



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE POLIETILENO TEREF TALATO (PET) E
POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) RECICLADOS NA PRODUÇÃO DE BLOCOS
DE CONCRETO**

CLEOFAS BERWANGER



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO Em
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET) E
POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) RECICLADOS NA PRODUÇÃO DE BLOCOS
DE CONCRETO**

CLEOFAS BERWANGER

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Walfrido Alonso Pippo

Foz do Iguaçu
2021

CLEOFAS BERWANGER

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE POLIETILENO TEREF TALATO (PET) E
POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) RECICLADOS NA PRODUÇÃO DE BLOCOS
DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal da Integração Latino-
Americana, como requisito parcial à obtenção
do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Walfrido Alonso Pippo
UNILA

Profa. Dra. Orieta Soto Izquierdo
UFT

Prof. Dr. Daniel Tregnago Pagnussat
UFRGS

Prof. Dr. Aref Kalilo Lima Kzam
UNILA

Foz do Iguaçu, 25 de novembro de 2021.

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA –
PTI

B553a

Berwanger, Cleofas.

Avaliação da utilização de polietileno tereftalato (PET) e poliestireno expandido (EPS) reciclados na produção de blocos de concreto / Cleofas Berwanger. - Foz do Iguaçu, 2021.
111 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-americano de Tecnologia,
Infraestrutura e Território, Pós-graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Walfrido Alonso Pippo.

1. Construção de blocos de concreto. 2. Polietileno tereftalato. 3. Poliestireno expandido. I. Pippo,
Walfrido Alonso. II. Título.

CDU 627.824

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela boa saúde a qual me proporcionou condições de finalizar mais esta etapa de estudo.

Aos meus pais Zenno (*in memoriam*) e Ivone, pelo incentivo dado em sempre seguir meus objetivos de vida. Principalmente ao meu pai, que infelizmente não pode presenciar o desfecho do curso, mas com certeza observou com muita satisfação de outro plano.

À minha esposa Ana Paula e minha filha Olívia, pela compreensão e apoio durante a jornada de mais de dois anos.

A meu orientador Professor Walfrido Pippo, com sua condução exemplar e valiosa. Orientando-me de maneira objetiva e clara, sempre me incentivando nos momentos necessários.

À empresa CR Lajes e Pavers, pela doação dos insumos e disponibilização da estrutura da fábrica para realização deste estudo.

À minha amiga Lívia, pelo suporte e contribuição durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos servidores do laboratório de LACTEC SUL-PTI, Andrey, Dalila, Wagner e Paula. Agradeço por todo o apoio dado durante a realização do trabalho.

RESUMO

O estudo tem como objetivo o desenvolvimento de blocos de concreto com a adição de Polietileno tereftalato (PET) e Poliestireno expandido (EPS) reciclados, buscando o reaproveitamento de materiais descartados. O trabalho compreende a avaliação através da realização de experimentos comparativos entre a mistura de referência e a formulação com PET e EPS, em teores de substituição volumétricos de 5, 10, 15, 20, 30 e 40%, para o desenvolvimento de blocos de concreto reciclado (BCR), Classe C, sem função estrutural, com dimensões de 14x19x39cm. Com base nos resultados de experimentos piloto com corpos de prova, foram fabricadas três séries de blocos do tipo BCR, empregando as três misturas com menor teor de reciclados (BCR-5, BCR-10 e BCR-15). Após, foram avaliadas as propriedades de absorção de água, umidade relativa, massa específica, índice de vazios, análise dimensional e resistência mecânica à compressão axial. O estudo também englobou avaliações de custo comparativo de insumos para a produção, custo de manejo dos resíduos e emissão de CO₂. Os resultados alcançados demonstram que teores de reciclados para os modelos BCR-5 e BCR-10, não alteraram de forma significativa as propriedades analisadas, sendo estatisticamente equivalentes ao bloco de concreto tradicional. Já o modelo com maior quantidade de reciclados (BCR-15) teve uma redução da resistência à compressão axial de 12,75%, acréscimo do nível de absorção de água de 6,66% e redução da massa específica dos blocos de 4,00%. Todos os modelos de blocos analisados atenderam aos requisitos impostos pela normatização do tema, sendo classificados como Classe C. Os resultados obtidos para avaliação de custo demonstram um incremento no valor unitário do bloco BCR em até 5,19%; em paralelo, constatou-se uma redução de até 4,20% na emissão de CO₂, considerando a obtenção e o transporte de insumos.

Palavras-chave: Bloco de concreto. Reciclagem. PET. EPS.

ABSTRACT

The study aims to develop concrete blocks with the addition of recycled polyethylene terephthalate (PET) and expanded polystyrene (EPS), seeking to reuse discarded materials. The work comprises the evaluation by carrying out comparative experiments between the reference mixture and the formulation with PET and EPS, in volumetric substitution levels of 5, 10, 15, 20, 30 and 40%, for the development of concrete blocks recycled (BCR), Class C, without structural function, with dimensions of 14x19x39cm. Based on the results of pilot experiments with specimens, three series of BCR-type blocks were manufactured, using the three mixtures with the lowest recycled content (BCR-5, BCR-10 and BCR-15). Afterwards, the properties of water absorption, relative humidity, specific mass, void ratio, dimensional analysis and mechanical strength to axial compression were evaluated. The study also included comparative cost assessments of inputs for production, cost of waste management and CO₂ emissions. The results achieved demonstrate that the contents of recycled for the models BCR-5 and BCR-10 did not significantly change the properties analyzed, being statistically equivalent to the traditional concrete block. The model with the highest amount of recycled material (BCR-15) had a reduction in axial compressive strength of 12.75%, an increase in the level of water absorption of 6.66% and a reduction in the specific mass of the blocks of 4.00%. All the analyzed block models met the requirements imposed by the regulation of the theme, being classified as Class C. The results obtained for the cost evaluation demonstrate an increase in the unit value of the BCR block by up to 5.19%; in parallel, there was a reduction of up to 4.20% in CO₂ emissions, considering the acquisition and transport of inputs.

Keywords: Concrete block. Recycling. PET. EPS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção de plásticos em 2016 segmentado por indústria e tempo médio de vida útil do produto	18
Figura 2: (a) Floco de PET; (b) Pó de PET;	20
Figura 3: EPS granular reciclado de forma mecânica	21
Figura 4: Índice de reciclagem mecânica de EPS	22
Figura 5: Curva granulométrica indicada para dosagem de blocos de concreto	27
Figura 6: Planejamento de pesquisa	36
Figura 7: (a) Areia natural; (b) Pó de pedra; (c) Granilha; (d) Brita 0.....	37
Figura 8: (a) Pó de PET; (b) EPS reciclado	38
Figura 9: Amostra de pó de PET	39
Figura 10: Comparativo de composição de agregados da pesquisa com limites práticos sugeridos na produção de blocos de qualidade.....	41
Figura 11: Comparativo de composição com três agregados usados na pesquisa com limites práticos sugeridos para a produção de blocos de qualidade.....	42
Figura 12: (a) Primeira composição; (b) Composição ajustada e adotada como referência	43
Figura 13: (a) Concreto seco no "ponto de pelota"; (b) Aspecto da mistura de concreto seco	44
Figura 14: (a) Moldagem CP's; (b) Corpos de Prova recém moldados	48
Figura 15: Instruções realização do ensaio	49
Figura 16: Corpos de prova cilíndricos na estufa	50
Figura 17: (a) Capeamento CP's; (b) Prensa; (c) Ensaio resistência à compressão.....	51
Figura 18: (a) Agregados pouco antes da moldagem; (b) Descarga material; (c) Mistura; (d) Alimentação vibroprensa	54
Figura 19: (a) Equipamentos; (b) Moldagem blocos; (c) Transporte blocos; (d) Blocos do modelo BCR	55
Figura 20: (a) Capeamento blocos; (b) Ensaio de resistência à compressão bloco.....	57
Figura 21: (a) Secagem estufa; (b) Saturação blocos; (c) Secagem; (d) Aferição massa.....	59
Figura 22: Composição granulométrica areia.....	64
Figura 23: Composição granulométrica do pó de pedra.....	65
Figura 24: Composição granulométrica da Brita 0	66

Figura 25: Composição granulométrica do PET	66
Figura 26: Composição granulométrica do EPS.....	67
Figura 27: Textura superficial das misturas	68
Figura 28: Fissuras durante a moldagem dos traços BCR-20, BCR-30 e BCR-40 ...	69
Figura 29: Textura superficial blocos	75
Figura 30: Vista dos blocos em perspectiva	76
Figura 31: Relação entre as propriedades físicas do modelo BCR e BCT	80
Figura 32: Relação entre a resistência mecânica do modelo BCR e BCT	84
Figura 33: Forma de ruptura bloco	87
Figura 34: Quantidade de resíduos utilizados em uma habitação de 56,62m ²	89
Figura 37: Detalhe molde e soquete utilizado para moldagem dos corpos de prova	104
Figura 35: (a) Estufa secagem agregados; (b) Balança modelo AD10K	105
Figura 36: Procedimento de ensaio de coesão	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padronização das dimensões nominais dos blocos de concreto	23
Tabela 2: Relação de cimento e agregado proposto para produção de blocos	28
Tabela 3: Resultados pesquisa bloco concreto com PET	33
Tabela 4: Resultados pesquisa bloco concreto com EPS	33
Tabela 5: Caracterização de agregados	39
Tabela 6: Formulação da composição de agregados	41
Tabela 7: Percentual de substituição de agregados reciclados	45
Tabela 8: Proporcionamento da mistura (massa)	45
Tabela 9: Consumo de materiais para produção de 1m ³ de concreto	45
Tabela 10: Propriedades avaliadas nos CP's cilíndricos	46
Tabela 11: Número de blocos produzidos em ambiente de fábrica	52
Tabela 12: Propriedades avaliadas nos blocos de concreto	56
Tabela 13: Coesão dos corpos de prova	69
Tabela 14: Massa específica, absorção e índice de vazios dos corpos de prova	70
Tabela 15: Resistência mecânica à compressão axial dos corpos de prova	71
Tabela 16: Estimativa da resistência mecânica dos blocos de concreto	72
Tabela 17: Teste ANOVA para os resultados dos corpos de prova	73
Tabela 18: Traços utilizados na moldagem em fábrica	74
Tabela 19: Análise dimensional dos blocos	77
Tabela 20: Massa específica, índice de vazios e absorção dos blocos	78
Tabela 21: Teste ANOVA para os resultados propriedades físicas blocos	80
Tabela 22: Teste "t de student" para avaliação das propriedades físicas estudadas no modelo BCT e BCR	81
Tabela 23: Umidade relativa blocos	82
Tabela 24: Resistência à compressão axial aos 7 dias de idade	82
Tabela 25: Resistência à compressão axial aos 28 dias de idade	83
Tabela 26: Teste ANOVA para os resultados de resistência à compressão axial dos blocos	85
Tabela 27: Teste "t de student" para avaliação da resistência mecânica à compressão axial aos 7 e 28 dias de idade no modelo BCT e BCR	85
Tabela 28: Coeficientes de correlação entre Corpos de prova cilíndricos e blocos	87
Tabela 29: Estimativa de custo para produção de blocos tradicionais e com	

agregados reciclados	88
Tabela 30: Custo de um aterro sanitário em sua vida útil	90
Tabela 31: Custo de destinação dos resíduos em aterro sanitário por um período de 42 anos.	90
Tabela 32: Custo unitário de cada tipo de bloco levando em conta o valor de manejo do resíduo	91
Tabela 33: Emissões de CO ₂ para blocos tradicionais (BCT) e com reciclados (BCR)	92
Tabela 34: Dados ensaio de coesão corpos de prova cilíndricos	106
Tabela 35: Dados ensaios físicos corpos de prova cilíndricos	106
Tabela 36: Dados resistência corpos de prova cilíndricos	107
Tabela 37: Dados ensaios físicos blocos de concreto	107
Tabela 38: Dados de ensaio de resistência bloco de concreto	108
Tabela 39: Equacionamento geral ANOVA três fatores	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRETE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção
ANOVA	Análise de Variância
BCR	Bloco de concreto reciclado
BCT	Bloco de concreto tradicional
BTU	Unidade térmica britânica
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
CV	Coeficiente de variação
EPS	Poliestireno Expandido
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
f_{bk}	Resistencia característica à compressão das unidades de alvenaria
f_{bm}	Resistência média dos blocos
f_{cp}	Resistência média dos corpos de prova cilíndricos
FGV	Fundação Getúlio Vargas
INCC	Índice Nacional de Custo da Construção
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
M.F.	Módulo de finura
MPa	Mega Pascal
PET	Polietileno Tereftalato
PLASTIVIDA	Instituto Socioambiental dos Plásticos
RSU	Resíduo sólido urbano

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVAS	13
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.1.1 Objetivos Específicos	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 RESÍDUO SÓLIDO URBANO	17
2.1.1 Resíduo Plástico.....	18
2.2 POLITEREFTALATO DE ETILENO – PET	19
2.3 POLIESTIRENO EXPANDIDO – EPS	20
2.4 UNIDADES DE ALVENARIA EM BLOCOS DE CONCRETO	22
2.4.1 Concreto para a Produção de Blocos.....	24
2.4.1.1 Agregados	24
2.4.1.2 Cimento Portland e Água	25
2.4.2 Formulação	26
2.4.2.1 Método de Dosagem da Besser Company.....	26
2.4.3 Aspectos de Produção.....	28
2.4.3.1 Proporcionamento e Mistura dos Materiais	28
2.4.3.2 Moldagem dos Blocos e Cura	29
2.4.4 Avaliação de Misturas de Concreto Seco para Produção de Blocos em Laboratório	30
2.5 A UTILIZAÇÃO DE PET OU EPS EM SISTEMAS DE ALVENARIA	31
3. METODOLOGIA DE PESQUISA	35
3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS (ETAPA 1)	37
3.1.1 Agregados Reciclados.....	39
3.2 ESTUDO DOSAGEM DE TRAÇO DE REFERÊNCIA E SUBSTITUIÇÕES (ETAPA 2)	40
3.2.1 Dosagem de Referência	40
3.2.2 Combinação de Agregados	40
3.2.3 Consumo de Cimento e Umidade da Mistura	43
3.2.4 Traço de Referência e com Agregados Reciclados	44
3.3 ESTUDO PRELIMINAR DAS MISTURAS EM LABORATÓRIO (ETAPA 3).....	46
3.3.1 Produção dos Corpos de Prova Cilíndricos	47
3.3.2 Textura Superficial	48
3.3.3 Coesão da Mistura.....	48

3.3.4 Massa Específica, Absorção e Índice de Vazios	49
3.3.5 Resistência à Compressão Axial	50
3.4 PRODUÇÃO DOS BLOCOS DO TIPO BCT E BCR EM AMBIENTE DE FÁBRICA (ETAPA 4) 52	
3.4.1 Proporcionamento, Mistura e Moldagem dos Blocos	53
3.4.2 Avaliação das Propriedades dos Blocos de Concreto	56
3.4.2.1 Resistência à Compressão Axial Blocos	57
3.4.2.2 Absorção de Água, Umidade Relativa e Análise Dimensional.....	57
3.4.2.3 Massa Específica e Índice de Vazios	58
3.5 AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE NO ASPECTO CUSTO E EMISSÃO CO ₂ (ETAPA 5)	59
3.5.1 Custo Unitário dos Blocos tipo BCT e BCR e Custo de Disposição Final dos Resíduos em Aterro Sanitário.....	60
3.5.2 Avaliação da Emissão de CO ₂ Devido a Extração e Transporte dos Insumos para Produção de BCT e BCR	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
4.1 CARACTERÍSTICA DOS MATERIAIS EMPREGADOS (ETAPA 01)	64
4.1.1 Areia Natural.....	64
4.1.2 Pó de Pedra.....	64
4.1.3 Brita 0	65
4.1.4 Pó de PET	66
4.1.5 EPS	67
4.1.6 Cimento	67
4.2 RESULTADOS AVALIAÇÃO PRELIMINAR DAS MISTURAS EM LABORATÓRIO (ETAPA 3)	67
4.2.1 Textura Superficial dos Corpos de Prova Cilíndricos	67
4.2.2 Coesão	69
4.2.3 Massa Específica, Absorção e Índice de Vazios.....	70
4.2.4 Resistência à Compressão Axial	71
4.2.5 Análise Estatística – Resultados Ensaio dos Corpos de Prova	72
4.2.6 Traços Empregados na Produção dos Blocos.....	73
4.3 RESULTADOS ENSAIOS DOS BLOCOS DE CONCRETO DO TIPO BCT E BCR (ETAPA 4) 74	
4.3.1 Textura Superficial dos Blocos de Concreto	74
4.3.2 Propriedades Físicas dos Blocos	76
4.3.2.1 Análise Dimensional.....	76
4.3.2.2 Massa Específica, Índice de Vazios e Absorção de Água.....	78

4.3.2.3 Umidade Relativa	81
4.3.3 Resistência à Compressão Axial dos Blocos de Concreto	82
4.3.3.1 Correlação dos Resultados de Resistência Mecânica – Corpos de Prova Cilíndricos e Blocos de Concreto	87
4.4 RESULTADO DA AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE NO ASPECTO CUSTO E EMISSÃO CO ₂ (ETAPA 5)	88
4.4.1 Custo Unitário dos Blocos tipo BCT e BCR e Custo de Disposição Final dos Resíduos em Aterro Sanitário.....	88
4.4.2 Avaliação da Emissão de CO ₂ Devido a Extração e Transporte dos Insumos para Produção de BCT e BCR	91
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
6. REFERÊNCIAS.....	97
APÊNDICE A – DETALHAMENTO EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA CILINDRICOS	104
APÊNDICE B – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS.....	104
APÊNDICE C – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS COM CORPOS DE PROVA CILINDRICOS (5X10CM).....	106
APÊNDICE D – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS COM BLOCOS DE CONCRETO.....	107
ANEXO A – FORMULAÇÃO DE TESTES ESTATÍSTICOS APLICADOS NO TRABALHO	109

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVAS

A indústria da construção civil exige uma grande demanda de material para suas atividades, a extração de recursos como o caso de jazidas de areia ou material pétreo, consome grande quantidade de matéria-prima não renovável de origem natural (HOOD, 2006). Em 2014, o consumo *per capita* de agregado no Brasil chegou a 3,7 toneladas. Em países ricos, como o caso dos Estados Unidos, esse número chega a 9 toneladas por habitante/ano. Uma habitação popular de 50m² consome cerca de 68 toneladas de agregados para ser construída, ou 1,36 tonelada por metro quadrado de construção. Ao longo dos anos, a demanda de agregado aumentou no Brasil, no ano de 2000, foram produzidos 340 milhões de toneladas, com uma taxa de aumento médio de 6,20% ao ano, chegando ao pico de produção em 2013, com 745 milhões de toneladas (ANEPAC, 2015).

