

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

MATEUS AUGUSTO RIGOTTO MORAZ

**CONCRETO PRODUZIDO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE
AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUOS PLÁSTICOS**

MARINGÁ

2021

MATEUS AUGUSTO RIGOTTO MORAZ

**CONCRETO PRODUZIDO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO
MIÚDO POR RESÍDUOS PLÁSTICOS**

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.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins

MARINGÁ

2021

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

M832c

Moraz, Mateus Augusto Rigotto

Concreto produzido com substituição parcial de agregado miúdo por resíduos plásticos / Mateus Augusto Rigotto Moraz. -- Maringá, PR, 2021.
111 f.: il. color., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

1. Concreto sustentável. 2. Resíduos plásticos. 3. Concreto - Resistência à compressão. 4. Concreto - Módulo de elasticidade. I. Martins, Carlos Humberto, 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. 624.1834

MATEUS AUGUSTO RIGOTTO MORAZ

**CONCRETO PRODUZIDO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL
DE AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUOS PLÁSTICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 26/08/2021. 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



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

AGUINALDO LENINE
ALVES:38560445153

Assinado de forma digital por
AGUINALDO LENINE
ALVES:38560445153
Dados: 2021.08.26 10:02:14 -03'00'

Prof. Dr. Aguinaldo Lenine Alves
Programa de Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional
Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul



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

Ao Pai Celestial, Deus de conhecimento.

RESUMO

A Indústria da Construção Civil (ICC) é um dos setores de maior importância mundialmente. Dessa forma, há uma grande demanda de material por parte desse setor, de modo que os recursos naturais mais minerados internacionalmente são os agregados presentes no concreto – areia e pedra britada. Paralelamente, a produção exacerbada de resíduos plásticos é outro fator preocupante a cunho mundial. Sendo assim, a necessidade de uma destinação correta dos resíduos plásticos aliada ao fato da possibilidade de redução da exploração de recursos minerais faz com que a utilização de resíduos industriais plásticos como matéria prima no setor da construção civil se torne o enfoque de diversas linhas de pesquisa nas áreas de tecnologia e inovação. A partir do exposto, foram desenvolvidos e avaliados 13 traços de concreto com substituição parcial de agregado miúdo – areia – por resíduos de garrafas PET moídas e trituradas, pellets de sacolas plásticas e o resíduo industrial Cyrel® moído e triturado, de forma individual e também misturados com diversos teores em massa, resultando em valores totais de 5, 10 e 15 % em massa. Dessa forma, pode-se comparar esses traços com um traço piloto de concreto produzido por materiais convencionais, procurando-se obter traços de concreto os quais possam ser utilizados como concretos estruturais. Para isso, realizou-se, primeiramente, uma revisão de literatura e, posteriormente, ensaios de caracterização dos resíduos: granulometria e massa específica. Em sequência, produziu-se traços de concreto com a substituição parcial do agregado miúdo pelos resíduos plásticos individualmente e misturados, na ordem total de 5%, 10% e 15% em massa, realizando-se posteriormente os seguintes ensaios de caracterização mecânica desses materiais: ensaio de compressão de corpos cilíndricos; determinação da resistência à tração por compressão diametral; determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão; determinação do módulo dinâmico de elasticidade; e determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Desse modo, os traços puderam ser avaliados e, em sua maioria, observou-se que as misturas geraram concretos com potencial de utilização em estruturas, possibilitando o uso desses resíduos plásticos como matéria prima em concretos estruturais.

Palavras-chave: Concreto sustentável. Substituição de agregado miúdo. Resíduos Plásticos (Cyrel®, Pellets, PET).

ABSTRACT

The Civil Construction Industry (ICC) is one of the most important sectors worldwide. Thus, there is a great demand for material by this sector, and the most mined natural resources internationally are the aggregates present in concrete – sand and crushed stone. At the same time, the exacerbated production of plastic waste is another global worrying factor. Therefore, the need for a correct disposal of plastic waste combined with the possibility of reducing the exploitation of mineral resources makes the use of plastic industrial waste as a raw material in the civil construction sector to become the focus of several lines of research in the areas of technology and innovation. Based on the above, 13 concrete mixes were developed and evaluated with partial replacement of fine aggregate - sand - by waste from ground and crushed PET bottles, pellets from plastic bags and the industrial waste Cyrel® crushed, individually and also mixed with different contents by mass, resulting in total values of 5, 10 and 15% by mass. So, it is possible to compare these mixes with a pilot mix of concrete produced by conventional materials, seeking to obtain concrete mixes which can be used as structural concretes. For this, firstly, a literature review was accomplished and, later, the residues were characterized in granulometry and specific mass. Then, concrete mixes were produced with the partial replacement of the fine aggregate by plastic waste individually and mixed, in the total order of 5%, 10% and 15% by mass, subsequently carrying out the following tests for the mechanical characterization of these materials: simple compression test; determination of tensile strength by diametrical compression; determination of static and dynamic elasticity modulus; and determination of water absorption, void index and specific mass. Therefore, the traces could be evaluated and, for the most part, it was noticed that the mixtures generated concrete with potential for use in structures, enabling the use of these plastic residues as raw material in structural concrete.

Keywords: Sustainable concrete. Replacement of fine aggregate. Plastic waste (Cyrel®, Pellets, PET).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Máquina utilizada no processamento dos resíduos plásticos.....	16
Figura 2.1 – Percentual de utilização dos plásticos em diversas atividades.....	23
Figura 2.2 – Situação esquemática de uma impressão flexográfica.....	24
Figura 2.3 – Chapa flexográfica de Cyrel®.....	25
Figura 2.4 – Resíduo de Cyrel®.....	26
Figura 2.5 – Resíduo de Pellets.....	27
Figura 2.6 – Resíduo de PET.....	28
Figura 2.7 – Relação entre a substituição de resíduos plásticos e a perda de resistência a compressão.....	31
Figura 2.8 – Frasco de Le Chatelier.....	34
Figura 2.9 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A – Tensão σ_a fixa.....	36
Figura 2.10 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia B – Deformação ε_b fixa.....	37
Figura 2.11 – Equipamento Sonelastic.....	39
Figura 3.1 – Abatimento (Slump Test) do Traço Piloto.....	52
Figura 3.2 – Corpos de prova moldados.....	52
Figura 3.3 – Corpos de Prova acondicionados em câmara úmida.....	53
Figura 3.4 – Montagem do ensaio de tração por compressão diametral.....	54
Figura 3.5 – Montagem do corpo de prova para o ensaio.....	55
Figura 3.6 – Prensa INSTRON pronta para execução do ensaio.....	55
Figura 3.7 – Equipamento Sonelastic® com corpo de prova posicionado para ensaio.....	56
Figura 3.8 – Secagem dos corpos de prova em estufa.....	58
Figura 3.9 – Imersão das amostras em água.....	58
Figura 3.10 – Fervura das amostras.....	59
Figura 3.11 – Pesagem das amostras imersas em água.....	60
Figura 4.1 – Curva granulométrica da areia média.....	62
Figura 4.2 – Curva granulométrica da brita.....	64
Figura 4.3 – Curva granulométrica do Cyrel®.....	65
Figura 4.4 – Curva granulométrica dos Pellets.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.5 – Curva granulométrica dos Pellets.....	68
Figura 4.6 – Curva granulométrica dos resíduos em cada traço.....	70
Figura 4.7 – Dados de resistência à compressão simples.....	75
Figura 4.8 – Dados de módulo de elasticidade estático.....	78
Figura 4.9 – Relatório de ensaio emitido pelo software Bluehill Universal.....	78
Figura 4.10 – Dados de absorção de água das amostras.....	81
Figura 4.11 – Dados de índice de vazios das amostras.....	81
Figura 4.12 – Dados de massa específica das amostras secas.....	82
Figura 4.13 – Dados de massa específica das amostras após saturação em água.....	83
Figura 4.14 – Dados de massa específica real das amostras.....	84

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1.1 – Cálculo dos traços unitários de concreto com resíduo sem compensação.....	17
Tabela 3.1 – Cálculo dos traços unitários de concreto com resíduo sem compensação.....	50
Tabela 3.2 – Cálculo dos traços unitários de concreto com resíduo com compensação.....	51
Tabela 4.1 – Massa específica dos agregados.....	73
Tabela 4.2 – Dados de resistência à compressão simples.....	74
Tabela 4.3 – Dados de resistência à tração por compressão diametral.....	76
Tabela 4.4 – Razão entre tensões de tração e de compressão.....	76
Tabela 4.5 – Dados de módulo de elasticidade estático.....	77
Tabela 4.6 – Dados de módulo de elasticidade dinâmico.....	79
Tabela 4.7 – Dados de absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	80
Tabela 4.8 – Desvio Padrão dos ensaios de resistência.....	85
Tabela 4.9 – Cálculo de material por m ³ de concreto para cada traço.....	87
Tabela 4.10 – Análise simplificada de viabilidade de custos.....	88
Quadro 2.1 – Tamanho de abertura das peneiras.....	32
Quadro 3.1 – Módulo de Finura.....	46
Quadro 4.1 – Ensaio de granulometria da areia média.....	62
Quadro 4.2 – Ensaio de granulometria da brita.....	63
Quadro 4.3 – Ensaio de granulometria do Cyrel®.....	65
Quadro 4.4 – Ensaio de granulometria dos Pellets.....	66
Quadro 4.5 – Ensaio de granulometria do PET.....	68
Quadro 4.6 – Mistura de resíduos utilizada nos traços com substituição mista.....	69
Quadro 4.7 – Módulo de finura.....	71
Quadro 4.8 – Massa específica da areia pelo método de Le Chatelier.....	72
Quadro 4.9 – Massa específica dos agregados convencionais pelo método do picnômetro.....	72
Quadro 4.10 – Massa específica dos resíduos plásticos pelo método de Le Chatelier.....	73
Quadro 4.11 – Classificação dos concretos conforme massa específica seca.....	82
Quadro 4.12 – Parâmetros de controle do concreto – Desvio Padrão ($f_{ck} \leq 35$ MPa)	84
Quadro 4.13 – Preço dos insumos utilizados para análise de viabilidade de custos.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABTG	Associação Brasileira de Tecnologia Gráfica
ACI	American Concrete Institute
ARI	Alta Resistência Inicial
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Cimento Portland
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DMT	Dimetilteraftalato
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EB	Electron Bean
EEE	Espaço Econômico Europeu
ICC	Indústria da Construção Civil
INC	Incorporation
NBR	Normas Brasileiras
NBR NM	Normas técnicas de abrangência nos países do Mercosul
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PELBD	Polietileno de baixa densidade linear
PET	Politereftalato de Etileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Poli(cloreto de vinila)
RCC	Resíduos da Construção Civil
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices
SMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
TPA	Ácido teraftálico
WWF	World Wide Fund for Nature

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 OBJETIVO GERAL	14
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3 METODOLOGIA RESUMIDA.....	15
1.3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS E AGREGADOS	16
1.3.2 CONFECÇÃO DOS TRAÇOS DE CONCRETO.....	16
1.3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	19
1.3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	20
1.3.5 ANÁLISE SIMPLIFICADA DE VIABILIDADE DE CUSTOS.....	20
1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	20
REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 CONCRETO	21
2.1.1 AGREGADO MIÚDO: AREIA	21
2.2 RESÍDUOS PLÁSTICOS	22
2.2.1 CYREL®	24
2.2.2 RESÍDUOS PLÁSTICOS DE SACOLAS – PELLETS.....	26
2.2.3 PET	27
2.3 CONCRETO COM RESÍDUOS PLÁSTICOS	28
2.4 ENSAIOS	31
2.4.1 ENSAIO DE GRANULOMETRIA	31
2.4.2 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA – FRASCO DE LE CHATELIER.....	33
2.4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.....	34
2.4.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	35
2.4.5 DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS ESTÁTICOS DE ELASTICIDADE E DE DEFORMAÇÃO À COMPRESSÃO	35
2.4.6 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DINÂMICO DE ELASTICIDADE.....	38
2.4.7 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA.....	39
MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	43
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	44
3.2.1 ENSAIO DE GRANULOMETRIA	44

3.2.2	ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA – FRASCO DE LE CHATELIER.....	46
3.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	48
3.3.1	MATERIAIS.....	48
3.3.1.1	CIMENTO	48
3.3.1.2	AGREGADO MIÚDO	48
3.3.1.3	AGREGADO GRAÚDO	49
3.3.1.4	ÁGUA.....	49
3.3.2	DOSAGEM DOS TRAÇOS DE CONCRETO.....	49
3.3.3	ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.....	53
3.3.4	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	54
3.3.5	DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS ESTÁTICOS DE ELASTICIDADE E DE DEFORMAÇÃO À COMPRESSÃO	55
3.3.6	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DINÂMICO DE ELASTICIDADE.....	56
3.3.7	DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA.....	57
	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO E RESÍDUOS PLÁSTICOS.....	61
4.1.1	GRANULOMETRIA.....	61
4.1.1.1	AREIA	61
4.1.1.2	BRITA	63
4.1.1.3	CYREL®	64
4.1.1.4	PELLETS.....	66
4.1.1.5	PET	67
4.1.1.6	MISTURAS DE RESÍDUOS.....	69
4.1.2	MÓDULO DE FINURA.....	70
4.1.3	MASSA ESPECÍFICA.....	71
4.2	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS TRAÇOS DE CONCRETO.....	74
4.2.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	74
4.2.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	75
4.2.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.....	77
4.2.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	79
4.2.5	ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA	80
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	84
4.4	ANÁLISE SIMPLIFICADA DE VIABILIDADE DE CUSTOS	85
	CONCLUSÃO	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	APÊNDICE A – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS).....	100
	APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	103

SUMÁRIO

APÊNDICE C – MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO	105
APÊNDICE D – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	106
APÊNDICE E – ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA	107
APÊNDICE F – DADOS DE CONSISTÊNCIA DOS TRAÇOS DE CONCRETO	111

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A Indústria da Construção Civil (ICC) é um dos setores de maior importância mundialmente, a qual pode ser representada por sua elevada participação em investimentos. De acordo com o relatório da Global Construction 2030, a previsão é de que o investimento na construção civil cresça 85%, alcançando U\$ 15,5 trilhões em todo o mundo até 2030 (BETTS et al., 2015).

Entretanto, o macro setor da construção civil não se limita apenas a atividades de construção, mas também à distribuição de matéria prima e equipamentos, gerando alta demanda desses materiais para que ele se mantenha. Como resultado disso, o concreto tornou-se a segunda substância mais utilizada no planeta, atrás apenas da água. Se fosse comparada a um país, a indústria desse material seria o 3º maior emissor de dióxido de carbono do mundo, emitindo até 2,8 bilhões de toneladas anualmente (JONATHAN WATTS, 2019).

Sendo um dos ingredientes do concreto, a areia também necessita de uma alta taxa de extração para atender a demanda mundial. Em 2018, somente no Estados Unidos, foram minerados 970 milhões de toneladas de areia, com valor estimado em U\$ 8,7 bilhões. Estima-se ainda que cerca de 44% desses materiais foram utilizados como agregados de concreto; 24% em bases e coberturas de estradas; 12% como agregados de concreto asfáltico e outras misturas betuminosas; 12% como preenchimento de construção; e 4% para outros usos diversos (ESTADOS UNIDOS, 2019).

Paralelamente, a produção de resíduos plásticos é um fator preocupante em todo o mundo, sendo que o maior problema encontrado é a correta destinação desses materiais após utilizados. Por serem produtos não biodegradáveis, o plástico e a borracha permanecem por muito tempo nos locais em que foram descartados, causando poluição ambiental. Técnicas

convencionais, como aterro e incineração, não são ideais por criarem lixiviados nessa degradação, afetando negativamente a terra, a água e o ar (BANSAL; MISRA; BAJPAI, 2017).

Uma solução para ambos os problemas supracitados foi proposta por pesquisadores da Universidade de Goa, na Índia, os quais iniciaram um projeto que visava a substituição da areia fina por resíduos plásticos em traços de concreto. Seus resultados mostraram que, com uma substituição no teor de 10% de areia por volume pelo plástico reciclado, economizar-se-ia até 820 milhões de toneladas dela – e um volume semelhante de resíduos plásticos (ORR, 2019).

Percebe-se, desse modo, que a utilização de resíduos industriais como matéria prima no setor da construção civil vem se tornando o enfoque de diversas linhas de pesquisa nas áreas de tecnologia e inovação. Essas ideias não apenas incentivam a coleta e o uso desses resíduos, mas também dão alternativas para substituição das matérias primas não renováveis, como é o caso da areia (ORR, 2019).

Portanto, o objetivo geral desse estudo é a produção e avaliação de 13 traços de concreto com substituição parcial do agregado miúdo – areia – por resíduos plásticos em diferentes misturas nos teores totais de 5, 10 e 15 % em massa, procurando-se obter traços de concreto estrutural. Assim, o resíduo deixará de ser rejeito e será reinserido no processo industrial como matéria prima, tornando o processo sustentável.

1.1 JUSTIFICATIVA

Na última década, a sustentabilidade tornou-se um tópico de pesquisa muito importante no campo da construção civil e materiais de construção. A quantidade de resíduos produzidos anualmente no chamado Espaço Econômico Europeu (EEE) é estimada em 3 bilhões de toneladas, sendo 40% desses Resíduos de Construção Civil (RCC) (COPPOLA; KARA; LORENZI, 2016).

Paralelamente, pesquisadores tem focado seus estudos no uso de resíduos plásticos como alternativa aos recursos naturais como matéria-prima. Resíduos de PET já foram implementados como poliuretanos, materiais de revestimento, resina de poliéster como ligante e reforços de fibra. Inclusive, a reciclagem química do PET pode ser realizada de diversas maneiras, como glicólise, hidrólise e alcalose. Entretanto, o aumento na produção desses materiais traz a necessidade de novas destinações para acomodarem sua produção desenfreada de resíduos (REIS et al., 2011; COPPOLA et al., 2018).

Uma solução proposta para esses problemas é a substituição da areia fina em misturas de concreto por resíduos plásticos processados os quais, de outra forma, permaneceriam como rejeitos em aterros sanitários. Isso não apenas aumenta o incentivo da coleta e uso de resíduos, mas também fornece fontes alternativas de material fino nas misturas de concreto (THORNEYCROFT, 2018).

Desse modo, muitas pesquisas foram direcionadas para a substituição parcial de agregados naturais no concreto, em particular a areia, por subprodutos industriais plásticos, como exemplo: Al Manaseer e Dalal (1997); Choi et al. (2005); Ismail e Al-Hashimi (2008); Albano et al. (2009); Frigione (2010); Saikia (2012); Ferreira, Brito e Safi et al. (2013); Correia, Lima e Brito (2014); Saikia e Brito (2014); Coppola (2016); Alqahtani (2017); Moraz (2018); Rahman (2018); Saxena (2018); Thorneycroft (2018); e Orr (2019).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Produzir e avaliar 13 traços de concreto com substituição parcial de agregado miúdo (areia) por resíduos plásticos, com diferentes misturas de resíduos nos teores totais de 5, 10 e 15 % em massa.

1.2.2 Objetivos específicos

Para a obtenção do objetivo geral desse estudo, presume-se que os seguintes objetivos específicos sejam atingidos:

- a) Caracterizar os resíduos plásticos – Cyrel®, PET e pellets – em termos mecânicos e físicos;
- b) Reproduzir um traço de concreto com materiais convencionais, para fins comparativos;
- c) Desenvolver traços de concreto realizando a substituição parcial do agregado miúdo convencional – areia – pelos resíduos anteriormente citados, comparando-os com o traço piloto os resultados dos seguintes ensaios:
 - Determinação da resistência mecânica à compressão;
 - Determinação da resistência mecânica à tração por compressão diametral;

- Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão;
 - Determinação do módulo dinâmico de elasticidade;
 - Determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massa específica;
- d) Realização de aceitação de dados pelo critério de Chauvenet e, posteriormente, aplicação de análise estatística segundo prescrição da norma ACI 214-R (ACI, 2011).
- e) Realização de análise simplificada de viabilidade de custos da aplicação in loco dos traços produzidos.

1.3 METODOLOGIA RESUMIDA

Neste estudo, predomina-se a tipologia prático-experimental; envolvendo, desse modo, a execução de experimentos em laboratório como diretriz para que o objetivo dessa pesquisa seja atingido. Deste modo, a pesquisa se dará em quatro etapas, sendo elas:

- a) Caracterização dos resíduos plásticos e agregados;
- b) Confeção dos traços de concreto;
- c) Ensaio de caracterização mecânica;
- d) Análise dos resultados
- e) Análise simplificada de viabilidade de custos

Além disso, salienta-se que a coleta, processamento e fornecimento de todos os resíduos plásticos utilizados nos ensaios deste estudo foram realizadas pelo Prof. Dr. Aguinaldo Lenine Alves, da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. Deste modo, o presente estudo é um projeto conjunto realizado em parceria com o Professor Alves.

Esses resíduos são provenientes de centros de reciclagem e seu processamento (moagem e trituração) foi realizado pelos maquinários ilustrados na Figura 1.1 a seguir.

Figura 1.1 – Máquina utilizada no processamento dos resíduos plásticos



Fonte: Autor (2020)

A seguir, discorre-se em detalhes sobre cada uma das etapas supracitadas.

1.3.1 Caracterização dos resíduos plásticos e agregados

Os ensaios de caracterização terão como propósito identificar o comportamento dos resíduos plásticos e agregados, além da obtenção de informações fundamentais para as etapas posteriores.

Caracterizar-se-ão os agregados naturais (areia e brita) e os resíduos plásticos em termos de massa específica e granulometria.

1.3.2 Confecção dos traços de concreto

Os parâmetros de dosagem adotados têm como base as prescrições de Gonçalves (2017), sendo elas:

- a) Relação água/cimento, calculada em massa, menor que 0,60 – conforme NBR 6118 (ABNT, 2014) em casos de concreto armado com classe de agressividade II;

- b) Resistência à compressão acima de 25,0 MPa – devido à exposição do concreto à uma classe de agressividade II, exposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014);
- c) Abatimento do tronco de cone de 70 ± 10 mm, com objetivo de obter um concreto plástico sem utilização de aditivos, como demonstrado por Leite (2001) e Moretti (2014);
- d) Desvio padrão menor ou igual a 4,0 MPa;
- e) Condições de preparo: materiais medidos em massa, conforme a NBR 12.655 (ABNT, 2006).

O primeiro traço em massa (designado como traço piloto), previamente aplicado por Nunes (2009) em pesquisas similares, foi utilizado com base na proporção 1 : 2,06 : 2,94 : 0,555, obtendo consumo de cimento de 367,6 kg por m³ de concreto produzido. Já os demais traços utilizaram o piloto como base para a aplicação da substituição, como pode ser observado na Tabela 1.1 a seguir.

Tabela 1.1 – Cálculo dos traços unitários de concreto com resíduo sem compensação

Traço				C	A	B1	a/c	Resíduo		
ID	PET	CYREL	PELLETS					PET	CYREL	PELLETS
T1	Piloto			1,000	2,060	2,940	0,555	-	-	-
T2		10%		1,000	1,854	2,940	0,555	-	0,206	-
T3	10%			1,000	1,854	2,940	0,555	0,206	-	-
T4			10%	1,000	1,854	2,940	0,555	-	-	0,206
T5		5%		1,000	1,957	2,940	0,555	-	0,103	-
T6	5%			1,000	1,957	2,940	0,555	0,103	-	-
T7			5%	1,000	1,957	2,940	0,555	-	-	0,103
T8	5%	10%		1,000	1,751	2,940	0,555	0,103	0,206	-
T9	5%		10%	1,000	1,751	2,940	0,555	0,103	-	0,206
T10	10%	5%		1,000	1,751	2,940	0,555	0,206	0,103	-
T11	10%		5%	1,000	1,751	2,940	0,555	0,206	-	0,103
T12		5%	10%	1,000	1,751	2,940	0,555	-	0,103	0,206
T13		10%	5%	1,000	1,751	2,940	0,555	-	0,206	0,103
T14	5%	5%	5%	1,000	1,751	2,940	0,555	0,103	0,103	0,103

Fonte: Autor (2020)

Essa dosagem foi selecionada com base em estudos anteriores da análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos plásticos como agregado miúdo na produção de concreto. Nele, foi possível notar a granulometria do material substituinte foi um dos fatores que influenciou significativamente nos resultados. Desse modo, as misturas serão realizadas

para atingir granulometrias que mais se aproximem a do material convencional utilizado como agregado miúdo (MORAZ, 2018).

Entretanto, para a confecção dos corpos de prova com a substituição do agregado miúdo por resíduos plásticos, é necessário a realização de uma compensação de volume do material substituído, uma vez que a massa específica dos resíduos é inferior à da areia.

Caso essa compensação não fosse realizada, haveria maior volume de resíduo plástico em cada traço, necessitando assim de uma quantidade maior de água para envolver todas as partículas e, dessa forma, propiciar uma trabalhabilidade semelhante ao traço piloto. O método adotado já foi anteriormente utilizado por outros pesquisadores (GONÇALVES, 2017; LEITE, 2001; MORETTI, 2014), baseando-se na Equação 1.1 a seguir.

$$M_{Resíduos} = M_{Areia} \times \frac{\gamma_{Resíduo}}{\gamma_{Areia}} \quad (1.1)$$

em que: $M_{resíduos}$: massa do resíduo, em kg;

M_{areia} : massa da areia, em kg;

$\gamma_{Resíduo}$: massa específica do resíduo, em g/cm³;

γ_{Areia} : massa específica da areia, em g/cm³.

Deste modo, após a caracterização de todos os materiais do estudo, os traços serão compensados em volume para que os corpos de prova possam ser confeccionados conforme NBR 5738 (ABNT, 2016), de acordo com o Quadro 1.1 a seguir.

