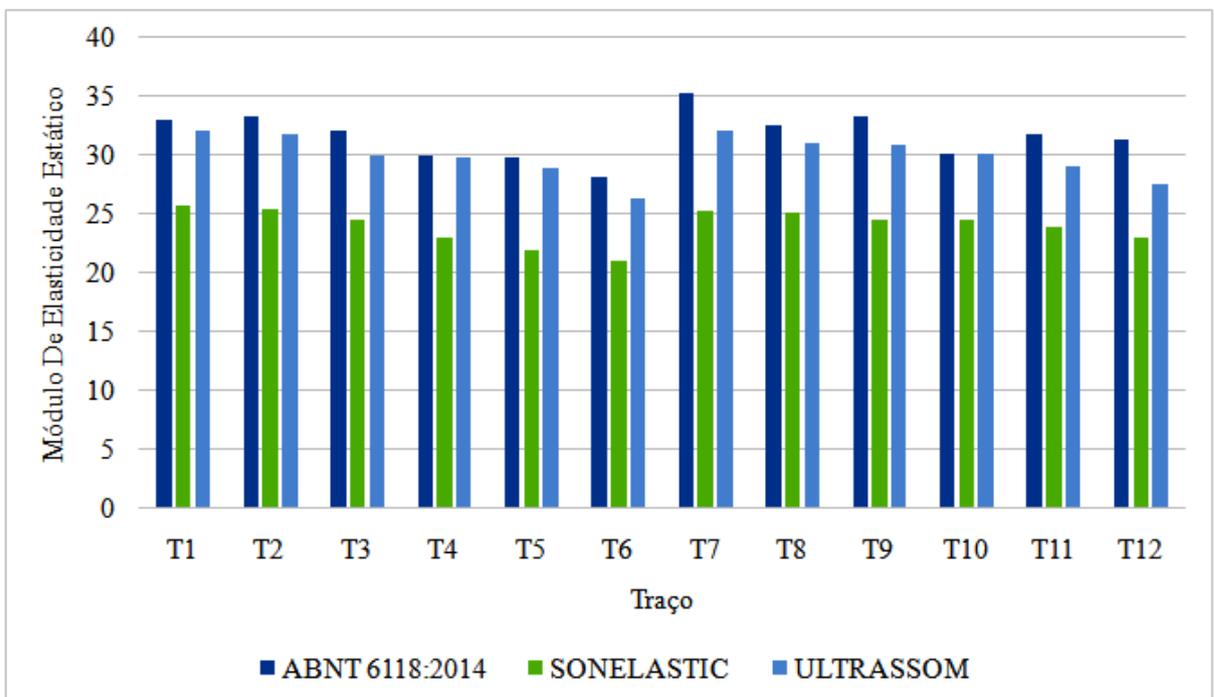
Os módulos de elasticidade tanto estático quanto dinâmico apresentados acima serão agora comparados entre si para uma nova análise. As figuras 41 e 42 apresentam os dados de módulos de elasticidade dinâmico e estático obtidos nos tópicos anteriores respectivamente.

Figura 41 – Módulos de elasticidade dinâmico



Fonte: Autora (2022)

Figura 42 – Módulos de elasticidade estático



Fonte: Autora (2022)

A figura 41 mostra que os módulos de elasticidade dinâmico obtidos pelo ensaio de velocidade de onda de ultrassom foram os maiores valores, seguidos dos valores encontrados pela norma NBR 6118:2014 e por fim os valores obtidos pelo ensaio do sonelastic. Exceto o traço 12 onde o módulo dinâmico pela ABNT foi maior que pelo ultrassom.

Já a figura 42 mostra que os módulos de elasticidade estático obtidos pela NBR 6118:2014 obteve os maiores valores seguidos dos valores obtidos pelo ultrassom e por fim pelo sonelastic. Isso pode se dar devido as fórmulas utilizadas para estimativa deste módulo serem mais conservadoras do que a utilizada pela NBR 6118. Como o Sonelastic pode trazer resultados mais conservadores é mais adequado para análises e cálculos que levam em consideração o módulo de elasticidade.

O importante é que o comportamento do material se mostrou idêntico independente do método utilizado, e condiz com a relação esperada com a resistência mecânica e com a absorção que será discutido posteriormente.

A tabela 29 mostra a perda em porcentagem entre os maiores valores obtidos e os menores.

Tabela 29 – Perca em porcentagem entre os módulos de elasticidade

TRAÇO	Perca em % - dinâmico		Perca em % - estático	
	Ultrassom/ Sonelastic	Ultrassom/ NBR 6118	NBR 6118/ Ultrassom	NBR 6118/ Sonelastic
T1	-14,82	-7,29	-2,61	-22,21
T2	-14,78	-3,64	-4,74	-23,84
T3	-13,23	-3,12	-6,59	-23,42
T4	-16,02	-7,34	-0,73	-23,52
T5	-17,71	-5,25	-3,38	-26,78
T6	-14,94	-3,22	-6,53	-25,69
T7	-17,09	-1,88	-8,94	-28,45
T8	-13,79	-5,32	-4,85	-23,00
T9	-14,99	-2,70	-7,20	-26,73
T10	-13,61	-9,22	-0,23	-18,69
T11	-12,21	-1,54	-8,80	-24,95
T12	-12,05	0,28	-12,09	-26,65

Fonte: Autora (2022)

5.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

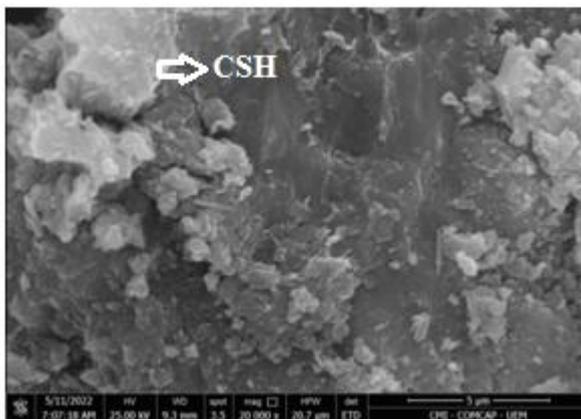
Foi avaliada uma amostra de cada traço no microscópio eletrônico com 20000 vezes de aumento para poder ver a interação do concreto com o PDV.

A microscopia foi realizada para avaliar o comportamento da substituição do aglomerante por PDV como redução das resistências, mas ainda dentro dos parâmetros estruturais mesmo com altos teores, assim como no módulo de elasticidade e a pouca influência na absorção de água e índice de vazios.

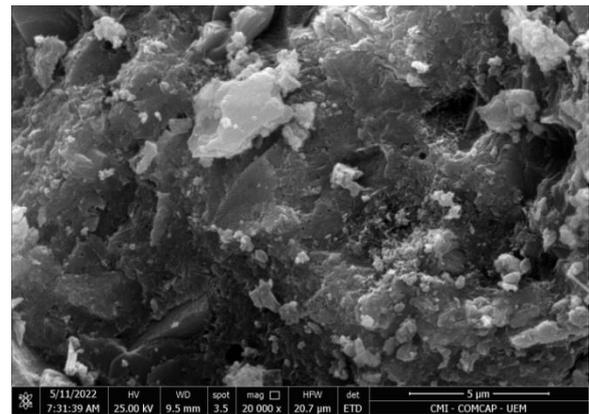
De acordo com Mehta e Monteiro (2014) as proporções típicas de materiais em dosagens de diferentes resistências apresentam um consumo de cimento de 255 Kg/m³, 356 Kg/m³ e 510 Kg/m³ para resistências baixa, moderada e alta respectivamente. O consumo de cimento do traço com fator a/c 0,6 foi de 357,47 Kg/m³ e para 0,55 foi de 363,98 Kg/m³. Portanto o concreto estudado deveria apresentar resistências moderadas.

A figura 43 de (a) à (e) corresponde as imagens dos traços de T1 à T6.