Para Buttler (2007), apesar das reservas de agregados atenderem a demanda no Brasil, a disponibilidade destes recursos localmente, especialmente dentro, ou no entorno dos grandes centros vem decaindo por problemas ambientais, inadequado planejamento, zoneamento restritivo e uso competitivo do solo. Tal conjuntura, causa limitações na exploração dos recursos, por restrições na obtenção de novas licenças ou renovação das existentes. A atividade de mineração para obtenção de agregados para a construção civil, também produz efeitos ambientais derivados de seu processo produtivo. Que de maneira geral, associa-se a movimentação de veículos e maquinários, consumo de recursos, degradação do relevo, uso de explosivos e perturbações em comunidades vizinhas (MMA, 1999; BACCI; LANDIM; ESTON, 2006; GRABASCK, 2016).

A exploração de jazidas, para a extração de matéria prima natural não renovável, revela ainda o atual padrão de produção linear, cujo modelo baseia-se na extração, fabricação, uso e descarte (RIBEIRO; KRUGLIANSKAS, 2014). Sistema que não apresentava problemas até as algumas décadas, dado a disponibilidade de recursos naturais e o menor número de pessoas incluídas à sociedade de consumo. Entretanto, à medida que se intensificou a industrialização, com reflexos na forma de consumo pela população, acréscimo populacional, maior quantidade de pessoas em áreas urbanas, trouxe consigo um problema no gerenciamento do volume acumulado de resíduos. Causando problemas de saneamento público, contaminação ambiental e custo social (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001).

A reciclagem de materiais como forma de reintrodução no ciclo produtivo, permite reduzir a extração de recurso natural não renovável, e suas consequências danosas ao meio ambiente. Além de possibilitar a redução do volume de material descartado em aterros sanitários, atenuando os impactos negativos, cuja forma de descarte e excesso de consumo, causam ao meio ambiente.

Somente no caso do Polietileno tereftalato (PET) e Poliestireno expandido (EPS), o descarte inadequado alcança cerca de 300 mil toneladas/ano apenas no Brasil (PLASTIVIDA, 2015; ABIPET, 2016). A crescente demanda de uso desses materiais plásticos, focado principalmente na área de embalagens, que tem como característica o uso e descarte rápido, corrobora ao problema. Parte dos resíduos pós-consumo são direcionados a reciclagem, para reutilização como matéria prima na manufatura de outros produtos. O material excedente, que não é reciclado, é direcionado a aterros sanitários causando problemas de diminuição do volume aproveitável de depósito, e gerando custos logísticos para municípios. A outra parcela acaba sendo destinada à lixões, depositado em rios, mares, córregos ou obstruindo sistemas de drenagem de águas pluviais (TEODÓSIO; DIAS, 2006).

Nesse contexto, a utilização de resíduos na construção civil, com o reaproveitamento e prolongamento da vida útil de materiais descartados, pode trazer benefícios ao meio ambiente. O estudo para a utilização de materiais reciclados traz consigo ainda, a oportunidade de ampliação de emprego e renda a trabalhadores do ramo de reciclagem, conduzido pela criação de novas formas de reintrodução desses materiais como matéria prima em processos produtivos. Promovendo a destinação adequada de resíduos descartados, principalmente materiais com característica de uso único, que estão presentes dentro da massa de resíduos sólidos urbanos.

Esta pesquisa, tem como enfoque o desenvolvimento e avaliação da utilização de materiais reciclados, como alternativa à incorporação no uso em sistemas de alvenaria. O estudo contempla o desenvolvimento e avaliação de parâmetros de desempenho físico e mecânico dos blocos com os agregados reciclados (BCR), seu impacto no custo de insumos para produção, e comparativo de emissão de CO₂ com o modelo de bloco tradicional (BCT). O trabalho traz a possibilidade do emprego de materiais na forma triturada, com uso de processos de reciclagem já estabelecidos, e possibilita utilização da mesma infraestrutura de equipamentos já empregada em blocos tradicionais, trazendo viabilidade, neste quesito, de implementação de produção imediata e em escala. O uso de agregados provenientes da reciclagem de PET e EPS em sistemas de alvenaria,

pode ser explorado pelas características de leveza desses materiais, principalmente se relacionado ao método construtivo tradicional. Permitindo potencialidades pertinentes a maior produtividade, facilidade de manuseio, redução do peso próprio das estruturas e uma logística mais econômica.

Alguns estudos na literatura (SILVA, 2016; GONÇALVES, 2018), buscaram o uso de materiais com características próximas (PET ou EPS) em blocos de concreto. No entanto, empregando equipamentos de moldagem diferentes, com menor capacidade de energia de compressão, o que altera as características do produto. Considerando a forma particular que o concreto seco é moldado para a obtenção dos blocos, um estudo com o uso desses materiais de forma combinada (como agregado miúdo e graúdo), empregando para tal, equipamentos com capacidade de aplicar grande energia de adensamento. Permite de forma prática, a avaliação de qual percentual de uso dos materiais reciclados pode ser admitido, para que se tenha um produto que atenda a qualidade mínima exigida em normatização.

Ademais, não se identificou dentro da literatura, estudos relacionados ao impacto da proposta, considerando os aspectos econômico de custo e ambiental. Os trabalhos desenvolvidos, normalmente tem a temática da avaliação focando no desempenho do material em uso, percebe-se que a avaliação de critérios pertinentes a sustentabilidade, nem sempre é realizada. Uma abordagem mais sistêmica, torna-se interessante pois permite avaliação dos impactos causados pela proposta dentro de um contexto ampliado.

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar o potencial técnico, econômico e ambiental da substituição de agregados tradicionais, em diferentes proporções, por materiais reciclados de pó de PET (agregado miúdo) e EPS granular (agregado graúdo), como forma de incorporação em blocos de concreto de 14x19x39cm, e seu uso como elemento de alvenaria de classe C, sem função estrutural, seguindo premissas da NBR 6136 (ABNT, 2016).

2.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar de forma preliminar, as propriedades físicas e mecânicas, da mistura de

referência e com a adição dos reciclados, através da moldagem de corpos de prova cilíndricos, antecipadamente a produção dos blocos;

- Realizar ensaios de avaliação da característica físico-mecânica do bloco de concreto tradicional (BCT) e dos blocos de concreto reciclado (BCR), como forma de comparação, classificação e avaliação em função de requisitos das normas técnicas;
- Avaliar comparativamente o custo de insumos para a produção de bloco de concreto tradicional (BCT) e o custo dos blocos de concreto reciclado (BCR), junto a valores de descarte em aterro dos resíduos empregados;
- Avaliar o potencial impacto na emissão de CO₂ devido a extração e transporte dos agregados (tradicionais e reciclados) utilizados na produção dos blocos BCT e BCR.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados de forma sucinta, informações da literatura sobre os tópicos relacionados a pesquisa. Levantou-se dados sobre a problemática que envolve a geração de resíduos sólidos urbanos, resíduos plásticos e informações sobre os materiais empregados no estudo (PET e EPS). Dados sobre normatização, processo produtivo e dosagem de blocos de concreto. Além do levantamento de trabalhos análogos na literatura.

2.1 RESÍDUO SÓLIDO URBANO

O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) de forma inadequada, impacta diretamente o ambiente, à saúde da população e tem componentes que contribuem para alterações climáticas (GOUVEIA, 2012). Destaca-se a tendência de aumento do volume de RSU, conduzido pela expansão da população urbana e acréscimo do consumo, motivo pelo qual vem ganhando importância como um problema que ainda necessita ser equacionado (AQUINO; ALVES, 2016). Em todo planeta, são gerados anualmente cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, estima-se que ao menos 33% desse valor não tenha um manejo ambientalmente correto. Até 2050, a geração de RSU deve atingir 3,4 bilhões de toneladas (KAZA et al., 2018).

No Brasil, no ano de 2018, o poder público gastou cerca de R\$ 22 bilhões em manejo de 64,48 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. Kaza et al. (2018) cita que a gestão dos resíduos sólidos tem grande impacto no orçamento de governos locais, podendo alcançar até 20% em países de baixa renda e 10% em países de média renda. Formalmente, a quantidade de material recuperado por coleta seletiva ou por centros de triagem foi de apenas 4,26% do total (SNIS, 2019). O que significa que parte dos resíduos que poderiam ser reutilizados ou reciclados, acabam sendo direcionados à aterros sanitários ou lixões à céu aberto.

Nesse sentido o documento de 'Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos' do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019), indica que apenas 38% dos municípios brasileiros tem um sistema de coleta seletiva implantado, e 24,4% dos resíduos tem destinação à unidades de disposição consideradas inadequadas, como aterros controlados ou lixões a céu aberto.

Estima-se que apenas 13% do total de RSU gerado no Brasil e no mundo seja reciclado (IPEA, 2017; KAZA et al., 2018). Existe um grande potencial de reciclagem

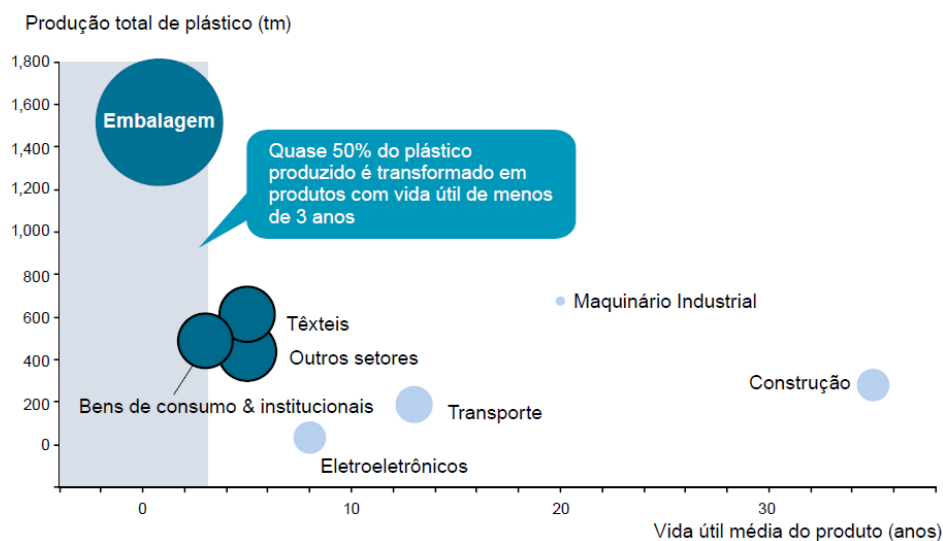
do resíduo, cuja composição tem materiais que podem gerar valor, permitindo a comercialização de matérias primas, reduzindo custos de manejo de resíduos, e atenuando os impactos ambientais provocados pela sociedade (AQUINO; ALVES, 2016).

2.1.1 Resíduo Plástico

Segundo o relatório “*State of Plastics*” (UN, 2018), das 9 bilhões de toneladas de plástico já produzidas no mundo, apenas 9% foram recicladas. Se não houver alterações nos padrões de consumo e forma de gerenciamento deste resíduo, em 2050, haverá aproximadamente 12 bilhões de toneladas de lixo plástico em aterros sanitários e no meio ambiente.

Existe uma tendência de aumento no consumo de material plástico, induzido pela sua versatilidade, baixo custo e confiabilidade. Desde 1950, houve um acréscimo na ordem de 200 vezes na produção de plástico virgem, desde o ano de 2000 o crescimento é em média de 4% ao ano. Em 2016, a produção mundial alcançou o valor de 396 milhões de toneladas, equivalente a 53Kg de plástico por pessoa no planeta (WWF; DALBERG, 2019). A indústria de embalagens é o principal setor responsável pela conversão da resina virgem em bens de consumo, que inclui produtos idealizados como descartáveis, destinado ao uso por uma única vez (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017). A Figura 1, apresenta a produção de plásticos no ano de 2016 por cada setor da indústria transformadora, com a expectativa de vida útil média dos produtos.

Figura 1: Produção de plásticos em 2016 segmentado por indústria e tempo médio de vida útil do produto



Fonte: (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017; WWF; DALBERG, 2019)

Nas condições atuais, a produção se caracteriza pela manufatura de produtos com curta vida útil, com expectativa de uso e descarte em até 3 anos. Tal condição, associada ao uso excessivo, leva a uma elevada quantidade de material pós-consumo presente no ambiente. Geyer *et al.* (2017) estima que 60% de todo o plástico produzido, já foi descartado e está acumulado em aterros ou no meio ambiente.

Kaza *et al.* (2018) indica que 12% do total de RSU coletado nas cidades é composto por resíduo plástico. No Brasil esse percentual é estimado de 13,5%, segundo a entidade do Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2019).

2.2 POLITEREFTALATO DE ETILENO – PET

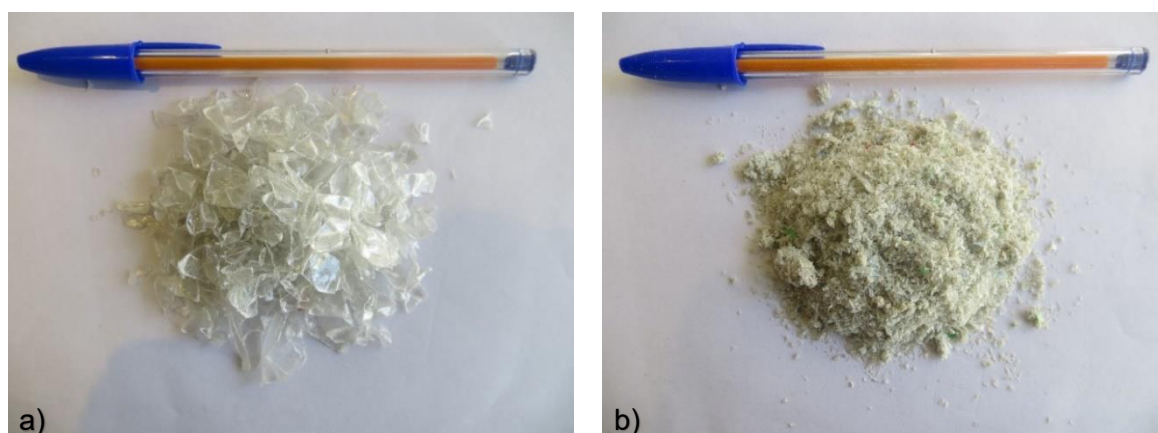
O uso do politereftalato de etileno é amplamente difundido, sendo um dos termoplásticos mais produzidos do mundo, motivo pelo qual o reaproveitamento de seu resíduo deve ser considerado. Trata-se de um poliéster insaturado, classificado como polímero termoplástico, comercialmente conhecido por PET, tem característica de ser um material de alta resistência mecânica (impacto) e química, excelente capacidade de contenção de gases e odores, densidade menor que embalagens tradicionais o que possibilita menores custos com transporte e produção. Tais propriedades tornam a utilização de PET ideal para uso em recipientes (AQUINO, 2013). No Brasil, seu emprego está alocado principalmente na indústria de embalagens (71%) (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009).

A característica, e a demanda de consumo do material, potencializa o descarte inadequado, que aliado ao fato de não ser biodegradável, torna as ações que buscam a sua reutilização de grande importância (AQUINO, 2013). Segundo a ABIPET (2016), em 2015 foram produzidos no Brasil 530 mil toneladas de embalagens PET, desse total, aproximadamente 274 mil toneladas foram recicladas. A taxa média de reciclagem no país se mantém em aproximadamente 50%, com o crescimento do volume de reciclagem até 2012, registrando queda nos anos subsequentes devido à redução da atividade econômica. Segundo Detomi (2012), o processo de reciclagem de embalagens PET pode ser classificado em 3 métodos: Reciclagem química, reciclagem energética e reciclagem mecânica.

A reciclagem mecânica é o sistema de reciclagem aplicado em quase a totalidade no Brasil, ocorre por meio da moagem das embalagens. Neste processo, o floco

de PET, demonstrado na Figura 2 (a), é basicamente o único produto obtido pelas empresas de reciclagem e destinados à indústria de fabricação de resinas. Durante o procedimento de moagem, obtém-se um pó fino chamado de pó de PET (Figura 2 (b)) que é separado do floco por meio de uma peneira vibratória após o processo de secagem (MELO, 2004). Os resíduos resultantes do processo de peneiramento pós-centrifugação (pó de PET), são considerados rejeitos, devido ao seu grau de contaminação química e granulometria muito fina (MELO, 2004; SILVA, 2016).

Figura 2: (a) Floco de PET; (b) Pó de PET;



Fonte: Autor (2020)

2.3 POLIESTIRENO EXPANDIDO – EPS

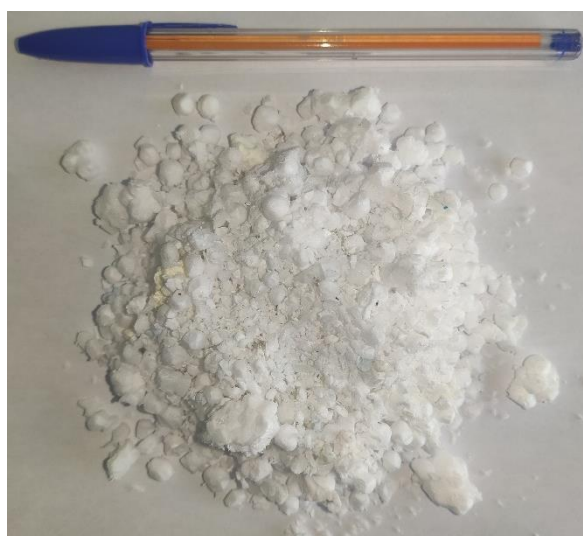
O poliestireno expandido (EPS) é um plástico celular rígido resultante da polimerização de estireno em água, foi formulado pelos químicos Fritz Stastny e Arl Buchholz em 1949 (SANTOS, 2008). Após a reação química, o EPS obtém forma de pérolas com diâmetro de até 3 milímetros, o qual é induzido a expansão através de vapor, possibilitando a moldagem em diversas formas. O produto final é inodoro, não contamina a água, ar ou solos, podendo ser reaproveitado e reciclado, inclusive com possibilidade de voltar a condição de matéria prima (SILVA, 2010).