Quadro 1.1 – Quantificação dos corpos de prova de acordo com cada ensaio

Traço	ID	Compressão	Tração na compressão diametral	Módulo de Elasticidade Estático	Módulo de Elasticidade Dinâmico	Absorção
T1	A	6	3	3	-	3
T2	B	6	3	3	-	3
T3	C	6	3	3	-	3
T4	D	6	3	3	-	3
T5	E	6	3	3	-	3
T6	F	6	3	3	-	3
T7	G	6	3	3	-	3
T8	H	6	3	3	-	3
T9	I	6	3	3	-	3
T10	J	6	3	3	-	3
T11	K	6	3	3	-	3
T12	L	6	3	3	-	3
T13	M	6	3	3	-	3
T14	N	6	3	3	-	3
Parcial		84	42	42		42
					TOTAL	210

Fonte: Autor (2020)

1.3.3 Ensaios de caracterização mecânica

Os ensaios de caracterização mecânica terão como finalidade a obtenção dos parâmetros que possibilitarão a comparação com o concreto convencional e, desse modo, ter dados quantitativos e qualitativos suficientes para atingir os objetivos propostos nesse estudo.

Todos os ensaios serão realizados aos 28 dias de cura, devido ao caráter comparativo desses dados, de forma que não há necessidade do estudo em menores idades pois tanto o cimento que será utilizado (não é de Alta Resistência Inicial - ARI) quanto às possíveis aplicações desse concreto (estruturas usuais, sem necessidade de rápida liberação) não necessitam desse tipo de estudo.

Caracterizar-se-ão os corpos de prova de acordo com os ensaios propostos no item 1.1.2 – Objetivos Específicos – desse estudo. Esses ensaios são apresentados com mais detalhes do item 2.4.3 ao item 2.4.7 nos capítulos seguintes.

1.3.4 Análise dos resultados

Todos os dados coletados serão submetidos ao critério de Chauvenet para a respectiva aceitação de dados e eliminação dos quais forem considerados discrepantes.

Para cada traço, serão confeccionados 3 corpos de prova sobressalentes para refacção de ensaios e substituição de eventuais discrepâncias.

Em seguida, os dados de desvio padrão de todos os ensaios de resistência serão avaliados qualitativamente de acordo com a norma ACI 214-R (ACI, 2011).

1.3.5 Análise simplificada de viabilidade de custos

A análise de viabilidade de custos será feita conforme os dados de preços e custos médios de materiais de construção atualizados pela SINAPI-PR, coletados em julho de 2021, e analisados em porcentagem (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2021).

1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo eles:

- 1) No Capítulo 1 introduziu-se o tema com o objetivo de contextualização do problema. Além disso, abordou-se também a justificativa, seguida do objetivo geral e dos objetivos específicos, assim como a metodologia resumida de pesquisa adotada na pesquisa.
- 2) No Capítulo 2 será feita uma revisão de literatura sobre o tema estudado.
- 3) O Capítulo 3 abordará os materiais utilizados, procedimentos de ensaio e obtenção de dados – os quais serão utilizados para análise dos resultados do presente trabalho.
- 4) No Capítulo 4 serão apresentados todos os resultados do presente trabalho. Além disso, será apresentado, nesse capítulo, a análise e discussão desses resultados.
- 5) No Capítulo 5 serão apresentadas as considerações finais, como a conclusão e as sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONCRETO

O concreto é utilizado pelos seres humanos há milênios. A mistura convencional, em que se utilizam quatro ingredientes básicos – areia e brita (agregados), um ligante com características cimentícias e água – é utilizada desde os tempos egípcios. Atualmente, sua produção ultrapassa 2 bilhões de toneladas por ano e, em 2050, prevê-se que o uso de concreto atinja quatro vezes o nível de 1990 (SCRIVENER; KIRKPATRICK, 2008; DAMTOFT et al., 2008).

A mistura de concreto moderna teve início no século XIX após a descoberta do cimento Portland, o qual se tornou principal ingrediente desses materiais a partir daí. O processo em si foi patenteado em 1824 por Joseph Aspidin e, posteriormente, refinado por seu filho Willian em um material muito próximo ao cimento utilizado hoje em dia. Desde então, o crescimento da sua utilização subiu exponencialmente; aumentando, por consequência, o consumo de areia e brita (CROW, 2008).

2.1.1 Agregado miúdo: areia

A areia e a brita são os materiais mais fundamentais de nossa economia e, ao mesmo tempo, com o menor reconhecimento desse fato. Eles são minerados no mundo todo, representando o maior volume de material sólido extraído globalmente. Entretanto, eles não

podem ser produzidos em nossos ambientes terrestres, fluviais e marinhos em quantidades suficientes para atender às suas demandas atuais (PEDUZZI, 2014; BEISER, 2018).

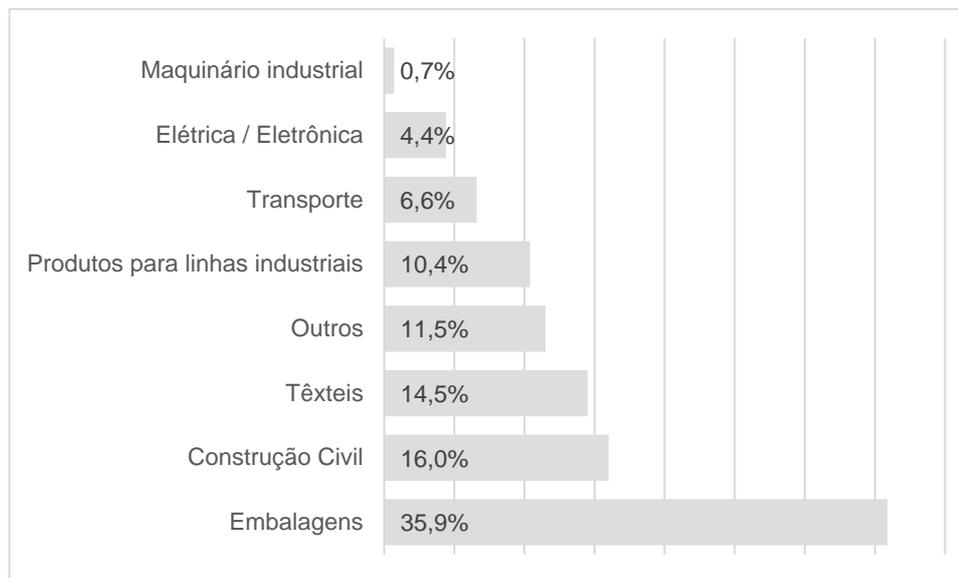
Ou seja, as taxas de extração estão excedendo as taxas de reabastecimento de areia natural. O volume crescente de agregados extraídos – muitas vezes de maneira ilegal – dos ecossistemas ribeirinhos e marinhos resultam em erosão fluvial e costeira, além de ameaças à pesca de água doce e marinha e a biodiversidade (JOHN, 2009; World Wide Fund for Nature [WWF], 2018).

Por esses motivos, o consumo e a produção de areia têm implicações para a gestão socioambiental em projetos de infraestrutura, planejamento sustentável das cidades, planejamento energético e conservação da biodiversidade. Sendo identificada como uma das atividades menos regulamentadas em muitas regiões, corrobora a tendência crescente de extração irresponsável e ilegal de areia em ecossistemas marinhos, costeiros e de água doce, o que faz deste um desafio de sustentabilidade de proporções significativas (GALLAGHER, 2019).

2.2 RESÍDUOS PLÁSTICOS

Os plásticos são materiais relativamente recentes para a humanidade, de forma que sua produção em larga escala data meados de 1950. Apesar disso, o crescimento subsequente na utilização de plásticos foi extraordinário – superando a maioria dos outros materiais artificiais – sendo que um dos aspectos decisivos para isso foi o econômico, pois se tornou possível a confecção dos mais diferentes objetos de plástico com custo acessível à população (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Um mundo sem plásticos ou polímeros orgânicos sintéticos parece hoje inimaginável. Utilizamos eles todos os dias, nas mais variadas formas e em diferentes aplicações, como exemplo: embalagens, materiais de construção, automóveis, utensílios domésticos, produtos de consumo entre outros primordiais atualmente. A Figura 2.1 ilustra alguns valores percentuais de acordo com a utilização destes materiais em algumas atividades.

Figura 2.1 - Percentual de utilização dos plásticos em diversas atividades

Fonte: Adaptado de Beckman (2018)

A grande maioria dos monômeros usados na fabricação de plásticos, como etileno e propileno, são derivados de hidrocarbonetos de origem fóssil. Nenhum dos plásticos comumente usados são biodegradáveis. Como resultado, eles se acumulam, em vez de se decompor, em aterros ou no ambiente natural. A única maneira de eliminar permanentemente os resíduos de plástico é os destruindo por tratamento térmico, como combustão ou pirólise (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Segundo Bîrcă et al. (2019), classificam-se os polímeros em termoplásticos e termorrígidos. Os termoplásticos são caracterizados por possuírem ligações mais frágeis entre suas cadeias, podendo ser facilmente rompidas com a introdução de energia. Dessa forma, suas ligações se rompem quando aquecidos – permitindo uma maior movimentação de cadeias poliméricas em relação às outras – garantindo a esses materiais a capacidade de serem reciclados.

Já os polímeros termorrígidos, quando aquecidos ou em outra forma de tratamento, assumem estrutura tridimensional, reticulada, com ligações cruzadas, o que os torna insolúveis e infusíveis. Após a moldagem do objeto desejado, esses polímeros não voltam a ser amolecidos pelo calor, pois suas ligações químicas primárias, as quais são responsáveis pelas ligações cruzadas entre cadeias, são mais resistentes e só se rompem com a introdução de quantidades elevadas de energia que usualmente gerariam também o rompimento das ligações do monômero – com a consequente degradação do material. Dessa forma, a reciclagem desse tipo de material é difícil e não compensatória (BÎRCĂ et al., 2019).

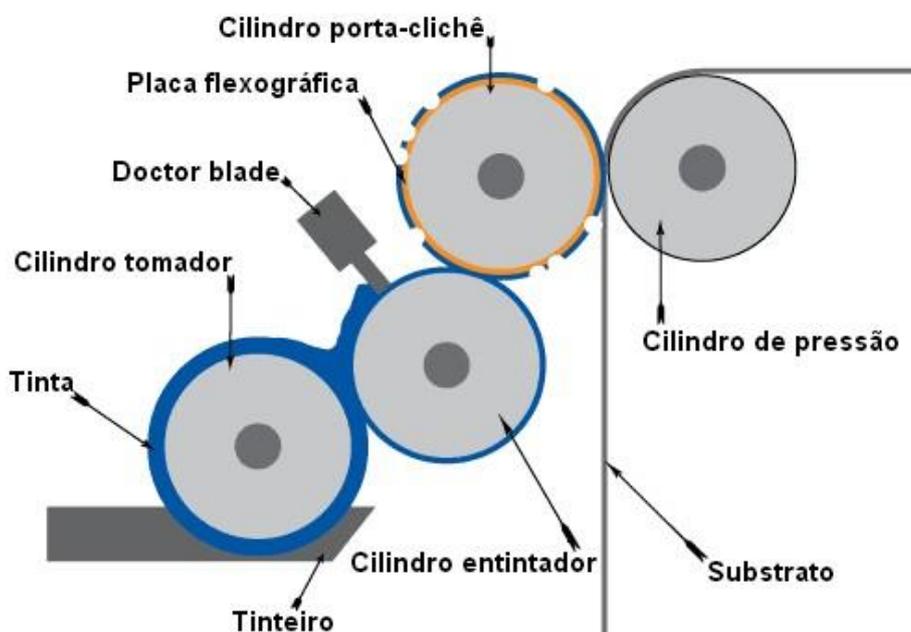
De acordo com Romão, Spinacé e Paoli (2009), os principais polímeros produzidos no Brasil e encontrados no RSU são: o polietileno de alta, baixa densidade e baixa densidade linear (PEAD, PEBD e PELBD), o polipropileno (PP), o poli(cloreto de vinila) (PVC), o poli(tereftalato de etileno) (PET) e o poliestireno (PS). Dentre esses, enquadram-se os materiais estudados: o Cyrel®, os polietilenos de baixa densidade (sacolas plásticas) e o Poli(Tereftaleno de Etileno) – PET.

2.2.1 Cyrel®

O Cyrel® é um material exclusivo utilizado na indústria de flexografia – sistema de impressão gráfica de repetição – em que uma fôrma relevográfica faz a impressão de conteúdos em diversos nichos, como: embalagens flexíveis; papel; papelão ondulado; e os mais variados suportes e superfícies (ABTG, 2012).

Pode-se dizer que a flexografia é a sucessora do carimbo de borracha, sendo que uma de suas vantagens é a possibilidade de várias repetições do módulo da imagem. De acordo com a ABTG (2012), “os clichês, que antigamente eram de borracha, entalhados manualmente ou feitos em formas de zinco e baquelite, hoje são compostos de fotopolímero e gravados com diferentes métodos...”. Pode-se observar, na Figura 2.2, um sistema esquemático de uma impressão flexográfica.

Figura 2.2 – Situação esquemática de uma impressão flexográfica



Fonte: Adaptado de American Label Group (2015)

Em 1974, a DuPont Packaging Graphics lançou as chapas flexográficas Cyrel® – as primeiras chapas elastoméricas de fotopolímeros para impressão flexográfica. Desde então, a utilização desse material ajudou a melhorar significativamente a qualidade e a produtividade desse tipo de impressão. A introdução do Cyrel® na indústria flexográfica permitiu uma melhoria do controle do processo, qualidade e no produto final, reduzindo em até 75% o tempo de produção de uma chapa. Além disso, a utilização desse material proporcionou uma redução do consumo de 15%, gerando menores emissões de gases causadores do efeito estufa. Pode-se observar, a seguir, uma chapa flexográfica de Cyrel® ilustrada na Figura 2.3 (DUPONT, 2017).

Figura 2.3 – Chapa flexográfica de Cyrel®



Fonte: Dupont (2017)

Entretanto, uma vez que a chapa de impressão for moldada, sua utilização e vida útil limitam-se às informações nela contidas; resultando, por fim, em seu descarte. Segundo a revista Flexo Tech, estima-se que mais de 180 mil toneladas de resíduos de chapas flexográficas são depositadas no Reino Unido a cada ano. Dessa forma, aliado ao fato de que os fotopolímeros são materiais de decomposição muito lenta, é interessante a busca de uma destinação sustentável para esse resíduo (FLEXO TECH, 2013).

A Figura 2.4 a seguir ilustra o resíduo de Cyrel® já processado (moído e triturado), no estado em que foi utilizado na pesquisa em questão.

Figura 2.4 – Resíduo de Cyrel®

Fonte: Autor (2021)

2.2.2 Resíduos plásticos de sacolas – PELLETS

Devido às características de resistência, baixo peso, durabilidade e, principalmente, baixo custo, a sacola plástica de uso único tornou-se item comum das compras modernas desde sua introdução no mercado, na década de 1980. Após duas décadas, em 2014, mais de 8,5 bilhões de sacolas plásticas foram utilizadas em supermercados no Reino Unido, estimadas em 58 mil toneladas de resíduos plásticos (THOMAS et al., 2019).

Além disso, devido ao fato de serem leves e terem baixo valor agregado, a separação individual para a coleta e reciclagem desse material acaba tornando-se inviável economicamente (PÓVOA NETO et al., 2011). Por fim, embora os sacos plásticos acabem principalmente em lixões e aterros sanitários como parte dos resíduos domésticos, a grande parte descartada no ambiente causa danos graves à vida selvagem, poluição das vias aquáticas e o entupimento de sistemas pluviais (THOMAS et al., 2019).

Desse modo, percebe-se que as sacolas plásticas são cada vez mais vistas como riscos ambientais, que ameaçam o bem-estar humano e animal, ao invés de uma conveniência modernas. Devido a isso, há um surgimento de normas anti sacolas plásticas de forma rápida e generalizada. Embora essas políticas tenham sido adotadas amplamente, nem sempre elas são realmente observadas na prática (CLAPP; SWANSTON, 2009).

Atualmente, a reciclagem de sacolas plásticas dificilmente ocorre devido a diversos motivos, como por exemplo: serem de difícil reciclagem, devido à sua baixa densidade;

possuírem um baixo custo de produção, tornando a operação economicamente inviável; e ter um número de reciclagens limitado, pois ocorre a perda das propriedades do material a cada ciclo. Desse modo, percebe-se a importância de encontrar métodos alternativos de aproveitamento desse tipo de material (HOPEWELL; DVORAK; KOSIOR, 2009).

A Figura 2.5 a seguir ilustra o resíduo chamado de Pellets, já em sua forma processada (moído e triturado), no estado em que foi utilizado na pesquisa em questão.

Figura 2.5 – Resíduo Pellets



Fonte: Autor (2021)

2.2.3 PET

Embora esse material seja amplamente identificado pela sua utilização na indústria de bebidas, suas aplicações são diversas, como exemplos: suporte de filme metálico para estampagem em plásticos e fitas magnéticas para gravação; mantas para filtros industriais; embalagem de alimentos, cosméticos e produtos farmacêuticos; filmes e placas para radiografia, fotografia e reprografia; impermeabilização de superfícies; fibras têxteis; na indústria automobilística, em partes estruturais grandes, carcaças de bomba, carburadores e limpadores de para-brisa; componentes elétricos; e interior de fornos de micro-ondas (MISHRA, 2019).

As garrafas PET movimentam hoje um mercado que produz cerca de 20 mil unidades por segundo, das quais 53% não são reaproveitadas. Desse modo, cerca de 250 bilhões de unidades por ano são descartadas na natureza, contaminando rios e mares, indo para lixões ou mesmo espalhadas por terrenos vazios (MUTHU, 2020). De 2004 e 2016, a produção

mundial de PET para a fabricação de garrafas subiu de 300 para cerca de 485 bilhões de unidades, com estimativa de 583,3 bilhões de unidades em 2021 (GARSIDE, 2017).

Na reciclagem dos resíduos de PET, despesas adicionais em relação ao custo de fabricação são necessárias para que seja possível o reprocessamento. Além disso, no decorrer dos ciclos, a mudança de cor e a perda da pureza podem limitar o uso do plástico PET reciclado para a fabricação de novos produtos (MUTHU, 2020).

Dessa forma, a indústria da construção civil – com a sua alta demanda de materiais citada anteriormente nesse estudo – torna-se um setor apropriado para esse tipo de resíduo, criando um destino para essa quantia exacerbada de resíduos plásticos de PET cuja reciclagem convencional não consegue dar conta.

A Figura 2.6 a seguir ilustra o resíduo de PET já processado (moído e triturado), no estado em que foi utilizado na pesquisa em questão.

Figura 2.6 – Resíduo de PET



Fonte: Autor (2021)

2.3 CONCRETO COM RESÍDUOS PLÁSTICOS

Uma das pesquisas pioneiras na área dos efeitos da substituição de agregados convencionais por plástico na resistência à compressão do concreto foi realizada por Al-Manaseer e Dalal (1997), os quais exploraram o efeito de um incremento na proporção de partículas angulares de resíduos plásticos na resistência a compressão de corpos de prova com três diferentes fatores de água-cimento. Eles observaram que a resistência a compressão

diminuiu proporcionalmente ao aumento do teor de resíduos plásticos substituídos, sendo essa perda de resistência atribuída à má ligação entre os agregados plásticos e a pasta de cimento.

Posteriormente, Choi et al. (2005) utilizaram fragmentos de PET aquecidos e moldados em formato arredondado, com tamanhos de 5 a 15 mm, para uso em misturas de argamassa. A substituição total do agregado convencional pelo plástico resultou em reduções de 42% da resistência a compressão. Entretanto, esse novo formato atribuiu melhorias na trabalhabilidade da mistura, de forma que Hassani et. al. (2005) conseguiu uma mistura de concreto asfáltico com 20% de substituição do agregado graúdo em volume pelos fragmentos PET arredondados com impacto moderado em sua resistência e, ao mesmo tempo, níveis aceitáveis de deformação e fluência.

Ismail e Al-Hashimi (2008) testaram concretos com uma mistura de PET e poliestireno como substitutos parciais da areia. De maneira semelhante aos estudos de Al-Manaseer e Dalal (1997), houve uma redução na resistência à compressão também atribuída a uma diminuição na ligação entre a superfície plástica e a pasta de cimento. Porém, percebeu-se que, devido ao comportamento hidrofóbico dos plásticos, o movimento da água necessário para a hidratação do cimento é dificultado, podendo resultar em volumes isolados de cimento não hidratado dentro da massa.

No ano seguinte, Albano et. al. (2009) utilizou partículas com formatos irregulares de PET com diâmetros entre 2,6 e 11,4 mm, substituindo a areia com teores de 10% e 20% com dois diferentes fatores de água-cimento. Constatou-se novamente a redução da resistência à compressão proporcional ao aumento da proporção de resíduos plásticos, implicando que essas partículas atuam como defeitos na estrutura interna do concreto. Além disso, notou-se que as misturas que utilizaram apenas partículas plásticas de maiores dimensões obtiveram desempenho reduzido em relação às que continham as menores partículas. A formação de cavidades e poros observada foi atribuída à baixa trabalhabilidade, a qual afeta a compactação do concreto.

Os mesmos autores ainda demonstraram que, tanto os aumentos do tamanho das partículas de plástico quanto das porcentagens de substituição causam reduções significativas na resistência à tração, devido ao aumento dos vazios presentes no concreto. Esse fato é apoiado pela pesquisa de Frigione (2010), em que uma substituição de 5% em volume de areia por PET granulado resultou em uma perda de apenas 2% na resistência à tração do concreto (ALBANO et. al., 2009).

Frigione (2010), utilizando PET granulado com granulometria muito semelhante a uma areia convencional, verificou que uma substituição de 5% em volume resultou em uma redução de resistência a compressão menor do que 2%. Isso indica que, embora o uso de resíduos plásticos possa ocasionar diminuição de resistência à compressão quando comparado à areia, o design adequado da mistura e dos plásticos pode trazer resultados muito satisfatórios.

Com outro tipo de abordagem, Ferreira, Brito e Sakia (2012) estudaram a influência de três diferentes condições de cura no desempenho dos concretos com agregados de resíduos plásticos. Entretanto, esses autores chegaram à conclusão de que o efeito dominante no desempenho desses concretos não eram as condições de cura, mas sim o percentual de substituição.

Além do PET, também foi estudada a utilização de sacolas plásticas na produção de misturas de argamassa autoadensável. Safi et. al. (2013) testaram níveis de substituição de 0 a 50%, encontrando reduções médias de 15% de resistência com teores de 30% de resíduos plásticos na mistura. As reduções de resistência foram atribuídas à falta de ligação entre os plásticos e a pasta de cimento, uma conclusão apoiada pela maioria das pesquisas anteriores.

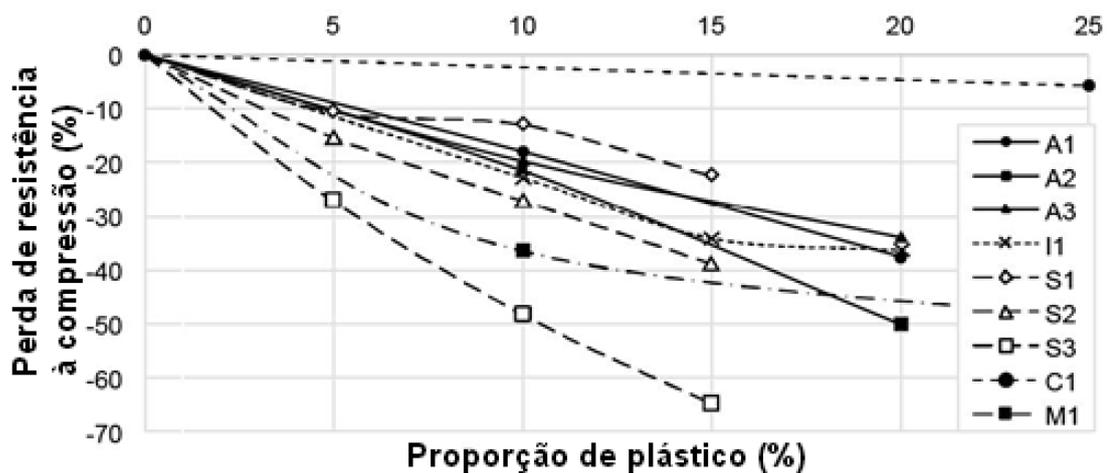
No próximo ano, Saikia e Brito (2014) testaram misturas de concreto contendo três tipos diferentes de partículas plásticas: partículas grandes (10 a 20 mm); partículas finas e escamosas trituradas (2 a 5 mm); e partículas cilíndricas em forma de grânulos (3 mm). Cada uma delas foi utilizada em teores variando de 0% a 15% de substituição de areia. Verificou-se, assim como apoia a literatura, que quanto maior a taxa de substituição de areia, menor a resistência à compressão. Esse estudo pode concluir que a zona de transição interfacial no concreto (região entre as partículas de agregado e a pasta) contendo agregados plásticos é mais fraca que a do concreto padrão.

Os mesmos autores também observaram que, assim como na resistência à compressão, houve também uma perda de resistência à tração nos concretos com adição de agregados plásticos e, quanto maior o teor, maior a perda. Estudos microscópicos de amostras rompidas revelaram que a forma mais comum de falha era a desassociação justamente na interface plástico-concreto (SAIKIA; BRITO, 2014).

A Figura 2.7 a seguir resume os resultados de Albano (2009), Ismail (2008), Saikia (2014), Choi (2005) and Al-Manaseer (1997), ilustrando a perda de resistência com relação a porcentagem de substituição de plásticos nos traços estudados. A dispersão dos resultados é explicada pelo número de variáveis entre cada conjunto de testes, incluindo a razão água

cimento e o tipo, tamanho, forma, textura das superfícies e o tratamento do plástico (THORNEYCROFT, 2018).