Figura 43 – MEV traços T1 à T6



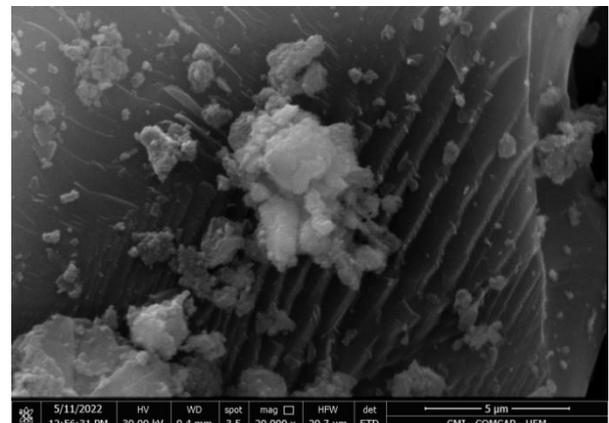
(a) MEV traço 1



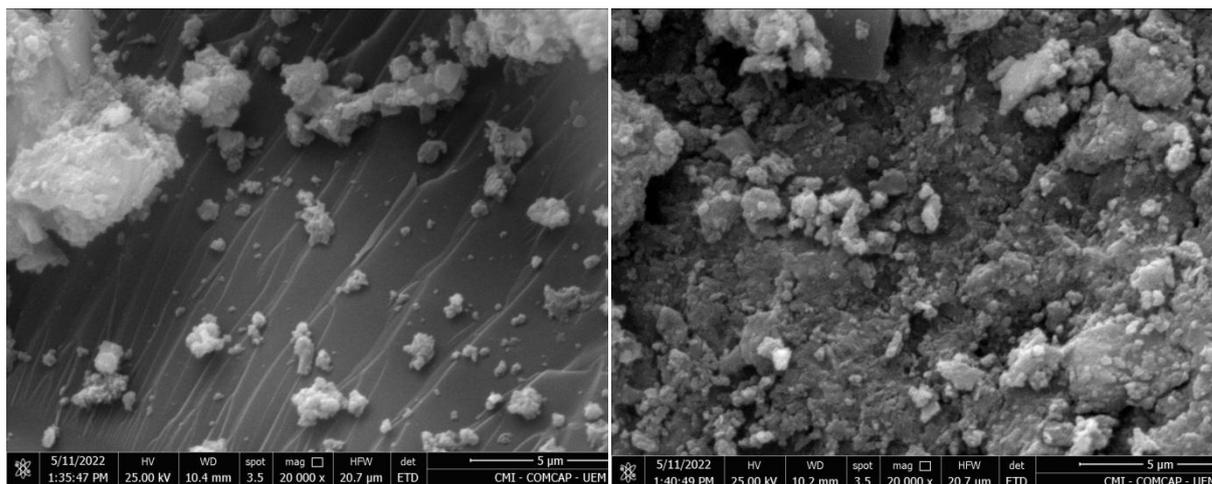
(b) MEV traço 2



(c) MEV traço 3



(d) MEV traço 4

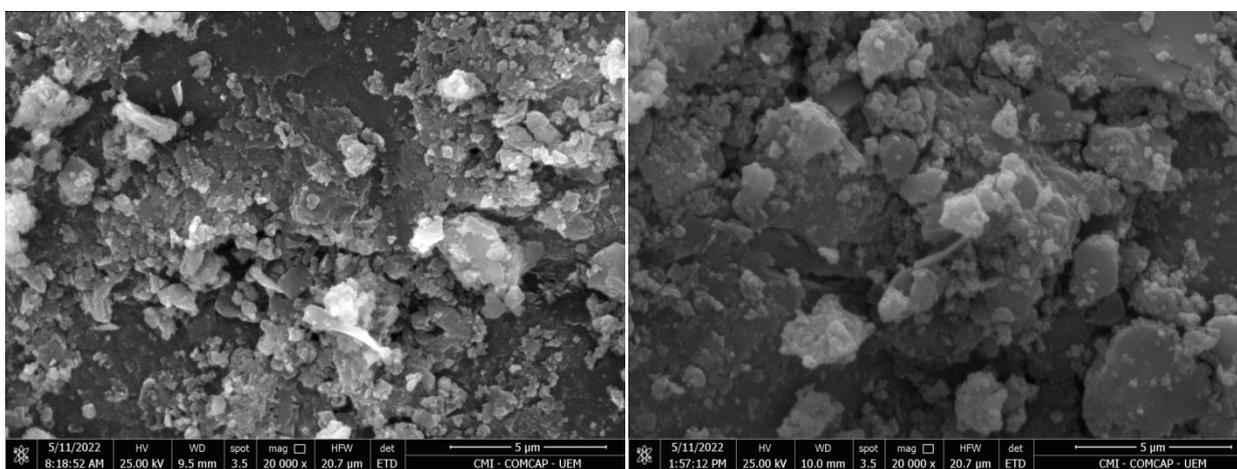


(e) MEV traço 5

(f) MEV traço 6

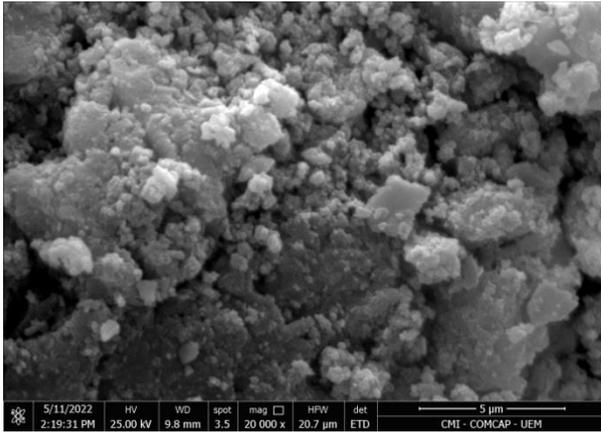
Fonte: Autora (2022)

A figura 44 de (a) à (e) corresponde as imagens dos traços de T7 à T12.

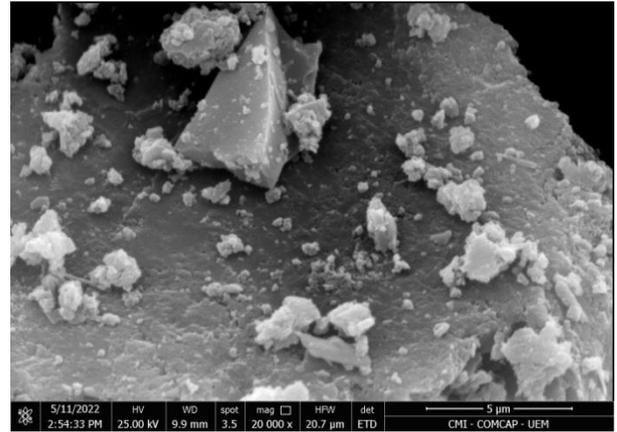
Figura 44 – MEV traços T7 à T12

(a) MEV traço 7

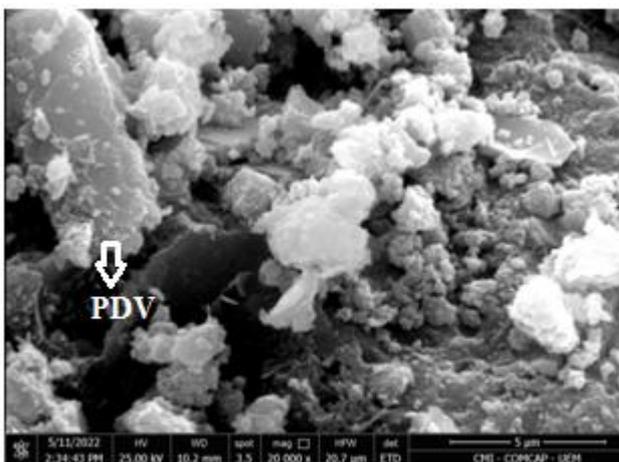
(b) MEV traço 8



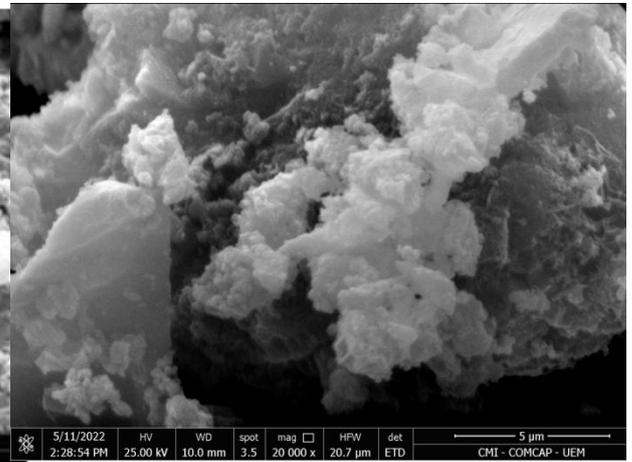
(c) MEV traço 9



(d) MEV traço 10



(e) MEV traço 11



(f) MEV traço 12

Fonte: Autora (2022)

Os traços T4, T5, T6 e T10 apresentam superfícies mais lisas, menos CSH aderido, o que remete a baixas resistências. Os traços T1 e T7, traços pilotos, apresentam estruturas CSH em abundância, o que é esperado pelo alto consumo de cimento e resistência acima de 30MPa.

Nos demais traços observa-se alta concentração de CSH, como nos traços piloto. Durante a execução do ensaio houve uma grande dificuldade de encontrar estruturas como etringita e portlandita, cristais precipitados característicos da zona de transição dos concretos que evidenciam baixas resistências ou porosidade.

Isso vai de encontro com os resultados encontrados: a absorção de água também pode ser justificada pela redução da zona de transição, pela falta de etringita e portlandita. Os pontos que apresentam o PDV podem contribuir para os baixos índices de vazios nos traços

T5 e T11.

Autores como Elaqra et al. (2019) , He et al. (2019), Islam; Rahman; Kazi (2017) mostram que com idades mais avançadas o concreto tem um ganho de resistência.

5.4. CORRELAÇÕES CARACTERÍSTICAS

5.4.1. Resistência à compressão x Módulo de elasticidade

Em relação à resistência e o módulo de elasticidade o T2 com 10% de substituição de PDV atinge os maiores valores para resistência e módulos dinâmico e estático de acordo com a NBR 6118. Já os módulos obtidos através do Sonelastic, Ultrassom e NBR 8522 (utilizada para obter os valores de módulo de elasticidade estático) apresentam seu maior valor em T1, traço piloto, e vai diminuindo seus valores conforme vai ocorrendo a substituição de PDV. A tabela 30 mostra os valores de resistência com os valores de módulos de elasticidade dinâmico e estático. Os traços de T1 à T6 representam concreto piloto, com 10, 15, 20, 25 e 30% de substituição de PDV respectivamente e fator a/c 0,6.