O material tem características que favorecem o uso em larga escala, entre eles: leveza, facilidade de manuseio, capacidade de isolamento térmico e baixo custo. Sua utilização envolve a aplicação em áreas como agricultura, construção civil, indústria de embalagens de alimentos, eletroeletrônicos, bebidas, elementos decorativos etc. (SANTOS, 2008). Sua composição final é formada por 2% de poliestireno e 98% de vazios, tem formato de espuma com micro células fechadas, e grande desempenho térmico como

material isolante em temperaturas de -70° a 80° centígrados (SILVA, 2010).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Química – ABIQUIM (2017), em 2017 foram produzidas mais de 50 mil toneladas de EPS no Brasil, de 1999 a 2017 houve um crescimento anual de 4,8% na produção. O principal uso de EPS no Brasil é focado na indústria de embalagens, consumindo cerca de 50% do total, seguido pela construção civil que absorve 28%. O EPS utilizado em embalagens possui a característica de curta vida útil, normalmente, com descarte após único uso, causando problemas ambientais por ser um material não biodegradável. A solução de depósito do material em aterro, ou mesmo incineração, não resolvem por completo a problemática, pois causam poluição secundária (GUTIÉRREZ et al., 2012). Existem três métodos de reciclagem do EPS (CRUZ, 2015): Reciclagem mecânica, reciclagem química, reciclagem energética. A Figura 3 apresenta EPS obtido através de reciclagem mecânica.

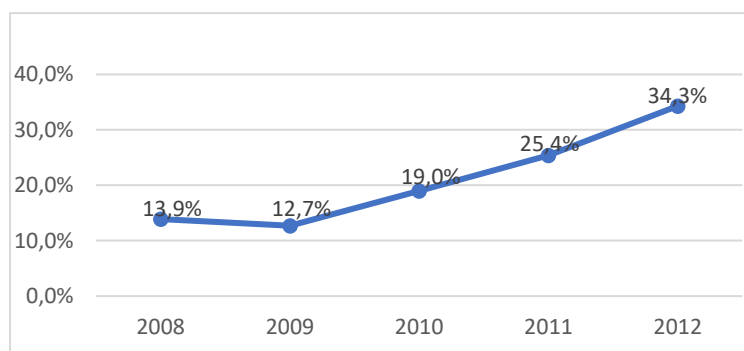
Figura 3: EPS granular reciclado de forma mecânica



Fonte: Autor (2021)

O Brasil vem aumentando a taxa de reciclagem de EPS ao longo dos anos, dados apresentados pelo Instituto Plastivida, demonstram que desde o ano de 2008 o índice de material reciclado vem crescendo em média de 4% ao ano. A Figura 4 apresenta a evolução da reciclagem mecânica do material no país (PLASTIVIDA, 2015).

Figura 4: Índice de reciclagem mecânica de EPS



Fonte: Adaptado de (PLASTIVIDA, 2015)

Apesar do crescimento dos índices, somente pouco mais de um terço do material é destinado a reciclagem, visando o reaproveitamento em novos processos produtivos.

2.4 UNIDADES DE ALVENARIA EM BLOCOS DE CONCRETO

Segundo Sabbatini (1984) alvenaria pode ser definida como um componente complexo empregado na construção sendo conformado diretamente em obra, é composto por tijolos ou blocos unidos entre si por juntas de argamassa, formando um sistema rígido e coeso. A alvenaria formada por blocos de concreto pode assumir a função de vedação, ou seja, tão somente capaz de suportar seu peso próprio, ou agregar a função estrutural, nesse caso, através de dimensionamento racional, a qual deve suportar todas as cargas e solicitações que a edificação é submetida.

A unidade de bloco é o componente mais resistente do sistema, o que o torna o principal elemento no conjunto, a característica dos blocos de concreto dependem fundamentalmente dos seguintes fatores: natureza dos materiais constituintes, umidade do material usado na moldagem, proporcionamento dos materiais, grau de compactação conferido (equipamento) e método de cura (MEDEIROS; SABBATINI, 1993). A NBR 6136 (ABNT, 2016) estabelece definições e requisitos aos blocos vazados de concreto destinados a sistemas de alvenaria, o documento traz diretrizes relacionados a dimensão, aparência, característica físico-mecânica e procedimentos de inspeção. A norma Brasileira subdivide os blocos em três classes:

- **Classe A:** Bloco com função estrutural, resistência característica à compressão axial em área bruta $f_{bk} \geq 8,00$ MPa, aos 28 dias.

- **Classe B:** Bloco com função estrutural, resistência característica à compressão axial em área bruta entre $4,00 \text{ MPa} \leq f_{bk} < 8,00 \text{ MPa}$, aos 28 dias.
- **Classe C:** Com ou sem função estrutural, resistência característica à compressão axial em área bruta $f_{bk} \geq 3,00 \text{ MPa}$, aos 28 dias.

O uso de blocos com a classificação C, pode ser determinado pela largura do elemento: 65 mm, usado somente em sistemas de alvenaria sem função estrutural, com 90 mm, restringe à utilização em edificações de no máximo um pavimento. Para 115mm, possibilita a construção de edificações de no máximo dois pavimentos, 140 mm e 190mm edificações de até cinco pavimentos. As larguras mínimas das paredes longitudinais e transversais para o modelo de classe C, deve ser em média de 18mm.

As dimensões dos elementos são padronizadas, adotam-se medidas em módulos, em acordo com o que preconiza a NBR 15873 (ABNT, 2010), norma direcionada a coordenação modular para edificações. Busca-se promover a compatibilidade dimensional entre elementos e componentes construtivos. A Tabela 1, apresenta a padronização de dimensões para o modelo de bloco de concreto predominante, segundo a NBR 6136 (ABNT, 2016)

Tabela 1: Padronização das dimensões nominais dos blocos de concreto

Módulo /Família	M-20	M-15		M-12,5			M-10		M-7,5
Linha	20x40	15x40	15x30	12,5x40	12,5x25	12,5x37,5	10x40	10x30	7,5x40
Largura (mm)	190	140	140	115	115	115	90	90	65
Altura (mm)	190	190	190	190	190	190	190	190	190
Comprimento (mm)	390	390	290	390	240	365	390	190	390

Fonte: Adaptado de NBR 6136 (ABNT, 2016)

A norma estabelece ainda, dimensões para elementos complementares, tais como: meio bloco, canaleta, meia canaleta etc. E tolerâncias dimensionais admitidas nos componentes, sendo 2,0mm para a largura, e 3,0mm para altura e comprimento.

Além dos requisitos mínimos pertinentes a resistência mecânica, blocos de concreto devem atender a limites relacionados a absorção de água. A NBR 6136 (ABNT, 2016) admite valores dependendo da classe do elemento, modelos de blocos classe A, B e C, devem apresentar valores médios de até 8%, 9% e 10%, respectivamente. Caso seja empregado agregados leves na composição do bloco (argila expandida, vermiculita etc.),

permite-se o valor médio de até 13%.

A especificação dos métodos de ensaios para análise das propriedades requeridas, são normatizadas pela NBR 12118 (ABNT, 2013).

2.4.1 Concreto para a Produção de Blocos

O uso do cimento Portland combinado com agregados, água e eventuais aditivos e adições atinge um grande leque de possibilidades de uso (OLIVEIRA, 2004). Neville (2015) classifica concreto em duas principais categorias, “plástico” e concreto “seco”. Em termos gerais, o primeiro é misturado com seus materiais constituintes utilizando maior proporção de água, o que lhe confere maior trabalhabilidade para ser lançado e adensado com a utilização de equipamentos simples, trata-se de um concreto fluído e mais comumente utilizado.

Para a produção de blocos de concreto, a indústria se utiliza de concreto denominado “seco”, que possui a característica de ter baixa umidade, variando em torno de 6 a 8%, da massa dos materiais secos. O método é possibilitado pela utilização de máquinas de adensamento, que permitem a moldagem do material em moldes sem necessidade de formas provisórias. A característica do concreto seco é diferente do concreto plástico convencional, pois não segue na íntegra a “Lei de Abrams”, a redução da quantidade de água em concretos secos, não caracteriza o aumento de resistência mecânica no estado endurecido. Normalmente, quando adicionado volumes maiores de água, a mistura tende a aumentar (dentro de um limite) a resistência mecânica, pois o maior teor de água, facilita o processo de moldagem por vibroprensagem pelos equipamentos (FRASSON, 2000).

2.4.1.1 Agregados

Os agregados são responsáveis pela maior parte do volume existente no concreto, como consequência, características como resistência mecânica e distribuição granulométrica tem grande influência nas propriedades finais dos blocos (MEDEIROS, 1993). Para Fernandes (2019), os principais requisitos que determinam a qualidade de um agregado para produção de blocos de concreto são: Tipo de rocha, dimensão máxima, formato, rugosidade superficial; dureza dos grãos, limpeza e distribuição granulométrica.

De forma a garantir que os agregados proporcionem propriedades

satisfatórias, estabelece-se características relacionadas a limites de qualidade. A NBR 6136 (ABNT, 2016) constitui que os agregados graúdos e miúdos estejam em acordo com os requisitos constantes na NBR 7211 (ABNT, 2009), devendo atender condições como granulometria, teor de materiais friáveis, materiais carbonosos, impurezas orgânicas e material pulverulento.

O agregado miúdo condiciona propriedades aos blocos de concreto em sua textura superficial, quanto mais fino for o agregado, mais liso será sua textura. Também tem responsabilidade na característica de coesão a mistura, propriedade necessária para que a peça mantenha-se íntegra após a moldagem, e resista aos impactos de movimentação nas primeiras idades (EPUSP/ENCOL, 1991; MEDEIROS, 1993; FERREIRA, 1995; FERNANDES, 2019).

Os agregados graúdos empregados na confecção de blocos, normalmente são oriundos da britagem de rochas duras (calcários dolomíticos, basálticos e granitos). A faixa granulométrica deve ser restrita a zona de graduação zero segundo NBR 7211 (ABNT, 2009), o grão do agregado não pode ter dimensão maior que 10 mm, para que não ocorram danos a matriz do molde do equipamento durante o processo de moldagem (EPUSP/ENCOL, 1991). Tal recomendação é ratificada pela NBR 6136 (ABNT, 2016), que proíbe a utilização de agregados com grãos que tenham dimensão máxima característica superior a metade da espessura da parede do bloco.

A NBR 6136 (ABNT, 2016) permite o uso de agregados leves, desde que a condição final do produto esteja em acordo com os requisitos físicos-mecânicos, estabelecidos no documento.

2.4.1.2 Cimento Portland e Água

A NBR 6136 (ABNT, 2016) indica a produção de blocos de concreto utilizando cimento Portland que obedeça as especificações das normas Brasileiras destinadas a aplicação em concretos e argamassas. Portanto, qualquer tipo de cimento pode ser empregado, desde que tenha os requisitos mínimos de qualidade. (FERNANDES, 2019).

A avaliação da qualidade da água utilizada na produção de blocos, deve-se levar em conta que as impurezas presentes podem interferir na hidratação do cimento, e prejudicar a resistência do concreto ou até causar manchas. Em geral, estabelece que o uso de água potável é acertado para uso em concretos (NEVILLE, 2015).

2.4.2 Formulação

A metodologia de formulação da mistura para concreto tipo seco, normalmente, baseia-se em ajustes nas características dos agregados miúdo e graúdo. E tem o intuito de se obter um menor volume de vazios ou apresentar uma curva granulométrica combinada adequada (FRASSON, 2000). Os aspectos que envolvem a dosagem de concreto para a produção de blocos, tem-se segundo Medeiros (1993), condições principais que devem ser satisfeitas, sendo:

- Capacidade de coesão, para que seja possível o procedimento de desforma e transporte dos blocos logo após a moldagem;
- Máxima compacidade;
- Resistência mecânica compatível com a aplicação destinada;
- Textura superficial ajustada ao uso (bloco aparente ou revestido).

Os principais métodos empregados na formulação de traços para produção de blocos de concreto são: Besser Company, método ABCP (FERREIRA, 1995), método IPT/EPUSP para concretos secos (TANGO, 1994) e método Colúmbia Wilk (1948 *apud* (FRASSON, 2000) e Menzel (1934 *apud* (FRASSON, 2000)).

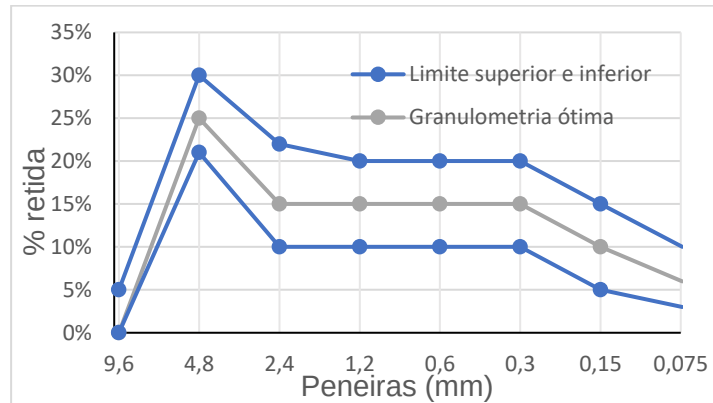
De modo geral, o conceito de formulação da mistura é a determinação da proporção mais apropriada de agregado miúdo e graúdo com o objetivo de alcançar a maior compacidade possível, seja pela determinação por ensaios do menor índices de vazios ou análise da granulometria combinada dos agregados. Neste trabalho será apresentado o método Besser Company, considerando o seu emprego durante a fase experimental da pesquisa.

2.4.2.1 Método de Dosagem da Besser Company

O método Besser foi formulado pelo pesquisador norte americano Lucas E. Pfeiffenberger, e adotado pela empresa fabricante de equipamento de vibroprensa chamada Besser Company. Modelo foi adaptado por Medeiros (1993) e EPUSP/ENCOL (1991) para utilização em fábricas Brasileiras, com procedimentos mais adequados a situação específica nacional (FRASSON, 2000). O método se inicia com a indicação de uma combinação entre agregados, cuja função é melhorar a compacidade do material

através de uma distribuição granulométrica determinada, que deve se adequar aos limites demonstrados na Figura 5.

Figura 5: Curva granulométrica indicada para dosagem de blocos de concreto



Fonte: Adaptado de (FRASSON, 2007) apud (Pfeiffenberger, 1985)

Para que seja determinada a fração de agregado miúdo e graúdo na mistura, o método aplica a seguinte equação para definição da combinação de agregados (MEDEIROS, 1993):

$$X = (A-B) / (A-C) \times 100\% \quad (1)$$

$$Y = 100\% - X \quad (2)$$

Onde:

A = módulo de finura do agregado graúdo; B = módulo de finura desejado para os agregados combinados; C = módulo de finura do agregado miúdo; X = percentagem de agregado miúdo desejada; Y = percentagem de agregado graúdo desejada.

Após a determinação das frações que correspondem aos percentuais de agregado miúdo e graúdo, a obtenção da curva granulométrica combinada, se dá através da multiplicação das percentagens retidas nas peneiras. Dessa forma, é possível avaliar se a combinação dos agregados atende a faixas de graduação previstas na Figura 5 (EPUSP/ENCOL, 1991). Em uma próxima etapa, requer-se a produção de um traço piloto, baseando-se na resistência desejada dos blocos, determina-se a proporção entre cimento e agregado indicado na Tabela 2.

Tabela 2: Relação de cimento e agregado proposto para produção de blocos

	Resistência à compressão média (MPa)			
	4,5	6,0	8,0	9,0
	1:9	1:8	1:7	1:6
	a	a	a	a
Relação cimento / agregado (em massa)	1:12	1:10	1:9	1:8

Fonte (EPUSP/ENCOL, 1991)

A umidade da mistura normalmente oscila entre 6 e 7,5% da somatória em massa dos materiais secos. O valor tem variação em função das características dos materiais utilizados, equipamentos de moldagem e o emprego de aditivos (MEDEIROS, 1993).

2.4.3 Aspectos de Produção

Fernandes (2019) indica que o equipamento empregado para produção dos blocos influencia significativamente o resultado do produto. Pode-se utilizar uma máquina manual na produção, com pouca capacidade de compactação, que permite obter blocos com resistência aproximada de 4 MPa, utilizando uma quantidade de cimento na ordem de 25% do seu peso. Como também, um equipamento de vibroprensa hidráulico automatizado, que possibilita confeccionar blocos com a mesma resistência, com apenas 4% de cimento em sua mistura, tendo ainda uma capacidade produtiva superior.

Cada fábrica utiliza no seu processo de produção diferentes metodologias, com emprego de variados modelos de equipamentos. Algumas, procedem o proporcionamento da matéria prima em massa, outras em volume. Realizam ensaios para controle da umidade de agregados, ou utilizam sensores acoplados ao misturador como forma de automatizar o processo. Empregam-se variadas formas cura (natural, vapor ou autoclave). Cada uma destas particularidades, ligada a etapa de produção, tem influência na característica final do produto.

2.4.3.1 Proporcionamento e Mistura dos Materiais

O proporcionamento dos materiais caracteriza-se pela medição das quantidades de cada componente do traço estabelecido, pode ser realizado em massa ou volume. Quanto maior for a precisão no atendimento as proporções definidas entre os materiais, menor será a variação da qualidade final do produto. Normalmente, a separação

em volume, conduz a uma maior alteração no processo. Está relacionada principalmente ao controle de umidade dos agregados, que tem a consequência de causar o efeito de inchamento do agregado miúdo, e sem as devidas correções, modifica as proporções entre materiais constantes no traço. A umidade presente nos agregados também pode levar o acréscimo de água à mistura (TANGO, 1984).

Para Ferreira (1995), a forma mais adequada seria a pesagem dos materiais, utilizando os agregados secos, ou com seu teor de umidade previamente aferido, para então subtrair do total da água de amassamento. O proporcionamento mais uniforme dos materiais na mistura, permite o emprego da mínima quantidade de cimento para uma certa resistência à compressão característica.

Após o proporcionamento, ocorre a mistura dos materiais constituintes do bloco de concreto, deve-se empregar um processo eficiente de mistura, para que o produto seja homogêneo. Por esta razão, empregam-se equipamentos capazes de conferir tal característica (FRASSON, 2000; FERNANDES, 2019). O tempo mínimo de mistura, depende do equipamento empregado, mas é de aproximadamente 2,5 minutos, não devendo ser prolongado para mais de 5 minutos para não ocorra a segregação dos materiais (MEDEIROS, 1993).