Figura 2.7: Relação entre a substituição de resíduos plásticos e a perda de resistência à compressão



	A = Albano et al. (2009)	I = Ismail and Al-Hashmi (2008)	S = Saikia and de Brito (2014)	C = Choi et al. (2005)	M = Al-Manaseer and Dalai (1997)
1	Todas partículas pequenas	PET e poliestireno	PP - Pellets	PET revestido em GBFS	Partículas Angulares
2	Todas partículas grandes	N/A	PF - Partículas finas escamosas	N/A	N/A
3	Mistura 50/50 de partículas	N/A	PC - Partículas grandes	N/A	N/A

Fonte: Adaptado de Thorneycroft (2018)

2.4 ENSAIOS

2.4.1 Ensaio de Granulometria

Ao inserir diferentes tipos de agregados no concreto, deve-se atentar para a granulometria do material que será adicionado. As propriedades do concreto dependem diretamente das propriedades de seus componentes (matriz da pasta, agregados e interações entre eles), sendo que a diferença de dureza entre os agregados e a matriz da pasta produzem concentração de tensões nas interfaces que podem diferir das tensões do material, com a possibilidade de ocorrer formações de fissuras no concreto, nas argamassas e nas partículas dos agregados, sendo que esses efeitos são intensificados com o aumento do tamanho do agregados,

especialmente quando esse valor for maior do que 5 mm – agregado graúdo (GIACCIO et. al., 1992).

O ensaio de granulometria, de acordo com a normatização da NBR NM 248 (ABNT, 2003), tem como objetivo a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos para concreto. Para isso, utilizar-se-á a série normal e a série intermediária de peneiras, prescritas pela própria norma, como observa-se no Quadro 2.1 a seguir.

Quadro 2.1 – Tamanho de abertura das peneiras

Série Normal	Série Intermediária
76 mm	-
-	64 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
0,600 mm	-
0,300 mm	-
0,150 mm	-

Fonte: Adaptado de ABNT (2003)

Conforme a dimensão máxima característica do agregado (em mm), tem-se a quantidade de material mínima (em kg) para a execução do ensaio (ABNT, 2003).

Por último, para o cálculo do módulo de finura, a norma cita que essa grandeza equivale a “Soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100”.

2.4.2 Ensaio de Massa Específica – Frasco de Le Chatelier

O ensaio de determinação de massa específica, de acordo com a NM 23 (2000), tem como objetivo estabelecer um método de determinação da massa específica de materiais em pó, utilizando-se um frasco volumétrico de Le Chatelier. A norma expõe que, para a execução do experimento, deve ser utilizado um líquido que não reaja quimicamente com o material ensaiado, além de possuir uma densidade maior do que $0,731 \text{ g/cm}^3$, a $15 \text{ }^\circ\text{C}$ – sendo ela menor do que a do material ensaiado.

A execução do ensaio parte do seguinte procedimento (NM, 2000):

- a) preenchimento do frasco com o líquido de densidade conhecida até a marcação inicial;
- b) realização da primeira leitura de volume, obtendo a variável V_i ;
- c) adição de uma quantidade de material com massa conhecida;
- d) retirada do ar da solução por meio de movimentação do frasco;
- e) realização da outra leitura de volume, obtendo a variável V_f ;
- f) cálculo da massa específica do material, conforme a Equação 2.1 a seguir.

$$\rho = \frac{m}{V'_f - V'_i} \quad (2.1)$$

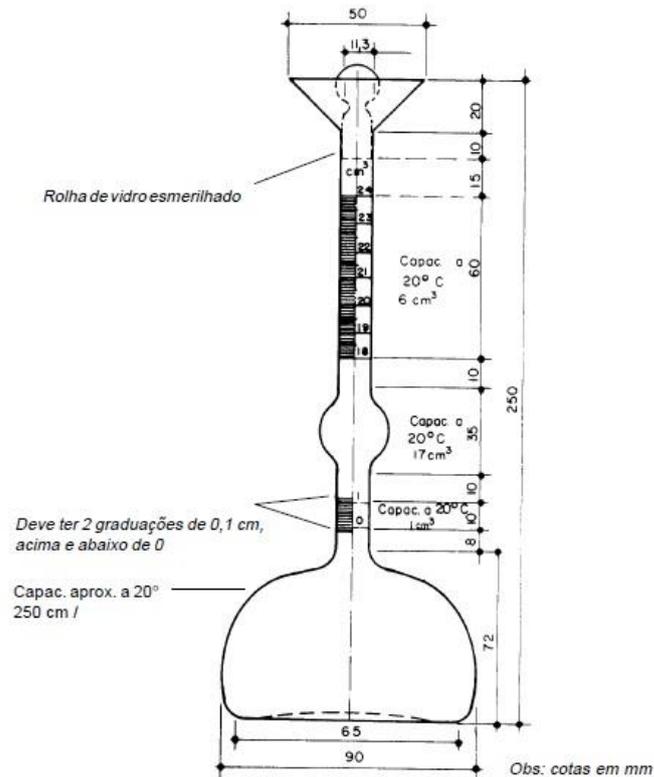
em que: ρ : é a massa específica do material ensaiado, em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

V'_i : é o valor corrigido de V_i a partir da calibração da escala do frasco volumétrico, em centímetros cúbicos (cm^3);

V'_f : é o valor corrigido de V_f a partir da calibração da escala do frasco volumétrico, em centímetros cúbicos (cm^3).

A Figura 2.8 a seguir representa a situação esquemática do frasco de Le Chatelier.

Figura 2.8 – Frasco de Le Chatelier



Fonte: NM (2000)

2.4.3 Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos

O ensaio de compressão, normalizado pela NBR 5739 (ABNT, 2018), tem como objetivo determinar a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto, moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016).

Assim, o ensaio se resume na moldagem dos corpos de prova e, após cura especificada, na realização do carregamento axial até a ruptura do material. Com os dados de força aplicada e dimensões do corpo de prova, pode-se calcular a resistência à compressão a partir da Equação 2.2 expressa a seguir.

$$f_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2} \quad (2.2)$$

em que: f_c : é a resistência à compressão, expressa em megapascals (MPa);

F: é a força máxima alcançada, expressa em newtons (N);

D: é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

2.4.4 Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de resistência à tração é normatizado pela NBR 7222 (ABNT, 2011), a qual prescreve o método para determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de argamassa e concreto.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada de acordo com a Equação 2.3 a seguir:

$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (2.3)$$

em que: $f_{t,D}$: é a resistência à tração por compressão diametral, expressa em megapascals, com aproximação de 0,05 MPa (MPa);

F: é a força máxima obtida no ensaio, expressa em newtons (N);

D: é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

L: é a altura do corpo de prova, expresso em milímetros (mm)

2.4.5 Determinação dos Módulos Estáticos de Elasticidade e de Deformação à Compressão

Seguindo a normatização da NBR 8522 (ABNT, 2017), esta norma especifica um método para determinação do módulo elástico de elasticidade à compressão de um concreto moldado em corpos de prova cilíndricos.

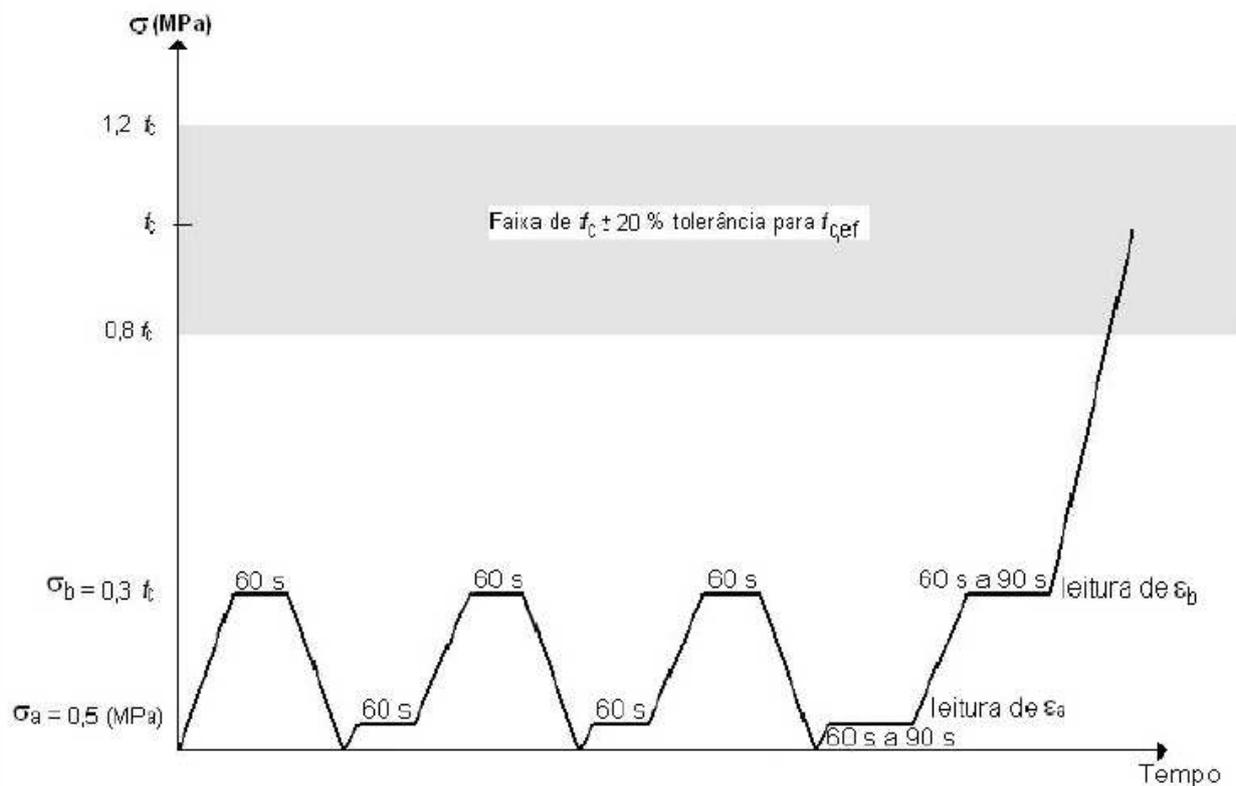
Primeiramente, deve-se determinar a resistência à compressão (f_c) de corpos de prova provenientes da mesma betonada dos quais serão utilizados para determinar o módulo de elasticidade.

Após isso, pode-se configurar o ensaio de determinação do módulo de elasticidade de duas maneiras:

a) Metodologia A – Tensão σ_a fixa:

Consiste em um ciclo de carregamentos e descarregamentos conforme ilustrado na Figura 2.9 a seguir, em que o parâmetro que define os patamares dos ciclos é ditado pelas tensões.

Figura 2.9 - Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A – Tensão σ_a fixa



Fonte: NBR 8522 (ABNT, 2017)

Nesse caso, o módulo de elasticidade é dado pela equação 2.4 a seguir:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3} \quad (2.4)$$

em que: E_{ci} : módulo de elasticidade, em gigapascals (GPa);

σ_b : é a tensão maior, em megapascals ($\sigma_b = 0,3 \cdot f_c$);

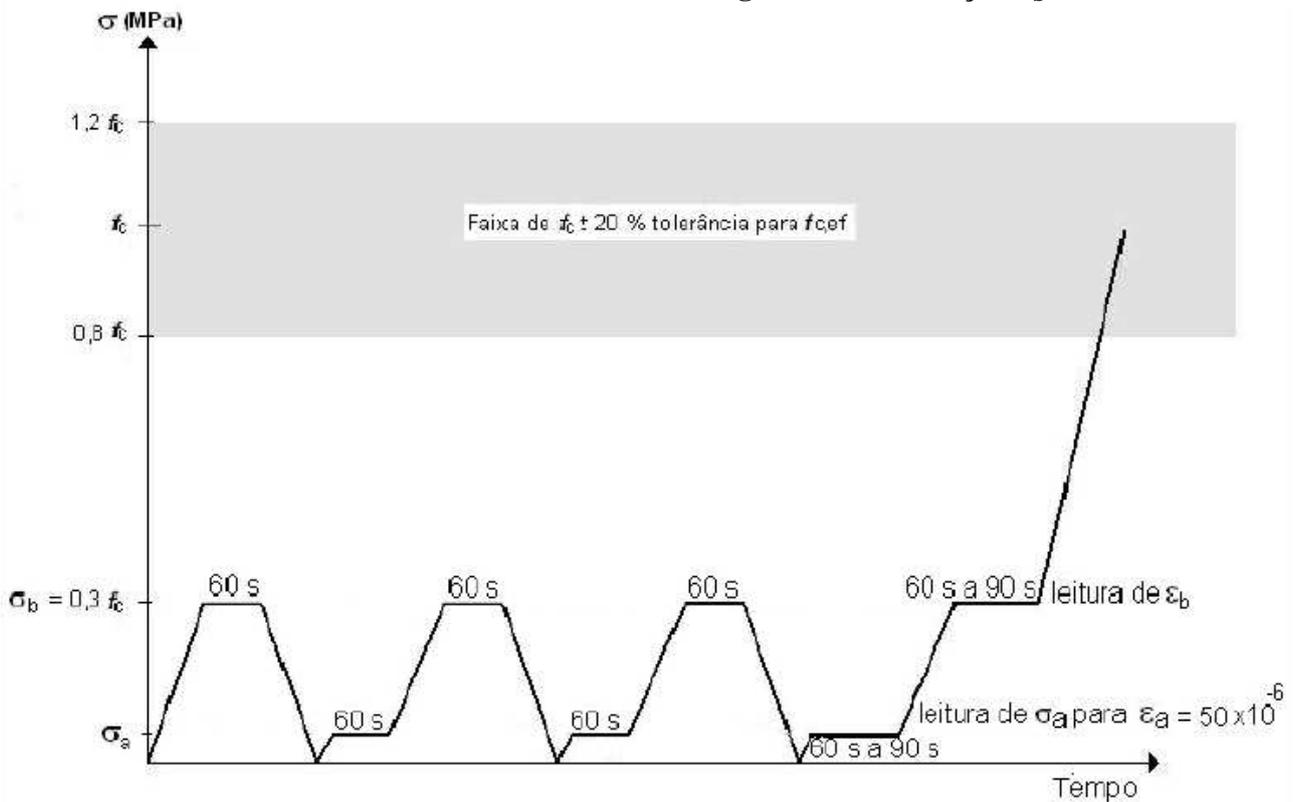
ε_b : é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão maior;

ε_a : é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica (0,5 MPa).

a) Metodologia B – Deformação específica ε_a fixa:

Semelhante ao método A, também consiste em um ciclo de carregamentos e descarregamentos ilustrado na Figura 2.10 a seguir; entretanto, o parâmetro que define os patamares dos ciclos é ditado pelas deformações, nesse caso.

Figura 2.10 - Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia B – Deformação ε_b fixa



Fonte: NBR 8522 (ABNT, 2017)

Nesse caso, o módulo de elasticidade é dado pela Equação 2.5 a seguir:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-3} \quad (2.5)$$

em que: E_{ci} : módulo de elasticidade, em gigapascals (GPa);
 σ_b : é a tensão maior, em megapascals ($\sigma_b = 0,3 \cdot f_c$);
 σ_a : é a tensão básica correspondente à deformação específica de $50 \cdot 10^{-6}$, expressa em megapascals (MPa).
 ε_b : é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão maior.

2.4.6 Determinação do Módulo Dinâmico de Elasticidade

Este método de teste abrange a determinação das propriedades dinâmico elásticas de materiais elásticos à temperatura ambiente, pois sabe-se que amostras desse tipo de material possuem frequências mecânicas ressonantes específicas determinadas pelo módulo de elasticidade, massa e geometria do corpo de prova. Desse modo, as propriedades elástico dinâmicas de um material podem, portanto, ser computadas se a geometria, massa e frequências ressonantes mecânicas de uma amostra adequada (geometria retangular ou cilíndrica) desse material puderem ser medidas. Assim, o módulo de elasticidade é determinado usando a frequência ressonante, tanto na flexão quanto no modo longitudinal de vibração. Já o módulo de cisalhamento dinâmico – ou módulo de rigidez – é encontrado usando ressonância torcional de vibrações. Por fim, o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de cisalhamento dinâmico podem, ainda, ser usados para calcular o coeficiente de Poisson (ASTM, 2005).

Todos os parâmetros serão obtidos com o uso de um equipamento chamado Sonelastic (representado na Figura 2.11). Sua função é a caracterização de um material utilizando a técnica de excitação por impulso, de acordo com a norma ASTM E 1876-01. A utilização deste equipamento incorre em algumas vantagens, como: metodologia do tipo não destrutiva; grande precisão do equipamento, se comparado com os testes mecânicos; rapidez e praticidade do ensaio; e a facilidade para exportar dados (ASTM, 2005).

Figura 2.11 – Equipamento Sonelastic

Fonte: Adaptado de ATCP Physical Engineering Sonelastic® Division (2017)

2.4.7 Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica

Para determinar a absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos, tomar-se-á como base a norma ABNT NBR 9778:2005 versão corrigida 2:2009, de forma que o equacionamento utilizado pode ser observado nas Equações 2.6 a 2.13 a seguir:

$$A_i = \frac{B - A}{A} \cdot 100 \quad (2.6)$$

em que: A_i : absorção após imersão em água à temperatura $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, em porcentagem;
 A : massa, em g, da amostra seca em estufa;
 B : massa, em g, da amostra saturada em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ com superfície seca.

$$A_f = \frac{C - A}{A} \cdot 100 \quad (2.7)$$

em que: A_f : absorção após imersão e fervura, em porcentagem;

A: massa, em g, da amostra seca em estufa;

C: massa, em g, da amostra com superfície seca, após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C e fervura em água em ebulição durante 5 h.

$$e_s = \frac{B - A}{B - D} \cdot 100 \quad (2.8)$$

em que: e_s : índice de vazios após saturação em água, em porcentagem;

A: massa, em g, da amostra seca em estufa;

B: massa, em g, da amostra saturada em água à temperatura de (23 ± 2) °C com superfície seca;

D: massa, em g, da amostra, após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C.

$$e_f = \frac{C - A}{C - E} \cdot 100 \quad (2.9)$$

em que: e_f : índice de vazios após saturação e fervura, em porcentagem;

A: massa, em g, da amostra seca em estufa;

C: massa, em g, da amostra com superfície seca, após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C e fervura em água em ebulição durante 5 h.

E: massa, em g, da amostra, após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C, e fervura em água em ebulição durante 5 h.

$$\rho_d = \frac{A}{C - D} \quad (2.10)$$

em que: ρ_d : massa específica da amostra seca, em g/cm³;

A: massa, em g, da amostra seca em estufa;

C: massa, em g, da amostra com superfície seca, após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C e fervura em água em ebulição durante 5 h.

D: massa, em g, da amostra, após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C.

$$\rho_{sat} = \frac{B}{C - D} \quad (2.11)$$

em que: ρ_{sat} : massa específica da amostra após saturação, em g/cm³;

B: massa, em g, da amostra saturada em água à temperatura de (23 ± 2) °C com superfície seca;

C: massa, em g, da amostra com superfície seca, após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C e fervura em água em ebulição durante 5 h.

D: massa, em g, da amostra, após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C.

$$\rho_f = \frac{C}{C - D} \quad (2.12)$$

em que: ρ_f : massa específica da amostra após saturação e fervura, em g/cm³;

C: massa, em g, da amostra com superfície seca, após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C e fervura em água em ebulição durante 5 h.

D: massa, em g, da amostra, após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C.

$$\rho_r = \frac{A}{C - D} \quad (2.13)$$

em que: ρ_r : massa específica real, em g/cm³;

A: massa, em g, da amostra seca em estufa;

C: massa, em g, da amostra com superfície seca, após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C e fervura em água em ebulição durante 5 h.

D: massa, em g, da amostra, após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo predomina-se a tipologia prático-experimental, a qual envolve a execução de experimentos laboratoriais como diretriz para estudo e comprovação das hipóteses levantadas. Dessa forma, a pesquisa se deu em quatro etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) ensaios de caracterização dos materiais estudados (agregado miúdo e resíduos plásticos);
- c) ensaios de caracterização mecânica;
- d) análise dos resultados.

A seguir, discorre-se em detalhes sobre cada uma das etapas supracitadas.

3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A etapa referente à pesquisa na literatura teve como propósito coletar o maior número de informações referentes ao tema. Desse modo, possibilitou-se maior qualidade e precisão na realização dos ensaios, provendo o conhecimento fundamental para a interpretação dos resultados deste estudo.

Salienta-se, ainda, que a pesquisa foi realizada consultando-se artigos e estudos publicados em revistas científicas, anais de eventos, monografias, dissertações e teses, livros e normas técnicas. Além disso, grande parte desse trabalho tem como embasamento pesquisas anteriores realizadas pelo próprio autor, como pesquisas de iniciação científica, monografia e artigos.

As informações e conhecimentos adquiridos por intermédio dessa etapa da pesquisa estão dispostos no capítulo 2 deste trabalho.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização tiveram como propósito o conhecimento e compreensão do comportamento dos agregados convencionais (areia e brita) e dos resíduos plásticos, além da obtenção de informações fundamentais para as etapas posteriores, como a compensação em volume dos traços. Os resultados referentes aos ensaios de caracterização obtidos experimentalmente e suas respectivas análises serão apresentados do tópico 4.1.1 ao 4.1.3.

3.2.1 Ensaio de Granulometria

O ensaio de Granulometria foi realizado no laboratório de Materiais de Construção (P02) da Universidade Estadual de Maringá.

Tal experimento foi executado conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Determinou-se, a partir da dimensão máxima característica dos materiais (inferior a 4,8 mm), a granulometria das peneiras utilizadas. Definiu-se ainda que, para a realização do ensaio, seriam necessários 1000,0 g de cada resíduo, sendo 500,0 g para cada uma das duas determinações, e 2000,0 g de cada agregado convencional, sendo 1000,0 g para cada uma das duas determinações.

Posteriormente, iniciou-se a execução do ensaio, fazendo uso dos seguintes materiais:

- a) bandejas metálicas;
- b) colher de solo tipo DER Quadrada;
- c) balança BG 4000 (Gehaka); Divisão = 0,01; Escala = 0,1 g;
- d) jogo de peneiras de 6,3 mm, 4,76 mm, 2,38 mm, 1,18 mm, 600 μ m, 300 μ m, 150 μ m e 02 fundos;
- e) amostra de cada um dos materiais: areia, brita e os 3 resíduos plásticos;
- f) recipiente metálico para pesagem;
- g) escova metálica.

Colocou-se o recipiente metálico na balança e se tarou o conjunto. Em seguida, com o auxílio da colher de solo tipo DER quadrada, colocou-se o resíduo no recipiente metálico e pesou-se 500,0 g do material.

Montou-se o jogo de peneiras conforme tamanho da abertura de cada peneira, com o fundo embaixo e empilhando de maneira crescente. Despejou-se cuidadosamente todo o material no jogo de peneiras, e agitou-se o conjunto com o objetivo de provocar uma separação inicial entre as diferentes granulometrias do resíduo.

Após, tirou-se a primeira peneira (6,3 mm) e, encaixando-a sob o segundo fundo, promoveu-se a agitação, até que todos os grãos com granulometria inferior tivessem se depositado no fundo. Com o auxílio da escova metálica, retirou-se todos os grãos retidos na peneira de 6,3 mm e se colocou o material no recipiente metálico para pesagem, anotando-se sua massa. Após, depositou-se tal material em uma bandeja metálica separada, para que, no final do ensaio, fosse possível observar as diferentes frações granulométricas componentes dos resíduos plásticos. Depositou-se o material passante na peneira de 6,3 mm na peneira seguinte (4,76 mm), e se repetiu o processo com todas as peneiras do jogo, sempre anotando os valores de massa retida.

Por fim, tabulou-se os dados obtidos experimentalmente, calculando-se a porcentagem de material retido, acumulando esta porcentagem, e se plotou o gráfico da curva granulométrica de cada material. Para fins de cálculo, tem-se que a porcentagem de material retido é a relação entre a massa de material retido na peneira e a massa total de material retido em todas as peneiras. Já a porcentagem retida e acumulada é a soma da porcentagem de material retido da peneira em questão com a porcentagem de material retido nas peneiras anteriores. Conforme a norma (ABNT, 2003), realiza-se a média entre os valores de porcentagem retida e acumulada dos dois ensaios e se plota a curva com os valores médios.

Ante o exposto, os resultados de cada uma das duas determinações para cada um dos materiais serão apresentados do item 4.1.1 ao 4.1.3 desta pesquisa.

Com os resultados do ensaio de granulometria, é possível calcular os valores do módulo de finura de cada um dos materiais e classificá-los em “muito fino”, “fino”, “médio” e “grosso”. A classificação apresentada na norma anterior NBR 7217/1987 (ABNT, 1987) é referente ao agregado miúdo. Contudo, uma vez que haverá a substituição dos resíduos plásticos pelo agregado miúdo, convém-se realizar tal classificação para fins de análise e comparação. No Quadro 3.1, apresentam-se os parâmetros para a classificação dos agregados de acordo com o seu Módulo de Finura.

Quadro 3.1 – Módulo de Finura.

Tipo de areia	Tamanho nominal (mm)		Módulo de Finura (MF)
	Mínima	Máxima	
Muito fina	0,15	0,6	MF < 2,0
Fina	0,6	1,2	2,0 < MF < 2,4
Média	1,2	2,4	2,4 < MF < 3,2
Grossa	2,4	4,8	MF > 3,2

Fonte: ABNT (2003)

Os valores do módulo de finura de cada um dos resíduos e da areia utilizada – bem como a sua respectiva classificação – serão apresentados no tópico 4.1.2 deste estudo.

3.2.2 Ensaio de Massa Específica – Frasco de Le Chatelier

O ensaio de Massa Específica utilizando o Frasco de Le Chatelier foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção (P02) da Universidade Estadual de Maringá.

Escolheu-se esse método de determinação da massa específica devido ao fato de que os resíduos plásticos estudados em questão (pellets de sacolas plásticas, Cyrel® moído e triturado e PET moído e triturado) são compostos por uma granulometria pequena, impossibilitando a execução desse ensaio pelos métodos convencionais (MARCANTONIO, 2017).

Tal ensaio baseou-se na norma NM 23 (NM, 2000). Determinou-se que o líquido utilizado no experimento seria o querosene, atendendo ao item 3 da referida norma.