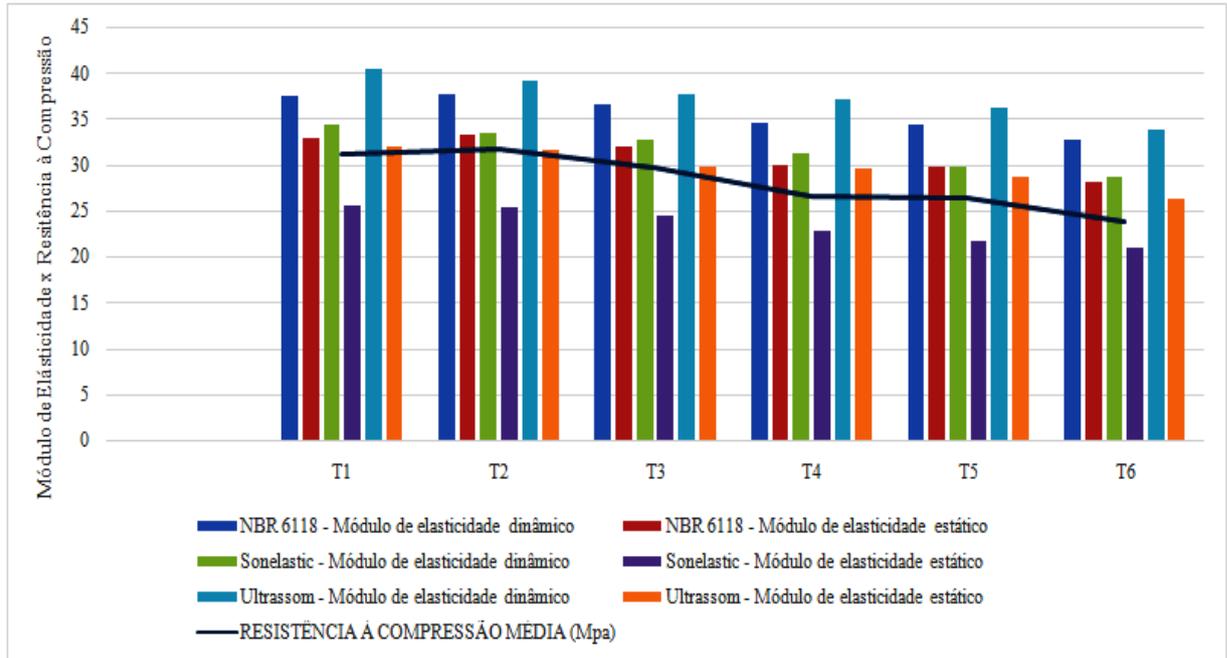
Tabela 30 – Resistência à compressão x Módulo de elasticidade

Traço	Resistência à compressão média (MPa)	ABNT 6118:2014		Sonelastic		Ultrassom	
		Eci	Ecs	Ecd	Eci	Ecd	Eci
T1	31,2	37,54	32,96	34,49	25,64	40,49	32,1
T2	31,75	37,87	33,3	33,49	25,36	39,3	31,72
T3	29,7	36,62	32,02	32,8	24,52	37,8	29,91
T4	26,5	34,59	29,97	31,35	22,92	37,33	29,75
T5	26,3	34,46	29,84	29,93	21,85	36,37	28,83
T6	23,8	32,78	28,18	28,81	20,94	33,87	26,34

Fonte: Autora (2022)

A figura 45 mostra no gráfico os valores da comparação dos traços analisados.

Figura 45 – Resistência à compressão x Módulo de elasticidade



Fonte: Autora (2022)

Os traços entre T7 e T12 apresentam fator a/c 0,55. Os módulos calculados pelo ultrassom apresentam seu valor máximo em T7 e tem seu valor diminuído conforme aumenta a quantidade de PDV. A tabela 31 mostra os valores dos traços de T7 à T12.

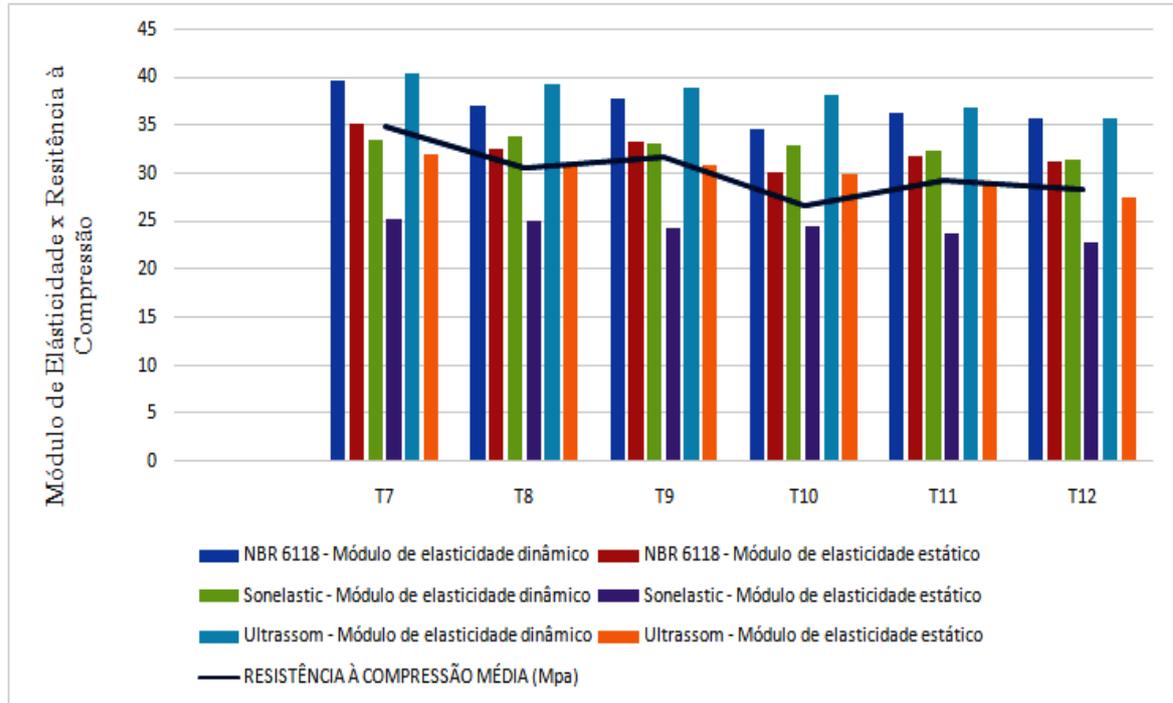
Tabela 31 – Resistência à compressão x Módulo de elasticidade

Traço	Resistência à compressão média (MPa)	ABNT 6118:2014		Sonelastic		Ultrassom	
		Eci	Ecs	Ecd	Eci	Ecd	Eci
T7	34,95	39,73	35,25	33,57	25,22	40,49	32,1
T8	30,65	37,2	32,61	33,87	25,11	39,29	31,03
T9	31,8	37,9	33,33	33,11	24,42	38,95	30,93
T10	26,75	34,76	30,13	33,08	24,5	38,29	30,06
T11	29,4	36,44	31,83	32,49	23,89	37,01	29,03
T12	28,5	35,87	31,26	31,46	22,93	35,77	27,48

Fonte: Autora (2022)

A figura 46 mostra no gráfico os valores da comparação dos traços analisados.

Figura 46 – Resistência à compressão x Módulo de elasticidade



Fonte: Autora (2022)

Pode-se observar que a resistência diminui e o módulo também diminui. Sabe-se que quanto maior a resistência do concreto maior o módulo de elasticidade, e isso também ocorre com o concreto com a substituição de PDV. Quando a resistência diminui, o módulo de elasticidade também diminui, ou seja o comportamento entre eles se assemelha aos dos concretos pilotos.

5.4.2. Resistência à compressão x Absorção de água

Em relação à resistência e absorção de água dos traços T1 à T6 existe um leve aumento de resistência e depois queda novamente desse valor. Já a absorção de água tem um valor em T1, diminui em T2, aumenta em T3, chega ao ápice em T4, tem sua maior queda em T5 e volta a subir em T6. Enquanto a resistência só aumenta em T2 a absorção de água varia conforme vai ocorrendo a substituição de PDV. A variação entre o maior valor de absorção e o menor é de 21,49% para os traços de T1 à T6 e de 19,57% para os traços de T7 à T12.