2.4.3.2 Moldagem dos Blocos e Cura

Os equipamentos utilizados na moldagem dos blocos de concreto funcionam por meio de compressão e vibração simultânea, a mistura é confinada nos moldes, e devido a sua coesão possibilita a imediata desmoldagem. Como descrito, as características dos equipamentos têm grande importância na qualidade final dos blocos (TANGO, 1984; FRASSON, 2000). Quanto maior a capacidade do equipamento para realizar o adensamento da mistura, menor o consumo de cimento para uma dada resistência (os mais eficientes são os modelos hidráulicos). Equipamentos manuais podem ser utilizados na fabricação de blocos de concreto, contudo, devido à falta de energia de prensagem, se consome mais cimento para atingir a resistência requerida (FERNANDES, 2019).

O processo de cura dos blocos também tem grande importância para garantir que as reações de hidratação do cimento ocorram por completo, condicionado principalmente pelas extremas condições de dosagem, com o emprego mínimo de cimento e água durante o processo (MEDEIROS; SABBATINI, 1993). Normalmente, os sistemas

mais empregados são a cura natural, com a manutenção das peças úmidas e protegidas de insolação direta e vento. Ou a cura a vapor, que consiste em facilitar a penetração da umidade nos blocos por meio de diferencial de pressão criado no ar saturado no interior de câmaras (MEDEIROS, 1993)

2.4.4 Avaliação de Misturas de Concreto Seco para Produção de Blocos em Laboratório

O estudo de dosagem que utiliza concreto seco para a produção de blocos, envolve um equipamento de vibro-prensa no seu adensamento, assim, normalmente a avaliação de novas misturas ou componentes ocorre na própria fábrica. O que acarreta custos em função da necessidade de intervenção no processo produtivo, além do consumo maior de matéria prima (cimento e agregado), em função de atendimento da capacidade operacional mínima dos equipamentos.

Dentro da literatura, foram encontrados alguns estudos que buscaram correlacionar as propriedades do material do bloco, com corpos de prova produzidos em laboratório (FRASSON, 2000; BARBOSA, 2004; BUTTLER, 2007; SOTO IZQUIERDO, 2015). De modo geral, as pesquisas buscaram identificar fatores de correlação para resistência mecânica, e propriedades físicas de exemplares moldados em laboratório com o bloco de concreto. Em parte, alguns estudos tinham o objetivo de avaliar de forma prévia uma quantidade maior de traços, selecionando os mais promissores para moldagem em fábrica.

Frasson (2000) estudou uma maneira de comparação entre a resistência mecânica de CPs cilíndricos 5x10cm com blocos produzidos em fábrica, buscando uma relação entre ambos. Foram produzidos exemplares com a mesma mistura, onde que a única variável era a massa específica fresca, determinada através de estudo de pesagem dos blocos recém moldados de cada série. Os corpos de prova eram moldados com o material previamente pesado, de modo a atingir a mesma massa específica dos blocos, a energia de adensamento era constante, fixada em 4 camadas com 20 golpes cada. A pesquisa obteve uma relação entre a resistência mecânica à compressão axial do corpo de prova e do bloco um valor médio de 0,80.

Barbosa (2004) avaliou corpos de prova cilíndricos com diferentes dimensões (5x10cm, 10x20cm, 15x30cm) comparativamente com blocos, utilizando concreto de consistência plástica e procedimento de moldagem semelhante. O estudo não apontou para uma relação fixa entre a resistência mecânica dos CP's e blocos. O modelo

de CP com dimensão de 5x10cm teve resistência de 13% a 31% maior que os blocos. O pesquisador observou que a obtenção de uma relação absoluta se torna dificultada, considerando a variedade de formas geométricas que o bloco pode assumir, e a variabilidade no processo de adensamento, a qual se modifica em função de cada modelo de equipamento e a própria regulagem dos tempos de produção.

O programa de pesquisa realizado por Buttler (2007), também aferiu propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova cilíndricos (5x10cm) comparativamente a blocos. Em procedimento semelhante ao adotado por Frasson (2000), o pesquisador produziu exemplares (CP's) modificando a energia de adensamento, através da variação do número de golpes no processo de moldagem, fixando o método de compactação que mais aproximava do equipamento. Os resultados demonstram uma variação da correlação de resistência mecânica à compressão, não obtendo um valor fixo, o pesquisador considerou apropriado um intervalo de valores em sua pesquisa de 0,80 a 1,30, como relação entre a resistência mecânica à compressão axial do corpo de prova e um bloco de concreto.

Izquierdo (2015) utilizou em seu trabalho CP's cilíndricos 5x10cm, buscando avaliar características físico-mecânicas dos materiais de forma preliminar, para diferentes tipos de misturas. O trabalho não teve o intuito de se aferir uma correlação (corpos de prova x blocos de concreto), mas um indicativo do comportamento do material previamente ao uso da vibroprensa. O estudo piloto possibilitou a avaliação de várias composições de traços com a adição de dois tipos de resíduos, selecionado parte das misturas para a moldagem no equipamento.

2.5 A UTILIZAÇÃO DE PET OU EPS EM SISTEMAS DE ALVENARIA

Diversos pesquisadores buscaram desenvolver formas de reaproveitamento de PET ou EPS como matéria prima na construção civil, direcionando a aplicação em unidades de alvenaria (BEZERRA, 2003; KANNING, 2008; VIEGAS, 2012; GALLI et al., 2013; NETO; GABRIEL; FILHO, 2013; SAXENA; SINGH, 2013; MANSOUR; ALI, 2015; FERNANDES, 2016; SAFINIA; ALKALBANI, 2016; RATHINAM, 2017; PATIL et al., 2018; SILVA; SANTOS, 2019).

Alguns estudos desenvolveram sistemas que utilizam a própria embalagem PET (garrafa) como componente de alvenaria, normalmente envolto por uma camada de material cimentício com a função de dar acabamento à superfície ou melhorar as

propriedades mecânicas do conjunto. O uso de PET em forma de flocos, pó ou fibra, também é empregado em estudos de materiais cimentícios, que podem vir a ser utilizados em sistemas de alvenaria. A matéria prima é obtida através de processo de moagem do PET, utilizando equipamentos mecânicos ou mesmo de forma manual com corte diretamente em garrafas.

Uso de EPS também é empregado em sistemas de alvenaria, podendo ser painéis monolíticos revestidos por material cimentício. EPS em pérolas, ou grânulos provenientes de reciclagem mecânica para formação de compósitos cimentícios, focados principalmente em desempenho térmico e menor densidade.

Alguns estudos utilizaram PET ou EPS em concreto do tipo seco para produção de blocos de alvenaria. Silva (2016) desenvolveu um estudo para adição de Politereftalato de etileno (PET) micronizado na confecção de blocos de concreto com função estrutural, após a caracterização das matérias-primas, realizou-se uma investigação de dosagem para a incorporação de PET em substituição ao agregado miúdo nas proporções de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10%. Foi utilizado um traço de referência (sem adição) na proporção de 1:3,32 (cimento:agregado). O autor observou que a incorporação de PET aumentou a absorção de água e reduziu o peso específico dos blocos, também modificou as características mecânicas dos blocos, reduzindo a resistência compressão da unidade de bloco quando comparado ao de referência. Aos 28 dias, atingiu-se a resistência característica de 6,85 MPa, 5,03 MPa, 4,40 MPa, 3,46 MPa e 3,01 MPa, para teores de 0,0%, 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10% respectivamente, os resultados indicaram que os blocos podem ser classificados como classe B ou C, podendo adquirir função estrutural, conforme a NBR 6136 (ABNT, 2016).

Barreto *et al.* (2019) produziu blocos de concreto adicionado fragmentos de PET com dimensões aproximadas de 2,36mm a 4,75mm (floco), substituiu-se o volume de agregado miúdo pelo material reciclado em teores de 15%, 30% e 45%, o traço em massa de referência foi de 1:5:0,7 (cimento:pó de pedra:água) moldados em um equipamento tipo manual, empregado usualmente para produção de tijolos do tipo solo-cimento. Os resultados demonstrados na Tabela 3, mostram que a proporção de 15% de PET conduziu a um pequeno incremento na resistência mecânica, seguido da redução para percentuais maiores.

Tabela 3: Resultados pesquisa bloco concreto com PET

Proporção de PET	Resistência a compressão 28dias (MPa)	Absorção de água (%)
0%	5,58	12,77
15%	5,71	10,92
30%	3,54	13,34
45%	2,73	17,19

Fonte: Adaptado de (BARRETO et al., 2019)

A pesquisa avaliou a absorção de água dos espécimes, o teor de 15% obteve um percentual de absorção de cerca de 14% menor, em relação ao de referência, possivelmente indicando um concreto menos poroso que os demais.

O uso de EPS como componente para sistemas de alvenaria foi proposto no programa de pesquisa de Gonçalves (2018). O estudo moldou blocos de concreto utilizando EPS reciclado (grânulos) em substituição volumétrica ao agregado graúdo, em teores de 5%, 10% e 15%. A proporção do traço em massa foi de 1:7,6:0,5 (cimento:agregado:água), a pesquisa utilizou um modelo de vibroprensa tipo manual para a moldagem. Os principais resultados obtidos no trabalho estão detalhados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados pesquisa bloco concreto com EPS

Proporção de EPS	Resistência a compressão 28dias (MPa)	Absorção de água (%)	Massa específica seca (Kg/m³)	Umidade relativa (%)
0%	3,95	5,91	2035,66	30,49
5%	4,02	6,33	1956,47	27,88
10%	2,59	7,07	1910,79	26,56
15%	2,25	8,69	1878,68	25,24

Fonte: Adaptado de (GONÇALVES, 2018)

Blocos com teores de 5% de substituição obtiveram um ligeiro aumento na resistência mecânica, entretanto, o autor considerou o resultado estatisticamente desprezível em função do desvio padrão entre traços (0% e 5%). Como esperado, o aumento gradativo de inserção do EPS em substituição a Brita 0, reduziu a resistência do sistema, motivado pela diferença da capacidade resistiva dos materiais.

O teor de EPS trouxe uma proporcionalidade oposta entre propriedades de absorção e umidade relativa, ambas relacionadas a presença de água nos blocos. Para Gonçalves (2018), a redução da umidade relativa ocorreu devido a condições de hidrofobicidade do EPS. Já o acréscimo de absorção, se justifica pela ocorrência de

porosidade da mistura ocasionada pela incorporação de líquidos do sistema. Ozório (2017) cita a vantagem de utilização de EPS como agregado em concretos com características leveza devido ao material ter baixa capacidade de absorção de água, inclusive durante a fase de hidratação dos compósitos de cimento.

De forma geral, as pesquisas que envolvem o PET e EPS como agregados em compósitos cimentícios, indicam a redução da resistência mecânica à medida que aumenta sua incorporação (SABAA; RASIAH, 1997; ALBANO et al., 2009; CHOI et al., 2009; MODRO et al., 2009; MADANDOUST; RANJBAR; YASIN MOUSAVI, 2011; DETOMI, 2012; FABIAN S. CAMPOS et al., 2014; PEREIRA, 2016; GUERRA; ROCHA; OKABAYASHI, 2017; RODRIGUES et al., 2017). São materiais que não apresentam propriedades para composição de elementos que necessitam de alto desempenho estrutural, mas podem ser avaliados na utilização em sistemas de vedação sem função estrutural, ou mesmo com função estrutural em menor grau de exigência. Permitindo explorar outras vantagens técnicas importantes em um sistema de alvenaria, como redução de massa e desempenho térmico.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

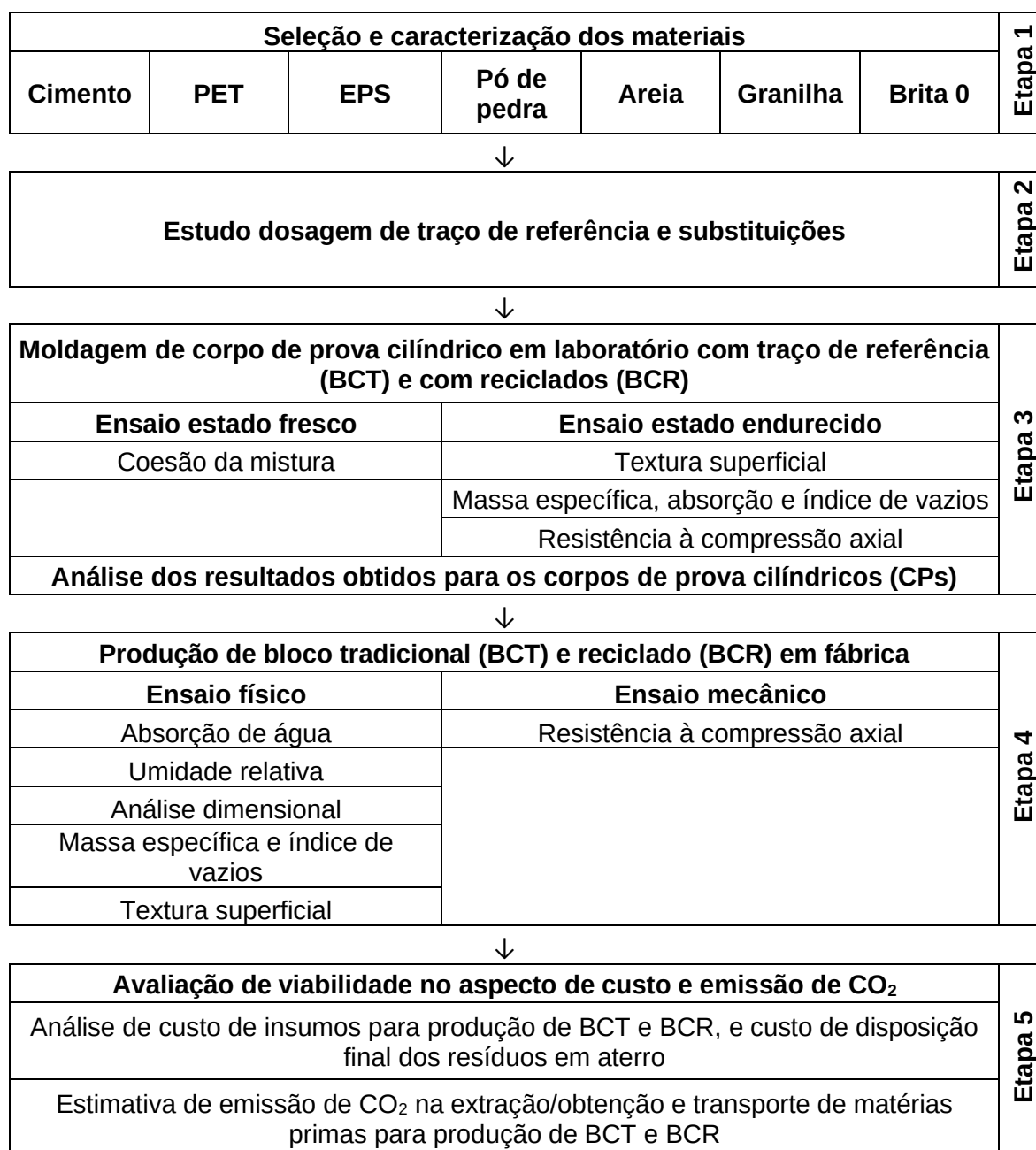
Para atendimento aos objetivos propostos, o método de pesquisa foi concebido em cinco etapas. Compreendendo no desenvolvimento do bloco de concreto com agregados reciclados (BCR), através de um estudo experimental, que inclui o levantamento de características dos materiais utilizados, desenvolvimento e avaliação do desempenho para uso dos blocos tipo BCR.

Os dados obtidos são comparados a características de blocos de concreto produzidos com agregados tradicionais (BCT), e aos parâmetros normativos direcionados a blocos de classe C, sem função estrutural (NBR 6136 (ABNT, 2016)). A pesquisa utilizou a infraestrutura de equipamentos usualmente empregada em uma fábrica para a produção de blocos.

O trabalho também contempla avaliações de viabilidade no aspecto de custo e emissão de CO₂, buscando conhecer o efeito da proposta associada a custo de insumos de produção dos blocos, custo de manejo de resíduos e estimativa de emissão de CO₂. Os tópicos a seguir e a Figura 6, detalham os procedimentos e critérios empregados na pesquisa:

- a) **Etapa 01:** Seleção e caracterização dos materiais;
- b) **Etapa 02:** Estudo de dosagem do concreto para formulação do traço de referência e traço com adição de materiais reciclados;
- c) **Etapa 03:** Análise experimental preliminar da mistura em laboratório, através de moldagem de corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5x10cm. Submetidos a ensaios para avaliação de suas características físicas e mecânicas. Os traços que apresentarem desempenho superior nas premissas estabelecidas, foram selecionados para a próxima etapa;
- d) **Etapa 04:** Produção dos blocos de concreto tradicional (BCT) e reciclado (BCR) em fábrica. Unidades com dimensões de 14cmx19cmx39cm, utilizando misturas selecionadas conforme critérios estabelecidos na etapa anterior. Os espécimes foram avaliados através de ensaios para determinação de suas características físicas e mecânicas;
- e) **Etapa 05:** A avaliação do reflexo da proposta considerando custo de insumos, custo de manejo dos resíduos e estimativa de emissão de CO₂.

Figura 6: Planejamento de pesquisa



Fonte: Autor (2021)

Os ensaios de caracterização dos materiais, propriedades físicas dos corpos de prova e blocos de concreto foram realizadas no laboratório de Engenharia Civil da UNILA, LACTEC – SETOR SUL, nas dependências do Parque Tecnológico de ITAIPU – PTI, em Foz do Iguaçu – PR. Os ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos e blocos de concreto, foram realizados no laboratório da empresa Dobra Engenharia na cidade de Cascavel – PR.

3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS (ETAPA 1)

Os materiais utilizados para desenvolvimento da pesquisa foram agregados miúdos e graúdos usualmente empregados na produção de blocos de concreto, cimento, aditivo, água e material proveniente de indústrias de reciclagem de PET e EPS.

Na Figura 7 são apresentados os quatro tipos de agregados selecionados para a pesquisa, convencionados neste trabalho como agregado tradicional, comercialmente denominados: areia natural, pó de pedra, granilha e brita 0. Sendo os dois primeiros considerados agregado miúdo e o restante agregado graúdo. O material foi doado pela empresa CR lajes e pavers do município de Foz do Iguaçu – PR. São insumos normalmente utilizados na produção de artefatos de cimento pela fábrica, incluindo a produção de blocos de concreto.