Após, iniciou-se o ensaio propriamente dito. Os seguintes materiais foram utilizados:

- a) cápsula de porcelana;
- b) bastão de vidro;
- c) papel absorvente;
- d) espátula de metal;
- e) proveta de plástico, de 100,0 mL;
- f) funil de vidro;

- g) frasco de Le Chatelier de volume 25,0 mL;
- h) amostra de cada um dos materiais (areia, brita e os 3 resíduos plásticos) – aproximadamente 50,0 g de cada;
- i) balança BG 4000 (Gehaka); divisão = 0,01; escala = 0,1 g;
- j) querosene 100% puro;
- k) colher de solo tipo DER quadrada.

Primeiramente, com auxílio do funil, adicionou-se 100,0 mL de querosene na proveta, e após, utilizou-se a proveta para colocar o querosene no frasco de Le Chatelier, até se atingir a marca entre 0,0 mL e 1,0 mL (a utilização da proveta permite maior controle na quantidade adicionada), e se anotou o volume inicial. Depois, enrolou-se um papel absorvente no bastão de vidro, e se secou as paredes internas no frasco de Le Chatelier, retirando o querosene em excesso.

Em seguida, colocou-se a cápsula de porcelana na balança e se tarou o conjunto. Com o auxílio da colher de solo tipo DER quadrada, colocou-se o resíduo plástico na cápsula de porcelana, e anotou-se o valor da massa inicial de resíduo. Com o auxílio da espátula metálica e do funil de vidro, colocou-se, gradualmente, o resíduo no frasco de Le Chatelier até que o menisco ultrapassasse a marca de 18,0 mL (caso adicionado rapidamente, o resíduo não se misturava com o querosene, obstruindo o gargalo e impossibilitando a mistura entre os dois). Anotou-se a massa final de resíduos restante na cápsula de porcelana.

Tampou-se o frasco e, com o recipiente inclinado, realizou-se movimentos rotacionais com a finalidade de retirar bolhas de ar. Por fim, colocou-se o frasco em superfície plana e se realizou a leitura do volume final do sistema, anotando o valor obtido.

De posse dos valores de massa e volume obtidos experimentalmente, foi possível calcular a massa específica por intermédio da Equação 3.1:

$$\rho = \frac{Mf - Mi}{Vf - Vi} \quad (3.1)$$

- em que:
- ρ : massa específica, em g/cm³;
 - Mf: massa final de resíduos, em g;
 - Mi: massa inicial de resíduos, em g;
 - Vf: volume final do conjunto, em mL;
 - Vi: volume inicial do conjunto, em mL.

Para o ensaio ser considerado válido, devem ser realizadas ao menos duas determinações, sendo que estas não podem diferir mais que 0,01 g/cm³. Uma vez obedecida essa condição, o resultado é a média aritmética de todas as determinações realizadas.

Assim, foram realizadas duas determinações para cada um dos resíduos em questão. Os resultados serão apresentados no tópico 4.1.3 desta pesquisa.

3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Para a realização dos ensaios de caracterização mecânica necessitou-se, anteriormente, da execução de traços de concreto com substituição parcial de agregado miúdo por resíduos plásticos e, posteriormente, da moldagem dos corpos de prova. Para isso, a seguir serão apresentados os materiais e os métodos utilizados a fim de atingir o objetivo geral desta pesquisa.

3.3.1 Materiais

Os materiais utilizados foram: cimento, areia, brita, água e resíduos plásticos, os quais foram descritos e caracterizados anteriormente nesta monografia – Cyrel®, PET e Pellets de sacolas plásticas. A seguir, apresentam-se os detalhes de cada um dos outros materiais utilizados.

3.3.1.1 Cimento

O cimento utilizado na execução dos traços e na moldagem dos corpos de prova foi o CP II – F-32 da marca ‘Supremo’, escolhido devido ao fato deste não possuir escória ou pozolana em sua composição, conforme descrito por Gonçalves (2017).

3.3.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia média quartzosa.

3.3.1.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado nos ensaios foi a brita 1.

3.3.1.4 Água

A água utilizada na execução dos traços é a água potável fornecida pela SANEPAR (Companhia de Saneamento do Paraná), a partir do sistema de abastecimento de água da cidade de Maringá-PR.

3.3.2 Dosagem dos traços de concreto

Os parâmetros de dosagem adotados seguem os prescritos por Gonçalves (2017), sendo eles:

- a) relação água/cimento, calculada em massa, menor que 0,60, conforme prescrito pela NBR 6118 (ABNT, 2007) para casos de concreto armado com classe de agressividade II;
- b) resistência à compressão acima de 25,0 MPa devido à exposição do concreto à uma classe de agressividade II, exposto pela NBR 6118 (ABNT, 2007);
- c) abatimento do tronco de cone de 70 ± 10 mm, buscando assim um concreto plástico, sem utilização de aditivos, como detalhado por Leite (2001) e Moretti (2014);
- d) desvio padrão de 4,0 MPa;
- e) condições de preparo: materiais são medidos em massa, conforme a NBR 12.655 (ABNT, 2006).

O primeiro traço em massa, chamado traço piloto, foi o traço utilizado anteriormente por Nunes (2009), com um consumo de cimento de $367,6 \text{ kg/ m}^3$ de concreto produzido. Após a execução deste traço, foram moldados 18 corpos de prova.

Após, tomando-se por referência o traço piloto, executou-se os outros 13 traços, realizando a substituição do agregado miúdo conforme a Tabela 3.1 a seguir. Todo o procedimento foi executado conforme prescrito pela NBR 5738:2015 Versão Corrigida:2016 (ABNT, 2016). Ainda na Tabela 3.1, apresentam-se também as dosagens dos traços (cimento: areia: brita: água: resíduo).

Tabela 3.1 – Cálculo dos traços unitários de concreto com resíduo sem compensação

ID	Traço			C	A	B1	a/c	Resíduo		
	PET	CYREL	PELLETS					PET	CYREL	PELLETS
T1	Piloto			1,000	2,060	2,940	0,555	-	-	-
T2		10%		1,000	1,854	2,940	0,555	-	0,206	-
T3	10%			1,000	1,854	2,940	0,555	0,206	-	-
T4			10%	1,000	1,854	2,940	0,555	-	-	0,206
T5		5%		1,000	1,957	2,940	0,555	-	0,103	-
T6	5%			1,000	1,957	2,940	0,555	0,103	-	-
T7			5%	1,000	1,957	2,940	0,555	-	-	0,103
T8	5%	10%		1,000	1,751	2,940	0,555	0,103	0,206	-
T9	5%		10%	1,000	1,751	2,940	0,555	0,103	-	0,206
T10	10%	5%		1,000	1,751	2,940	0,555	0,206	0,103	-
T11	10%		5%	1,000	1,751	2,940	0,555	0,206	-	0,103
T12		5%	10%	1,000	1,751	2,940	0,555	-	0,103	0,206
T13		10%	5%	1,000	1,751	2,940	0,555	-	0,206	0,103
T14	5%	5%	5%	1,000	1,751	2,940	0,555	0,103	0,103	0,103

Fonte: Autor (2020)

Vale salientar que, na dosagem e execução dos traços, não foi mantido constante o valor do abatimento e, deste modo, não houve ajustes no fator água/cimento. Além disso, nos traços em que houve substituição do agregado miúdo pelos resíduos plásticos, foi realizada a compensação do volume do material substituído, uma vez que a massa específica dos resíduos é inferior quando comparada com a massa específica da areia.

Caso a compensação não fosse realizada haveria um volume maior de cada resíduo plástico em seus respectivos traços, necessitando assim de uma quantidade maior de água para envolver todas as partículas e propiciar uma trabalhabilidade semelhante ao traço piloto. O método adotado também foi utilizado por outros pesquisadores (GONÇALVES, 2017; LEITE, 2001; MORETTI, 2014), baseando-se na Equação 3.2 para realizar a compensação e a correta substituição:

$$M_{Resíduos} = M_{Areia} \times \frac{\gamma_{Resíduo}}{\gamma_{Areia}} \quad (3.2)$$

em que: $M_{resíduos}$: massa do resíduo, em kg;

M_{areia} : massa da areia, em kg;

$\gamma_{Residuo}$: massa específica do resíduo, em g/cm³;

γ_{Areia} : massa específica da areia, em g/cm³.

Deste modo, apresenta-se na Tabela 3.2 as quantidades, em massa, após a compensação do volume de cada um dos materiais componentes dos quatorze traços estudados neste estudo.

Tabela 3.2 – Cálculo dos traços unitários de concreto com resíduo com compensação

Traço				C	A	B1	a/c	Resíduo		
ID	PET	CYREL	PELLETS					PET	CYREL	PELLETS
T1	Piloto			1,000	2,060	2,940	0,555	-	-	-
T2		10%		1,000	1,854	2,940	0,555	-	0,053	-
T3	10%			1,000	1,854	2,940	0,555	0,061	-	-
T4			10%	1,000	1,854	2,940	0,555	-	-	0,061
T5		15%		1,000	1,751	2,940	0,555	-	0,079	-
T6	15%			1,000	1,751	2,940	0,555	0,092	-	-
T7			15%	1,000	1,751	2,940	0,555	-	-	0,092
T8	5%	10%		1,000	1,751	2,940	0,555	0,031	0,053	-
T9	5%		10%	1,000	1,751	2,940	0,555	0,031	-	0,061
T10	10%	5%		1,000	1,751	2,940	0,555	0,061	0,026	-
T11	10%		5%	1,000	1,751	2,940	0,555	0,061	-	0,031
T12		5%	10%	1,000	1,751	2,940	0,555	-	0,026	0,061
T13		10%	5%	1,000	1,751	2,940	0,555	-	0,053	0,031
T14	5%	5%	5%	1,000	1,751	2,940	0,555	0,031	0,026	0,031

Fonte: Autor (2020)

A betoneira – cuja capacidade é de 320,0 litros – foi manuseada primeiramente pela adição da brita, seguida de água, cimento e a areia.

Antes de moldar os corpos de prova referentes a cada traço, foi determinado o abatimento do concreto, conforme prescrito pela ABNT NBR NM 67:1998, como mostrado na Figura 3.1. Os dados referentes ao ensaio de consistência estão contidos no Apêndice F e classificados conforme a ABNT NBR 8593:2015.

Figura 3.1 – Abatimento (Slump Test) do Traço Piloto.

Fonte: Marcantonio (2017)

Como citado anteriormente, a execução de moldagem e cura dos corpos de prova foi realizada conforme prescrito normativamente (ABNT, 2016). Com o intuito de facilitar a retirada do corpo de prova do molde, antes da moldagem foi aplicada uma camada de desmoldante na face interna. Com o auxílio de concha, haste metálica e colher de pedreiro, moldou-se os corpos de prova. Após cada traço, os corpos de prova foram etiquetados, como mostrado na Figura 3.2, referente ao traço piloto.

Figura 3.2 – Corpos de prova moldados

Fonte: Autor (2020)

Após a moldagem dos corpos de prova – cujas dimensões finais foram de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura – estes permaneceram nos moldes por 24h, para depois serem desmoldados e arranjados em câmara úmida para uma cura adequada, onde permaneceram até a idade para execução dos ensaios de caracterização mecânica (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Corpos de Prova acondicionados em câmara úmida



Fonte: Autor (2020)

3.3.3 Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos

O ensaio de Resistência à Compressão Simples foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção (Bloco P02) da Universidade Estadual de Maringá. Após a execução dos traços e moldagem dos corpos de prova, estes permaneceram em câmara úmida por um período de 28 dias. Completado esse período de cura, as amostras foram ensaiadas.

Para garantir que a distribuição de tensões fosse uniforme na superfície do corpo de prova e o ensaio fosse realizado de modo correto, todos os corpos de prova passaram por um processo de retífica, com o intuito de regularizar a superfície e remover quaisquer irregularidades.

Após a retificação, os corpos de prova foram posicionados na prensa hidráulica da marca Emic, modelo PCE100C, e ensaiados. Após a ruptura de cada corpo de prova, anotou-se

a carga de ruptura mostrada pela prensa, em tonelada-força. Os resultados referentes a este ensaio serão apresentados no item 4.2.1 deste trabalho.

3.3.4 Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção (Bloco P02) da Universidade Estadual de Maringá. Completado o período de cura supracitado, as amostras foram ensaiadas.

Para este ensaio em questão, não foi necessário o processo de retífica dos corpos de prova, visto que as tensões são aplicadas diametralmente com auxílio de um suporte, conforme ilustrado na Figura 3.4 a seguir.

Figura 3.4 – Montagem do ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Autor (2021)

Conforme a figura, com os corpos de prova posicionados na mesma prensa hidráulica do ensaio anterior, prosseguiu-se com o ensaio. Após a ruptura de cada corpo de prova, anotou-se a carga de ruptura mostrada pela prensa, em tonelada-força. Os resultados referentes a este ensaio serão apresentados no item 4.2.2 deste trabalho.

3.3.5 Determinação dos Módulos Estáticos de Elasticidade e de Deformação à Compressão

O ensaio de Módulo Estáticos de Elasticidade e de Deformação à Compressão foi realizado no bloco P02 da Universidade Estadual de Maringá. Após a cura dos corpos de prova por um período de 28 dias em câmara úmida, deu-se início ao ensaio.

Para essa determinação, necessitou-se da retificação dos corpos de prova e, após isso, eles foram montados conforme a Figura 3.5 a seguir e posicionados conforme a Figura 3.6 na prensa hidráulica da marca Emic, modelo INSTRON GR044 23-600, e ensaiados.

Figura 3.5 – Montagem do corpo de prova para o ensaio



Fonte: Autor (2021)

Figura 3.6 – Prensa INSTRON pronta para execução do ensaio



Fonte: Autor (2021)

Após a montagem, o controle do ensaio é todo automatizado e realizado pela máquina conforme a normatização da NBR 8522 (ABNT, 2017), controlado pelo software Bluehill Universal. Os dados e relatórios foram exportados pelo software de controle da prensa e serão apresentados no item 4.2.3 deste trabalho.

3.3.6 Determinação do Módulo Dinâmico de Elasticidade

O ensaio de Módulo Dinâmico de Elasticidade foi realizado no bloco C67 da Universidade Estadual de Maringá. Após a cura dos corpos de prova por um período de 28 dias em câmara úmida, deu-se início ao ensaio.

Todo o método utilizado foi baseado na norma ASTM E 1876-01 (ASTM, 2005). Para início do ensaio, foi necessário conhecer a massa e medidas de diâmetro e altura (três medidas para maior precisão) dos corpos de prova. Deste modo, mediu-se todos com auxílio de um paquímetro, e se pesou todos em uma balança eletrônica.

Após, posicionou-se o corpo de prova no equipamento Sonelastic® conforme o esquema ilustrado na Figura 3.7 a seguir.

Figura 3.7 – Equipamento Sonelastic® com corpo de prova posicionado para ensaio.



Fonte: Autor (2021)

O módulo de elasticidade, também conhecido como Módulo de Young, foi ensaiado com base no modo de vibração longitudinal. Segundo Otani e Pereira (2015), com a vibração longitudinal do corpo de prova, o módulo de elasticidade calculado é considerado o equivalente dinâmico de um ensaio de compressão ou tração.

Em seguida, posicionou-se o microfone responsável por captar as vibrações emitidas pelo corpo de prova em sua face superior, distanciado de 2,0 a 3,0 cm. Inseriram-se os dados das dimensões e massa no programa e se excitou o corpo de prova, por meio de uma leve pancada mecânica na sua face inferior com auxílio de um pulsador manual.

Por fim, o software realizou os cálculos com base nas frequências naturais de vibração emitidas pelo corpo de prova de concreto, e dispôs os resultados em formato de planilha eletrônica.

Os dados e relatórios foram exportados pelo software de controle da prensa e serão apresentados no item 4.2.4 deste trabalho.

3.3.7 Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção (Bloco P02) da Universidade Estadual de Maringá. Após a execução dos traços e moldagem dos corpos de prova, estes permaneceram em câmara úmida por um período de 28 dias. Completado este período de cura, as amostras foram ensaiadas.

Tal ensaio baseou-se na norma ABNT NBR 9778:2005 versão corrigida 2:2009. Para a sua realização, utilizou-se os seguintes equipamentos:

- a) balança hidrostática com peso máximo de 4040 g e precisão de 0,01 g;
- b) estufa de esterilização e secagem;
- c) cesto de arame para imersão da amostra;
- d) recipiente adequado para imersão e fervura da amostra;
- e) fogareiro industrial;
- f) toalhas absorventes;
- g) termômetro.

Em relação a balança hidrostática, a norma requer uma sensibilidade a 0,025% da massa das amostras. As menores massas encontradas foram superiores a 2000 g, sendo que 0,025 % desse valor corresponde a 0,5 g. Desta forma, apesar da precisão da balança ser de 0,01 g, utilizou-se nos cálculos a precisão de uma casa decimal, realizando os arredondamentos necessários de acordo com a norma NBR 5891 (ABNT, 2014).

Primeiramente, três corpos de prova de cada um dos 14 traços foram transferidos da câmara úmida para a estufa – a qual estava ajustada na temperatura (105 ± 5) °C (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Secagem dos corpos de prova em estufa.



Fonte: Autor (2021)

Determinou-se a massa das amostras após permanência na estufa de 24 h, 48 h e 72 h, sendo a última medida tomada após resfriamento ao ar seco à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Em seguida, procedeu-se com a imersão das amostras em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ durante 72 h; sendo que, nas primeiras 4 h, o nível d'água foi mantido em 1/3 do volume total do corpo de prova, nas seguintes 4h, em 2/3 e completamente imersos nas 64 h restantes – conforme Figura 3.9.

Figura 3.9 – Imersão das amostras em água



Fonte: Autor (2021)

Ao decorrer do tempo total, determinou-se as massas das amostras passadas 24 h, 48 h e 72 h de imersão, sempre efetuando as medições após enxugar-se a superfície das amostras com toalha absorvente.

Completa a etapa anterior, as amostras foram dispostas em um recipiente adequado para imersão e fervura e, após serem totalmente imersas em água, levou-se o conjunto progressivamente à ebulição com auxílio do fogareiro industrial (Figura 3.10).

Figura 3.10 – Fervura das amostras



Fonte: Autor (2021)

A ação da água quente durou 5 h e, posteriormente, aguardou-se o resfriamento do conjunto por cerca de 19 h, até a temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Após resfriadas, pesou-se as amostras após secagem com toalha absorvente.

Por último, as amostras foram pesadas imersas em água com auxílio do cesto de arame, conforme mostrado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Pesagem das amostras imersas em água.



Fonte: Autor (2021)

Os resultados referentes a esse ensaio serão apresentados no item 4.2.5 deste trabalho.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais (areia, brita e resíduos plásticos) e os testes feitos no concreto endurecido serão apresentados a seguir.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO E RESÍDUOS PLÁSTICOS

Relacionado a execução dos seguintes ensaios, seguem-se algumas informações importantes sobre as condições em que os experimentos foram executados:

- a) massa do recipiente metálico para pesagem: 123,0 g;
- b) temperatura ambiente: 20,0 °C.

A seguir, apresentar-se-ão os dados referentes a cada resíduo.

4.1.1 Granulometria

4.1.1.1 Areia

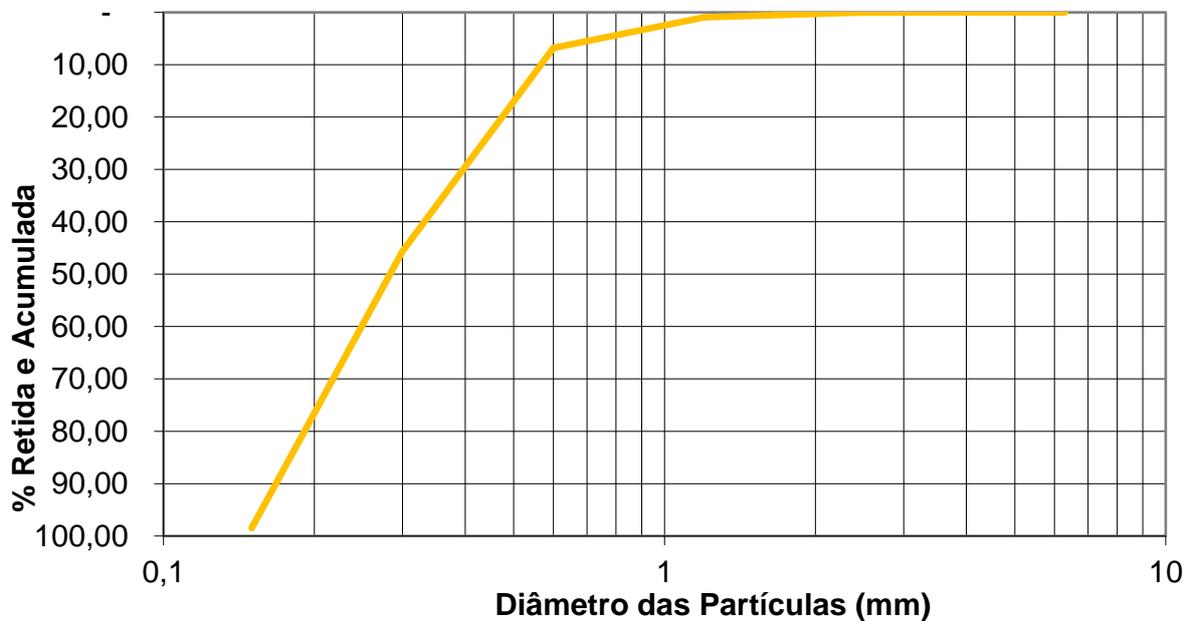
Estão apresentados, no Quadro 4.1, os dados do ensaio de granulometria da areia, abordando os valores de massa de material retido e suas respectivas porcentagens de material retido e retido acumulado. Além disso, expôs-se na Figura 4.1 a sua curva granulométrica, plotada com base nos dados do Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Ensaio de granulometria da areia média.

Material Ensaiado: AREIA					Data do ensaio: 20/11/2020		
Peneiras	Ensaio 01: Massa Inicial (g)		1.000,00	Ensaio 02: Massa Inicial (g)		1.000,00	Valores Médios de material retido e acumulado (%)
	Massa de material retido (g)	Porcentagem de material		Massa de material retido (g)	Porcentagem de material		
		Retido (%)	Retido Acumulado (%)		Retido (%)	Retido Acumulado (%)	
6,3 mm	0	-	-	0	-	-	-
4,76 mm	0	-	-	0	-	-	-
2,38 mm	0,87	0,09	0,09	0,44	0,04	0,04	0,07
1,18 mm	9,28	0,93	1,02	7,95	0,80	0,84	0,93
600 µm	60,16	6,02	7,04	57,37	5,74	6,58	6,81
300 µm	395,05	39,53	46,57	380,74	38,10	44,68	45,62
150 µm	520,11	52,05	98,62	536,41	53,68	98,36	98,49
Fundos	13,84	1,38	100,00	16,38	1,64	100,00	100,00
Total (g)	999,31	100	100	999,29	100,00	100,00	

Fonte: Autor (2020)

Figura 4.1 – Curva granulométrica da areia média.



Fonte: Autor (2020)

4.1.1.2 Brita

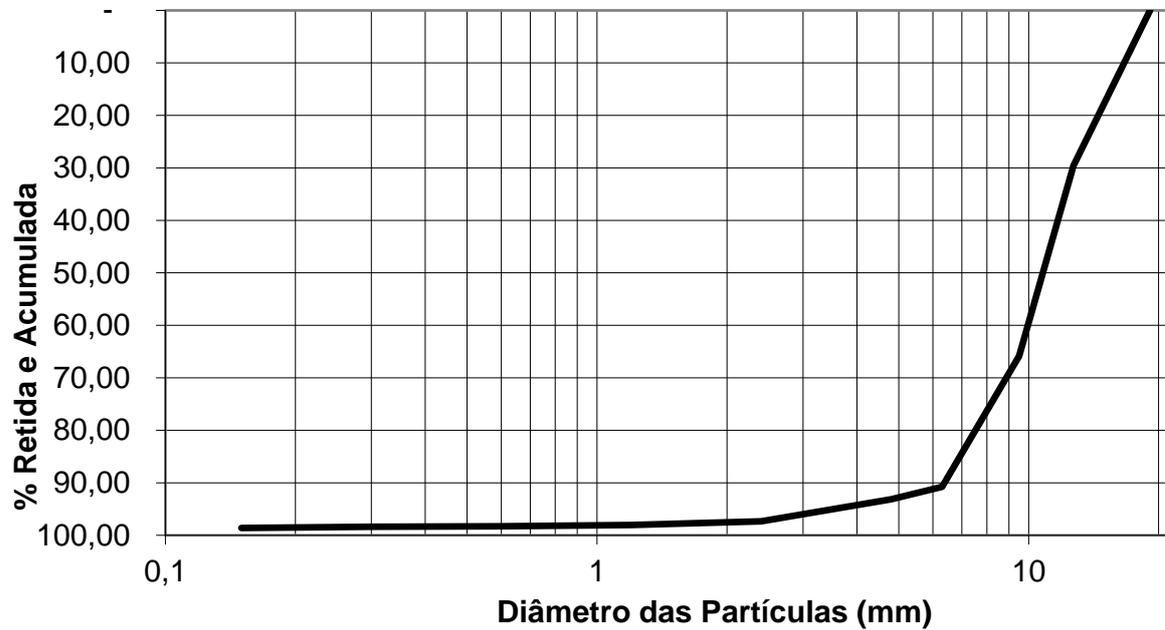
Apresentam-se, no Quadro 4.2, os dados do ensaio de granulometria da brita, abordando os valores de massa de material retido e suas respectivas porcentagens de material retido e retido acumulado. Além disso, expôs-se na Figura 4.2 a sua curva granulométrica, plotada com base nos dados do Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Ensaio de granulometria da brita.