O índice de vazios acompanha o desempenho da absorção de água. A maior resistência ocorre em T2 e menor valor de absorção de água em T5. O índice de vazios acompanha os valores de absorção. Os traços de T1 à T6 representam concreto piloto, com 10, 15, 20, 25 e

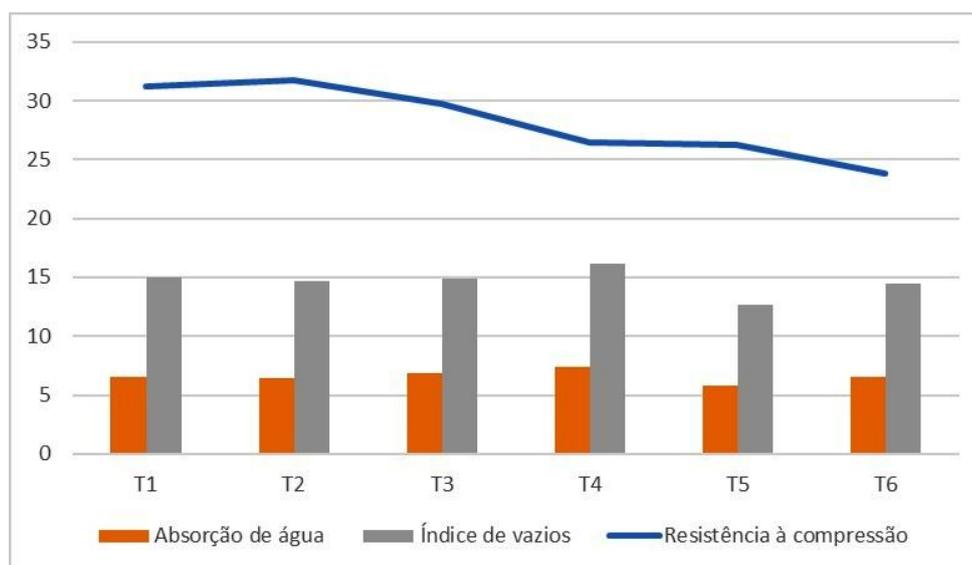
30% de substituição de PDV respectivamente e fator a/c 0,6. A tabela 32 mostra os valores analisados e a figura 47 mostra a comparação no gráfico.

Tabela 32 – Absorção de água x Resistência à compressão

Traço	Resistência à compressão média (Mpa)	Absorção de água por imersão média (%)	Índice de vazios médio (%)
T1	31,2	6,499	14,961
T2	31,75	6,459	14,647
T3	29,7	6,802	14,906
T4	26,5	7,399	16,129
T5	26,3	5,809	12,703
T6	23,8	6,585	14,446

Fonte: Autora (2022)

Figura 47 - Absorção de água x Resistência à compressão



Fonte: Autora (2022)

Já com os traços de T7 à T12 a resistência tem seu pico em T7, diminui em T8, aumenta em T9, diminui em T10, aumenta em T11 e diminui em T12. Já a absorção de água tem um valor em T7, aumenta em T8, diminui em T9, tem seu maior valor em T10, tem seu menor valor em T11 e aumenta novamente em T12. O índice de vazios acompanha os valores da absorção. Maior resistência aparece em T7 enquanto o menor valor de absorção em T11. Os traços de T7 à T12 representam concreto piloto, com 10, 15, 20, 25 e 30% de substituição de PDV respectivamente e fator a/c 0,55.

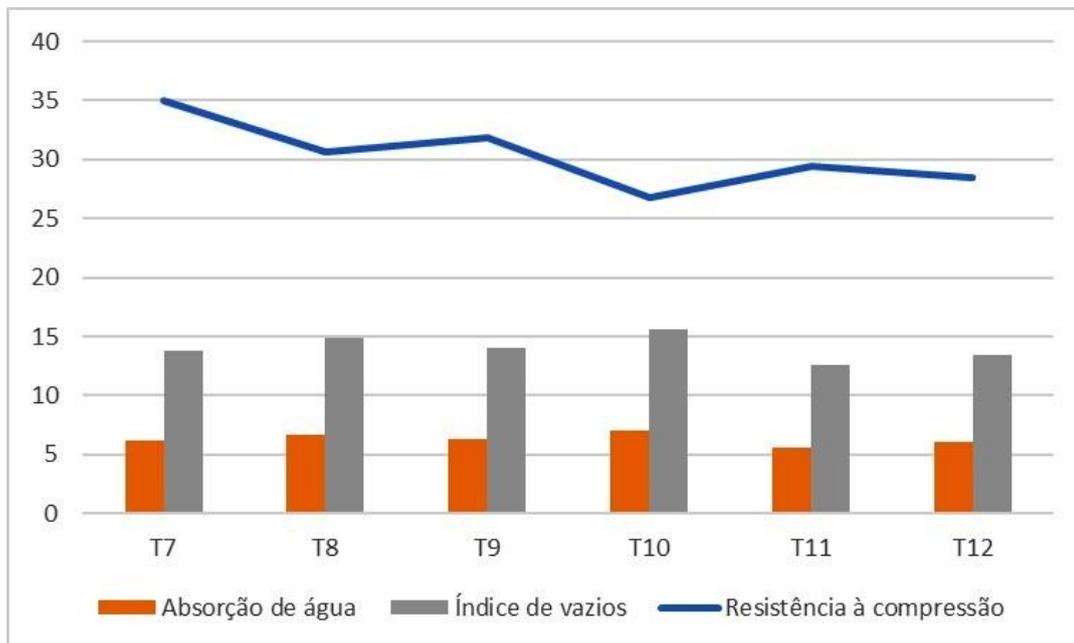
Pode-se observar que apesar na queda de resistência o aumento de absorção de água foi menor. A tabela 33 apresenta os valores que foram analisados e a figura 48 mostra a comparação no gráfico.

Tabela 33 - Absorção de água x Resistência à compressão

Traço	Resistência à compressão média (Mpa)	Absorção de água por imersão média (%)	Índice de vazios médio (%)
T7	34,95	6,13	13,808
T8	30,65	6,65	14,938
T9	31,8	6,28	14,07
T10	26,75	7,01	15,553
T11	29,4	5,638	12,576
T12	28,5	6,114	13,486

Fonte: Autora (2022)

Figura 48 - Absorção de água x Resistência à compressão



Fonte: Autora (2022)

5.4.3. Resistência à compressão x Slump

Pelo fato das mudanças de temperatura interferirem tanto no ensaio de abatimento do tronco de cone e os valores do slump serem altos ou alterados no mesmo traço em dias diferentes, uma questão em relação à resistência foi levantada. A dúvida era se esses valores

de slump altos e variações pela temperatura poderiam afetar a resistência. O slump alto decorre muitas vezes de alto fator a/c, o que devido à lei de Abrams vai levar a uma resistência mais baixa. Visto essa preocupação a ideia era trabalhar com fatores a/c mais baixos.

Após o ensaio de resistência à compressão ser realizado pode-se avaliar que o valor de slump alto, que mediu a consistência, não afetou a resistência do concreto, uma vez que estes sendo mais consistentes e que apresentavam menores índices de abatimento, pertenciam aos traços com maior substituição de PDV e as menores resistências foram também obtidas com esses valores.

Quando a resistência atingiu seus maiores valores os slumps estavam altos, ou seja, menos consistentes. Pode-se constatar então que não foi o valor do fator a/c que afetou à resistência do concreto e sim a substituição de PDV na mistura. A tabela 34 e 35 mostram os valores analisados.

Tabela 34 – Resistência à compressão x Slump

Traço	Resistência à compressão média (Mpa)	Slump
T1	31,2	18
T2	31,75	17
T3	29,7	15
T4	26,5	15
T5	26,3	14
T6	23,8	12

Fonte: Autora (2022)

A tabela 35 mostra a variação de slump em T7, T8 e T9 pois os traços foram feitos e depois refeitos devido à mudança de temperatura, conforme foi explicado anteriormente neste trabalho.

Tabela 35 – Resistência à compressão x Slump

Traço	Resistência à compressão média (Mpa)	Slump
T7	34,95	7 e 16
T8	30,65	6 e 14
T9	31,8	7 e 12
T10	26,75	13
T11	29,4	10
T12	28,5	11

Fonte: Autora (2022)

5.5. DEFINIÇÃO DOS MELHORES TRAÇOS

Para a obtenção dos melhores traços será levado em conta a resistência à compressão, absorção de água e o módulo de elasticidade do concreto. Nos traços com T1 à T6 com fator a/c de 0,6, T2 apresenta um leve aumento na resistência em relação à T1 e depois todos os valores diminuem chegando com o seu valor mínimo a 23,8 MPa. Já os traços entre T7 e T12 com fator a/c 0,55, T7 apresenta o maior valor de resistência, porém T8, T9, T11 e T12 apresentam bons valores.

Em relação à absorção de água os traços T1, T2, T7, T8, T9, T11 e T12 apresentam valores menores que 10%, sendo T11 o traço que apresenta o menor valor de absorção e índice de vazios.

Em relação ao módulo de elasticidade os traços selecionados apresentam valores maiores que 30 GPa, exceto os módulos de elasticidade estático calculados pelo sonelastic.

Considerando todos esses fatores os traços T2, T8, T9, T11 e T12 são os melhores traços, sendo T11 o melhor traço entre eles, já que apresenta um valor de resistência bom, menor absorção e índice de vazios em relação a todos os traços estudados e ser um traço com 25% de substituição de PDV. Os traços T1 e T7 foram retirados por serem os traços pilotos e não apresentarem nenhuma substituição de PDV.

5.6. ANÁLISE SUSTENTÁVEL

5.6.1. Viabilidade de custo

Para a análise sustentável foi feita uma viabilidade de custos com base na tabela SINAPI-PR com dados coletados em maio de 2022. A tabela 36 mostra os valores dos insumos utilizados nas análises.