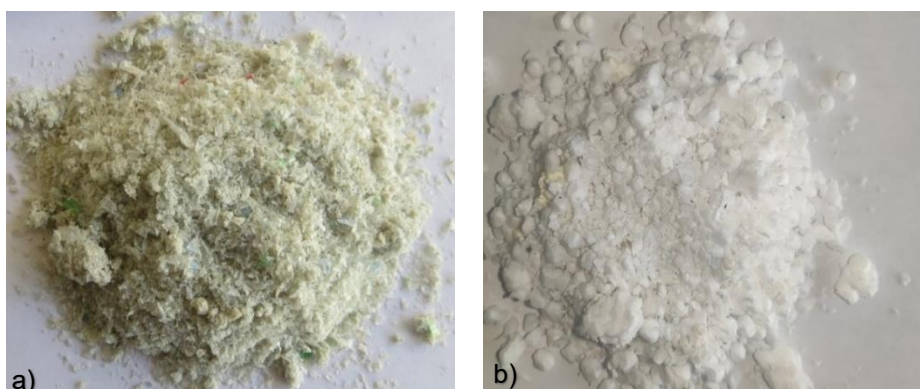
Figura 7: (a) Areia natural; (b) Pó de pedra; (c) Granilha; (d) Brita 0



Fonte: Autor (2020)

O material reciclado selecionado foi o Pó de PET (Figura 8 (a)), adquirido da empresa recicladora PETCÉU do município de Céu Azul - PR. E fragmentos de EPS (Figura 8 (b)) obtidos por reciclagem da empresa ISOART, Indústria e reciclagem de EPS do município de Santa Tereza do Oeste – PR.

Figura 8: (a) Pó de PET; (b) EPS reciclado



Fonte: Autor (2020)

O cimento utilizado foi do tipo CP-V-ARI-RS, qual proporciona maior resistência nas primeiras idades, sendo usualmente empregado por indústrias de blocos de concreto por questões de melhoria na logística de produção, com possibilidade de rápida comercialização dos produtos. A água usada no processo de mistura foi proveniente da rede pública de abastecimento.

Empregou-se o aditivo Liga 70 (Liga Química Industrial), aditivo plastificante voltado ao segmento de artefatos produzidos com concreto seco. Produto com especificação de aspecto viscoso, cor caramelo claro e densidade de 1,050 a 1,100 g/cm³. Segundo o fabricante, o produto auxilia na compactação das peças, reduzindo o atrito entre as partículas, obtendo um bloco com resistência mecânica mais elevada e melhor acabamento.

Os ensaios para caracterização física dos materiais constituintes da mistura, foram realizados buscando identificar e avaliar as propriedades necessárias para o desenvolvimento da pesquisa. Os dados levantados foram utilizados para determinação do proporcionamento de traços e principalmente para estudo de formulação das misturas.

A amostra dos agregados tradicionais foi coletada conforme NBR NM 26 (ABNT, 2009) Antecipadamente aos ensaios, o material foi submetido a secagem através de uma estufa por um período de 24 horas em temperatura 105 °C ± 5 °C, para posterior quarteamento conforme NBR NM 27 (ABNT, 2001). A Tabela 5 apresenta os ensaios realizados para obtenção das características dos materiais empregados no estudo.

Tabela 5: Caracterização de agregados

Caracterização	Cimento	Areia	Pó de pedra	Granilha	Brita 0	Pó de PET	EPS	Procedimento
Massa específica		x	x	x			x	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
					x			NBR NM 53 (ABNT, 2009)
						x		Pereira (2016)
	x							NBR 16605 (ABNT, 2017)
Massa unitária		x	x	x	x	x	x	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Curva granulométrica		x	x	x	x	x	x	NBR NM 248 (ABNT, 2003)

Fonte: Autor (2020)

3.1.1 Agregados Reciclados

O Pó de PET foi escolhido pela característica de ser um material derivado do processo de moagem para reciclagem de garrafas PET, cujo objetivo principal é a obtenção de flocos. Tem característica granulométrica que se assemelha a areia.

Diferente dos agregados tradicionais, a secagem para eliminação de umidade do pó de PET para a realização dos ensaios, foi realizada através da secagem ao ar livre por um período de 24 horas (Figura 9), procedimento também adotado por Pereira (2016). O motivo da não utilização da estufa, é a condição de manutenção das características iniciais do material. Por se tratar de um material industrializado, a massa específica do pó de PET foi levantada através da bibliografia, no estudo desenvolvido por Pereira (2016).

Figura 9: Amostra de pó de PET



Fonte: Autor (2020)

Ensaio com o EPS reciclado, repetiu-se as condições estabelecidas para o PET de não utilização de estufa de secagem. A obtenção da massa específica foi realizada usando a NBR NM 45 (ABNT, 2006) com adaptação, no procedimento adotado por Mazoni (2019). Em um recipiente de volume conhecido, foi inserido a amostra seguido de água até o preenchimento total, na parte superior foi utilizado uma malha metálica para evitar a movimentação do EPS. A subtração do volume do recipiente pelo volume de água, compreende o volume do EPS, a massa específica foi obtida pela razão entre a massa de EPS e o volume encontrado.

3.2 ESTUDO DOSAGEM DE TRAÇO DE REFERÊNCIA E SUBSTITUIÇÕES (ETAPA 2)

3.2.1 Dosagem de Referência

A etapa de estudo para estabelecimento de traços avaliados, deu-se inicialmente pela obtenção de mistura considerada como referência, empregando apenas agregados tradicionais. O intuito foi utilizar a mistura como parâmetro, buscando uma comparação entre a composição com materiais reciclados utilizado na obtenção do BCR.

3.2.2 Combinação de Agregados

Nos principais métodos de dosagem de concreto de consistência seca, o primeiro passo consiste em estabelecer ajustes na proporção de agregados, o critério é obter maior compacidade na composição de agregados. Pode ser aferida através de ensaios de adensamento como proposto por Ferreira (1995), ou pela análise de curva granulométrica dos agregados (MEDEIROS, 1993).

O procedimento de adensamento de Ferreira (1995), conhecido como o método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), é bastante utilizado por pesquisadores na formulação de traços de concreto secos. No entanto, conforme aponta Frasson (2000), quando da utilização de areia com característica de granulometria fina, como no presente caso, para se alcançar o menor volume de vazios, os resultados conduzem a um consumo alto desse agregado, com redução da resistência mecânica.

Assim, adotou-se como premissa a formulação dos percentuais de agregados na mistura, o método de análise da curva granulométrica, baseando-se no

método Besser Company de dosagem, adaptado por Medeiros (1993). Após o procedimento de ensaio de granulometria dos agregados tradicionais, buscou-se o modelo de distribuição granulométrica conforme estabelecido na Figura 5. O estudo simulou diferentes proporções de agregados miúdos e graúdos, inicialmente, através da fórmula de combinação (Equação 01 e 02), e depois pelo ajuste da curva granulométrica combinada. A Tabela 6 apresenta as composições entre agregados avaliadas para definição da proporção de agregados na mistura de referência.

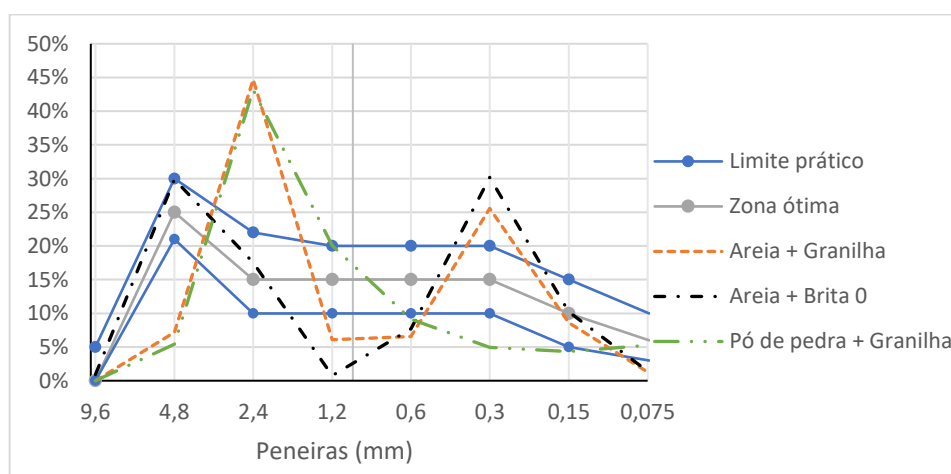
Tabela 6: Formulação da composição de agregados

nº	Composição de agregados	Proporção (%)
1	Areia + Granilha	42,48 + 57,52
2	Areia + Brita 0	50,42 + 49,58
3	Pó de pedra + Granilha	56,57 + 43,43
4	Areia + Pó de pedra + Granilha	25 + 55 + 20
5	Areia + Pó de pedra + Brita 0	18 + 45 + 37

Fonte: Autor (2020)

As composições de número 1 a 3 foram determinadas através da fórmula de combinação de agregados, usando como parâmetro os dados dos agregados obtidos nos ensaios de caracterização. Contudo, à medida que foi traçado o gráfico multiplicando os percentuais encontrados na tabela, com os valores percentuais retidos nas peneiras, ocorre a extrapolação dos limites práticos. A Figura 10 apresenta o comparativo entre a granulometria combinada dos agregados com a limitação sugerida para formulação.

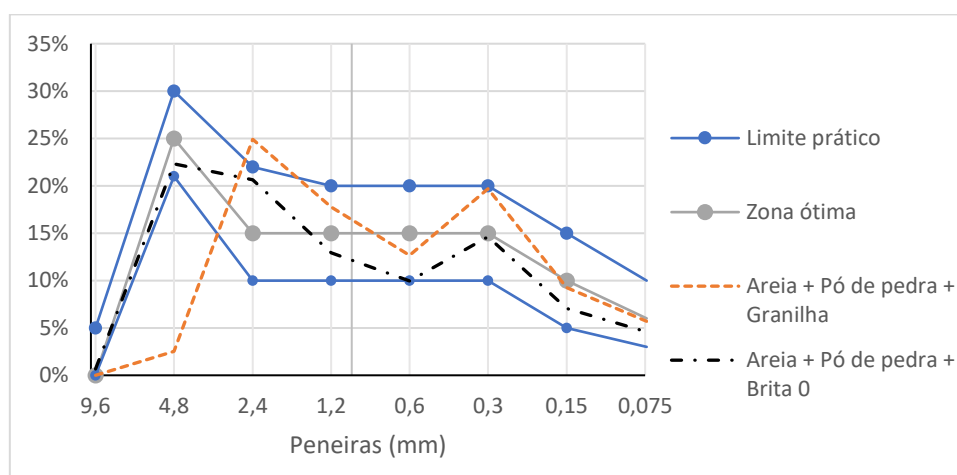
Figura 10: Comparativo de composição de agregados da pesquisa com limites práticos sugeridos na produção de blocos de qualidade



Fonte: Autor (2020)

A tentativa de adequação aos limites práticos, se deu com a inserção de mais um agregado (MEDEIROS, 1993). Compondo os itens número 4 e 5 da Tabela 6, adicionou-se o pó de pedra nas composições de areia e granilha (1) e areia com brita 0 (2). O resultado apresentado na Figura 11, mostra que formulação com areia, pó de pedra e brita 0, na proporção de 18%, 45% e 37% ficaram dentro dos limites práticos, portanto possíveis, segundo o método, de atender aos parâmetros requisitados para produção de blocos com qualidade.

Figura 11: Comparativo de composição com três agregados usados na pesquisa com limites práticos sugeridos para a produção de blocos de qualidade



Fonte: Autor (2020)

Porém, durante a fase de moldagem na etapa 3 do trabalho, constatou-se que a composição, apesar de se adequar a curva granulométrica pretendida, resultava em um concreto com acabamento superficial muito poroso e áspero (Figura 12(a)). Segundo Frasson (2007), é desejável que as misturas tenham um percentual de 40% de material grosso (retido nas peneiras 4,8mm e 2,4mm), 45% de material médio (retido nas peneiras 1,2mm, 0,6mm e 0,3mm) e 15% de material fino (retido nas peneiras 0,15mm e fundo).

A primeira mistura apresentava um percentual de 43,62% de material grosso, 37,51% de material médio e 18,87% de finos. Buscando atender as condições de proporções orientadas pela literatura (FRASSON, 2007), procedeu-se um ajuste, reduzindo o percentual de material grosso da composição e aumentando o material médio, resultando em novos valores de 40,09% (grosso), 40,10% (médio) e 19,81% (fino). A nova composição de agregados, se manteve dentro a curva granulométrica combinada proposta no método Besser. E resultou nas proporções de 20% de areia, 47% de pó de pedra e 33% de brita 0. Adotou-se tal composição, como proporção entre agregados para o traço de referência

(Figura 12(b)).

Figura 12: (a) Primeira composição; (b) Composição ajustada e adotada como referência



Fonte: Autor (2020)

3.2.3 Consumo de Cimento e Umidade da Mistura

Medeiros (1993) cita que a determinação do consumo de cimento é orientada principalmente em função da resistência desejada. Neste trabalho, propõe-se a moldagem de blocos com resistência mecânica de compressão axial característica de no mínimo de 3 MPa aos 28 dias de idade, caracterizado como Classe C. Considerando os dados obtidos na bibliografia (EPUSP/ENCOL, 1991; MEDEIROS, 1993), o traço de referência foi estabelecido em massa, na proporção 1:12, composto por areia: 20% (2,40), pó de pedra: 47% (5,64) e brita 0: 37% (3,96). A proporção adotada se baseou na mistura mais pobre para se atingir a resistência de 4,5 MPa, considerando a ausência de estrutura para a cura a vapor (apresentada na Tabela 2).

A umidade da mistura em concreto com consistência seca fica entre 6 e 7,5% em relação ao total de material seco (MEDEIROS, 1993; FERNANDES, 2019). Para atingir-se a umidade adequada da mistura, foi fixado o percentual de 6% em relação ao total de materiais secos. A aferição deu-se com o procedimento comumente empregado na dosagem do concreto seco e demonstrado na Figura 13 (a), chamado de “ponto de pelota” (TANGO, 1994). O procedimento adotado foi o mesmo para a moldagem da mistura utilizando os agregados reciclados. A Figura 13 (b), apresenta o aspecto visual do concreto

seco após o procedimento de mistura, no traço sem o emprego dos agregados reciclados.

Figura 13: (a) Concreto seco no "ponto de pelota"; (b) Aspecto da mistura de concreto seco



Fonte: Autor (2020)

3.2.4 Traço de Referência e com Agregados Reciclados

Os teores de substituição dos agregados tradicionais pelos reciclados na mistura foram estabelecidos baseando-se em pesquisa bibliografia sobre o tema, buscou-se misturas com características de concreto seco com a utilização de materiais e procedimentos próximos ao pretendido por esta pesquisa (SILVA, 2016; RODRIGUES et al., 2017; GONÇALVES, 2018; BARRETO et al., 2019).

A inserção dos materiais reciclados no concreto foi planejada de forma gradativa (Tabela 7). A substituição, em volume, leva em conta a proximidade de granulométrica dos materiais, por isso, o pó de PET foi adicionado em substituição ao agregado miúdo (areia e pó de pedra) e o EPS reciclado ao agregado graúdo (brita 0).

Tabela 7: Percentual de substituição de agregados reciclados

Traço	Substituição em volume de agregados	
	PET (miúdo)	EPS (graúdo)
BCT	0%	0%
BCR-5	2,5%	2,5%
BCR-10	5,0%	5,0%
BCR-15	7,5%	7,5%
BCR-20	10,0%	10,0%
BCR-30	15,0%	15,0%
BCR-40	20,0%	20,0%

Fonte: Autor (2020)

A Tabela 8, apresenta o proporcionamento dos materiais em massa, para a produção dos sete traços. A Tabela 9, a quantidade de material necessário para a confecção de 1 m³ de concreto.

Tabela 8: Proporcionamento da mistura (massa)

Traço	Cimento	Areia	Pó de pedra	Brita 0	Pó de PET	EPS
BCT	1	2,40	5,64	3,96	-	-
BCR-5	1	2,34	5,50	3,86	0,05	0,0006
BCR-10	1	2,28	5,36	3,76	0,09	0,0012
BCR-15	1	2,22	5,22	3,66	0,14	0,0017
BCR-20	1	2,16	5,08	3,56	0,19	0,0023
BCR-30	1	2,04	4,79	3,37	0,28	0,0035
BCR-40	1	1,92	4,51	3,17	0,37	0,0046

Fonte: Autor (2020)

Tabela 9: Consumo de materiais para produção de 1m³ de concreto

Traço	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Pó de pedra (Kg)	Brita 0 (Kg)	Pó de PET (Kg)	EPS (Kg)
BCT	186,10	446,64	1049,61	736,96	-	-
BCR-5	186,10	435,48	1023,37	718,54	8,62	0,11
BCR-10	186,10	424,31	997,13	700,11	17,25	0,22
BCR-15	186,10	413,14	970,89	681,69	25,87	0,32
BCR-20	186,10	401,98	944,65	663,26	34,49	0,43
BCR-30	186,10	379,65	892,17	626,42	51,74	0,65
BCR-40	186,10	357,31	839,69	589,57	68,99	0,86

Fonte: Autor (2020)

Em cada mistura, foi empregado aditivo superplastificante na proporção de

0,33% em relação a massa de cimento, conforme recomendação do fabricante. Como descrito, a umidade foi fixada em 6% (fator a/c 0,78), estabelecida para o traço de referência e mantida para todas as misturas.

3.3 ESTUDO PRELIMINAR DAS MISTURAS EM LABORATÓRIO (ETAPA 3)

O estudo de dosagem que utiliza concreto seco para a produção de blocos, envolve um equipamento de vibro-prensa no seu adensamento, assim, normalmente a avaliação de novas misturas ocorre na própria fábrica. O que envolve custos, dado a necessidade de intervenção no processo produtivo da fábrica, além do consumo maior de matéria prima (cimento e agregados), em função de atendimento da capacidade operacional mínima dos equipamentos.

Levando em conta informações presentes na literatura (BUTTLER, 2007), está pesquisa empregou no seu estudo experimental, a avaliação preliminar em laboratório das misturas. Através de moldagem de corpos de prova (CP) cilíndricos com dimensões de 5 cm x 10cm, empregando concreto de consistência seca, para o traço de referência e com materiais reciclados (Tabela 8). Moldou-se um total de 105 corpos de prova para avaliação de propriedades físicas e mecânica dos espécimes, com um intuito de buscar um indicativo prévio do comportamento das misturas, antecipadamente a fabricação dos blocos em fábrica. A Tabela 10 apresenta as propriedades avaliadas nesta fase da pesquisa.