Material Ensaiado: BRITA					Data do ensaio: 20/11/2020		
Peneiras	Ensaio 01: Massa Inicial (g)		1.000,00	Ensaio 02: Massa Inicial (g)		1.000,00	Valores Médios de material retido e acumulado (%)
	Massa de material retido (g)	Porcentagem de material		Massa de material retido (g)	Porcentagem de material		
		Retido (%)	Retido Acumulado (%)		Retido (%)	Retido Acumulado (%)	
19,1	0,00	-	-	0,00	-	-	0,00
12,7	296,73	29,70	29,70	294,42	29,47	29,47	29,58
9,5	350,07	35,04	64,73	374,91	37,52	66,99	65,86
6,3	232,44	23,26	88,00	265,37	26,56	93,55	90,77
4,76	24,89	2,49	90,49	22,38	2,24	95,79	93,14
2,38	51,46	5,15	95,64	32,57	3,26	99,05	97,34
1,18	11,64	1,16	96,80	2,41	0,24	99,29	98,05
600	4,38	0,44	97,24	0,41	0,04	99,33	98,29
300	1,90	0,19	97,43	0,20	0,02	99,35	98,39
150	3,82	0,38	97,81	0,53	0,05	99,40	98,61
Fundos	21,84	2,19	100,00	5,95	0,60	100,00	100,00
Total (g)	999,17	100	100	999,15	100	100,00	

Fonte: Autor (2020)

Figura 4.2 – Curva granulométrica da brita.



Fonte: Autor (2020)

4.1.1.3 Cyrel®

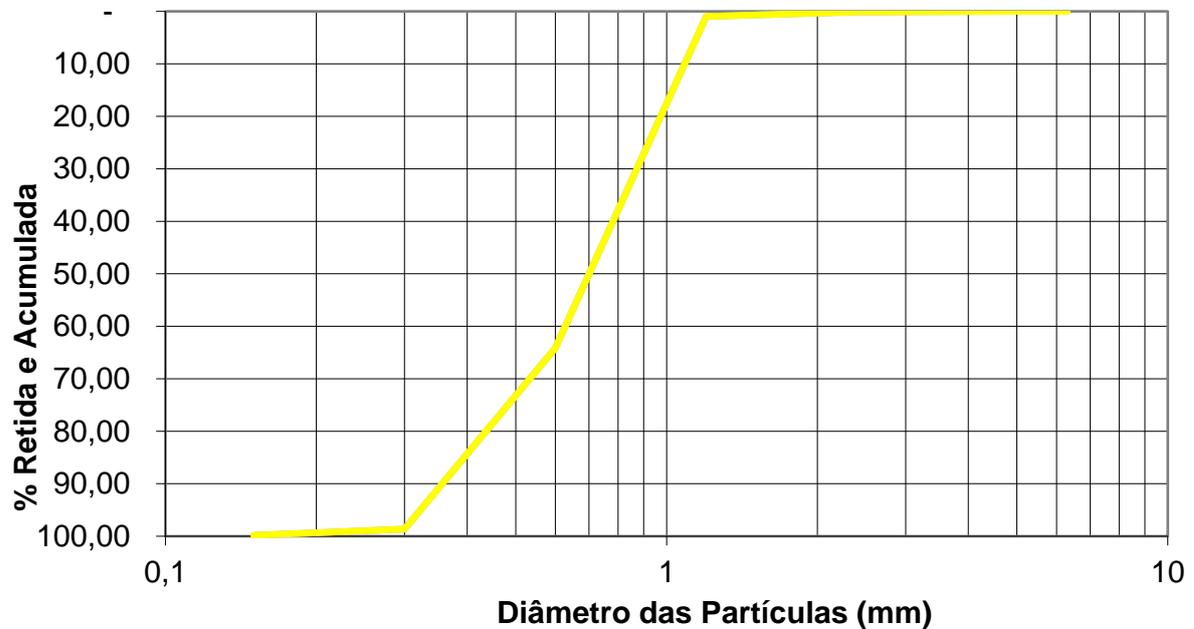
Estão apresentados, no Quadro 4.3, os dados do ensaio de granulometria do Cyrel®, abordando os valores de massa de material retido e suas respectivas porcentagens de material retido e retido acumulado. Além disso, expôs-se na Figura 4.3 a sua curva granulométrica, plotada com base nos dados do Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Ensaio de granulometria do Cyrel®.

Material Ensaiado: CYREL®					Data do ensaio: 12/11/2020		
Peneiras	Ensaio 01: Massa Inicial (g)		1.000,00	Ensaio 02: Massa Inicial (g)		1.000,00	Valores Médios de material retido e acumulado (%)
	Massa de material retido (g)	Porcentagem de material		Massa de material retido (g)	Porcentagem de material		
		Retido (%)	Retido Acumulado (%)		Retido (%)	Retido Acumulado (%)	
6,3 mm	0	-	-	0	-	-	-
4,76 mm	0	-	-	0	-	-	-
2,38 mm	0,7	0,14	0,14	0,31	0,06	0,06	0,10
1,18 mm	7,32	1,46	1,61	1,25	0,25	0,31	0,96
600 µm	325,04	65,05	66,65	306,45	61,30	61,61	64,13
300 µm	158,32	31,68	98,34	186,65	37,33	98,94	98,64
150 µm	6,85	1,37	99,71	5,02	1,00	99,95	99,83
Fundos	1,45	0,29	100,00	0,26	0,05	100,00	100,00
Total (g)	499,68	100	100	499,94	100,00	100,00	

Fonte: Autor (2020)

Figura 4.3 – Curva granulométrica do Cyrel®.



Fonte: Autor (2020)

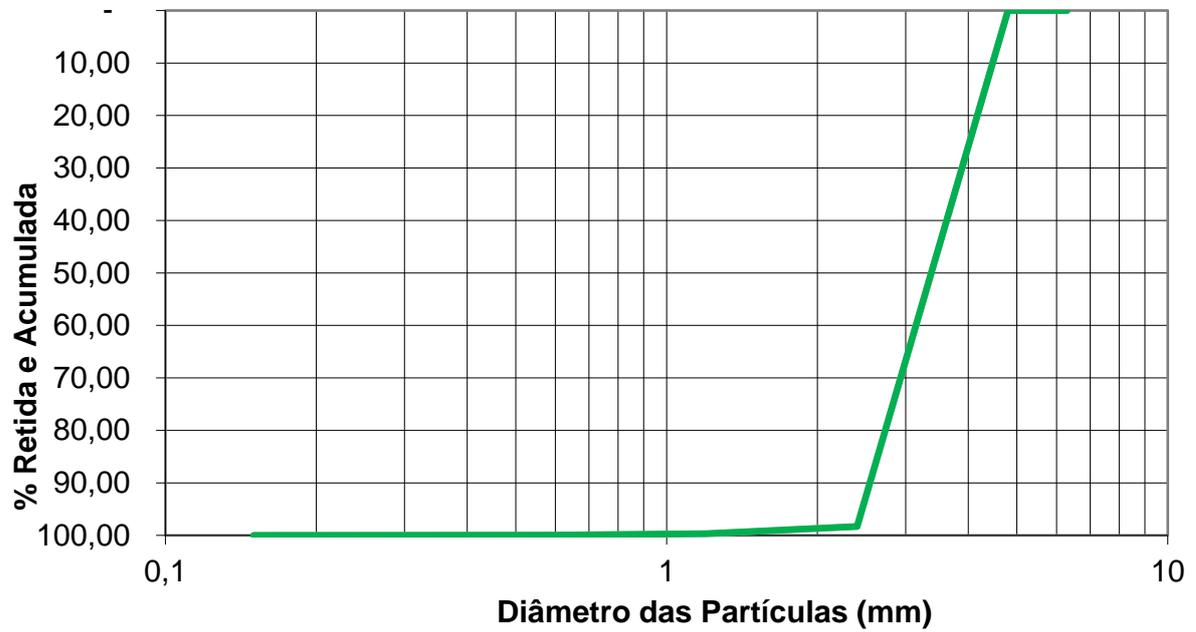
4.1.1.4 Pellets

Estão apresentados, no Quadro 4.4, os dados do ensaio de granulometria dos Pellets, abordando os valores de massa de material retido e suas respectivas porcentagens de material retido e retido acumulado. Além disso, expôs-se na Figura 4.4 a sua curva granulométrica, plotada com base nos dados do Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Ensaio de granulometria dos Pellets.

Material Ensaiado: PELLETS					Data do ensaio: 12/11/2020		
Peneiras	Ensaio 01: Massa Inicial (g)		1.000,00	Ensaio 02: Massa Inicial (g)		1.000,00	Valores Médios de material retido e acumulado (%)
	Massa de material retido (g)	Porcentagem de material		Massa de material retido (g)	Porcentagem de material		
		Retido (%)	Retido Acumulado (%)		Retido (%)	Retido Acumulado (%)	
6,3 mm	0	-	-	0	-	-	-
4,76 mm	0	-	-	0	-	-	-
2,38 mm	489,76	97,95	97,95	493,23	98,65	98,65	98,30
1,18 mm	8,36	1,67	99,62	5,5	1,10	99,75	99,69
600 µm	1,54	0,31	99,93	1,05	0,21	99,96	99,94
300 µm	0,23	0,05	99,98	0,09	0,02	99,98	99,98
150 µm	0,11	0,02	100,00	0,09	0,02	99,99	100,00
Fundos	0	-	100,00	0,03	0,01	100,00	100,00
Total (g)	500	100	100	499,99	100,00	100,00	

Fonte: Autor (2020)

Figura 4.4 – Curva granulométrica dos Pellets.

Fonte: Autor (2020)

4.1.1.5 PET

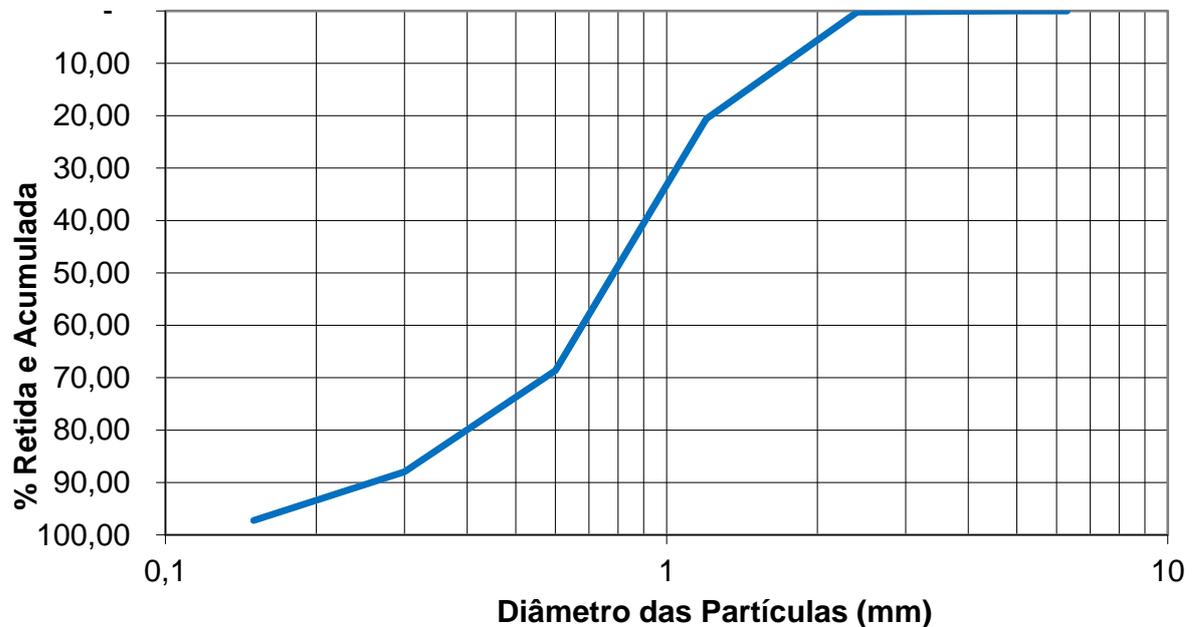
Estão apresentados, no Quadro 4.5, os dados do ensaio de granulometria do PET, abordando os valores de massa de material retido e suas respectivas porcentagens de material retido e retido acumulado. Além disso, expôs-se na Figura 4.5 a sua curva granulométrica, plotada com base nos dados do Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Ensaio de granulometria do PET.

Material Ensaiado: PET					Data do ensaio: 12/11/2020		
Peneiras	Ensaio 01: Massa Inicial (g)		1.000,00	Ensaio 02: Massa Inicial (g)		1.000,00	Valores Médios de material retido e acumulado (%)
	Massa de material retido (g)	Porcentagem de material		Massa de material retido (g)	Porcentagem de material		
		Retido (%)	Retido Acumulado (%)		Retido (%)	Retido Acumulado (%)	
6,3 mm	0	-	-	0	-	-	-
4,76 mm	0,1	0,02	0,02	0,05	0,01	0,01	0,02
2,38 mm	0,99	0,20	0,22	1,01	0,20	0,21	0,22
1,18 mm	103,36	20,68	20,90	100,45	20,09	20,30	20,60
600 µm	240,48	48,11	69,01	239,87	47,98	68,28	68,64
300 µm	95,34	19,07	88,08	97,67	19,53	87,81	87,95
150 µm	45,67	9,14	97,22	47,28	9,46	97,27	97,25
Fundos	13,89	2,78	100,00	13,65	2,73	100,00	100,00
Total (g)	499,83	100	100	499,98	100,00	100,00	

Fonte: Autor (2020)

Figura 4.5 – Curva granulométrica do PET.



Fonte: Autor (2020)

4.1.1.6 Misturas de resíduos

Analisou-se também a granulometria resultante dos resíduos em cada mistura utilizada nos traços estudados nessa pesquisa, conforme demonstrado no Quadro 4.6 a seguir.

Quadro 4.6 – Mistura de resíduos utilizada nos traços com substituição mista.

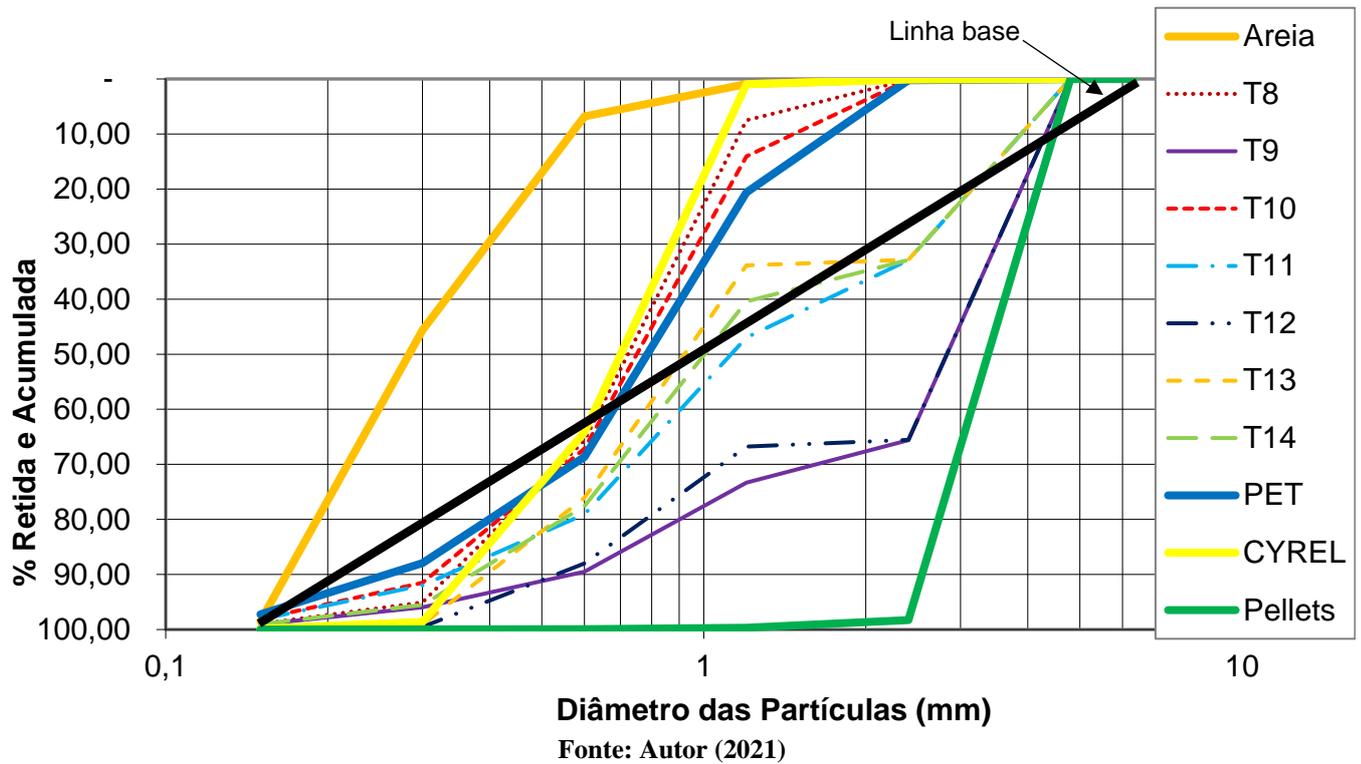
Traços			
Ref.	PET	CYREL	PELLETS
T1	Piloto		
T2		10%	
T3	10%		
T4			10%
T5		5%	
T6	5%		
T7			5%
T8	5%	10%	
T9	5%		10%
T10	10%	5%	
T11	10%		5%
T12		5%	10%
T13		10%	5%
T14	5%	5%	5%

Fonte: Autor (2021)

Nota-se que no traço T1, a granulometria dos agregados miúdos corresponde à granulometria da areia. Já nos traços T2 ao T7, ela corresponde à mistura entre os resíduos plásticos puros com a areia, nas porcentagens indicadas. Em contrapartida, nos traços T8 ao T14, a granulometria dos agregados miúdos é resultante da combinação entre resíduos adicionados à areia.

Desse modo, as curvas granulométricas dos traços com substituição mista de resíduos foram ilustradas na Figura 4.6 a seguir, utilizando as curvas anteriormente mostradas como base comparativa.

Figura 4.6 – Curva granulométrica dos resíduos em cada traço.



Percebe-se que os traços que promovem preenchimento de vazios de forma mais otimizada são os que se aproximam da linha base (uma reta), pois nesses casos a porcentagem retida e acumulada tende a ser distribuída de maneira mais uniforme entre as dimensões das peneiras. Desse modo, nota-se que os traços T11, T13 e T14 obtiveram um melhor preenchimento de vazios quando comparados aos outros traços, agindo como “filler” e certamente influenciando positivamente na resistência mecânica (BARBOSA *et al.*, 2019).

4.1.2 Módulo de finura

Pode-se observar, no Quadro 4.7, o módulo de finura de cada material e das misturas de resíduos utilizadas nessa pesquisa, calculados conforme ditado no item 2.4.1 desse trabalho.

Quadro 4.7 – Módulo de finura.

TRAÇOS				Módulo de finura	Classificação
Ref.	MISTURA				
1	Areia média			1,52	Muito Fina
2	PET			2,75	Média
3	CYREL			2,64	Média
4	PELLETS			4,98	Grossa
T8	5% PET	10% CYREL		2,67	Média
T9	5% PET		10% PELLETS	4,23	Grossa
T10	10% PET	5% CYREL		2,71	Média
T11	10% PET		5% PELLETS	3,49	Grossa
T12		5% CYREL	10% PELLETS	4,20	Grossa
T13		10% CYREL	5% PELLETS	3,42	Grossa
T14	5% PET	5% CYREL	5% PELLETS	3,45	Grossa

Fonte: Autor (2021)

Percebe-se que o módulo de finura da areia média tem o menor valor, sendo classificada como areia muito fina – com base no Quadro 3.1. Em comparação aos valores dos módulos de finura dos resíduos, nota-se que a areia tem módulo de finura menor devido a menor massa retida na peneira de diâmetro 600 μm .

Além disso, pode-se constatar que a adição de pellets - mesmo que em pouca porcentagem, devido a seu elevado valor de módulo de finura, promove um elevado aumento desse valor nas misturas.

4.1.3 Massa específica

No Quadro 4.8 a seguir, observa-se os dados do ensaio de massa específica da areia pelo método do frasco volumétrico de Le Chatelier. Vale ressaltar que o ensaio foi realizado em sala de ensaio com temperatura constante de 21 °C e os dados foram obtidos com auxílio da Equação 2.1.

Quadro 4.8 – Massa específica da areia pelo método de Le Chatelier.

Ensaio de massa específica - frasco volumétrico de Le Chatelier (NM 23:2000)		
Material	AREIA	
	Det. 01	Det. 02
Volume inicial (mL)	0,60	0,60
Volume final (mL)	22,00	20,20
Varição de Volume (mL)	21,40	19,60
Massa inicial (g)	386,35	386,35
Massa final (g)	442,95	438,37
Massa de resíduo (g)	56,60	52,02
Densidade (g/cm ³)	2,645	2,654
Diferença (< 0,01 g/cm ³)	0,009	
Densidade média (g/cm ³)	2,65	
Erro relativo (%)	0,35%	

Fonte: Autor (2021)

No Quadro 4.9 a seguir, observa-se os dados do ensaio de massa específica dos agregados convencionais com a utilização do picnômetro, o qual foi feito para constatar-se a massa específica do agregado graúdo e confirmar o valor obtido no primeiro ensaio para o agregado miúdo. Enfatiza-se que o processo foi realizado em sala de ensaio com temperatura constante de 21 °C e os dados calculados conforme prescrito na norma DNER-ME 084/95 (DNER, 1995).

Quadro 4.9 – Massa específica dos agregados convencionais pelo método do picnômetro.

Ensaio de massa específica - picnômetro (DNER-ME 084/95)				
Material	AREIA		BRITA	
	Det. 01	Det. 02	Det. 01	Det. 02
Massa do picnômetro (g) [a]	368,89	410,47	372,74	370,24
Massa do picnômetro + amostra (g) [b]	783,03	864,19	796,91	847,59
Massa do picnômetro + amostra + água (g) [c]	1128,55	1183,28	1156,77	1184,39
Massa do picnômetro + água (g) [d]	871,46	902,83	880,43	871,79
Densidade (g/cm ³)	2,637	2,619	2,869	2,897
Densidade média (g/cm ³)	2,63		2,88	
Diferença da média (< 0,02 g/cm ³)	0,01		0,01	
Erro relativo (%)	0,70%		0,98%	

Fonte: Autor (2021)

Já no Quadro 4.10 a seguir, são demonstrados os dados do ensaio de massa específica dos resíduos plásticos pelo método do frasco volumétrico de Le Chatelier. Enfatiza-se que o ensaio foi realizado em sala de ensaio com temperatura constante de 21 °C e os dados foram obtidos com auxílio da Equação 3.1.

Quadro 4.10 – Massa específica dos resíduos plásticos pelo método de Le Chatelier.

Ensaio de massa específica por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier						
Material	PET		Pellets		Cyrel	
	Det. 01	Det. 02	Det. 01	Det. 02	Det. 01	Det. 02
Volume inicial (mL)	0,50	0,90	0,90	1,00	0,30	0,40
Volume final (mL)	8,00	10,40	23,90	22,70	20,50	15,50
Varição de Volume (mL)	7,50	9,50	23,00	21,70	20,20	15,10
Massa inicial (g)	386,20	386,68	386,72	386,78	386,11	386,49
Massa final (g)	392,12	394,21	404,80	403,95	399,75	396,72
Massa de resíduo (g)	5,92	7,53	18,08	17,17	13,64	10,23
Densidade (g/cm ³)	0,789	0,793	0,786	0,791	0,675	0,677
Diferença (< 0,01 g/cm ³)	0,003		0,005		0,002	
Densidade média (g/cm ³)	0,79		0,79		0,68	
Erro relativo (%)	0,42%		0,66%		0,33%	

Fonte: Autor (2021)

Desse modo, pode-se apresentar a Tabela 4.1 a seguir, contendo o resumo das massas específicas dos agregados utilizados na pesquisa.

Tabela 4.1 – Massa específica dos agregados.

Material	Massa específica (g/cm ³)
Areia	2,65
PET	0,79
Cyrel®	0,68
Pellets	0,79
Brita	2,88

Fonte: Autor (2021)

4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS TRAÇOS DE CONCRETO

A seguir, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização mecânica dos traços de concreto endurecido. No fim desse trabalho, nos apêndices, encontram-se os dados detalhados recolhidos nos respectivos ensaios.

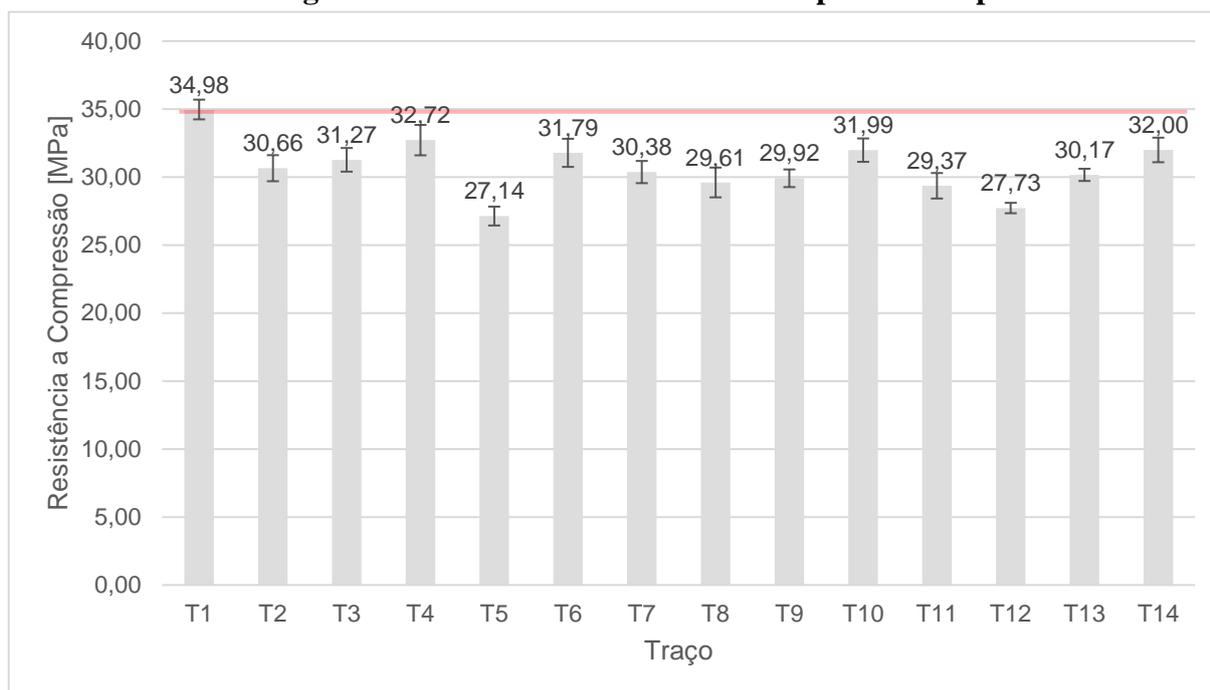
4.2.1 Resistência à compressão simples

Na Tabela 4.2 a seguir, observa-se os dados resumidos do ensaio de resistência à compressão simples e na Figura 4.7, dispõe-se de um gráfico para auxílio da análise desses dados. No Apêndice A encontram-se os dados detalhados desse ensaio, incluindo a Equação 1 utilizada para calibração da prensa. O cálculo das tensões foi realizado com auxílio da Equação 2.2.