Tabela 36 – Valores dos insumos

CÓDIGO	INSUMO	UNIDADE	PREÇO (R\$)
—	Cimento CPV ARI	kg	0,77
370	Areia média	m ³	80
4721	Pedra britada n°1	m ³	56,7

Fonte: SINAPI – PR (2022), Adaptado

O preço por kg do cimento CPV ARI foi utilizado de acordo com custo de mercado já que ele não existe na tabela SINAPI. O saco de cimento CPV ARI de 40 kg tem um custo de R\$ 30,90. O cálculo do volume de materiais por m³ é expresso pela equação 5.5.

$$V = \frac{c}{dc} + \frac{a}{da} + \frac{b}{db} + \frac{a/c}{d \text{ água}} \quad (5.5)$$

Onde:

V = volume por dosagem dos traços (cm³)

c = cimento do traço utilizado

dc = densidade do cimento utilizado (g/cm³)

a = areia do traço utilizado

da = densidade da areia utilizada (g/cm³)

b = brita do traço utilizada

db = densidade da brita utilizada (g/cm³)

a/c = fator a/c utilizado

d água = densidade da água utilizada (g/cm³)

A tabela 37 mostra o valor do volume calculado a partir da equação 5.5.

Tabela 37 – Valor do volume por traço

V	2,797	2,747
c	1	1
a	1,96	1,96
b	2,72	2,72
a/c	0,6	0,55
dc	3,12	3,12
da	2,658	2,658
db	2,387	2,387
d água	1	1

Fonte: Autora (2022)

A equação 5.6 apresenta o fator utilizado para obter o volume ou a massa de cada material por m³.

$$Fp = \frac{1000}{V} \quad (5.6)$$

Onde:

Fp = fator proporção

Os valores de Fp gerado para fator a/c 0,6 foi de 357,53 e para fator a/c 0,55 foi de 364,03. Para calcular a massa é preciso apenas multiplicar o traço pelo fator, já para calcular o volume é necessário multiplicar o traço pelo fator e dividir pela densidade. A tabela 38 apresenta os valores calculados.

Tabela 38 – Cálculo de material de cada traço

Traço	Fator a/c	Substituição de resíduo (%)	Cimento (kg)	Areia (m³)	Brita (m³)
T1	0,6	0	357,53	263,64	407,41
T2		10	321,78	263,64	407,41
T3		15	303,9	263,64	407,41
T4		20	286,02	263,64	407,41
T5		25	268,15	263,64	407,41
T6		30	250,27	263,64	407,41
T7	0,55	0	364,03	268,43	414,81
T8		10	327,63	268,43	414,81
T9		15	309,43	268,43	414,81
T10		20	291,22	268,43	414,81
T11		25	273,02	268,43	414,81
T12		30	254,82	268,43	414,81

Fonte: Autora (2022)

Com os dados de custo obtidos pela tabela SINAPI é possível calcular os custos e a viabilidade do concreto. A tabela 39 mostra os custos de viabilidade.

Tabela 39 – Viabilidade de custos

Traço	Fator a/c	Substituição de PDV (%)	Cimento (R\$/kg)	Areia (R\$/m³)	Brita (R\$/m³)	Total (R\$)	Economia (R\$)	Economia (%)
T1	0,6	0	275,3	21,09	23,1	319,49	—	—
T2		10	247,77	21,09	23,1	291,96	27,53	8,62
T3		15	234	21,09	23,1	278,19	41,29	12,93
T4		20	220,24	21,09	23,1	264,43	55,06	17,23
T5		25	206,47	21,09	23,1	250,66	68,82	21,54
T6		30	192,71	21,09	23,1	236,9	82,59	25,85
T7	0,55	0	280,3	21,47	23,52	325,3	—	—
T8		10	252,27	21,47	23,52	297,27	28,03	8,62
T9		15	238,26	21,47	23,52	283,25	42,05	12,93
T10		20	224,24	21,47	23,52	269,24	56,06	17,23
T11		25	210,23	21,47	23,52	255,22	70,08	21,54
T12		30	196,21	21,47	23,52	241,21	84,09	25,85

Fonte: Autora (2022)

Tomando como base o teor ótimo de substituição, T11, pode-se chegar a uma economia de R\$ 70,08 por m³, que significa 21,54%. Para esse teor, utilizando o cimento CPV-ARI, cujo saco possui 40 kg, seria feita uma economia de 1,75 saco de cimento por m³.

Para produzir uma tonelada de cimento é necessário 1,3 toneladas de calcário e 0,7 toneladas de argila. Também para esse traço seriam deixados de ser utilizados e retirados do meio ambiente 325 kg de calcário e 175 kg de argila.

5.6.2. Emissão de CO₂

Para estimar o sustentabilidade ambiental no uso do PDV em concretos com cimento Portland um estudo com base no método desenvolvido por Costa (2012) denominado Método para a quantificação das emissões de CO₂ (Método QE-CO₂). A análise foi feita pela fórmula simplificada apresentada pelo autor. A equação 5.6 apresenta a fórmula geral do método QE-CO₂.

(5.6)

$$Emissões_{MT1,j} = QT_j \cdot FP_j \cdot (Emissões_{TR1,i} + Emissões_{EN1,i})$$

$Emissões_{MT1,j}$ =emissões devido à utilização do produto j em edificações, em toneladas de CO₂;

QT_j = quantidade de produto j necessária na obra, em toneladas;

FP_j = fator de perda do produto j, adimensional, para concreto 6%;

$Emissões_{TR1,i}$ = emissões de devido ao consumo de energia i para o transporte de matérias primas e do produto j para a edificação, em toneladas / tonelada de produto j;

$Emissões_{EN1,i}$ = emissões devido ao consumo de energia i para extração e processamento do produto j necessário na edificação, em toneladas / tonelada de produto j.

O método utilizado foi o básico proposto por Costa (2012) onde valores foram tabelados e recomendados pelo autor. A tabela 40 apresenta os valores de Emissões devido ao consumo de energia para o transporte das matérias-primas e os valores de Emissões devido ao consumo de energia para extração e processamento do material. As distâncias foram consideradas do ponto de extração dos materiais até a cidade de Maringá.

Tabela 40 – Emissões de CO₂ dos materiais componentes

MATERIAL	EMIÇÃO CO ₂ TRANSPORTE				EMIÇÃO CO ₂ PRODUÇÃO (*)	EMIÇÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)
	DIST.(KM)	Cot. (*)	Feche (*)	TOTAL		
CIMENTO	1120	0,0196	0,0032	0,0702	0,6281	0,6983
AGREGADO MIÚDO	370	0,0196	0,0032	0,0232	0,0722	0,0954
AGREGADO GRAUDO	25	0,0196	0,0032	0,0016	0,0719	0,0735
PDV	70	0,0196	0,0032	0,0044	-	0,0044

Cot. = fator de consumo médio de energia de determinado tipo de veículo, em L/t/km, no caso adotado um caminhão de 12 a 26 t

Feche = fator de emissão corrigido da energia CO₂, em t / L

(*) = valores tabelados por Costa (2012)

Fonte: Autora (2022)

Com os valores de emissão de CO₂ de cada um dos materiais do concreto foi calculado quanto 1 m³ de concreto emite de CO₂ para os traços estudados. As tabelas completas são apresentadas no Apêndice 05 para os traços de fator a/c 0,6 e no Apêndice 06 para os traços de fator 0,55. A tabela 41 mostra a redução na emissão de CO₂ dos traços estudados.

Tabela 41 – Redução na emissão de CO₂

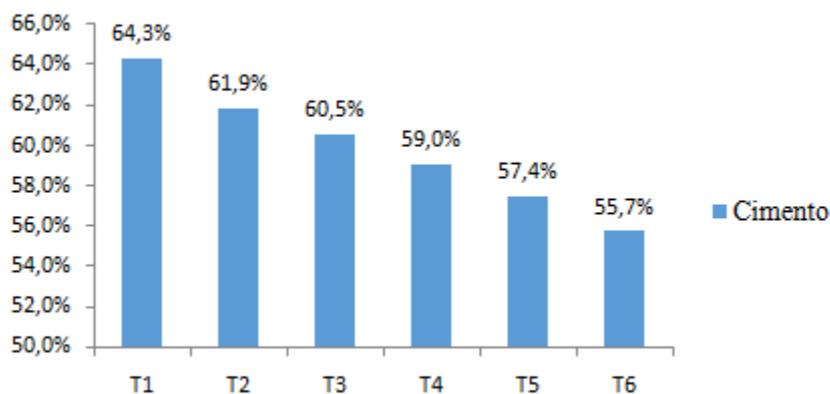
Traços	Fator a/c	Redução CO ₂ (%)
T1	0,6	0,00
T2		6,39
T3		9,59
T4		12,79
T5		15,99
T6		19,18
T7	0,55	0,00
T8		6,48
T9		9,65
T10		12,95
T11		16,19
T12		19,43

Fonte: Autora (2022)

A partir da tabela é claro observar como a substituição parcial de PDV no aglomerante é capaz de reduzir substancialmente a emissão de CO₂. As figuras 49 e 50 mostram a

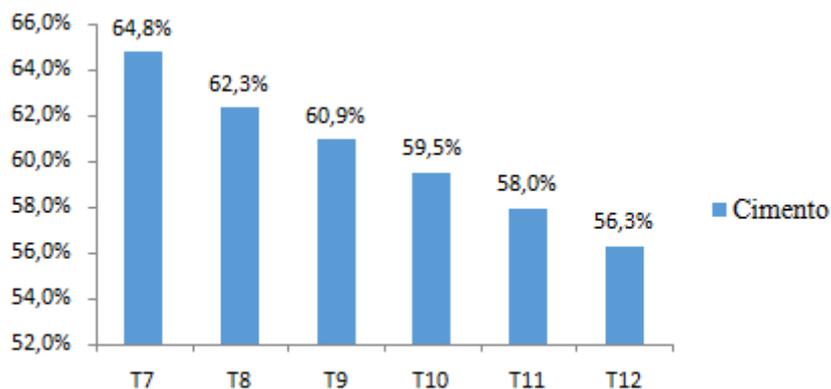
contribuição nas emissões de CO₂ na fabricação de 1m³ de concreto nos traços T1 à T6 e T7 à T12 respectivamente. Para o traço com teor ótimo de substituição, T11, haverá uma redução de 16,19% de CO₂ por m³ na atmosfera.