Tabela 10: Propriedades avaliadas nos CP's cilíndricos

Propriedade	Procedimento
Textura superficial	-
Coesão da mistura	Frasson (2000)
Massa específica, absorção e índice de vazios	NBR 9778 (ABNT, 2009)
Resistência a compressão axial	NBR 5739 (ABNT, 2018)

Fonte: Autor (2020)

São 15 corpos de prova por mistura, sendo 6 espécimes direcionados a avaliação da resistência à compressão axial aos 28 dias de idade, 6 exemplares para a avaliação da coesão da mistura, 3 para aferição da massa específica, absorção de água e índices de vazios. A etapa teve o objetivo de identificar quais misturas que empregam agregados reciclados, melhor atendem a critérios de desempenho nas propriedades analisadas, tendo como parâmetro, principalmente requisitos normativos e análises pertinentes a condição para a produção dos blocos. Onde possível, foi aplicado o teste de

análise de Análise de Variância – ANOVA com as informações obtidas nos ensaios, como forma de análise dos dados entre os grupos estudados.

Metade dos seis traços que utilizam agregados reciclados, seguiram para a próxima fase da pesquisa, empregando-os na produção de unidades de blocos reciclados (BCR) em fábrica.

3.3.1 Produção dos Corpos de Prova Cilíndricos

Todos os materiais foram proporcionados em massa, os agregados tradicionais foram adicionados na condição de seco em estufa. Devido à inexistência de um misturador de apropriado de pequeno porte, o material foi misturado em um recipiente metálico de forma manual. O tempo total da mistura foi de aproximadamente 4 minutos, a ordem de inserção dos materiais foi:

- a) Carregamento do recipiente com os agregados, mistura e homogeneização;
- b) Introdução do cimento e homogeneização;
- c) Adição de 50% da água de amassamento e homogeneização;
- d) Adição do restante da água com o aditivo e homogeneização final.

A moldagem dos corpos de prova utilizou parâmetros adotados por Buttler (2007), com a compactação da mistura em 4 camadas com 20 golpes, executado por um único operador e buscando a equivalência de energia durante a aplicação dos golpes (Figura 14(a) e (b)). O detalhamento do molde do cilíndrico 5x10cm e o soquete de compactação utilizados, estão apresentados no Apêndice A.

Figura 14: (a) Moldagem CP's; (b) Corpos de Prova recém moldados



Fonte: Autor (2020)

Como forma de garantir a aproximação entre as espessuras de cada camada de adensamento, usando dados de densidade da mistura sem compactação na literatura (FERNANDES, 2019), estimou-se o volume de material solto que corresponderia a uma camada compactada. O volume correspondente foi demarcado em um recipiente plástico para utilização durante o processo de moldagem.

A cura dos espécimes buscou semelhança ao procedimento adotado nos blocos moldados em fábrica. 96 horas após a moldagem, foram mantidos úmidos através de aspersão de água e armazenados em local livre de insolação e vento, após esse período, armazenados em local seco protegido de intempéries até a realização dos ensaios.

3.3.2 Textura Superficial

A aparência superficial do corpo de prova foi avaliada qualitativamente, considerando melhores desempenhos quando da obtenção de texturas lisas, ao invés de um aspecto demasiadamente rugoso.

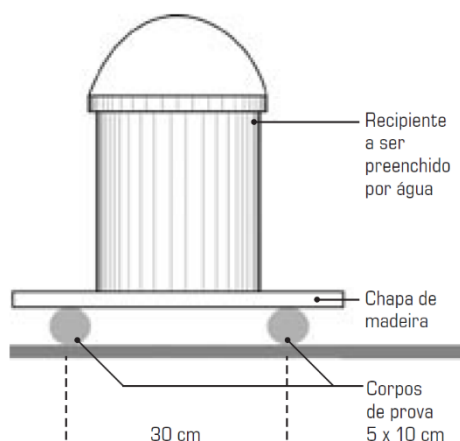
3.3.3 Coesão da Mistura

A propriedade relacionada a coesão da mistura exerce grande importância dentro do processo de moldagem, como forma de garantir que não haja o esboroamento do material quando o molde do equipamento é elevado. Atualmente, não existe ensaio

normatizado pela ABNT para determinação desta propriedade.

Neste trabalho foi empregado o ensaio proposto por Frasson (2000), como forma de avaliar a capacidade de coesão da mistura. O método consiste na moldagem de CP's cilíndricos de 5x10cm, buscando aferir a resistência à desagregação relativa à compressão diametral da mistura fresca. Logo após a moldagem e desforma, posiciona-se dois CP's sobre uma superfície horizontal, paralelos em seu eixo longitudinal, com uma distância de 30 cm (eixo a eixo). Acima dos CP's, posiciona-se uma chapa plana (50x20cm) com espessura mínima de 1,5 cm com o objetivo de realizar a transferência de carga acima da chapa. O carregamento é realizado através do enchimento de um recipiente com água, buscando um incremento de 0,1Kg/s. A Figura 15 apresenta o esquema utilizado para a realização do ensaio.

Figura 15: Instruções realização do ensaio



Fonte: Frasson (2000)

Para Frasson (2000), as misturas devem atingir valores superiores a 6,0 Kg de carregamento sem que os apoios sejam esmagados, nesta condição pode se considerar aptos à produção de blocos. O detalhamento dos equipamentos utilizados no ensaio está descrito no apêndice B.

3.3.4 Massa Específica, Absorção e Índice de Vazios

A diretriz de avaliação foi a NBR 6136 (ABNT, 2016), que prevê um índice de absorção médio de até 10% para blocos de concreto. O nível de desempenho foi aferido, considerando o atendimento deste requisito. O detalhamento dos equipamentos utilizados no ensaio está apresentado no apêndice B.

Os ensaios para determinação da massa específica, absorção de água e

índice de vazios, basearam-se nos critérios da NBR 9778 (ABNT, 2009). Dentro do processo, o procedimento que estabelece o aquecimento na estufa, em temperatura de 105 °C, necessária para a secagem dos corpos de prova, teve que ser alterado. Considerando as características de sensibilidade ao calor dos agregados reciclados, principalmente o EPS (GANESH BABU; SARADHI BABU, 2004; SADRMOHTAZI et al., 2012). Para evitar a degradação do material, o procedimento foi modificado, ajustando a temperatura em 50°C durante 72 horas (Figura 16), conforme adotado da literatura em estudos com o EPS (OZÓRIO, 2017; MAZONI, 2019).

Figura 16: Corpos de prova cilíndricos na estufa



Fonte: Autor (2020)

3.3.5 Resistência à Compressão Axial

A aferição da resistência à compressão axial dos exemplares foi aos 28 dias de idade. Antes do ensaio, os espécimes tiveram suas bases regularizadas através do capeamento com pasta de cimento na proporção de 3 partes de cimento para 1 parte de água (Figura 17(a)). O equipamento utilizado no ensaio foi uma prensa hidráulica da marca Intermetric, modelo Unique 2223, com capacidade de até 100 toneladas força (Figura 17(b) e (c)).

Figura 17: (a) Capeamento CP's; (b) Prensa; (c) Ensaio resistência à compressão



Fonte: Autor (2020)

A NBR 6136 (ABNT, 2016) estabelece que a resistência característica à compressão axial mínima que blocos de concreto de classe C devem suportar, é de F_{bk} 3,0 MPa aos 28 dias de idade. Com isso, foi estimado através de fatores de correlação, valores mínimos e máximos de resistência mecânica que os blocos de concreto poderiam assumir, considerando os dados obtidos de resistência para os corpos de prova em cada traço.

Com base na análise de estudos na literatura (BARBOSA, 2004; BUTTLER, 2007; FRASSON, 2007; SOTO IZQUIERDO, 2015), a pesquisa adotou intervalos de valores de 0,80 a 1,30 utilizados por Buttler (2007). E não um fator de correlação fixo entre as propriedades de CP's e blocos para previsão da resistência a compressão. A estimativa de valores de resistência esperada dos blocos foi através da seguinte fórmula (FRASSON, 2007):

$$f_{bm} = \left[\frac{f_{cp}}{\text{Coef. Correlação}} \right] \cdot \left[\frac{\text{Área líquida do bloco}}{\text{Área bruta do bloco}} \right] \quad (3)$$

Onde:

f_{bm} - Resistência média dos blocos (área bruta); f_{cp} - Resistência média dos corpos de prova cilíndricos; Coef. Correlação – valor entre 0,8 a 1,3 (BUTTLER, 2007) para relação entre a resistência do corpo de prova cilindro e o bloco de concreto.

A relação entre a área líquida e área bruta do bloco, foi utilizado como parâmetro de cálculo o valor de 0,47 (47%). Dado obtido através de ensaio, nos termos da NBR 12118 (ABNT, 2013), de uma unidade de bloco de concreto produzida no mesmo

molde e equipamento a qual foi realizado a etapa 04 do trabalho.

As faixas de resistência que os blocos poderão assumir, foram apresentados em termos de resistência média (F_{bm}) e característica (F_{bk}). No último, a apresentação dos dados se deu, após a identificação da resistência característica de acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016), e posteriormente aplicado os índices seguindo a equação de Frasson (3) (FRASSON, 2007)

3.4 PRODUÇÃO DOS BLOCOS DO TIPO BCT E BCR EM AMBIENTE DE FÁBRICA (ETAPA 4)

Nesta etapa foram produzidos blocos de concreto tradicional (BCT) e com agregados reciclados (BCR) em ambiente de fábrica, visando obter informações do comportamento do elemento contendo em sua composição PET e EPS. Buscou-se o atingimento de características físico-mecânicas para classificação do produto como classe C, segundo a NBR 6136 (ABNT, 2016), com o uso previsto para alvenaria com função de vedação (sem função estrutural). A moldagem dos blocos ocorreu nas dependências da fábrica CR lajes e pavers do município de Foz do Iguaçu – PR, a qual cedeu o equipamento para a moldagem dos quatro traços, e disponibilizou para uso, formas de blocos de classe C.

Após análise e estabelecimento dos traços com melhor performance da etapa anterior, submeteu-se as misturas à produção de blocos. Conforme Tabela 11, foram moldados 64 blocos em 4 misturas diferentes, o número de espécimes foi estabelecido respeitando especificações normativas, para que os ensaios tenham dados suficientes para validade estatística.

Tabela 11: Número de blocos produzidos em ambiente de fábrica

Traço	Compressão axial		Absorção de água, umidade relativa e massa específica
	7 dias	28 Dias	
BCT	06	06	04
BCR 1	06	06	04
BCR 2	06	06	04
BCR 3	06	06	04
Total blocos	24	24	16
Total geral	64		

Fonte: Autor (2020)

O traço BCT, representa o bloco de concreto tradicional usando a mistura de referência sem substituição. Já a nomenclatura BCR1 a BCR3 aplica-se a blocos com agregados reciclados, cujo teor de substituição foi determinado durante a avaliação da etapa 3 do trabalho.

3.4.1 Proporcionamento, Mistura e Moldagem dos Blocos

O dimensionamento dos materiais foi realizado em massa, utilizando uma balança suspensa digital da marca Mister, modelo R-100681, com capacidade de 50 Kg e precisão de 10 gramas.

Devido a grande quantidade de agregado necessário para a produção dos blocos, e a ausência de um laboratório com estufa de secagem na fábrica. Não foi possível realizar o dimensionamento na condição seco em estufa. À vista disso, foi necessário o ajuste do traço considerando a umidade presente nos agregados miúdos (pó de pedra e areia), através de ensaio de teor de umidade, levando em conta a diferença de massa quando da secagem em estufa das amostras do material. O agregado de PET foi misturado após o procedimento de secagem ao ar por um período de 24 horas.

Os materiais foram separados, e armazenados em recipientes fechados até o momento da moldagem (Figura 18(a)). O procedimento de mistura foi semelhante ao empregado nos corpos de prova cilíndricos. O tempo total foi de aproximadamente 3 minutos, a ordem de inserção dos materiais foi a seguinte:

- a) Carregamento dos agregados na esteira do misturador (Figura 18(b));
- b) Mistura e homogeneização dos agregados no misturador (Figura 18(c));
- c) Introdução do cimento e EPS, homogeneização;
- d) Adição de 50% da água de amassamento e homogeneização;
- e) Adição do restante da água com o aditivo e homogeneização final;
- f) Carregamento da mistura no equipamento de vibroprensa através da correia alimentadora (Figura 18(d)).

Figura 18: (a) Agregados pouco antes da moldagem; (b) Descarga material; (c) Mistura; (d) Alimentação vibroprensa



Fonte: Autor (2021)

Assim como o cimento e a água de amassamento, o EPS, levando em conta sua baixa densidade, foi adicionado diretamente no misturador para evitar perda de material durante o transporte pela esteira alimentadora. No processo, manteve-se as condições de emprego de aditivo e teor de umidade previamente estabelecidos e empregados na etapa 3 do trabalho. Sendo, aditivo na proporção de 0,33% em relação a massa de cimento, e umidade fixada em 6% em relação ao total de materiais secos (fator a/c 0,78), estabelecida para o traço de referência e mantida para todas as misturas. Durante a moldagem, não houve necessidade de alteração da umidade entre os traços.

Os blocos foram moldados utilizando um equipamento de vibroprensa

hidráulica da marca Menegotti modelo MPB 4 automática, acoplado com um conjunto de esteira e misturador mecânico do tipo vertical com capacidade para 600 litros de mistura (Figura 19(a)).

O processo aplicou ao material energia através de vibro compressão para a obtenção dos blocos, o equipamento utilizado é capaz de produzir 3 ciclos por minuto, com 4 blocos. Cada ciclo durou aproximadamente 20 segundos, o equipamento estava programado com tempos de alimentação de 2 segundos e vibração de 5,5 segundos (Figura 18(b)).

Após a moldagem, os blocos que foram posicionados sobre chapas de madeira compensada, e transportados com ajuda de uma empilhadeira motorizada a um local coberto, onde permaneceram por cerca de 20 horas (Figura 19(c)). Após esse período, os blocos foram retirados dos paletes (Figura 19 (d)) e acomodados em uma área descoberta por cerca de 3 horas. Momento que ocorreu o transporte a outro local, e início do procedimento de cura, a qual foi realizada em condições de ambiente (cura natural).

Figura 19: (a) Equipamentos; (b) Moldagem blocos; (c) Transporte blocos; (d) Blocos do modelo BCR





c)

Fonte: Autor (2021)



d)

Os blocos foram mantidos por mais um período de 96 horas, em local protegido de insolação direta e vento, cobertos com lona plástica e umedecidos regularmente através de aspersão de água. Após esse período, foram empilhados e deixados em local seco, protegido de intempéries até o início dos ensaios.

3.4.2 Avaliação das Propriedades dos Blocos de Concreto

As propriedades físico-mecânica dos blocos avaliadas estão descritas na Tabela 12.

Tabela 12: Propriedades avaliadas nos blocos de concreto

Propriedade	Procedimento
Textura superficial	-
Resistência à compressão axial	NBR 12118 (ABNT, 2013)
Absorção de água	
Umidade relativa	
Análise dimensional	
Massa específica e índice de vazios	NBR 9778 (ABNT, 2009)

Fonte: Autor (2021)

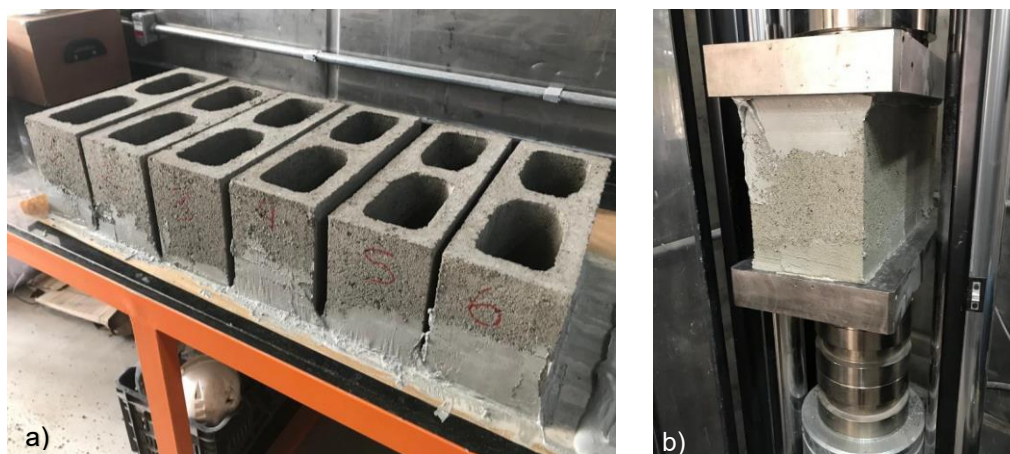
Os resultados obtidos pelos ensaios foram analisados buscando um comparativo entre os modelos de blocos, e o atingimento de requisitos prescritos em normas técnicas da ABNT. Onde possível, foi realizado a análise de parâmetros de influência de propriedades, através de testes estatísticos de Análise de Variância – ANOVA e teste “t de student”.

3.4.2.1 Resistência à Compressão Axial Blocos

O ensaio para determinação da resistência mecânica à compressão axial foi realizado seguindo os preceitos da NBR 12118 (ABNT, 2013), rompidos na idade de 7 e 28 dias. Buscou-se o conhecimento do comportamento relacionado a resistência à compressão das unidades logo nas primeiras idades (7 dias). Considerando que normalmente, por questões de logística de produção, as indústrias não aguardam o ganho de resistência dos blocos até a idade de 28 dias para serem comercializados, data utilizada como parâmetro para aferição pela NBR 6136 (ABNT, 2016).

Antes do ensaio, os espécimes tiveram suas bases regularizadas através do capeamento com pasta de cimento na proporção de 3 partes de cimento para 1 parte de água (Figura 20(a)). O equipamento utilizado no ensaio foi uma prensa hidráulica da marca Intermetric, modelo Unique 2223, com capacidade de até 100 toneladas força. Mesmo equipamento utilizado no ensaio de resistência mecânica à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos (5X10cm). A Figura 20 (b) refere-se ao momento da realização do ensaio de avaliação da resistência do bloco.

Figura 20: (a) Capeamento blocos; (b) Ensaio de resistência à compressão bloco



Fonte: Autor (2021)

O ensaio obteve resultados da resistência mecânica à compressão axial média dos blocos de concreto (f_{bm}) e a resistência característica (f_{bk}).

3.4.2.2 Absorção de Água, Umidade Relativa e Análise Dimensional

A obtenção das características deste item fora realizada através dos procedimentos descritos na NBR 12118 (ABNT, 2013), com corpos de prova com idade de

28 dias. O detalhamento dos equipamentos utilizados no ensaio está descrito no apêndice B.