Tabela 4.2 – Dados de resistência à compressão simples.

Traço	Mistura			Tensão Resistente Média (MPa)	Desvio padrão
	PET	CYREL	PELLETS		
T1	Piloto			34,98	0,73
T2	-	10%	-	30,66	0,96
T3	10%	-	-	31,27	0,87
T4	-	-	10%	32,72	1,12
T5	-	15%	-	27,14	0,70
T6	15%	-	-	31,79	1,03
T7	-	-	15%	30,38	0,82
T8	5%	10%	-	29,61	1,09
T9	5%	-	10%	29,92	0,65
T10	10%	5%	-	31,99	0,86
T11	10%	-	5%	29,37	0,94
T12	-	5%	10%	27,73	0,38
T13	-	10%	5%	30,17	0,45
T14	5%	5%	5%	32,00	0,90

Fonte: Autor (2021)

Figura 4.7 – Dados de resistência à compressão simples.

Fonte: Autor (2021)

Nota-se que, corroborando com os resultados anteriores de Moraz (2018) e Marcantonio (2017), os traços com 10% em volume de substituição de resíduos plásticos obtiveram ótimos resultados de resistência à compressão, assim como o traço de PET obteve resultados muito satisfatórios mesmo com um teor de 15% de substituição.

Entretanto, percebeu-se que o traço em que foram efetuadas misturas de resíduos obteve os melhores resultados de resistência à compressão entre os com teor de 15% de substituição em volume, evidenciando a importância da granulometria e efeito “filler” gerado.

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 4.3 em sequência, ilustram-se os dados resumidos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. No Apêndice B encontram-se os dados detalhados desse ensaio, incluindo a Equação 2 utilizada para calibração da prensa. O cálculo das tensões foi realizado com auxílio da Equação 2.3.

Tabela 4.3 – Dados de resistência à tração por compressão diametral.

Traço	Mistura			Tensão Resistente Média (MPa)	Desvio padrão
	PET	CYREL	PELLETS		
T1	Piloto			2,63	0,18
T2	-	10%	-	2,29	0,15
T3	10%	-	-	2,06	0,08
T4	-	-	10%	1,99	0,24
T5	-	15%	-	1,67	0,09
T6	15%	-	-	1,98	0,11
T7	-	-	15%	1,98	0,21
T8	5%	10%	-	2,07	0,27
T9	5%	-	10%	2,08	0,38
T10	10%	5%	-	2,10	0,29
T11	10%	-	5%	1,79	0,13
T12	-	5%	10%	2,01	0,31
T13	-	10%	5%	1,97	0,27
T14	5%	5%	5%	2,06	0,27

Fonte: Autor (2021)

Na Tabela 4.4 a seguir, foram calculadas as razões entre as tensões de tração por compressão diametral e compressão simples, para avaliar se ambas as características seguem o mesmo critério de alteração de acordo com as misturas utilizadas.

Tabela 4.4 – Razão entre tensões de tração e de compressão.

Traço	Mistura			Tensão Resistente Compressão (MPa)	Tensão Resistente Tração (MPa)	Razão Tração / Compressão	Diferença (%)
	PET	CYREL	PELLETS				
T1	Piloto			34,98	2,63	0,0753	-
T2	-	10%	-	30,66	2,29	0,0748	-0,6%
T3	10%	-	-	31,27	2,06	0,0659	-12,4%
T4	-	-	10%	32,72	1,99	0,0609	-19,1%
T5	-	15%	-	27,14	1,67	0,0616	-18,2%
T6	15%	-	-	31,79	1,98	0,0624	-17,1%
T7	-	-	15%	30,38	1,98	0,0653	-13,2%
T8	5%	10%	-	29,61	2,07	0,0699	-7,2%
T9	5%	-	10%	29,92	2,08	0,0696	-7,5%
T10	10%	5%	-	31,99	2,10	0,0655	-13,0%
T11	10%	-	5%	29,37	1,79	0,0611	-18,9%
T12	-	5%	10%	27,73	2,01	0,0725	-3,8%
T13	-	10%	5%	30,17	1,97	0,0653	-13,3%
T14	5%	5%	5%	32,00	2,06	0,0644	-14,4%

Fonte: Autor (2021)

Percebe-se que as tensões de tração por compressão diametral e as de compressão simples seguem relativamente um critério parecido de influência, variando de forma semelhante conforme a adição de resíduos plásticos na composição dos seus traços.

Todavia, nos traços com maior índice de vazios (T8, T10 e T11), nota-se que essa razão é menor devido à resistência de tração naturalmente diminuir ao se aumentar a porosidade, seja da matriz, dos agregados ou da zona de transição das fases componentes do concreto (QUADROS, 2014).

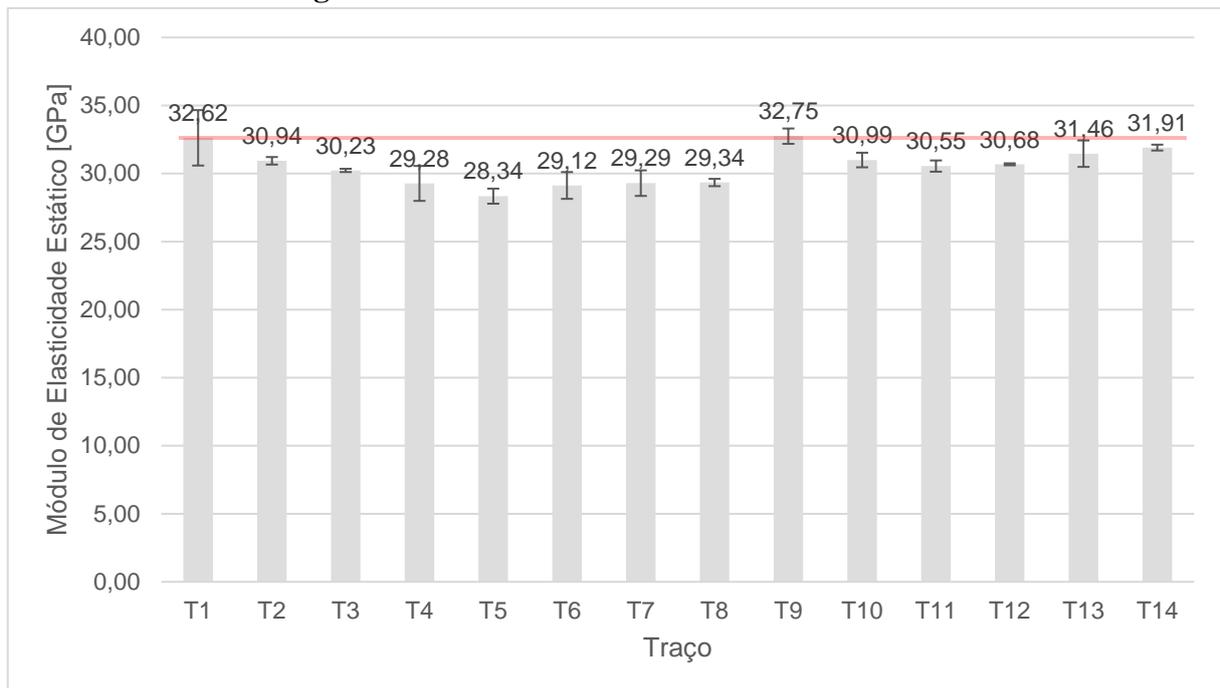
4.2.3 Módulo de elasticidade estático

Por intermédio das equações do tópico 2.4.5 do presente estudo e dos valores medidos dispostos no Apêndice C, foram obtidos os valores de absorção, índice de vazios e massa específica dos traços estudados, ilustrados na Tabela 4.5 a seguir. Já na Figura 4.8, dispõe-se de um gráfico para auxílio na análise desses dados.

Tabela 4.5 – Dados de módulo de elasticidade estático.

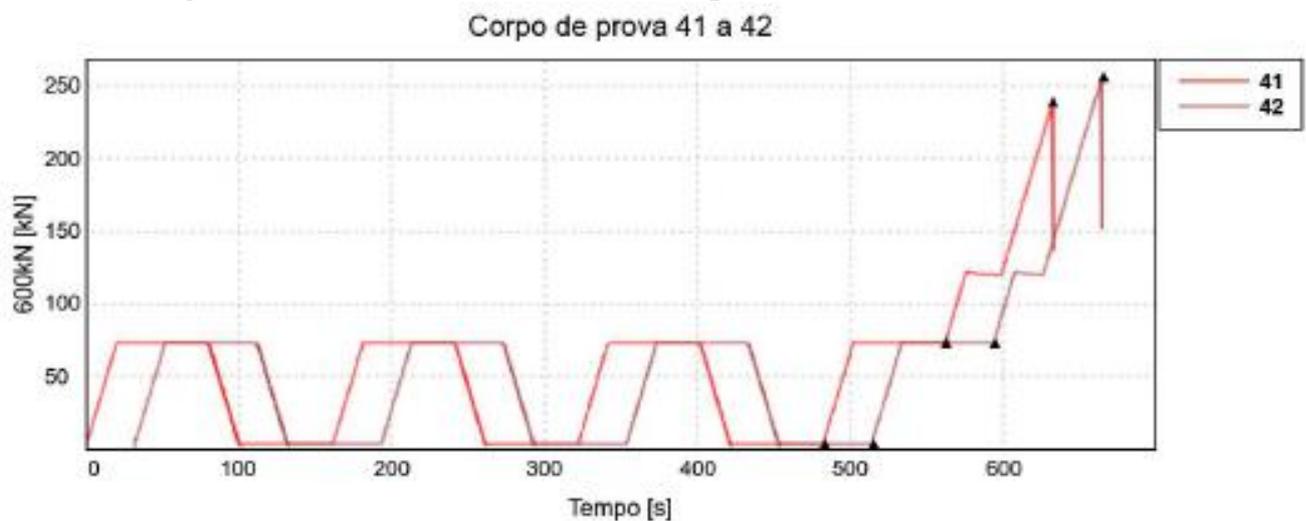
Traço	Mistura			Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio padrão (GPa)
	PET	CYREL	PELLETS		
T1	Piloto			32,62	2,04
T2	-	10%	-	30,94	0,28
T3	10%	-	-	30,23	0,12
T4	-	-	10%	29,28	1,28
T5	-	15%	-	28,34	0,55
T6	15%	-	-	29,12	0,98
T7	-	-	15%	29,29	0,94
T8	5%	10%	-	29,34	0,27
T9	5%	-	10%	32,75	0,56
T10	10%	5%	-	30,99	0,54
T11	10%	-	5%	30,55	0,41
T12	-	5%	10%	30,68	0,07
T13	-	10%	5%	31,46	0,97
T14	5%	5%	5%	31,91	0,22

Fonte: Autor (2021)

Figura 4.8 – Dados de módulo de elasticidade estático.

Fonte: Autor (2021)

É importante ressaltar que todos os dados foram coletados e processados pelo próprio software controlador da prensa, o Bluehill Universal, o qual foi ajustado conforme a normatização da NBR 8522 (ABNT, 2017). A seguir, na Figura 4.9, está ilustrado um exemplo de relatório gráfico emitido pelo software.

Figura 4.9 – Relatório de ensaio emitido pelo software Bluehill Universal.

Fonte: Autor (2021)

4.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico

A Tabela 4.6 a seguir ilustra os valores de módulo de elasticidade dinâmico dos traços de concreto estudados, baseando-se nos valores obtidos em ensaio – os quais podem ser visualizados no Apêndice D desse trabalho.

Tabela 4.6 – Dados de módulo de elasticidade dinâmico.

Traço	Mistura			Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio padrão (GPa)
	PET	CYREL	PELLETS		
T1	Piloto			36,12	1,04
T2	-	10%	-	33,76	0,15
T3	10%	-	-	33,71	0,89
T4	-	-	10%	34,52	1,33
T5	-	15%	-	31,65	1,15
T6	15%	-	-	33,20	0,17
T7	-	-	15%	34,45	0,82
T8	5%	10%	-	32,13	0,38
T9	5%	-	10%	33,66	1,26
T10	10%	5%	-	34,03	0,16
T11	10%	-	5%	33,06	1,02
T12	-	5%	10%	33,63	0,74
T13	-	10%	5%	33,31	0,66
T14	5%	5%	5%	32,80	0,87

Fonte: Autor (2021)

Vale lembrar que todos os dados foram coletados e processados pelo próprio software controlador do aparelho, o Sonelastic, o qual opera conforme a normatização da ASTM E 1876-01 (ASTM, 2005).

4.2.5 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

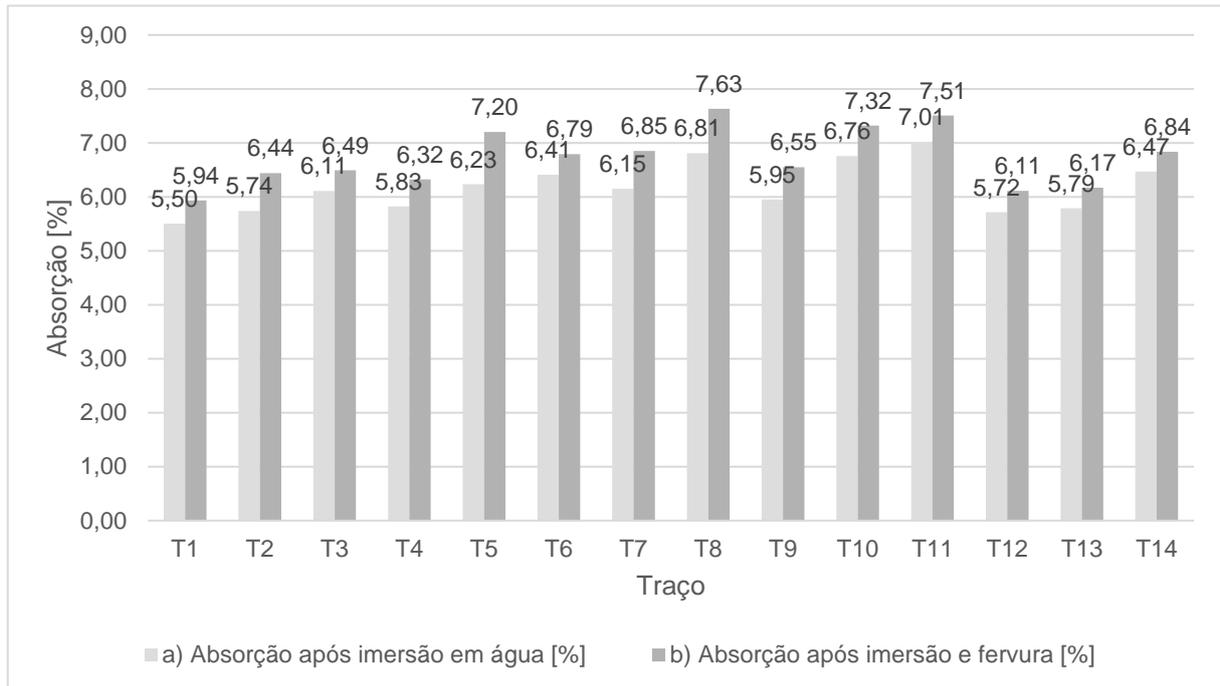
Com o auxílio das equações do tópico 2.4.7 do presente estudo e dos valores medidos dispostos no Apêndice E, obteve-se os valores de absorção, índice de vazios e massa específica dos traços estudados, ilustrados na Tabela 4.7 a seguir.

Tabela 4.7 – Dados de absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Traço	a) Absorção após imersão em água [%]	b) Absorção após imersão e fervura [%]	c) Índice de vazios após saturação em água [%]	d) Índice de vazios após saturação e fervura [%]	e) Massa específica da amostra seca [g/cm ³]	f) Massa específica da amostra após saturação [g/cm ³]	g) Massa específica da amostra após saturação e fervura [g/cm ³]	h) Massa específica real [g/cm ³]
T1	5,50	5,94	12,70	13,66	2,29	2,41	2,42	2,65
T2	5,74	6,44	12,86	14,38	2,21	2,33	2,35	2,57
T3	6,11	6,49	13,64	14,46	2,21	2,35	2,36	2,59
T4	5,83	6,32	13,11	14,20	2,23	2,35	2,37	2,59
T5	6,23	7,20	13,64	15,72	2,14	2,28	2,30	2,53
T6	6,41	6,79	14,22	15,05	2,20	2,34	2,35	2,59
T7	6,15	6,85	13,76	15,30	2,20	2,34	2,35	2,59
T8	6,81	7,63	14,86	16,61	2,14	2,29	2,31	2,56
T9	5,95	6,55	13,30	14,62	2,21	2,34	2,35	2,58
T10	6,76	7,32	14,91	16,12	2,18	2,33	2,34	2,59
T11	7,01	7,51	15,39	16,42	2,17	2,32	2,33	2,59
T12	5,72	6,11	12,72	13,55	2,21	2,33	2,34	2,55
T13	5,79	6,17	12,81	13,64	2,19	2,32	2,33	2,54
T14	6,47	6,84	14,28	15,06	2,19	2,33	2,34	2,57

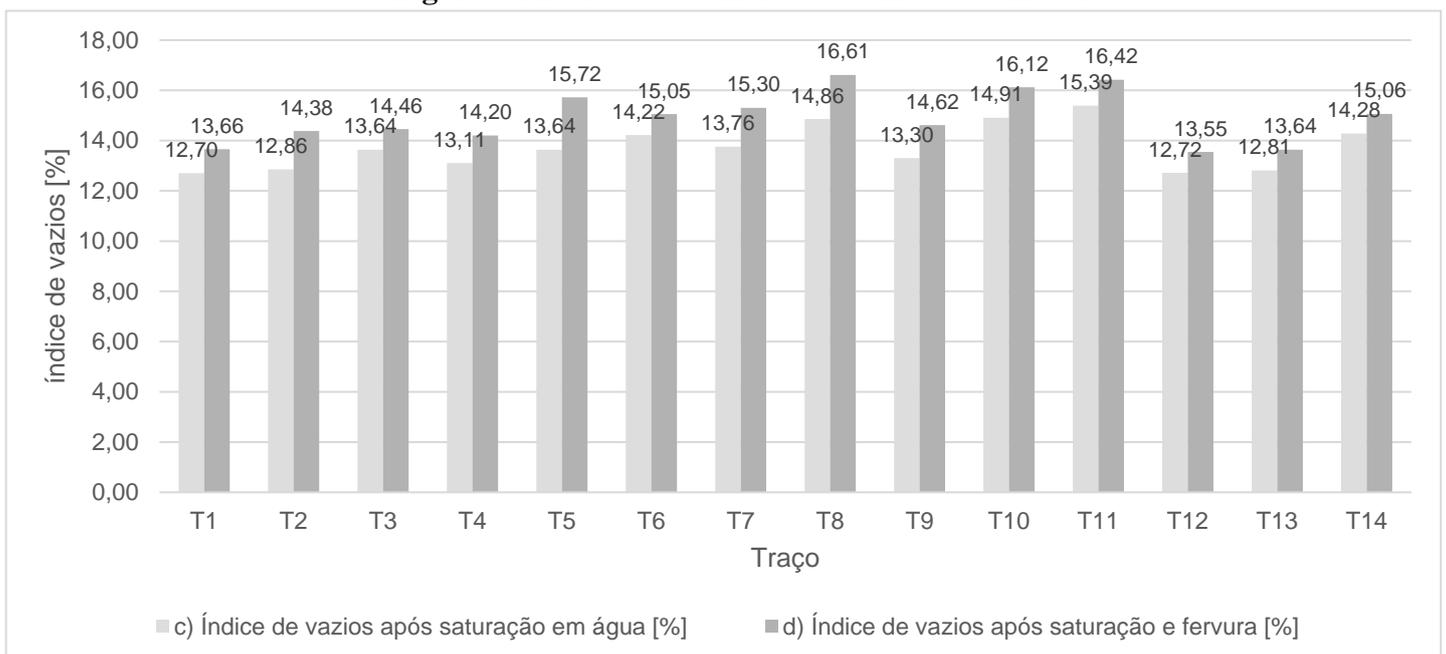
Fonte: Autor (2021)

Nas Figuras 4.10 a 4.14 a seguir encontram-se os dados de absorção de água, índice de vazios e massa específica do ensaio discretizados e arranjados graficamente, de forma a auxiliar na análise desses parâmetros de forma individual.

Figura 4.10 – Dados de absorção de água das amostras.

Fonte: Autor (2021)

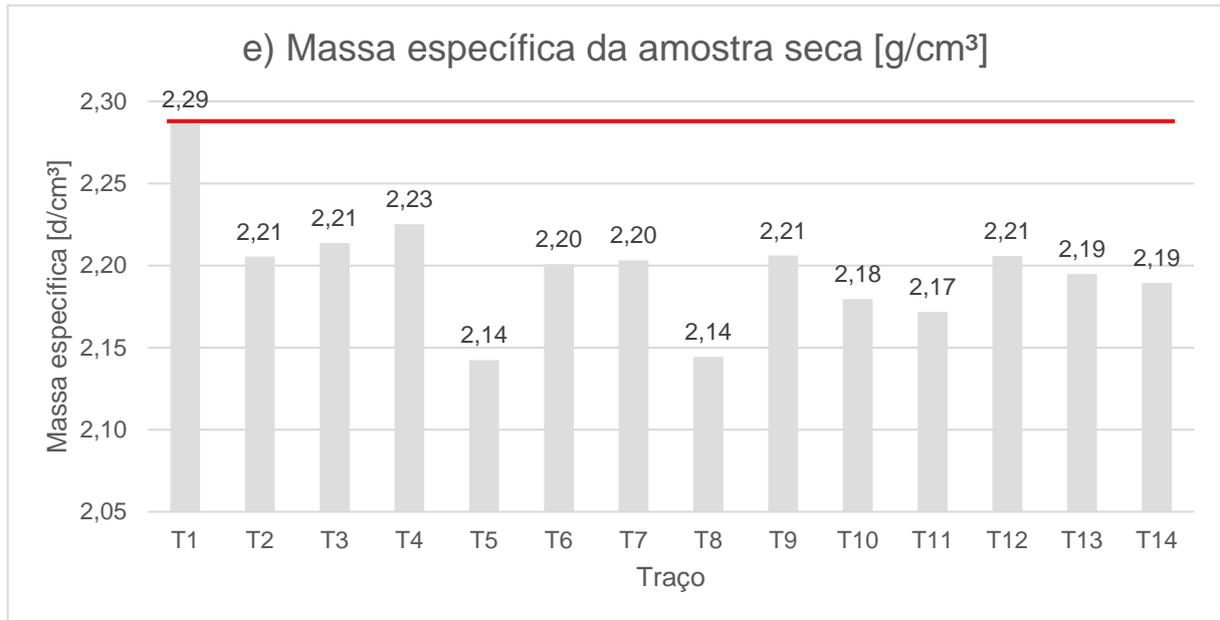
Nota-se que os valores de absorção de água dos traços com adição de resíduo foram todos maiores do que o traço piloto, isso devido ao fato dos vazios também aumentarem ao substituir um material com módulo de finura menor por um maior na mistura. A Figura 4.11 a seguir ilustra os dados de índice de vazios das amostras, evidenciando o aumento supracitado.

Figura 4.11 – Dados de índice de vazios das amostras.

Fonte: Autor (2021)

Com relação a massa específica, em todos os casos analisados foram obtidos valores menores do que o traço referência, como pode-se observar na Figura 4.12 a seguir, devido à densidade dos resíduos ser muito inferior à da areia.

Figura 4.12 – Dados de massa específica das amostras secas.



Fonte: Autor (2021)

No caso dos traços T5 e T8, por exemplo, pode-se observar que os valores de massa específica se aproximaram dos valores de um concreto leve, conforme classificação da ABNT NBR 8593:2015 ilustrada no Quadro 4.11 a seguir.