Figura 49 - Contribuição nas emissões de CO₂ na fabricação de 1m³ de Concreto T1 à T6



Fonte: Autora (2022)

Figura 50 - Contribuição nas emissões de CO₂ na fabricação de 1m³ de Concreto T7 à T12



Fonte: Autora (2022)

Os gráficos mostram a quantidade de CO₂ emitido por m³ de concreto de cada traço estudado. Fica claro a diminuição da emissão desse gás conforme diminui a utilização de cimento.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Com base nos ensaios realizados, resultados obtidos e estudos para revisão bibliográfica foram obtidas as seguintes conclusões.

Pode-se ver que pela caracterização do resíduo de pó de vidro que ele poderia ser utilizado como substituto do aglomerante, já que pela sua classificação granulométrica ele é compatível ao silte e quanto mais fino o material menor será o índice de vazios e absorção de água do concreto. O PDV foi caracterizado em relação à pozolanicidade, onde pelos ensaios de DRX, FRX, MEV e atividade pozolânica foi possível constatar essa característica no material.

Para vislumbrar a viabilidade do concreto com PDV foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido que compreendiam em consistência pelo abatimento do tronco de cone e massa específica para estado fresco e resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios, massa específica, VPU, módulo de elasticidade e MEV para o estado endurecido.

A utilização do PDV na substituição parcial se mostrou viável como concreto estrutural para todos os traços, porém apresentando alguns mais vantajosos. Em relação à resistência a compressão os traços com fator a/c 0,6 apresentaram uma diminuição entre o traço piloto e o com 30% de substituição de PDV de 23,72%, enquanto para os traços com fator a/c 0,55 de 18,45%. Apesar dos resultados dos traços pilotos apresentarem maior resistência, a diferença entre eles e o traço com 30% de substituição e a/c 0,55 não demonstraram grande perda. Com a análise completa dos outros ensaios pode ser avaliado como vantajoso a utilização desse concreto, levando em conta a boa resistência mecânica e grande redução de cimento em relação ao traço piloto.

Na absorção de água foi avaliado que os traços de ambos a/c apresentaram menores valores com 25% de substituição de PDV apresentando uma redução de 10,62% para os traços T1 e T5 e 8,03% entre T7 e T11. O índice de vazios apresentou o mesmo comportamento, sendo os traços T5 e T11 (25% de substituição de PDV) que apresentaram os menores valores

tendo uma redução de 15,09% e 8,92% entre eles e o traço piloto de cada fator a/c utilizado. Os módulos de elasticidade acompanharam os resultados de resistência, o que era esperado e afirmando que a substituição do PDV não interferiu nessa propriedade. Pela velocidade do ultrassom foi constatado que a qualidade de todos os traços foi ótima, apesar de haver diminuição da qualidade.

As imagens feitas pelo MEV ajudam a esclarecer o motivo da resistência diminuir quanto mais PDV é substituído no concreto. Com todas as análises foi possível chegar a um traço ótimo, T11, já que ele apresenta uma grande substituição, o menor valor em relação a absorção de água e índice de vazios e sua resistência mecânica não reduzir muito com base no traço piloto.

Em relação a análise ambiental pode-se ver que com a utilização do traço de teor ótimo houve uma redução de 21,54% do custo por m³ e 13,19% da emissão de CO₂ na atmosfera.

Fundamentado com os resultados encontrados pode-se dizer que o PDV pode ser utilizado na confecção de concretos estruturais sem comprometer as exigências exigidas para que seja utilizado em estruturas. Do ponto de vista ambiental a utilização desse resíduo contribui para diminuição no consumo de cimento e descarte em aterros de grande quantidade de PDV.

6.1. TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste trabalho não pode ser resolvidas todas as questões que aparecem, portanto sugerem-se como trabalhos futuros:

- a) Estudo da durabilidade do concreto dos traços apresentados;
- b) Elaboração de traços com menor fator a/c em dias quente e frio para avaliação de consistência;
- c) Refazer os traços apresentados com um novo tipo de mistura do PDV no concreto proposto por Elaqra et. al (2019).

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953**: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11172**: Aglomerantes de origem mineral . Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6508**: Grãos de

solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2019.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ASTM - American Society for Testing Materials. **ASTM C 597 - 16 - Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete**. 2016

AKERMAN, M. Natureza , Estrutura e Propriedades do Vidro. **CETEV - Centro Técnico de Elaboração do Vidro**, p. 1–37, 2000.

AL-ZUBAID, A. B. et al. Study The Effect of Recycled Glass on The Mechanical Properties Study The The Effect of Recycled Glass Mechanical Properties Concrete of Green Concrete Assessing the feasibility using the heat temper. **Energy Procedia**, v. 119, p. 680–692, 2017.

ALI, E. E.; AL-TERSAWY, S. H. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 785–791, 2012.

ANTÔNIO, A. P. **Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo – cálcico na produção de concretos**. 2012. 163F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

AZEVEDO, F. F. DE et al. AGREGADOS MIÚDOS : A Importância dos Agregados Miúdos no Controle Tecnológico do Concreto. **Revista Conexão Eletrônica**, v. 14, n. 2014, p. 2079–2086, 2017.

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

São Carlos, 2016.

BATTAGIN, A. F. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo, IBRACON, 2011.

BHANDARI, P. S.; TAJNE, K. M. Use of waste glass in cement mortar. **International Journal of Civil and Structural Engineering**, v. 3, n. 4, p. 704–711, 2013.

BUTTLER, A. M. **CONCRETO COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO – INFLUÊNCIA DA IDADE DE RECICLAGEM NAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS E CONCRETOS RECICLADOS**. 2003. 220f. Mestrado (Mestre em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CAMARGO, M. V. DE. **Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END)**. 2020. 143f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020.

CAMPITELI, V. C. **Porosidade do Concreto** São Paulo Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, , 1987.

CAMPOS, E. E.; OUTROS, E. Agregados para a Construção Civil no Brasil. n. 11, p. 233, 2007.

CASTRO, S. DE; BRITO, J. DE. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. **Cleaner Production**, v. 41, 2013.

CBIC. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Disponível em: < <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2022/03/informativo-economico-pib-04-marco-2022.pdf>>. Acesso em maio de 2022.

CHA, S. et al. A prediction approach of concrete properties at early ages by using a thermal stress device. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 120–134, 2018.

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.

CHEN, G. et al. Glass recycling in cement production-an innovative approach. **Waste Management**, v. 22, n. 7, p. 747–753, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA (2002). Resolução CONAMA 307 de 05 de Julho de 2002. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em março de 2020.

COSTA, B, L, C. **Quantificação das emissões de co2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 2012. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - COPPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