O percentual de absorção de água está relacionado à porosidade da peça, servindo como um indicador de vazios presente no material, é obtido por procedimentos de secagem em estufa e imersão em água. O ensaio basicamente busca a relação entre a massa máxima de água que o bloco absorve e a massa da peça seca. A umidade relativa ou teor de umidade, simula o comportamento do bloco exposto a condições ambientais para determinação da quantidade de umidade que é absorvida.

Os ensaios com necessidade de secagem em estufa, foram realizados com limitação de temperatura (OZÓRIO, 2017; MAZONI, 2019), seguindo o mesmo procedimento ao dos corpos de prova cilíndricos, para evitar alterações nas características dos materiais recicláveis incorporados no elemento.

Para a realização da avaliação dimensional, foram selecionados 12 blocos de cada modelo. Com o auxílio de um paquímetro digital, Marca Digimess, modelo 100,178BL. Determinou-se as espessuras de paredes (longitudinal e transversal), altura, largura e comprimento da peça. As dimensões foram tomadas de acordo com as diretrizes da NBR 12118 (ABNT, 2013).

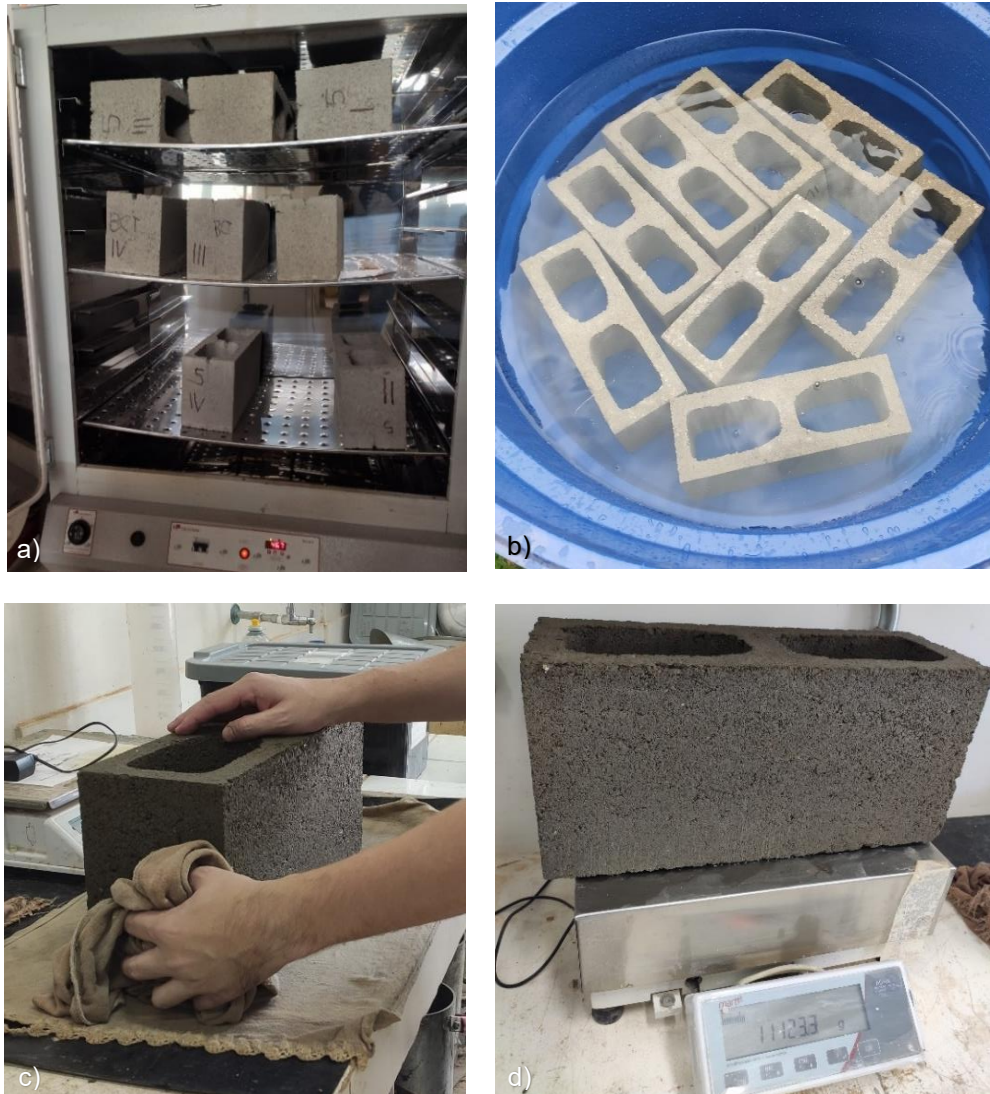
A determinação das dimensões principais (comprimento, largura e altura), foi através da aferição de três dimensões em pontos distintos, distribuídos na face de maior espessura da parede. A espessura das paredes, foi tomada como base em quatro medições no sentido longitudinal, e 3 em cada parede transversal. Ambos na face de menor espessura da parede.

3.4.2.3 Massa Específica e Índice de Vazios

A massa específica seca foi avaliada como indicador de redução de massa dos blocos à medida que são adicionados os materiais reciclados, a avaliação desta propriedade e do índice de vazios, foi determinado seguindo as prescrições da NBR 9778 (ABNT, 2009). Documento que se aplica a argamassas e concretos endurecidos, mas foi adaptado para blocos. O detalhamento dos equipamentos utilizados no ensaio está descrito no apêndice B.

A Figura 21 apresenta os procedimentos de ensaios realizados de secagem em estufa, saturação, secagem superficial e aferição da massa dos blocos.

Figura 21: (a) Secagem estufa; (b) Saturação blocos; (c) Secagem; (d) Aferição massa



Fonte: Autor (2021)

Como já descrito, os ensaios com necessidade de secagem em estufa, foram realizados com limitação de temperatura. Seguindo o mesmo procedimento ao dos corpos de prova cilíndricos, para evitar alterações nas características dos materiais recicláveis incorporados.

3.5 AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE NO ASPECTO CUSTO E EMISSÃO CO₂ (ETAPA 5)

No presente tópico, desenvolveu-se um estudo simplificado para estimar o impacto da proposta do uso de agregados reciclados na produção de blocos de concreto reciclado (BCR), levando em conta aspecto econômico e ambiental. Buscou-se, uma avaliação do possível impacto da proposta sob a ótica da sustentabilidade. Para tal, foram

realizados estudos de levantamento do custo de insumo para fabricação dos blocos de concreto tradicional (BCT) e reciclado (BCR), custo de disposição dos resíduos em aterro sanitário, e estimativa de emissão de CO₂, nas fases de extração e transporte de insumos.

3.5.1 Custo Unitário dos Blocos tipo BCT e BCR e Custo de Disposição Final dos Resíduos em Aterro Sanitário

A avaliação foi realizada buscando conhecer o efeito da adição do PET e EPS reciclado no custo da unidade de bloco, além de valores necessários para o manejo dos resíduos, caso fossem destinados a um aterro sanitário. Considerando o compartilhamento do processo de produção dos blocos com agregado tradicional ou reciclado. A avaliação de custo ponderou gastos com os insumos aplicados diretamente na confecção do produto, sem incidência de custos indiretos de produção ou mão de obra envolvida. O levantamento de valores foi realizado através de pesquisa de mercado na região de Foz do Iguaçu-PR, em julho de 2021.

O estudo contemplou a simulação dos modelos de blocos estudados na etapa 04 do trabalho (BCT, BCR5, BCR10 e BCR15). Adotando a mesma geometria (14x19x39cm) e índice de consumo de materiais utilizados durante a moldagem. Para efeito de análise, o quantitativo de blocos considerou o necessário para a construção de uma habitação de 56,62m² de área construída. O levantamento do número de unidades destinados à obra, levou em conta o parâmetro de consumo (bloco/m²) em relação ao total de área de alvenaria. Devido a predominância do uso de bloco principal (bloco inteiro), e com isso, a possibilidade de estabelecimento de um parâmetro seguro de custo do sistema. Não foram levados em conta, blocos do tipo complementares (meio bloco, bloco canaleta etc.).

Considerando que parte dos resíduos que poderiam ser reciclados, acabam sendo destinados a aterros sanitários ou lixões à céu aberto, também foi avaliado o consumo total dos resíduos incorporados durante a construção da habitação de exemplo, para os diferentes tipos de BCR. O custo de manejo dos resíduos em aterro sanitário, foi elaborado partindo da premissa, de que o material direcionado a reciclagem, desonera o valor de transporte e gerenciamento em aterros sanitários. Estimou-se então, a partir do estudo elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos (ABRETE) e a Fundação Getúlio Vargas (FGV), o custo de destinação ao aterro dos resíduos incorporados à edificação pelos BCR.

As premissas para a obtenção do custo de um aterro sanitário em sua vida útil, levou em conta um empreendimento de pequeno porte (capacidade de 100 toneladas/dia), com horizonte de gastos de 42 anos, compreendendo em 2 anos de implantação, 20 anos de operação, 20 anos de encerramento e pós-encerramento (ABETRE, 2009). O trabalho realizado em 2009, teve seus valores atualizados pelo autor, através da aplicação do Índice Nacional de Custo da Construção (INCC) até junho de 2021.

3.5.2 Avaliação da Emissão de CO₂ Devido a Extração e Transporte dos Insumos para Produção de BCT e BCR

Realizou-se uma estimativa da emissão de CO₂ com o comparativo de uso de blocos de concreto tradicional (BCT) e blocos contendo agregados reciclados para os modelos BCR-5, BCR-10 e BCR-15 (Modelos moldados na fábrica). O estudo avaliou a estimativa de emissão de CO₂ considerando as etapas de extração e transporte dos insumos até a produção dos blocos, não foi estimado a emissão de CO₂ durante o processo de produção em fábrica, pelo fato de serem semelhantes para agregados tradicionais e reciclados. No total, foi quantificado o material necessário para a produção de blocos para construção de um total de 100 habitações de 56,62m² (mesma edificação modelo utilizada no estudo de custo de insumos).

A simulação foi realizada utilizando o modelo proposto por Costa (2012) destinado a estimativa de emissões de etapas de extração de matéria prima, produção e transporte dos principais materiais empregados na construção civil. O método denominado QE-CO₂, possui uma fórmula geral que consiste na multiplicação do produto necessário à obra por um fator de perda do material, e a somatória das emissões geradas pela energia de obtenção e transporte. Sendo:

$$\text{Emissões } M_{T1,j} = Q_{Tj} \cdot FP_j \cdot (\text{Emissões}_{TR1,i} + \text{Emissões}_{EN1,i}) \quad (4)$$

Onde:

Emissões $M_{T1,j}$ = Emissões de CO₂ devido à utilização do produto j em edificações, em toneladas de CO₂; Q_{Tj} = Quantidade de material j necessário, em toneladas; FP_j = Fator de perda do produto j, adimensional; $\text{Emissões}_{TR1,i}$ = Emissões de CO₂ do consumo de energia i para o transporte de matérias primas, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto; $\text{Emissões}_{EN1,i}$ = Emissões de CO₂ devido ao consumo de energia i para extração e processamento da matéria prima, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto

O fator de perda do material está relacionado a desperdícios na aplicação durante a obra, neste trabalho não será considerado. Levando em conta que o fator é direcionado a perdas durante a aplicação no canteiro de obras e o estudo pretende estimar emissões dos insumos na extração/obtenção e transporte até a chegada em fábrica.

Para estimativa de emissão de CO₂, que corresponde a parcela de transporte, é dada a seguinte equação (COSTA, 2012):

$$\text{Emissões}_{\text{TR1},i} = \text{km} \cdot \text{CO}_t \cdot \text{FE} \quad (5)$$

Onde:

$\text{Emissões}_{\text{TR1},i}$ = Emissões de CO₂ do consumo de energia para o transporte de matérias primas, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto; Km= Distância percorrida pelo veículo no transporte de matérias primas; CO_t= Consumo médio de energia de determinado tipo de veículo, em l/t/km; FE= Fator de emissão – Óleo Diesel - 0,0032 (tCO₂/l).

O consumo médio de energia utilizado pelo transporte (CO) e o fator de emissão do combustível utilizado (FE) foi obtido por (COSTA, 2012). A distância percorrida para o transporte da matéria prima, adotou-se as seguintes premissas:

- **Cimento:** Distância de transporte de 660 Quilômetros da fábrica na cidade de Rio Branco do Sul-PR (Cimento Votorantim) até a fábrica de blocos em Foz do Iguaçu-PR. Considerando retorno de caminhões vazios a distância dobra para 1.320 Quilômetros. Transporte com caminhão pesado até 45 toneladas com consumo de 0,0121 (l/t/km);
- **Brita 0:** Transporte da jazida do município de Matelândia-PR até a fábrica em Foz do Iguaçu-PR, distância de 135,6 quilômetros (ida e volta). Transporte com caminhão pesado até 45 toneladas com consumo de 0,0121 (l/t/km);
- **Pó de pedra:** Transporte da jazida do município de Matelândia-PR até a fábrica em Foz do Iguaçu-PR, distância de 135,6 quilômetros (ida e volta). Transporte com caminhão pesado até 45 toneladas com consumo de 0,0121 (l/t/km);

- **Areia:** Transporte do material do local de extração de areia do Rio Paraná na cidade Guaíra-PR até a fábrica em Foz do Iguaçu-PR, distância total de 422 quilômetros (ida e volta). Transporte com caminhão pesado até 45 toneladas com consumo de 0,0121 (l/t/km);
- **Pó de PET:** Considerou-se a mais próxima indústria de reciclagem em Céu Azul-PR, distância de transporte 186 quilômetros (ida e volta) até a fábrica em Foz do Iguaçu-PR. Transporte com caminhão leve de 9 até 13 toneladas com consumo de 0,0347 (l/t/km);
- **EPS:** Considerou-se à indústria de reciclagem em Santa Tereza do Oeste-PR. Distância de transporte 238 quilômetros (ida e volta) até a fábrica em Foz do Iguaçu-PR. Transporte com caminhão leve de 9 até 13 toneladas com consumo de 0,0347 (l/t/km).

Os valores de emissões associadas a extração e processamento ($E_{\text{Emissões}}$) do cimento, areia, pó de pedra e brita 0 foram obtidos através do estudo de (COSTA, 2012), sendo: 0,6281 (t CO₂/t de cimento), 0,0719 (t CO₂/t de brita 0), 0,0719 (t CO₂/t de Pó de pedra), 0,0722 (t CO₂/t de areia).

O valor da emissão do processo de reciclagem do EPS foi obtido com dados da pesquisa de Cruz (2015), considerando o consumo de energia elétrica de um equipamento triturador (GP-1500 AB) para processar 1 tonelada de EPS (165 KWh). O valor foi multiplicado pelo fator médio de emissão de CO₂ do Sistema Interligado Nacional do Brasil (0,0979 Kg CO₂/KWh) para o ano de 2020, obteve-se 0,01615 (t CO₂/t de EPS). A emissão de reciclagem do Pó de PET não foi considerada, dado que a literatura considera um rejeito, que é obtido durante o processo de reciclagem, cuja finalidade é a obtenção dos flocos de PET (MELO, 2004; SILVA, 2016). Considerou-se a emissão de transporte até a produção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

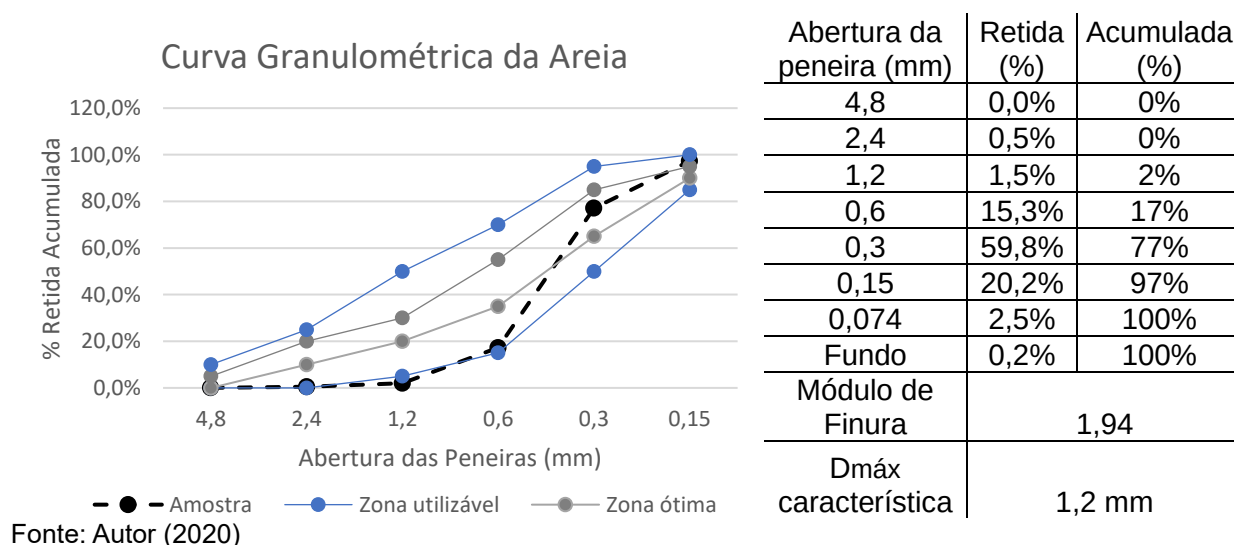
Neste item, são apresentados os resultados obtidos durante a realização dos ensaios e avaliações descritas na metodologia de pesquisa.