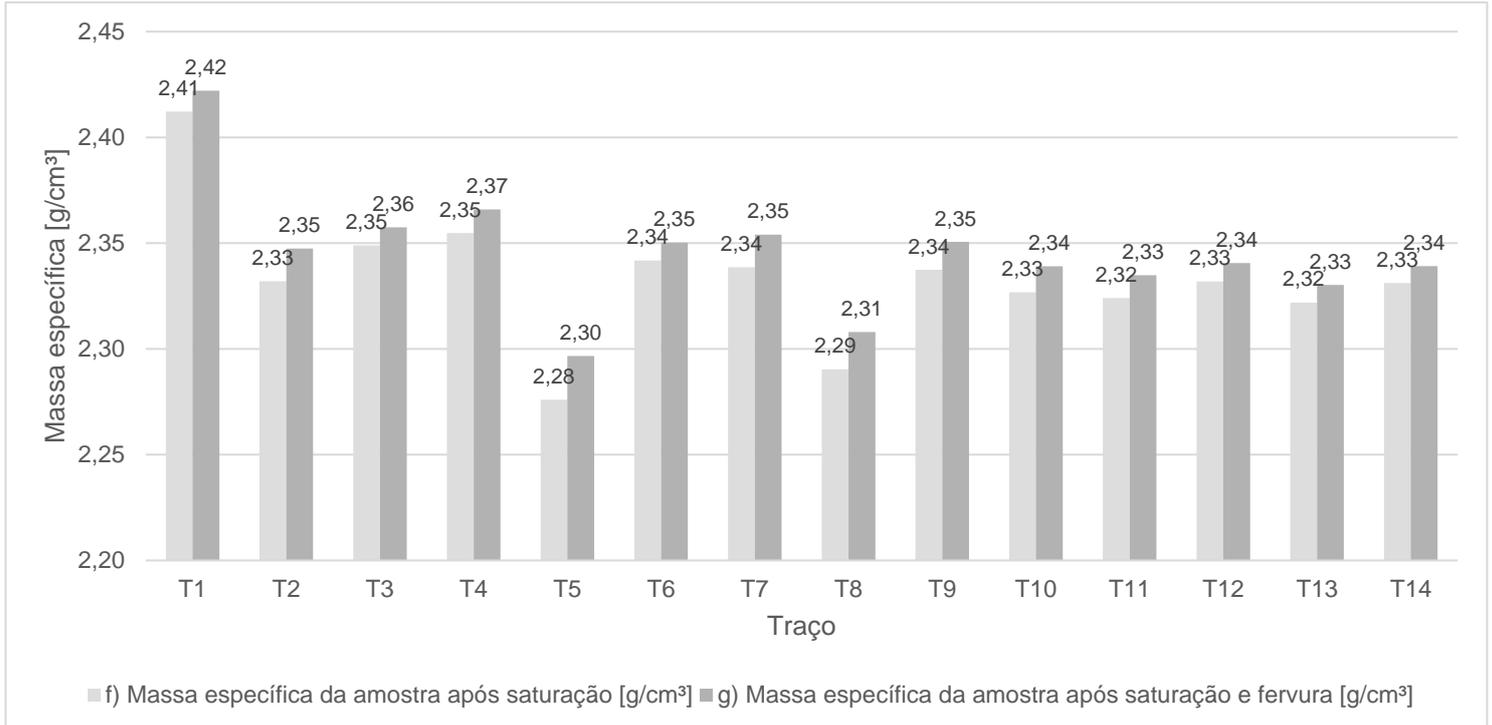
Quadro 4.11 – Classificação dos concretos conforme massa específica seca.

Concreto Normal [C]	Massa específica seca compreendida entre 2.000 kg/m ³ e 2.800 kg/m ³
Concreto Leve [CL]	Massa específica seca inferior a 2.000 kg/m ³
Concreto Pesado / Denso [CD]	Massa específica seca superior a 2.800 kg/m ³

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8593:2015 (ABNT, 2015)

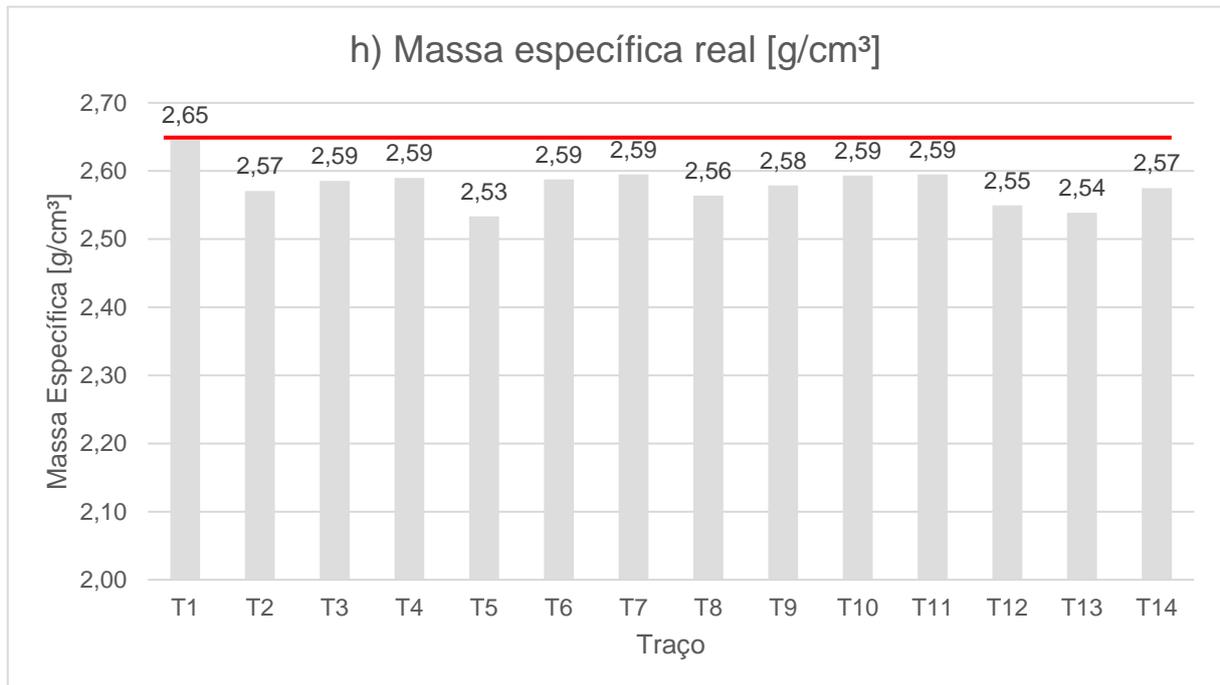
No tocante ao aumento de massa específica saturada após a fervura, nota-se que esse valor foi praticamente constante em todos os traços, como pode ser observado na Figura 4.13 a seguir. Isso demonstra que os resíduos pouco foram afetados pela temperatura de fervura, visto que todos tem temperatura de tratamento superior a usual de ebulição da água (100°C).

Figura 4.13 – Dados de massa específica das amostras após saturação em água.



Fonte: Autor (2021)

Por último, avaliou-se a massa específica real dos traços estudados, conforme ilustrado na Figura 4.14 a seguir. Em se tratando de aplicabilidade, na prática, esse fator é um dos mais importantes do concreto pois caracteriza o peso próprio da estrutura. Nas estruturas mais simples, em muitos casos, o carregamento preponderante acaba sendo o peso próprio, de forma que ao se produzir um concreto mais leve, as cargas de dimensionamento serão aliviadas e a estrutura final provavelmente será mais econômica.

Figura 4.14 – Dados de massa específica real das amostras.

Fonte: Autor (2021)

Percebe-se que os valores de massa específica real dos traços com adição de resíduos foram notavelmente inferiores ao do referencial, o que é benéfico a depender da situação, como foi citado anteriormente.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com relação ao ensaio de compressão simples, utilizou-se parâmetros da norma ACI 214-R (2011) conforme o Quadros 4.12 a seguir para aceitação dos resultados.

Quadro 4.12 – Parâmetros de controle do concreto – Desvio Padrão ($f_{ck} \leq 35$ MPa).

Classe de operação	Desvio padrão para diferentes padrões de controle [MPa]				
	Excelente	Muito bom	Bom	Razoável	Ruim
Ensaio em obra	< 2,8	2,8 - 3,4	3,4 - 4,1	4,1 - 4,8	> 4,8
Ensaio em laboratório	< 1,4	1,4 - 1,7	1,7 - 2,1	2,1 - 2,4	> 2,4

Fonte: Adaptado de ACI 214-R (2011)

Desse modo, comparando com o Quadro 4.12 anterior, nota-se na Tabela 4.8 a seguir que, considerando-se os ensaios como em laboratório, todos os valores de desvio padrão dos ensaios de resistência enquadrados na ACI 214-R encontram-se classificados como

“Excelentes”, exceto um valor de módulo de elasticidade marcado em negrito o qual foi enquadrado como “Bom”.

Tabela 4.8 – Desvio Padrão dos ensaios de resistência.

Traço	Mistura			Resistência à compressão simples [MPa]	Resistência à tração por compressão diametral [MPa]	Módulo de elasticidade estático [GPa]	Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]
	PET	CYREL	PELLETS				
T1	Piloto			0,73	0,18	2,04	1,04
T2	-	10%	-	0,96	0,15	0,28	0,15
T3	10%	-	-	0,87	0,08	0,12	0,89
T4	-	-	10%	1,12	0,24	1,28	1,33
T5	-	15%	-	0,70	0,09	0,55	1,15
T6	15%	-	-	1,03	0,11	0,98	0,17
T7	-	-	15%	0,82	0,21	0,94	0,82
T8	5%	10%	-	1,09	0,27	0,27	0,38
T9	5%	-	10%	0,65	0,38	0,56	1,26
T10	10%	5%	-	0,86	0,29	0,54	0,16
T11	10%	-	5%	0,94	0,13	0,41	1,02
T12	-	5%	10%	0,38	0,31	0,07	0,74
T13	-	10%	5%	0,45	0,27	0,97	0,66
T14	5%	5%	5%	0,90	0,27	0,22	0,87

Fonte: Autor (2021)

Portanto, percebe-se que os ensaios podem ser validados e os dados aceitos para utilização, de acordo com a análise estatística imposta pela ACI 214-R (ACI, 2011).

4.4 ANÁLISE SIMPLIFICADA DE VIABILIDADE DE CUSTOS

A análise de viabilidade de custos foi feita tomando como base os dados de preços e custos médios de materiais de construção atualizados pela tabela do SINAPI-PR, coletados em julho de 2021.

No Quadro 4.13 a seguir encontram-se os valores dos preços dos insumos utilizados para a análise.

Quadro 4.13 – Preço dos insumos utilizados para análise de viabilidade de custos.

Código	Insumos	Unidade	Preço [R\$]
00001379	Cimento CP-32 II	kg	0,56
00000370	Areia média	m ³	68,59
00004721	Brita n° 1	m ³	47,86
00038409	Concreto usinado C30 (p/ comparação)	m ³	365,91

Fonte: Adaptado da SINAPI-PR (2021)

A Equação 4.1 a seguir apresenta os cálculos de volume de cada material por metro cúbico de concreto para cada traço, utilizando a dosagem apresentada na Tabela 3.2, os dados de massa específica obtidos no tópico 4.1.3 e, inclusive, o valor médio de 3,11 g/cm³ de densidade para o cimento do tipo CP II – F-32.

$$Vt = \frac{1}{d_c} + \frac{1}{d_A} + \frac{1}{d_{B1}} + \frac{1}{d_{H2O}} = \frac{1}{3,11} + \frac{2,06}{2,65} + \frac{2,94}{2,88} + \frac{0,555}{1,00} = 2,675 \text{ cm}^3 \quad (4.1)$$

em que: Vt : volume por dosagem dos traços de acordo com a Tabela 3.2 (m³);

d_c : é a densidade do cimento utilizado nos traços (g/cm³);

d_A : é a densidade da areia utilizada nos traços (g/cm³);

d_{B1} : é a densidade da brita utilizada nos traços (g/cm³);

d_{H2O} : é a densidade da água utilizada nos traços (g/cm³);

Já a Equação 4.2 a seguir apresenta o cálculo do fator que será utilizado para se obter o volume ou massa de cada material por m³ de concreto.

$$F_p = \frac{1000}{2,675} = 373,83 \quad (4.2)$$

em que: F_p : fator proporção para obtenção do volume ou massa dos materiais por m³ de concreto;

Para o cálculo da massa, basta multiplicar o valor de dosagem utilizado na Tabela 3.2 pelo fator, já para o do volume, multiplica-se o valor de dosagem pelo fator e, em seguida, divide-se pela densidade do material, cálculos os quais foram demonstrados na Tabela 4.9 a seguir.

Tabela 4.9 – Cálculo de material por m³ de concreto para cada traço.

Traço	Mistura				Cimento (kg)	Areia (m ³)	Brita (m ³)
	PET	CYREL	PELLETS	TOTAL			
T1	Piloto			-	373,83	0,29	0,38
T2	-	10%	-	10%	373,83	0,26	0,38
T3	10%	-	-	10%	373,83	0,26	0,38
T4	-	-	10%	10%	373,83	0,26	0,38
T5	-	15%	-	15%	373,83	0,25	0,38
T6	15%	-	-	15%	373,83	0,25	0,38
T7	-	-	15%	15%	373,83	0,25	0,38
T8	5%	10%	-	15%	373,83	0,25	0,38
T9	5%	-	10%	15%	373,83	0,25	0,38
T10	10%	5%	-	15%	373,83	0,25	0,38
T11	10%	-	5%	15%	373,83	0,25	0,38
T12	-	5%	10%	15%	373,83	0,25	0,38
T13	-	10%	5%	15%	373,83	0,25	0,38
T14	5%	5%	5%	15%	373,83	0,25	0,38

Fonte: Autor (2021)

Com os dados da Tabela 4.9 e os valores do Quadro 4.13, foi possível calcular os custos de cada traço conforme segue na Tabela 4.10 a seguir.

Tabela 4.10 – Análise simplificada de viabilidade de custos.

Traço	Mistura			Cimento (R\$/m ³)	Areia (R\$/m ³)	Brita (R\$/m ³)	TOTAL (R\$/m ³)	Economia [%]
	PET	CYREL	PELLETS					
T1	Piloto			209,34	19,89	18,26	247,50	-
T2	-	10%	-	209,34	17,90	18,26	245,51	0,8%
T3	10%	-	-	209,34	17,90	18,26	245,51	0,8%
T4	-	-	10%	209,34	17,90	18,26	245,51	0,8%
T5	-	15%	-	209,34	16,90	18,26	244,51	1,2%
T6	15%	-	-	209,34	16,90	18,26	244,51	1,2%
T7	-	-	15%	209,34	16,90	18,26	244,51	1,2%
T8	5%	10%	-	209,34	16,90	18,26	244,51	1,2%
T9	5%	-	10%	209,34	16,90	18,26	244,51	1,2%
T10	10%	5%	-	209,34	16,90	18,26	244,51	1,2%
T11	10%	-	5%	209,34	16,90	18,26	244,51	1,2%
T12	-	5%	10%	209,34	16,90	18,26	244,51	1,2%
T13	-	10%	5%	209,34	16,90	18,26	244,51	1,2%
T14	5%	5%	5%	209,34	16,90	18,26	244,51	1,2%

Fonte: Autor (2021)

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

De acordo com as discussões e análise geral dos resultados expostas no capítulo 4 e concordando com os estudos anteriormente realizados pelo autor, percebeu-se o quanto esse assunto é promissor e a tendência é obter resultados passíveis de aplicação prática. Anteriormente, os resultados do autor (MORAZ, 2018) e de Marcantonio (2017) já indicaram que a substituição parcial de agregado miúdo pelos resíduos plásticos estudados em questão, nos teores de 5%, 10% e 15% em massa, é tecnicamente viável e, dessa forma, foram estudados diferentes teores e misturas desses resíduos em busca da alternativa mais eficiente em termos sustentáveis, mecânicos e econômicos.

Em se tratando da granulometria dos traços estudados, percebe-se que certas misturas promoveram um preenchimento de vazios muito satisfatório. Nos estudos anteriores, notou-se que o aumento do teor de cada resíduo puro foi diretamente proporcional ao decréscimo das características principais, como resistência a compressão e módulo de elasticidade. Já nos traços estudados com as misturas, foi possível substituir um maior teor de material ao passo que as características citadas se mantiveram sem grandes perdas.

Ao moldar-se os traços de concreto, pode-se notar que a trabalhabilidade foi substancialmente afetada pela adição dos resíduos. Conforme ilustrado no Apêndice F, a maioria dos traços obteve uma melhora de consistência, aumentando em até 55 mm no valor de abatimento conforme ABNT NBR NM 67:1998, o que é benéfico no ponto de vista da aplicação prática desses concretos em estruturas usuais.

Com relação a resistência à compressão simples, característica de notável importância nessa análise, percebeu-se que, em muitos traços, os valores de tensão resistente foram extremamente satisfatórios mesmo com um teor de substituição elevado. Por efeito das misturas, os resultados obtidos em alguns traços com teor total de 15% obtiveram resultados

próximos ou até melhores do que os com 10%, teor este o qual obteve os melhores resultados nas pesquisas anteriores.

Condizente a resistência à tração por compressão diametral, pode-se notar que, como todos os traços com adição de resíduos possuem maior índice de vazios, as suas resistências à tração foram levemente reduzidas comparadas ao traço de referência. De fato, assim como demonstrado por Quadros (2014), ao aumentarmos a porosidade do concreto – seja da matriz, dos agregados ou da zona de transição das fases componentes dele – têm-se uma área menor resistente à tração, o que está diretamente ligado a essa redução dessa tensão de tração resistente.

Pode-se observar, também, que os módulos de elasticidade, tanto estático quanto dinâmico, são pouco afetados pela adição dos resíduos e, por consequência, na mudança de parte dos agregados do concreto estudado. Corroborando com os estudos de Santos *et al.* (2017), o qual demonstra que a mudança de agregado promove pequenos efeito no módulo de elasticidade comparado a mudança de classe de resistência.

Analisando diretamente a absorção de água dos traços, nota-se que esses valores cresceram paralelamente o aumento do índice de vazios de cada mistura. Isso ocorre devido ao fato de, ao substituir-se um material com menor módulo de finura (e, por consequência, menores dimensões) por um de maior valor, a tendência é o acréscimo de vazios existentes no material final. Como a água absorvida, com ou sem fervura, naturalmente ocupa os espaços do concreto que contém ar, esse acréscimo de vazios certamente promoverá o aumento da absorção de água, conforme observado.

Em se tratando da massa específica real dos concretos estudados, na prática, sabe-se que esse é um dos fatores mais importantes no dimensionamento, pois caracteriza o peso próprio da estrutura. Nas estruturas mais simples, na maioria dos casos, o carregamento preponderante é o peso próprio, de forma que ao se produzir um concreto mais leve, as cargas de dimensionamento serão aliviadas e a estrutura final provavelmente será mais econômica.

Por último, a análise simplificada de viabilidade de custos demonstrou que, de fato, ao utilizar-se um resíduo sem custo de compra (pois o procurado pelas empresas é direcionar esses anteriormente rejeitos plásticos a uma destinação adequada) como material de construção, o efeito é positivo na questão econômica, excluindo-se os fatores de logística e distribuição desses materiais. Vale lembrar que a substituição no teor de 15% de resíduos, em estudos anteriores, chegou a promover 4% de economia no custo do concreto. Como os valores atuais

do cimento subiram cerca de 70%, o maior valor de economia obtido nesse estudo foi menor, atingindo 1,2%.

Desse modo, é possível afirmar que os traços produzidos avaliados tem potencial para aplicação em estruturas devido as características anteriormente observadas, em especial os traços T4, T6, T9 e T14, os quais obtiveram excelentes resultados no ensaio de resistência à compressão e ótimos valores de massa específica. Assim, além de gerar economia, esses rejeitos se tornarão resíduos, podendo ser utilizados no processo industrial como matéria prima, fazendo com que uma elevada quantidade de areia, a qual é um insumo não renovável, seja substituída por um resíduo sem destinações concretas, tornando o processo sustentável.

Futuramente, para confirmação da utilização dos traços como concreto estrutural, propõe-se que sejam realizados ensaios em que sejam moldadas peças estruturais completas, como ensaio de flexão em vigas, utilizando as melhores misturas obtidas. Além disso, são importantes ensaios que estudem o comportamento a longo prazo, como a fluência ou viscoelasticidade, em que sejam moldados pórticos por completo, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 214R-11**: Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete. Farmington Hills: Aci Committee, 2011. 20 p.

AMERICAN LABEL GROUP. **Explore the Flexographic Printing Process**. 2015. Disponível em: https://www.americanlabel.com:444/algweb/alg2/explore_flexo.asp. Acesso em: 12 mar. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 13 p.

_____. **NBR 5891**: Regras de Arredondamento na Numeração Decimal. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

_____. **NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7222**: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 4 p.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017. 20 p.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12.655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA GRÁFICA (São Paulo). **Manual de Impressão Flexográfica**. São Paulo: ABTG, 2012. 84 p.

ASSOCIAÇÃO MERCOSSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000. 5 p.

AL-MANASEER, A. A.; DALAL, T. R. Concrete containing plastic aggregates. **Concrete International**, [s.i.], v. 19, n. 8, p.47-52, ago. 1997.

ALBANO, C. et al. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. **Waste Management**, [s.l.], v. 29, n. 10, p.2707-2716, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>.

ALQAHTANI, Fahad K. et al. Production of Recycled Plastic Aggregates and Its Utilization in Concrete. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 29, n. 4, p.236-244, abr. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001765](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001765).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 1876 - 01**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken, 2005. 16 p.

ATCP PHYSICAL ENGINEERING SONELASTIC® DIVISION. **Concretes, cementitious materials and rocks modulus of elasticity characterization**. 2017. Disponível em: <view-source:<https://www.sonelastic.com/en/applications/concrete-cementitious.html>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

BANSAL, Shubham; MISRA, Anil Kumar; BAJPAI, Purnima. Evaluation of modified bituminous concrete mix developed using rubber and plastic waste materials. **International Journal Of Sustainable Built Environment**, [s.l.], v. 6, n. 2, p.442-448, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.07.009>.

BARBOSA, Marcella de Sena et al. Produção de Concreto de Alto Desempenho (CAD) com adição de pó de pedra. **Revista Interscientia**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 200-217, 2 jul. 2019. Cruzeiro do Sul Educacional. <http://dx.doi.org/10.26843/interscientia.v7i1.1000>.

BATAYNEH, Malek; MARIE, Iqbal; ASI, Ibrahim. Use of selected waste materials in concrete mixes. **Waste Management**, [s.l.], v. 27, n. 12, p.1870-1876, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>.

BEISER, V. **The world in a grain: The story of sand and how it transformed civilization**. New York: Riverhead Books, 2018.

BETTS, Mike et al. **Global Construction 2030: A global forecast for the construction industry to 2030**. London: Global Construction Perspectives And Oxford Economics, 2015. 15 p.

BÎRCĂ, Alexandra et al. Introduction in thermoplastic and thermosetting polymers. **Materials For Biomedical Engineering**, [s.l.], p. 1-28, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-816874-5.00001-3>.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (Paraná). **Preços de Insumos - SINAPI**. Curitiba: Caixa, 2021.

CHOI, Yun-wang et al. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 35, n. 4, p.776-781, abr. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.014>.

CLAPP, Jennifer; SWANSTON, Linda. Doing away with plastic shopping bags: international patterns of norm emergence and policy implementation: international patterns of norm emergence and policy implementation. **Environmental Politics**, [s.l.], v. 18, n. 3, p. 315-332, maio 2009. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09644010902823717>.

COPPOLA, Bartolomeo et al. Hygro-thermal and durability properties of a lightweight mortar made with foamed plastic waste aggregates. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 170, p.200-206, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.083>.

COPPOLA, Bartolomeo et al. Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 99, p.75-83, ago. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.058>.

COPPOLA, L.; KARA, P.; LORENZI, S.. Concrete manufactured with crushed asphalt as partial replacement of natural aggregates. **Materiales de Construcción**, [s.l.], v. 66, n. 324, p.101-109, 22 set. 2016. Departamento de Publicaciones del CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2016.06515>.

CORREIA, J.r.; LIMA, J.s.; BRITO, J. de. Post-fire mechanical performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 53, p.187-199, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.004>.

CROW, James Mitchell. The concrete conundrum. **Chemistry World**, [s.i.], v. 3, n. 5, p.62-66, 27 fev. 2008.

DAMTOFT, J.s. et al. Sustainable development and climate change initiatives. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 38, n. 2, p.115-127, fev. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>.

DUPONT. **Fluxo de Trabalho Térmico Cyrel® Fast**: produtividade, qualidade e sustentabilidade. 2017. Disponível em: <<http://www.dupont.com.br/produtos-e-servicos/printing-package-printing/flexographic-platemaking-systems/brands/cyrel/products/cyrel-FAST-thermal-workflow.html>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

FERREIRA, Luís; BRITO, Jorge de; SAIKIA, Nabajyoti. Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 36, p.196-204, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.098>.

FLEXO TECH (Reino Unido). **The future of recycling waste from label printing**. 2013. Disponível em: <<http://www.paperandprint.com/flexotech/features/flexo-2013/october-2013/04-10-13-the-future-of-recycling-waste-from-label-printing.aspx#.WtYKNC7wapp>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

FRIGIONE, Mariaenrica. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. **Waste Management**, [s.l.], v. 30, n. 6, p.1101-1106, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>.

GALLAGHER, Louise. Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. **United Nations Environment Programme (UNEP)**, Nairobi, v. 1, n. 1, p. 1-56, fev. 2019. <http://dx.doi.org/10.13140/2FRG.2.2.33747.63526>

GARSIDE, M. **Production of polyethylene terephthalate bottles worldwide from 2004 to 2021**. 2017. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/723191/production-of-polyethylene-terephthalate-bottles-worldwide/>. Acesso em: 26 mar. 2020.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, [s.l.], v. 3, n. 7, p. 1-5, jul. 2017. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.

GIACCIO, G., ROCCO, C., VIOLINI, D., ZAPPITELLI, J., ZERBINO R., “High strength concretes incorporating different course aggregates”, **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 3, pp. 292 – 246, 1992.

GONÇALVES, Anderson Matheus Bernardino. **Concretos produzidos com cinza leve do bagaço da cana-de-açúcar e resíduos de construção civil**. 2017. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

GUIMARÃES, Leonardo Durval Duarte; ALBUQUERQUE, Elaine Cristina Barbosa da Silva de; SANCHEZ, Sandra Barros. **Embalagens plásticas como tema transversal no colégio técnico da Universidade Rural do Rio de Janeiro**. In: Colóquio Internacional Educação e Contemporaneidade, 4., 2010, Laranjeiras. Rio de Janeiro, 2010. 14 p.

HASSANI, Abolfazl; GANJIDOUST, Hossein; MAGHANAKI, Amir Abedin. Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. **Waste Management & Research**, [s.l.], v. 23, n. 4, p.322-327, ago. 2005. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x05056739>.

HITA, P. Rubio-de et al. Reuse of plastic waste of mixed polypropylene as aggregate in mortars for the manufacture of pieces for restoring jack arch floors with timber beams. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 198, p.1515-1525, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.065>.