- DABIRI, H. et al. The Influence of Replacing Sand with Waste Glass Particle on the Physical and Mechanical Parameters of Concrete. **Civil Engineering Journal**, v. 4, n. 7, p. 1646, 2018.
- DIPROTEC. Produtos técnicos para construção. Disponível em: <<https://www.diprotec.com.br/produto/aglomerantes/>>. Acesso em março 2022.
- DU, H.; TAN, K. H. Cement & Concrete Composites Use of waste glass as sand in mortar : Part II – Alkali – silica reaction and mitigation methods. v. 35, p. 118–126, 2013.
- DU, H.; TAN, K. H. Properties of high volume glass powder concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 75, p. 22–29, 2017.
- ELAQRA, H. A.; HALOUB, M. A. A.; RUSTOM, R. N. Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 75–82, 2019.
- FERREIRA, A. R. L.; LIMA, F. M. DA R. DE S. Impactos ambientais e econômicos dos agregados naturais e reciclados na construção civil. **Cetem**, p. 1–5, 2013.
- GUIGNONE, G. C. **Desempenho De Concretos Com a Utilização De Resíduos Da Lapidação Do Vidro Como Substitutos Parciais Ao Cimento**. 2017. 286f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.
- HE, Z. HAI et al. Creep behavior of concrete containing glass powder. **Composites Part B: Engineering**, v. 166, n. November 2018, p. 13–20, 2019.
- HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. São Paulo, 2007.
- HELENE, P.; ANDRADE, T. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo, 2010.
- HU, J.; WANG, K. Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1196–1204, 2011.
- 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.
- KHAN, A. G.; KHAN, B. Effect of Partial Replacement of Cement by Mixture of Glass Powder and Silica Fume Upon Concrete Strength. **International Journal of Engineering Works**, v. 4, n. 7, p. 124–135, 2017.
- KHMIRI, A.; CHAABOUNI, M.; SAMET, B. Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 74–80, 2013.
- 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, J. et al. Durability properties of a concrete with waste glass sludge exposed to freeze-and-thaw condition and de-icing salt. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 398–402, 2014.
- KIM, J.; YI, C.; ZI, G. Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 242–246, 2015.
- LARUCCIA, M. M. Construção Civil Sustainability and Environmental Impacts of. p. 69–84, 2014.
- LEE, H. et al. Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. **Cleaner Production**, v. 170, 2018.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: MICROESTRUTURA, PROPRIEDADES E MATERIAIS**. 2ª Edição ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MONTANO, P. F.; BASTOS, H. B. A indústria de vidro plano: conjuntura atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, v. 38, p. 265–290, 2014.
- MOURA, A. A. DE. **ARGAMASSA COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR RESÍDUOS INDUSTRIAIS**. 2018. 107f. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª edição ed. [s.l.] Editora Bookman, 2016.
- OERTEL, T. et al. Amorphous silica in ultra-high performance concrete: First hour of hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 58, p. 131–142, 2014.
- OLIVEIRA, R. C. S. DE. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO TRATADO COM RESÍDUO DE VIDRO**. 2021. 116f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2021.
- PACHECO, J. et al. **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto**IBRACON, 2014.
- SHAO, Y. et al. Studies on concrete containing ground waste glass. v. 30, p. 91–100, 2000.
- SHARIFI, Y.; AFSHOON, I.; FIROOZJAIE, Z. Fresh properties of self-compacting concrete containing ground waste glass microparticles as cementing material. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 13, n. 2, p. 50–66, 2015.
- SHAYAN, A.; XU, A. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 3, p. 457–468, 2006.
- SHI, C.; ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 2, p. 234–247, 2007.

SIAD, H. et al. Mechanical , Physical , and Self-Healing Behaviors of Engineered Cementitious Composites with Glass Powder. v. 29, n. 6, p. 1–12, 2017.

SILVA, R. A. et al. ADDITION OF BOROSILICATE GLASS TO CEMENT COMPOUNDS. n. 2000, 2017.

SINAPI. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_655>. Acesso em maio 2022.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Disponível em: <<https://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=68>>. Acesso em maio 2022.

SOBRAL, H. S. **Propriedades do concreto fresco**. 6^a Edição ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000.

TECNOSIL BR. Disponível em: <<https://www.tecnosilbr.com.br/>>. Acesso em abril 2020.

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

VALIN JR, M. DE O. et al. Aplicação de Ensaio Não Destrutivo de Concreto Para Avaliação Estrutural da Fundação de Torre de Linha de Transmissão. *E&S Engineering and Science*, v. 6, n. 2, p. 46–59, 2017

VG RESÍDUOS. Disponível em: <<https://www.vgresiduos.com.br/blog/reciclagem-de-embalagens-de-vidro/amp/>>. Acesso em março 2020.

APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

TRAÇO	FATOR A/C	RESISTÊNCIA (Mpa)	TRAÇO	FATOR A/C	RESISTÊNCIA (Mpa)
T1	0,60	28,80	T7	0,55	31,60
T1		24,10	T7		34,60
T1		31,50	T7		41,70
T1		32,40	T7		38,90
T1		34,10	T7		35,30
T1		30,90	T7		29,20
T2		31,30	T8		21,50
T2		30,70	T8		34,20
T2		32,60	T8		34,00
T2		30,40	T8		30,90
T2		32,20	T8		30,40
T2		34,90	T8		30,10
T3		30,70	T9		33,70
T3		30,50	T9		31,40
T3		28,70	T9		31,50
T3		28,90	T9		32,10
T3		26,10	T9		31,00
T3		31,00	T9		34,70
T4		30,50	T10		30,80
T4		29,20	T10		27,00
T4		27,30	T10		26,50
T4		25,70	T10		33,80
T4		22,40	T10		24,60
T4		22,80	T10		26,00
T5		27,60	T11		29,40
T5		28,10	T11		28,90
T5		25,80	T11		32,00
T5		26,80	T11		32,40
T5		25,10	T11		29,40
T5		24,80	T11		26,30
T6		22,80	T12		28,20
T6		26,60	T12		31,80
T6	26,30	T12	29,30		
T6	20,80	T12	28,80		
T6	23,80	T12	27,80		
T6	23,80	T12	27,80		

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

TRAÇO	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO (%)	ÍNDICE DE VAZIOS (%)	MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA (g/cm ³)	MASSA ESPECÍFICA SATURADA (g/cm ³)	MASSA ESPECÍFICA REAL (g/cm ³)
T1	6,757	15,529	2,298	2,453	2,720
T1	6,494	14,961	2,304	2,453	2,709
T1	6,499	14,883	2,290	2,439	2,691
T2	6,785	15,296	2,254	2,407	2,662
T2	6,459	14,647	2,268	2,414	2,657
T2	6,215	14,088	2,267	2,408	2,638
T3	6,802	14,906	2,191	2,340	2,575
T3	6,553	14,606	2,229	2,375	2,610
T3	7,444	16,481	2,214	2,379	2,651
T4	5,336	11,849	2,220	2,339	2,519
T4	7,644	16,955	2,218	2,388	2,671
T4	7,399	16,129	2,180	2,341	2,599
T5	5,809	12,703	2,187	2,314	2,505
T5	5,318	11,574	2,176	2,292	2,461
T5	7,481	16,303	2,179	2,342	2,604
T6	6,561	14,285	2,177	2,320	2,540
T6	7,172	15,475	2,158	2,312	2,553
T6	6,585	14,446	2,194	2,338	2,564
T7	6,130	13,808	2,252	2,390	2,613
T7	6,343	14,299	2,254	2,397	2,630
T7	5,793	13,110	2,263	2,394	2,604
T8	5,762	13,076	2,269	2,400	2,611
T8	6,670	15,017	2,252	2,402	2,649
T8	6,650	14,938	2,246	2,396	2,641
T9	7,205	15,963	2,215	2,375	2,636
T9	6,280	14,070	2,240	2,381	2,607
T9	6,095	13,677	2,244	2,381	2,600
T10	7,010	15,553	2,219	2,374	2,627
T10	4,238	9,638	2,274	2,371	2,517
T10	7,737	17,068	2,206	2,377	2,660
T11	4,959	11,138	2,246	2,357	2,527
T11	5,638	12,576	2,231	2,356	2,552
T11	6,351	14,074	2,216	2,357	2,579
T12	6,114	13,683	2,238	2,375	2,593
T12	5,082	11,323	2,228	2,341	2,513
T12	6,125	13,486	2,202	2,337	2,545

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE C – RESULTADOS DO ENSAIO DE VPU

TRAÇO	VELOCIDADE ULTRASSOM (m/s)
T1	4.454,00
T1	4.264,00
T1	4.357,00
T2	4.405,00
T2	4.357,00
T2	4.219,00
T3	4.264,00
T3	4.264,00
T3	4.264,00
T4	4.310,00
T4	4.264,00
T4	4.219,00
T5	4.132,00
T5	4.219,00
T5	4.219,00
T6	4.175,00
T6	4.049,00
T6	4.090,00
T7	4.357,00
T7	4.405,00
T7	4.264,00
T8	4.310,00
T8	4.310,00
T8	4.264,00
T9	4.264,00
T9	4.310,00
T9	4.310,00
T10	4.264,00
T10	4.264,00
T10	4.264,00
T11	4.219,00
T11	4.175,00
T11	4.310,00
T12	4.132,00
T12	4.175,00
T12	4.090,00

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE D – RESULTADOS DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE

Traço	Módulo de elasticidade dinâmico pelo ultrassom(ASTM C597-16) GPa	Módulo de elasticidade estático (Gpa) NBR 6118:2014 - Valores das resistências a compressão		Módulo de elasticidade estático (Gpa) NBR 6118:2014 - Valores das resistências a compressão média		Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) - Sonelastic	Módulo de elasticidade estático NBR 8522:2021 (GPa)	
		Eci	Ecs	Eci	Ecs		Sonelastic	Ultrassom
T1	42,49	38,25	33,70	37,54	32,96	34,95	26,01	34,20
T1	38,78	39,24	34,74	37,54	32,96	33,93	25,06	30,22
T1	40,49	37,35	32,77	37,54	32,96	34,49	25,64	32,10
T2	40,69	39,70	35,22	37,87	33,30	34,19	25,77	32,88
T2	39,30	37,05	32,46	37,87	33,30	33,49	25,36	31,72
T2	38,13	38,13	33,58	37,87	33,30	33,27	24,28	29,38
T3	37,80	37,11	32,52	36,62	32,02	32,8	24,52	29,91
T3	37,80	37,42	32,83	36,62	32,02	32,63	24,34	29,91
T3	37,80	34,33	29,71	36,62	32,02	32,8	24,52	29,91
T4	38,79	34,07	29,44	34,59	29,97	31,35	22,92	30,88
T4	37,31	31,80	27,22	34,59	29,97	31,69	23,68	29,75
T4	37,33	32,09	27,50	34,59	29,97	31,16	22,63	29,13
T5	35,03	35,62	31,00	34,46	29,84	29,93	21,85	27,25
T5	36,37	33,47	28,85	34,46	29,84	29,59	21,60	28,83
T5	37,01	34,79	30,16	34,46	29,84	31,08	22,74	29,03
T6	35,30	34,66	30,03	32,78	28,18	28,76	20,94	27,90
T6	33,64	30,65	26,11	32,78	28,18	28,81	20,72	25,74
T6	33,87	32,78	28,18	32,78	28,18	29,21	21,40	26,34
T7	40,49	43,39	39,24	39,73	35,25	34,59	25,75	32,10
T7	40,52	41,91	37,61	39,73	35,25	33,57	25,22	32,82
T7	38,78	39,53	35,04	39,73	35,25	33,08	24,19	30,22
T8	39,46	39,30	34,80	37,20	32,61	33,87	25,11	31,09
T8	39,29	37,05	32,46	37,20	32,61	34,33	25,69	31,03
T8	38,78	36,87	32,27	37,20	32,61	33,8	24,93	30,22
T9	38,13	38,07	33,51	37,90	33,33	33,53	25,07	30,01
T9	38,95	39,59	35,10	37,90	33,33	32,26	23,75	30,93
T9	39,29	37,42	32,83	37,90	33,33	33,11	24,42	31,03
T10	37,47	34,27	29,64	34,76	30,13	32,22	24,13	29,81
T10	38,29	33,33	28,71	34,76	30,13	33,08	24,50	30,06
T10	38,29	34,92	30,29	34,76	30,13	33,21	24,63	30,06
T11	37,01	34,46	29,84	36,44	31,83	32,65	24,36	29,03
T11	36,71	38,25	33,70	36,44	31,83	32,04	23,43	28,34
T11	39,12	38,01	33,45	36,44	31,83	32,49	23,89	30,98
T12	35,80	37,90	33,33	35,87	31,26	31,46	22,93	27,48
T12	35,77	35,43	30,81	35,87	31,26	31,67	23,65	28,05
T12	34,63	36,38	31,76	35,87	31,26	30,22	21,96	26,57

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE E – CÁLCULO DE EMISSÃO DE CO₂ POR m³ CONCRETO (a/c 0,6)

Concreto 30 Mpa 1:1,96:2,72 a/c 0,60		Quantidade	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)	0%	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)
Cimento	kg	357,47	0,6983	0,0150	357,47	0,6983	0,0150
Agregado Miudo	kg	700,64	0,0954	0,0040	700,64	0,0954	0,0040
Agregado Graudo	kg	972,32	0,0735	0,0043	972,32	0,0735	0,0043
PDV	Kg		0,0044	-	-	0,0044	-
TOTAL (tCO₂/m³)				0,0233		TOTAL (tCO₂/m³)	0,0233

Concreto 30 Mpa 1:1,96:2,72 a/c 0,60		Quantidade	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)	10%	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)
Cimento	kg	357,47	0,6983	0,0150	321,72	0,6983	0,0135
Agregado Miudo	kg	700,64	0,0954	0,0040	700,64	0,0954	0,0040
Agregado Graudo	kg	972,32	0,0735	0,0043	972,32	0,0735	0,0043
PDV			0,0044	-	35,75	0,0044	0,0000
TOTAL (tCO₂/m³)				0,0233		TOTAL (tCO₂/m³)	0,0218

Concreto 30 Mpa 1:1,96:2,72 a/c 0,60		Quantidade	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)	15%	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)
Cimento	kg	357,47	0,6983	0,0150	303,85	0,6983	0,0127
Agregado Miudo	kg	700,64	0,0954	0,0040	700,64	0,0954	0,0040
Agregado Graudo	kg	972,32	0,0735	0,0043	972,32	0,0735	0,0043
PDV			0,0044	-	53,62	0,0044	0,0000
TOTAL (tCO₂/m³)				0,0233		TOTAL (tCO₂/m³)	0,0210

Concreto 30 Mpa 1:1,96:2,72 a/c 0,60		Quantidade	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)	20%	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)
Cimento	kg	357,47	0,6983	0,0150	285,98	0,6983	0,0120
Agregado Miudo	kg	700,64	0,0954	0,0040	700,64	0,0954	0,0040
Agregado Graudo	kg	972,32	0,0735	0,0043	972,32	0,0735	0,0043
PDV			0,0044	-	71,49	0,0044	0,0000
TOTAL (tCO₂/m³)				0,0233		TOTAL (tCO₂/m³)	0,0203

Concreto 30 Mpa 1:1,96:2,72 a/c 0,60		Quantidade	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)	25%	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)
Cimento	kg	357,47	0,6983	0,0150	268,10	0,6983	0,0112
Agregado Miudo	kg	700,64	0,0954	0,0040	700,64	0,0954	0,0040
Agregado Graudo	kg	972,32	0,0735	0,0043	972,32	0,0735	0,0043
PDV			0,0044	-	89,37	0,0044	0,0000
TOTAL (tCO₂/m³)				0,0233		TOTAL (tCO₂/m³)	0,0196

Concreto 30 Mpa 1:1,96:2,72 a/c 0,60		Quantidade	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)	30%	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)
Cimento	kg	357,47	0,6983	0,0150	250,23	0,6983	0,0105
Agregado Miudo	kg	700,64	0,0954	0,0040	700,64	0,0954	0,0040
Agregado Graudo	kg	972,32	0,0735	0,0043	972,32	0,0735	0,0043
PDV			0,0044	-	107,24	0,0044	0,0000
TOTAL (tCO₂/m³)				0,0233		TOTAL (tCO₂/m³)	0,0188

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE F - CÁLCULO DE EMISSÃO DE CO₂ POR m³ CONCRETO (a/c 0,55)

Concreto 30 Mpa 1:1,96:2,72 a/c 0,55		Quantidade	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)	0%	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)
Cimento	kg	363,98	0,6983	0,0153	363,98	0,6983	0,0153
Agregado Miudo	kg	700,64	0,0954	0,0040	700,64	0,0954	0,0040
Agregado Graudo	kg	972,32	0,0735	0,0043	972,32	0,0735	0,0043
PDV			0,0044		-	0,0044	
TOTAL (tCO₂/m³)				0,0235		TOTAL (tCO₂/m³)	0,0235

Concreto 30 Mpa 1:1,96:2,72 a/c 0,55		Quantidade	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)	10%	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)
Cimento	kg	363,98	0,6983	0,0153	327,58	0,6983	0,0137
Agregado Miudo	kg	700,64	0,0954	0,0040	700,64	0,0954	0,0040
Agregado Graudo	kg	972,32	0,0735	0,0043	972,32	0,0735	0,0043
PDV			0,0044		36,40	0,0044	
TOTAL (tCO₂/m³)				0,0235		TOTAL (tCO₂/m³)	0,0220

Concreto 30 Mpa 1:1,96:2,72 a/c 0,55		Quantidade	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)	15%	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)
Cimento	kg	363,98	0,6983	0,0153	309,38	0,6983	0,0130
Agregado Miudo	kg	700,64	0,0954	0,0040	700,64	0,0954	0,0040
Agregado Graudo	kg	972,32	0,0735	0,0043	972,32	0,0735	0,0043
PDV			0,0044		54,60	0,0044	0,0000
TOTAL (tCO₂/m³)				0,0235		TOTAL (tCO₂/m³)	0,0213

Concreto 30 Mpa 1:1,96:2,72 a/c 0,55		Quantidade	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)	20%	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)
Cimento	kg	363,98	0,6983	0,0153	291,18	0,6983	0,0122
Agregado Miudo	kg	700,64	0,0954	0,0040	700,64	0,0954	0,0040
Agregado Graudo	kg	972,32	0,0735	0,0043	972,32	0,0735	0,0043
PDV			0,0044		72,80	0,0044	
TOTAL (tCO₂/m³)				0,0235		TOTAL (tCO₂/m³)	0,0205

Concreto 30 Mpa 1:1,96:2,72 a/c 0,55		Quantidade	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)	25%	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)
Cimento	kg	363,98	0,6983	0,0153	272,99	0,6983	0,0114
Agregado Miudo	kg	700,64	0,0954	0,0040	700,64	0,0954	0,0040
Agregado Graudo	kg	972,32	0,0735	0,0043	972,32	0,0735	0,0043
PDV			0,0044		91,00	0,0044	
TOTAL (tCO₂/m³)				0,0235		TOTAL (tCO₂/m³)	0,0197

Concreto 30 Mpa 1:1,96:2,72 a/c 0,55		Quantidade	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)	30%	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂ (t/kg)	EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³)
Cimento	kg	363,98	0,6983	0,0153	254,79	0,6983	0,0107
Agregado Miudo	kg	700,64	0,0954	0,0040	700,64	0,0954	0,0040
Agregado Graudo	kg	972,32	0,0735	0,0043	972,32	0,0735	0,0043
PDV			0,0044		109,19	0,0044	
TOTAL (tCO₂/m³)				0,0235		TOTAL (tCO₂/m³)	0,0190

Fonte: Autora (2022)