HOPEWELL, Jefferson; DVORAK, Robert; KOSIOR, Edward. Plastics recycling: challenges and opportunities. **Philosophical Transactions Of The Royal Society B: Biological Sciences**, [s.l.], v. 364, n. 1526, p. 2115-2126, 27 jul. 2009. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>.

ISMAIL, Zainab Z.; AL-HASHMI, Enas A.. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. **Waste Management**, [s.l.], v. 28, n. 11, p.2041-2047, nov. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023>.

JOHN, E. The Impacts of Sand Mining in Kallada river. **Journal Of Basic And Applied Biology**, Pathanapuram Taluk, v. 3, n. 12, p.108-113, jun. 2009.

JONATHAN WATTS (London). Guardian's Global Environment (Ed.). **Concrete: the most destructive material on Earth**. 2019. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>>. Acesso em: 1 nov. 2019.

LEITE, Paulo Roberto. **Logística Reversa - Meio Ambiente e Competitividade**. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 246p.

MARCANTONIO, Giordano Pietro Altoé. **Propriedades do concreto produzido com substituição parcial de agregado miúdo por resíduos plásticos**. 2017. 103 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

MISHRA, Munmaya (ed.). **Encyclopedia of Polymer Applications**. Boca Raton: Crc Press, 2019. 2954 p.

MOHAMMADINIA, Alireza et al. Strength evaluation of utilizing recycled plastic waste and recycled crushed glass in concrete footpaths. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 197, p.489-496, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.192>.

MORAZ, Mateus Augusto Rigotto. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos plásticos como agregado miúdo na produção de concreto**. 2018. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

MORETTI, J.P. **Estudo de viabilidade técnica da utilização da ACBC e do RCC na composição de concretos**. 2014. 166 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

MUTHU, Subramanian Senthilkannan (ed.). Environmental Footprints of Recycled Polyester. **Textile Science And Clothing Technology**, [s.l.], v. , n. , p. 1-98, jan. 2020. Springer Singapore. <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-9578-9>.

NUNES, I. H. S. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção**. 2009. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

ORR, John. India looks at using plastic waste as a partial replacement for sand in structural concrete. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Civil Engineering**, [s.l.], v. 172, n. 1, p.11-11, fev. 2019. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/jcien.2019.172.1.11>.

OTANI, Lucas Barcelos; PEREIRA, Antônio Henrique Alves. **Estimativa do módulo de elasticidade estático de concretos utilizando a Técnica de Excitação por Impulso**. 1.0. Ribeirão Preto: ATCP, 2015. 38 p.

PEDUZZI, Pascal. Sand, rarer than one thinks. **Environmental Development**, [s.l.], v. 11, n. 1, p.208-218, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2014.04.001>.

PIATTI, Tania Maria; RODRIGUES, Reinaldo Augusto Ferreira. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais**. Alagoas: Editora da Universidade Federal de Alagoas, 2005. 51 p. (Conversando sobre Ciências em Alagoas). Disponível em: <http://www.usinaciencia.ufal.br/multimedia/livros-digitais-cadernos-tematicos/Plasticos_caracteristicas_usos_producao_e_impactos_ambientais.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2020.

QUADROS, Peterson Araújo. **Estudo das correlações entre as propriedades mecânicas do concreto**. 2014. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

RAHMAN, Mahfujur. Investigating the effect of partial replacement of natural aggregates by recycled aggregates and waste plastic materials in concrete. **International Journal Of Advanced Structures And Geotechnical Engineering**, Mangaluru, v. 5, n. 1, p.16-20, jan. 2018.

REIS, J.m.l. et al. Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 6, p.2799-2804, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.056>.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. Poli(Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Campinas, v. 19, n. 2, p.121-132, jan. 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v19n2/v19n2a09>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

SAFI, Brahim et al. The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 43, p.436-442, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049>.

SAIKIA, Nabajyoti; BRITO, Jorge de. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 52, p.236-244, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>.

SANTOS, Antônio Carlos dos et al. Influence of coarse aggregate on concrete's elasticity modulus. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 39, n. [], p. 17-25, jan. 2017.

SANTOS, S. F. **Análise de filmes poliméricos densos de AcC/PHAmcl por técnicas de DSC, DMA, XPS, Ângulo de Contato e AFM**. 2005. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0312428_05_pretextual.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2020.

SAXENA, Rajat et al. Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 176, p.415-421, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.019>.

SCRIVENER, Karen L.; KIRKPATRICK, R. James. Innovation in use and research on cementitious material. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 38, n. 2, p.128-136, fev. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.025>.

THOMAS, Gregory Owen et al. The English Plastic Bag Charge Changed Behavior and Increased Support for Other Charges to Reduce Plastic Waste. **Frontiers In Psychology**, [s.l.], v. 10, p. 1-12, 26 fev. 2019. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00266>.

THORNEYCROFT, J. et al. Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 161, p.63-69, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127>.

United Nations Environment Programme, **GRID-Geneva**. Disponível em: <<http://www.uneplive.org/situation>>. Acesso em: 8 nov. 2019.

UNITED STATES. JASON CHRISTOPHER WILLETT. . **Natural Aggregates Statistics and Information: Sand and Gravel (Construction)**. [s.i.]: U.s. Geological Survey, 2019.

WWF. **Impacts of Sand Mining on Ecosystem Structure, Process and Biodiversity in Rivers**. Greater Mekong: World Wide Fund For Nature, 2018.

APÊNDICE A – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Tabela 1 – Dados do ensaio de resistência à compressão simples (continua).

Traço	Mistura			CP	Carga de Ruptura (kN)	Tensão Resistente (MPa)	Tensão Resistente Média (Mpa)	Desvio padrão
	PET	CYREL	PELLETS					
T1	Piloto			3	274,87	35,40	34,98	0,73
				5	273,70	35,20		
				6	277,11	35,60		
				7	264,59	34,00		
				9	265,26	33,77		
				11	281,82	35,88		
T2	-	10%	-	2	230,80	29,70	30,66	0,96
				3	224,70	28,90		
				4	249,03	32,00		
				5	237,50	30,50		
				6	245,30	31,60		
				7	245,41	31,25		
T3	10%	-	-	1	240,35	30,90	31,27	0,87
				4	249,46	32,10		
				5	232,89	30,00		
				6	248,67	32,00		
				8	253,93	32,33		
				9	238,03	30,31		
T4	-	-	10%	2	243,32	31,30	32,72	1,12
				4	263,46	33,90		
				5	263,83	33,90		
				6	258,69	33,30		
				9	260,31	33,14		
				10	241,86	30,79		
T5	-	15%	-	3	220,88	28,40	27,14	0,70
				5	212,01	27,30		
				6	215,93	27,80		
				7	203,32	26,20		
				8	208,95	26,90		
				9	205,99	26,23		
T6	15%	-	-	4	260,23	33,50	31,79	1,03
				5	250,93	32,30		
				6	252,36	32,50		
				8	236,293	30,09		
				9	238,58	30,38		
				10	250,97	31,95		

Fonte: Autor (2021)

Tabela 1 – Dados do ensaio de resistência à compressão simples (continua).

Traço	Mistura			CP	Carga de Ruptura (kN)	Tensão Resistente (MPa)	Tensão Resistente Média (Mpa)	Desvio padrão (MPa)
	PET	CYREL	PELLETS					
T7	-			-	15%	1	238,14	30,60
				5	273,70	3	249,04	32,00
				6	277,11	4	227,86	29,30
				7	264,59	6	237,33	30,50
				9	265,26	8	227,75	29,00
				11	281,82	9	242,28	30,85
T8	5%	10%	-	2	219,37	28,20	29,61	1,09
				3	248,02	31,90		
				5	227,58	29,30		
				6	237,58	30,60		
				7	232,46	29,60		
				8	220,28	28,05		
T9	5%	-	10%	3	239,70	30,80	29,92	0,65
				4	222,54	28,60		
				5	235,86	30,30		
				6	237,59	30,60		
				7	234,66	29,88		
				9	230,30	29,32		
T10	10%	5%	-	2	234,05	30,10	31,99	0,86
				5	254,17	32,70		
				6	257,82	33,20		
				7	243,32	31,30		
				9	251,10	31,97		
				10	256,38	32,64		
T11	10%	-	5%	3	233,10	30,00	29,37	0,94
				4	219,75	28,30		
				5	233,28	30,00		
				6	240,28	30,90		
				9	216,96	27,62		
				10	230,67	29,37		
T12	-	5%	10%	1	210,43	27,10	27,73	0,38
				2	219,25	28,20		
				4	218,88	28,20		
				7	218,78	27,86		
				8	218,34	27,80		
				9	213,74	27,21		

Fonte: Autor (2021)

Tabela 1 – Dados do ensaio de resistência à compressão simples (conclusão).

Traço	Mistura			CP	Carga de Ruptura (kN)	Tensão Resistente (MPa)	Tensão Resistente Média (Mpa)	Desvio padrão
	PET	CYREL	PELLETS					
T13	-	10%	5%	1	235,00	30,20	30,17	0,45
				3	224,52	28,90		
				5	236,35	30,40		
				6	241,71	31,10		
				8	236,34	30,09		
				9	238,11	30,32		
T14	5%	5%	5%	2	240,08	30,90	32,00	0,90
				4	259,21	33,30		
				5	252,01	32,40		
				6	251,66	32,40		
				9	238,70	30,39		
				10	256,10	32,61		

Fonte: Autor (2021)

Equação 1 de calibração da prensa INSTRON, com certificado de calibração 18120301SO – INSTRON. Emissão 08/12/2018:

$$\sigma = -3,5515 + \frac{1,0102 * Q * 1000}{\frac{\pi * 100^2}{4}} \quad (1)$$

em que: σ : tensão de ruptura do corpo de prova, em MPa;

Q : carga de ruptura lida no instrumento, em kN;

APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Tabela 2 – Dados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Traço	Mistura			CP	Carga de Ruptura (kN)	Tensão Resistente (MPa)	Tensão Resistente Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
	PET	CYREL	PELLETS					
T1	Piloto			1	87,23	2,77	2,63	0,18
				2	76,57	2,43		
				3	85,19	2,70		
T2	-	10%	-	1	76,96	2,44	2,29	0,15
				2	67,60	2,14		
				3	72,73	2,30		
T3	10%	-	-	1	66,00	2,09	2,06	0,08
				2	67,37	2,13		
				3	62,30	1,97		
T4	-	-	10%	1	61,62	1,95	1,99	0,24
				2	71,16	2,25		
				3	56,49	1,78		
T5	-	15%	-	1	51,03	1,61	1,67	0,09
				2	56,43	1,78		
				3	51,77	1,63		
T6	15%	-	-	1	66,55	2,10	1,98	0,11
				2	60,76	1,92		
				3	61,01	1,93		
T7	-	-	15%	1	68,73	2,17	1,98	0,21
				2	55,98	1,76		
				3	63,76	2,01		
T8	5%	10%	-	1	55,76	1,76	2,07	0,27
				2	70,28	2,22		
				3	70,27	2,22		
T9	5%	-	10%	1	73,66	2,33	2,08	0,38
				2	52,46	1,65		
				3	71,53	2,26		
T10	10%	5%	-	1	70,26	2,22	2,10	0,29
				2	55,99	1,76		
				3	72,52	2,30		
T11	10%	-	5%	1	59,60	1,88	1,79	0,13
				2	52,14	1,64		
				3	58,93	1,86		
T12	-	5%	10%	1	64,81	2,05	2,01	0,31
				2	53,48	1,68		
				3	72,49	2,30		
T13	-	10%	5%	1	58,95	1,86	1,97	0,27
				2	71,91	2,28		
				3	56,25	1,77		
T14	5%	5%	5%	1	60,18	1,90	2,06	0,27
				2	60,38	1,91		
				3	75,07	2,38		

Fonte: Autor (2021)

Equação 2 de calibração da prensa INSTRON, com certificado de calibração 18120301SO – INSTRON. Emissão 08/12/2018:

$$F = -0,35515 * \pi + 1,0102 * Q \quad (2)$$

em que: F : carga real de ruptura exercida pela máquina, em kN;

Q : carga de ruptura lida no instrumento, em kN;

APÊNDICE C – MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Tabela 3 – Dados do ensaio de módulo de elasticidade estático.

Traço	Mistura			CP	Carga de Ruptura (kN)	Tensão Resistente (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio padrão (GPa)
	PET	CYREL	PELLETS						
T1	Piloto			1	265,26	33,77	30,25	32,62	2,04
				2	254,26	32,37	35,68		
				3	281,82	35,88	31,94		
T2	-	10%	-	1	245,41	31,25	30,52	30,94	0,28
				2	195,98	24,95	31,00		
				3	210,44	26,79	31,29		
T3	10%	-	-	1	233,20	29,69	30,33	30,23	0,12
				2	253,93	32,33	30,05		
				3	238,03	30,31	30,31		
T4	-	-	10%	1	238,34	30,35	31,20	29,28	1,28
				2	260,31	33,14	28,44		
				3	241,86	30,79	28,19		
T5	-	15%	-	1	205,99	26,23	27,55	28,34	0,55
				2	199,55	25,41	28,30		
				3	193,10	24,59	29,17		
T6	15%	-	-	1	236,293	30,08	27,66	29,12	0,98
				2	238,58	30,38	30,60		
				3	250,97	31,95	29,11		
T7	-	-	15%	1	227,75	29,00	28,03	29,29	0,94
				2	242,28	30,85	29,15		
				3	211,06	26,87	30,70		
T8	5%	10%	-	1	232,46	29,60	29,27	29,34	0,27
				2	220,28	28,05	29,74		
				3	202,81	25,82	29,01		
T9	5%	-	10%	1	234,66	29,88	32,75	32,75	0,56
				2	222,64	28,35	31,90		
				3	230,30	29,32	33,59		
T10	10%	5%	-	1	223,59	28,47	31,55	30,99	0,54
				2	251,10	31,97	30,19		
				3	256,38	32,64	31,24		
T11	10%	-	5%	1	211,38	26,91	30,10	30,55	0,41
				2	216,96	27,62	30,38		
				3	230,67	29,37	31,17		
T12	-	5%	10%	1	218,78	27,86	30,57	30,68	0,07
				2	218,34	27,80	30,68		
				3	213,74	27,21	30,79		
T13	-	10%	5%	1	192,52	24,51	32,92	31,46	0,97
				2	236,34	30,09	31,01		
				3	238,11	30,32	30,45		
T14	5%	5%	5%	1	269,75	34,35	31,71	31,91	0,22
				2	238,70	30,39	31,78		
				3	256,10	32,61	32,23		

Fonte: Autor (2021)

APÊNDICE D – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Tabela 4 – Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.

Traço	Mistura			CP	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio padrão (GPa)
	PET	CYREL	PELLETS				
T1	Piloto			1	36,72	36,12	1,04
				2	36,72		
				3	34,91		
T2	-	10%	-	1	33,71	33,76	0,15
				2	33,63		
				3	33,93		
T3	10%	-	-	1	34,44	33,71	0,89
				2	32,72		
				3	33,96		
T4	-	-	10%	1	34,42	34,52	1,33
				2	35,90		
				3	33,24		
T5	-	15%	-	1	31,99	31,65	1,15
				2	30,37		
				3	32,59		
T6	15%	-	-	1	33,39	33,20	0,17
				2	33,10		
				3	33,10		
T7	-	-	15%	1	35,28	34,45	0,82
				2	33,65		
				3	34,44		
T8	5%	10%	-	1	32,22	32,13	0,38
				2	32,45		
				3	31,72		
T9	5%	-	10%	1	32,51	33,66	1,26
				2	35,00		
				3	33,47		
T10	10%	5%	-	1	34,16	34,03	0,16
				2	34,08		
				3	33,85		
T11	10%	-	5%	1	32,77	33,06	1,02
				2	32,21		
				3	34,19		
T12	-	5%	10%	1	33,42	33,63	0,74
				2	33,01		
				3	34,44		
T13	-	10%	5%	1	33,00	33,31	0,66
				2	34,07		
				3	32,86		
T14	5%	5%	5%	1	33,34	32,80	0,87
				2	33,27		
				3	31,79		

Fonte: Autor (2021)

APÊNDICE E – ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA
Quadro 1 – Massa seca em estufa à temperatura 105 ± 5 °C (A).

(A) SECAGEM EM ESTUFA À TEMPERATURA (105 ± 5) °C				
Massa após 72h de secagem (g)				
Traço	ID	Nº DO CP		
		1	2	3
T1	A	3634,28	3582,24	3584,82
T2	B	3422,68	3473,24	3503,54
T3	C	3449,36	3494,02	3462,94
T4	D	3444,85	3469,68	3500,66
T5	E	3430,46	3382,87	3404,11
T6	F	3498,62	3347,82	3455,8
T7	G	3506,57	3447,85	3479,82
T8	H	3413,58	3397,69	3433,45
T9	I	3494,03	3463,33	3473,64
T10	J	3449,21	3385,72	3457,93
T11	K	3420,22	3416,53	3413,6
T12	L	3459,59	3462,34	3469,92
T13	M	3455,34	3466,03	3475,82
T14	N	3466,64	3413,78	3430,16

Fonte: Autor (2021)

Quadro 2 – Massa saturada em água à temperatura 23 ± 2 °C, sem fervura (B).

(B) SATURAÇÃO EM ÁGUA À TEMPERATURA (23 ± 2) °C - SEM FERVURA				
Massa após 72h de imersão (g)				
Traço	ID	Nº DO CP		
		1	2	3
T1	A	3825,47	3773,59	3796,53
T2	B	3607,02	3681,58	3707,88
T3	C	3658,59	3707,47	3675,96
T4	D	3636,25	3675,15	3710,62
T5	E	3638,35	3593,84	3622,21
T6	F	3723,22	3568,18	3670,93
T7	G	3701,62	3670,74	3703,23
T8	H	3640,93	3637,53	3663,73
T9	I	3692,42	3672,79	3686,4
T10	J	3666,19	3624,07	3698,02
T11	K	3661,15	3651,02	3656,94
T12	L	3661,23	3669,76	3654,82
T13	M	3658,09	3664,26	3676,64
T14	N	3686,5	3639,67	3651,42

Fonte: Autor (2021)

Quadro 3 – Massa imersa em água após saturação, sem fervura (D).

(D) IMERSA EM ÁGUA APÓS SATURAÇÃO - SEM FERVURA				
Massa após 72h de imersão (g)				
Traço	ID	Nº DO CP		
		1	2	3
T1	A	2254,61	2230,13	2233,25
T2	B	2078,31	2126,18	2149,54
T3	C	2110,21	2138,04	2132,91
T4	D	2109,63	2129,8	2153,96
T5	E	2064,43	2048,8	2070,83
T6	F	2154,85	2049,53	2116,65
T7	G	2143,59	2120,44	2148,79
T8	H	2085,69	2069,55	2093,66
T9	I	2140,38	2114,04	2131,5
T10	J	2116,25	2087,16	2120,3
T11	K	2107,86	2094,83	2097,35
T12	L	2104,32	2112,2	2099,21
T13	M	2083,32	2102,56	2115,72
T14	N	2120,17	2084,18	2101,9

Fonte: Autor (2021)

Quadro 4 – Massa saturada em água à temperatura 23 ± 2 °C, com fervura (C).

(C) SATURAÇÃO EM ÁGUA COM FERVURA				
Massa após 5h de fervura e 14h de resfriamento (g)				
Traço	ID	Nº DO CP		
		1	2	3
T1	A	3838,4	3790,39	3813,46
T2	B	3633,61	3699,39	3736,42
T3	C	3670,28	3719,25	3692,5
T4	D	3652,44	3694,13	3727,5
T5	E	3664,5	3627,89	3660,83
T6	F	3741,03	3578,04	3682,95
T7	G	3722,9	3696,06	3729,87
T8	H	3670,08	3664,69	3691,71
T9	I	3715,38	3694,01	3704,76
T10	J	3686,62	3643,26	3716,5
T11	K	3677,43	3667,52	3674,86
T12	L	3677,25	3683,78	3665,83
T13	M	3670,96	3676,78	3691,09
T14	N	3697,41	3654,37	3663,53

Fonte: Autor (2021)

Quadro 5 – Massa imersa em água após saturação, com fervura (E).

(E) IMERSA EM ÁGUA COM FERVURA				
Massa após 5h de fervura e 14h de resfriamento (g)				
Traço	ID	Nº DO CP		
		1	2	3
T1	A	2264,43	2241,59	2243,75
T2	B	2097,19	2141,9	2172,69
T3	C	2117,6	2146,61	2144,27
T4	D	2121,04	2149,53	2165,92
T5	E	2088,79	2077,73	2105,77
T6	F	2169,68	2056,68	2127,27
T7	G	2162,36	2142,81	2173,68
T8	H	2112,02	2091,39	2117,19
T9	I	2160,61	2133,42	2146,64
T10	J	2133,37	2104,92	2133,94
T11	K	2118,77	2105,54	2109,88
T12	L	2115,25	2119,72	2105,21
T13	M	2095,48	2111,65	2126,3
T14	N	2129,23	2096,43	2111,19

Fonte: Autor (2021)

Tabela 5 – Dados do ensaio de módulo de elasticidade estático (continua).

Traço	CP	a) Absorção após imersão em água [%]	b) Absorção após imersão e fervura [%]	c) Índice de vazios após saturação em água [%]	d) Índice de vazios após saturação e fervura [%]	e) Massa específica da amostra seca [g/cm ³]	f) Massa específica da amostra após saturação [g/cm ³]	g) Massa específica da amostra após saturação e fervura [g/cm ³]	h) Massa específica real [g/cm ³]
T1	1	5,26	5,62	12,17	12,97	2,29	2,42	2,42	2,63
	2	5,34	5,81	12,40	13,44	2,30	2,42	2,43	2,65
	3	5,91	6,38	13,54	14,57	2,27	2,40	2,41	2,65
T2	1	5,39	6,16	12,06	13,73	2,20	2,32	2,34	2,55
	2	6,00	6,51	13,39	14,52	2,21	2,34	2,35	2,58
	3	5,83	6,65	13,11	14,89	2,21	2,34	2,35	2,59
T3	1	6,07	6,40	13,51	14,23	2,21	2,35	2,35	2,58
	2	6,11	6,45	13,60	14,32	2,21	2,34	2,35	2,58
	3	6,15	6,63	13,81	14,83	2,22	2,36	2,37	2,60
T4	1	5,56	6,03	12,54	13,56	2,23	2,36	2,37	2,58
	2	5,92	6,47	13,30	14,53	2,22	2,35	2,36	2,59
	3	6,00	6,48	13,49	14,53	2,22	2,36	2,37	2,60
T5	1	6,06	6,82	13,21	14,85	2,14	2,27	2,29	2,51
	2	6,24	7,24	13,65	15,81	2,14	2,28	2,30	2,54
	3	6,41	7,54	14,06	16,51	2,14	2,28	2,30	2,55

Fonte: Autor (2021)

Tabela 5 – Dados do ensaio de módulo de elasticidade estático (conclusão).

T6	1	6,42	6,93	14,32	15,43	2,21	2,35	2,36	2,60
	2	6,58	6,88	14,51	15,13	2,19	2,33	2,34	2,58
	3	6,23	6,57	13,84	14,60	2,21	2,34	2,35	2,58
T7	1	5,56	6,17	12,52	13,86	2,22	2,34	2,36	2,57
	2	6,46	7,20	14,38	15,98	2,19	2,33	2,35	2,60
	3	6,42	7,19	14,37	16,07	2,20	2,34	2,36	2,61
T8	1	6,66	7,51	14,62	16,46	2,15	2,30	2,32	2,57
	2	7,06	7,86	15,30	16,97	2,13	2,28	2,30	2,56
	3	6,71	7,52	14,67	16,40	2,15	2,29	2,31	2,56
T9	1	5,68	6,34	12,78	14,24	2,22	2,34	2,36	2,58
	2	6,05	6,66	13,44	14,78	2,19	2,32	2,34	2,57
	3	6,12	6,65	13,68	14,83	2,21	2,34	2,35	2,59
T10	1	6,29	6,88	14,00	15,28	2,20	2,33	2,35	2,59
	2	7,04	7,61	15,51	16,74	2,18	2,33	2,34	2,61
	3	6,94	7,48	15,22	16,34	2,17	2,32	2,33	2,59
T11	1	7,04	7,52	15,51	16,50	2,18	2,33	2,34	2,61
	2	6,86	7,35	15,07	16,07	2,17	2,32	2,33	2,58
	3	7,13	7,65	15,60	16,69	2,16	2,32	2,33	2,59
T12	1	5,83	6,29	12,95	13,93	2,20	2,33	2,34	2,55
	2	5,99	6,40	13,32	14,16	2,20	2,34	2,34	2,56
	3	5,33	5,65	11,89	12,55	2,21	2,33	2,34	2,53
T13	1	5,87	6,24	12,87	13,69	2,18	2,30	2,31	2,52
	2	5,72	6,08	12,69	13,47	2,20	2,33	2,34	2,54
	3	5,78	6,19	12,87	13,76	2,21	2,33	2,34	2,56
T14	1	6,34	6,66	14,04	14,72	2,20	2,34	2,34	2,57
	2	6,62	7,05	14,52	15,44	2,17	2,32	2,33	2,57
	3	6,45	6,80	14,28	15,03	2,20	2,34	2,35	2,58

Fonte: Autor (2021)

APÊNDICE F – DADOS DE CONSISTÊNCIA DOS TRAÇOS DE CONCRETO

Tabelas 6 – Dados de consistência obtidos a partir do ensaio de abatimento prescrito pela ABNT NBR NM 67:1998 e classificados conforme ABNT NBR 8593:2015.

Ref.	Traço			SLUMP (mm)	Classe
	PET	CYREL	PELLETS		
T1	Piloto			65	S50
T2		10%		88	S50
T3	10%			85	S50
T4			10%	90	S50
T5		15%		85	S50
T6	15%			53	S50
T7			15%	90	S50
T8	5%	10%		75	S50
T9	5%		10%	85	S50
T10	10%	5%		48	S10
T11	10%		5%	75	S50
T12		5%	10%	110	S100
T13		10%	5%	105	S100
T14	5%	5%	5%	85	S50

Fonte: Autor (2021)