4.1 CARACTERÍSTICA DOS MATERIAIS EMPREGADOS (ETAPA 01)

4.1.1 Areia Natural

Areia natural quartzosa, extraída do rio paraná no município de Guaíra-PR. A composição granulométrica da areia foi obtida conforme prescries da NM 248 (ABNT, 2003). A Figura 22 apresenta a curva granulométrica obtida no ensaio, com a indicao dos limites práticos das zonas ótimas e utilizáveis, conforme NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 22: Composio granulométrica areia

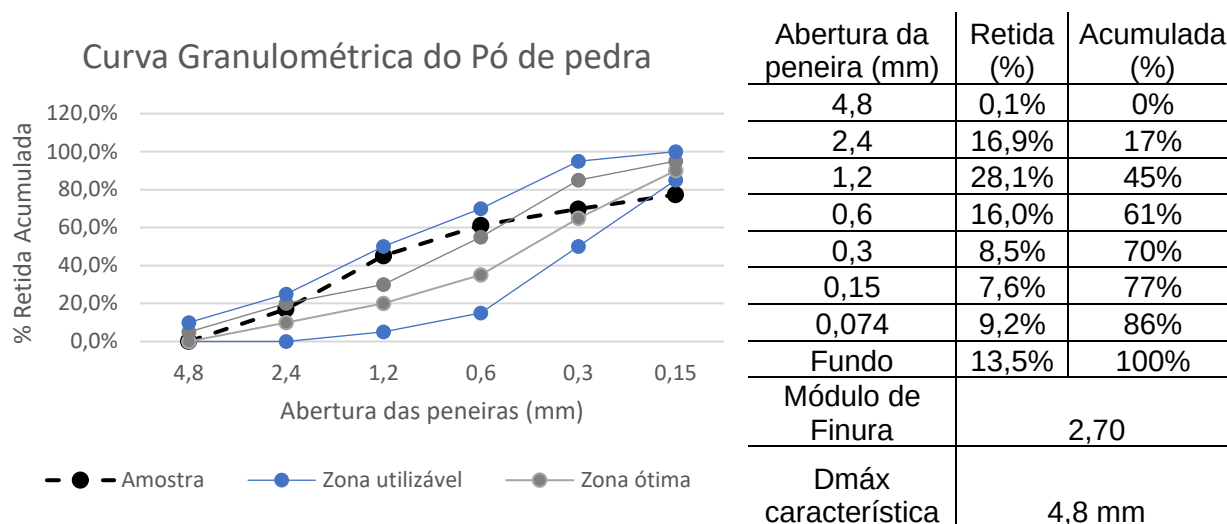


O módulo de finura apresentou o valor de 1,94, a curva granulométrica demonstra um posicionamento da amostra, em sua maior parte, em uma faixa inferior à zona ótima. A distribuição de partículas apresenta a maior quantidade a partir da peneira de 0,6mm, tendendo o aumento nas peneiras subsequentes (0,3mm e 0,15mm), material pode ser caracterizado como areia fina. A massa específica é de 2,62 g/cm³ e a massa unitária de 1,53 g/cm³.

4.1.2 P de Pedra

Agregado pó de pedra de origem basáltica, derivado do processo de cominuição das rochas, proveniente do município de Matelândia- PR. A Figura 23 apresenta o resultado obtido através do ensaio de granulometria, conforme prescrição da NBR 248 (ABNT, 2003), juntamente com os limites práticos recomendados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 23: Composição granulométrica do pó de pedra



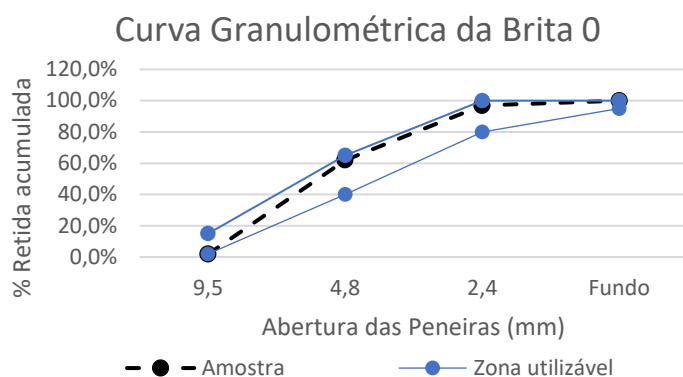
Fonte: Autor (2020)

Como característica usual deste tipo de material, nota-se uma quantidade grande de finos presentes no agregado, qual pode possibilitar benefícios pertinentes de coesão e textura superficial no processo de produção dos blocos. A adequação do material dentro da mistura, foi analisada através do estudo de formação da curva granulométrica combinada dos agregados. A massa específica é de 2,88 g/cm³, e a massa unitária de 1,84 g/cm³.

4.1.3 Brita 0

Agregado Brita 0 de origem basáltica, proveniente do município de Matelândia-PR. O ensaio de granulometria, realizado conforme prescrição da NBR 248 (ABNT, 2003) está apresentado Figura 24. A massa específica do material é de 2,86 g/cm³ e a massa unitária é de 1,37 g/cm³.

Figura 24: Composição granulométrica da Brita 0



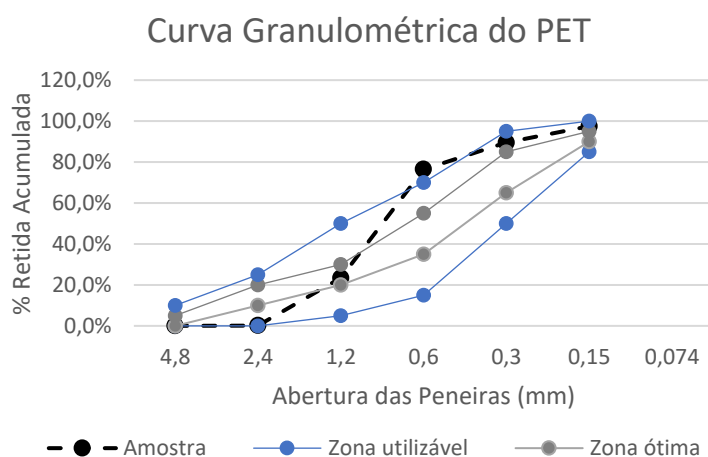
Fonte: Autor (2020)

Abertura da peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)
9,5	1,8%	2%
4,8	60,2%	62%
2,4	34,9%	97%
Fundo	3,1%	100%
Módulo de Finura	5,48	
D _{máx} característica	9,5 mm	

4.1.4 Pó de PET

O ensaio de granulometria foi realizado seguindo o método proposto pela da NBR 248 (ABNT, 2003). Na Figura 25, apresenta-se a curva granulométrica obtida, e os limites práticos estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009) para agregados miúdos.

Figura 25: Composição granulométrica do PET



Fonte: Autor (2020)

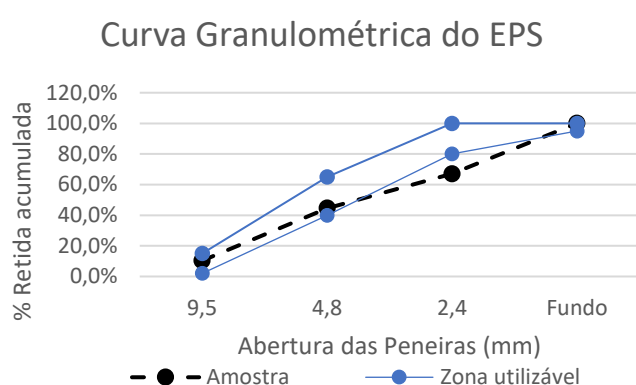
Abertura da peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)
4,8	0,0%	0%
2,4	0,1%	0%
1,2	23,3%	23%
0,6	53,1%	76%
0,3	13,0%	89%
0,15	8,0%	97%
0,074	2,0%	99%
Fundo	0,5%	100%
Módulo de Finura	2,87	
D _{máx} característica	2,4 mm	

O material demonstra possuir uma curva granulométrica muito próxima de agregados miúdos, se posicionando em quase todos os momentos dentro dos limites práticos estabelecidos pela norma. A massa específica adotada para o material é de 1,33 g/cm³ e a massa unitária é de 0,40 g/cm³.

4.1.5 EPS

Agregado de EPS, é proveniente de uma indústria de reciclagem do município de Santa Tereza do Oeste-PR. O ensaio de granulometria, conforme prescrição da NBR 248 (ABNT, 2003), e a representação gráfica dos limites práticos recomendados pela NBR 7211 (ABNT, 2009) para agregados graúdos estão apresentados Figura 26. A massa específica do material é de $0,013 \text{ g/cm}^3$ e a massa unitária é de $0,008 \text{ g/cm}^3$.

Figura 26: Composição granulométrica do EPS



Abertura da peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)
9,5	10,3%	10,3%
4,8	34,3%	44,6%
2,4	22,5%	67,0%
Fundo	33,0%	100,0%
Módulo de Finura	3,90	
D _{máx} característica	12,5 mm	

Fonte: Autor (2020)

4.1.6 Cimento

Cimento do tipo CPV ARI RS, marca Votorantim Cimentos, com massa específica de $2,99 \text{ g/cm}^3$.

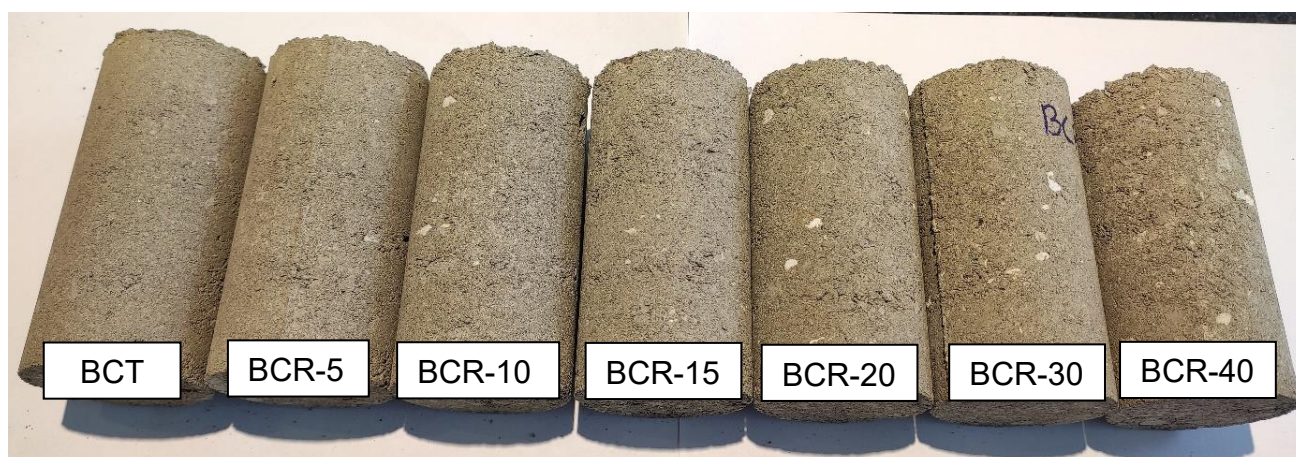
4.2 RESULTADOS AVALIAÇÃO PRELIMINAR DAS MISTURAS EM LABORATÓRIO (ETAPA 3)

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos na avaliação preliminar das misturas, etapa direcionada a análise das propriedades em corpos de prova cilíndricos, previstos para a fase 3 do trabalho. Contemplando o traço de modelo tradicional (BCT) e com agregados reciclados (BCR), conforme detalhado na Tabela 7.

4.2.1 Textura Superficial dos Corpos de Prova Cilíndricos

A Figura 27 apresenta a textura superficial obtida nos traços. De modo geral, os corpos de prova com material reciclado (BCR) apresentaram boa textura superficial, semelhantes ao traço de referência (BCT). A mistura BCR-40, foi a que apresentou uma superfície mais áspera das demais. Provavelmente motivada pela menor quantidade de finos, ocasionada pela substituição parcial do pó de pedra pelo pó de PET, material que possui em sua composição um menor teor de finos.

Figura 27: Textura superficial das misturas

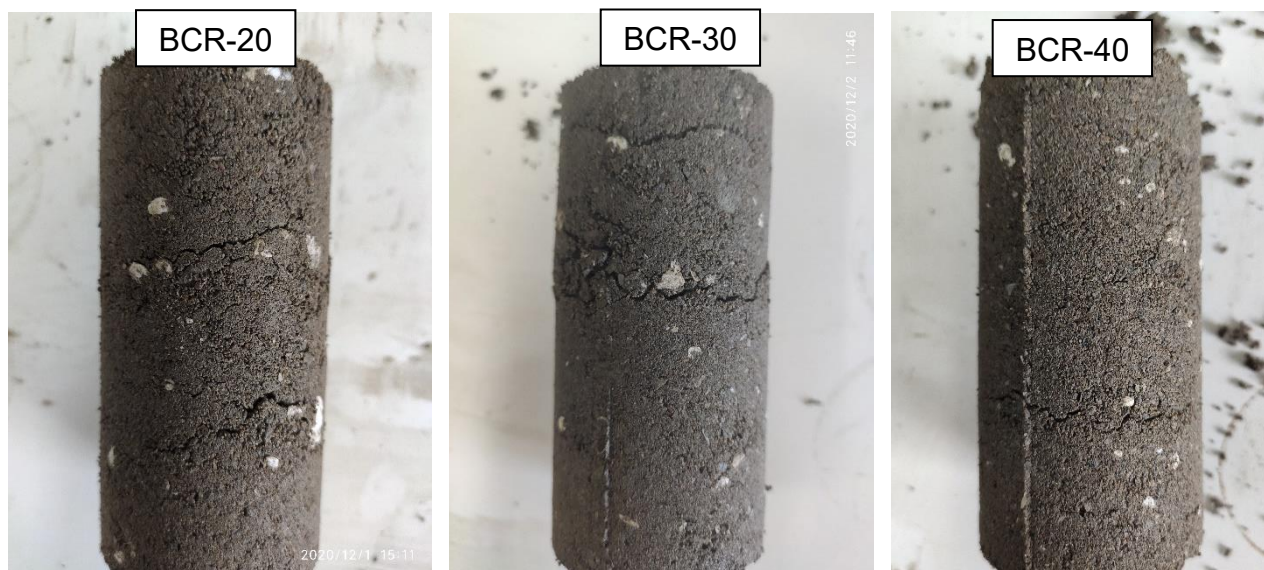


Fonte: Autor (2020)

O aspecto superficial dos espécimes, tem a indicação de serem adequados a produção de blocos de concreto, apresentando uma superfície não demasiadamente rugosa e arestas vivas. Ainda assim, torna-se necessário confirmar tal propriedade através do emprego dos traços no equipamento de moldagem dos blocos. Pela Figura 27, nota-se que as partículas de EPS tornam-se visíveis na superfície dos modelos, principalmente nas amostras com maior percentual de inserção. Quanto ao pó de PET, por ter granulometria mais fina que o EPS, não é possível visualizá-lo na face dos exemplares.

Após a retirada dos moldes logo após o processo de adensamento, parte dos corpos de prova dos modelos BCR-20, BCR-30 e BCR-40, apresentaram fissuras no plano transversal, como demonstra a Figura 28. Durante o processo de moldagem, observou-se que à medida que a mistura era comprimida na aplicação dos golpes de compactação do concreto, na retirada do soquete, a mistura se expandia, produzindo um “efeito mola” no concreto.

Figura 28: Fissuras durante a moldagem dos traços BCR-20, BCR-30 e BCR-40



Fonte: Autor (2020)

Acredita-se que a movimentação (compressão e expansão) da mistura, conduziu à fissuração dos exemplares. A ocorrência surgiu em traços com maior percentual de reciclados, acredita-se que motivado pela presença em maior quantidade do EPS, cuja característica, é dada pela alta compressibilidade levando em conta sua menor capacidade resistiva.

4.2.2 Coesão

A Tabela 13 apresenta os resultados do ensaio de coesão das misturas analisadas. Observa-se que traços com menor quantidade de agregados reciclados, tendem a obter maiores valores de coesão, enquanto os traços com maior percentual (BCR-20, BCR-30 e BCR-40), apresentaram uma redução nesta propriedade. O modelo BCR-40 obteve um valor de coesão no limite estabelecido pelo método proposto por Frasson (2007), que é de no mínimo 6 Kg de resistência à compressão diametral. Os resultados individuais obtidos para cada espécime estão apresentados no Apêndice C.

Tabela 13: Coesão dos corpos de prova

		BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15	BCR-20	BCR-30	BCR-40
Coesão (Kg)	Média	11,18	12,80	11,29	12,20	8,15	8,61	5,99
	D.P.	1,56	1,62	2,19	1,59	0,40	0,60	0,33
	C.V.	13,9%	12,7%	19,4%	13,0%	5,0%	7,0%	5,5%

Fonte: Autor (2020)

De modo geral, a maior parte dos traços apresentaram valores de coesão bem superiores ao estabelecido no método. Acredita-se que seja devido ao percentual de finos presente na mistura de referência, cerca de 19,81% (agregados retidos nas peneiras 0,15mm e fundo). Método Besser indica tal valor situado em torno de 15%.

Denota-se que até determinado grau de inserção dos reciclados, ainda é possível manter as características necessárias para que o material não esboroe após a moldagem. Isso propicia condições de inserção dos reciclados sem prejudicar o processo de produção.

4.2.3 Massa Específica, Absorção e Índice de Vazios

Na Tabela 14 são apresentados os resultados dos ensaios para aferição da massa específica, absorção e índice de vazios dos corpos de prova. Os resultados individuais obtidos para cada espécime estão detalhados no Apêndice C.

Tabela 14: Massa específica, absorção e índice de vazios dos corpos de prova

		BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15	BCR-20	BCR-30	BCR-40
Absorção (%)	Média	5,03	5,40	4,94	5,57	5,63	5,91	5,76
	D.P.	0,08	0,21	0,08	0,32	0,15	0,17	0,17
	C.V.	1,64%	3,84%	1,53%	5,77%	2,67%	2,89%	2,92%
Índice de Vazios (%)	Média	12,31	13,13	12,03	13,25	13,22	13,67	13,22
	D.P.	0,19	0,5	0,17	0,67	0,37	0,44	0,37
	C.V.	1,57%	3,81%	1,40%	5,08%	2,77%	3,21%	2,83%
Massa Específica (g/cm ³)	Média	2,324	2,298	2,315	2,248	2,218	2,176	2,164
	D.P.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,02
	C.V.	0,20%	0,63%	0,33%	1,06%	0,21%	0,25%	1,15%

Fonte: Autor (2020)

Como forma de avaliação preliminar das misturas, os resultados demonstram que os índices de absorção dos modelos, ficaram dentro dos parâmetros estabelecidos na NBR 6136 (ABNT, 2016), que indica um percentual médio de absorção de água de até 10%, para o caso de blocos de classe C.

Analisando os dados da Tabela 14, demonstra-se que existe uma tendência de aumento na absorção e índice de vazios com a inserção dos reciclados. Entretanto, pontua-se que o modelo BCR-10, apresentou o menor nível de absorção entre as amostras, possivelmente ocasionado por variações no processo de moldagem, que levaram a obtenção de uma maior massa específica. Apesar dos índices de absorção, demonstrarem

tal tendência, ainda sim, situaram-se na faixa de 5%. Portanto, trazendo um indicativo da possibilidade de atendimento neste quesito, para uso dos traços na produção dos blocos.

Como esperado, a massa específica dos concretos reduziu a medida da incorporação dos agregados reciclados, ocasionado pela menor densidade destes materiais. O modelo BCR-40, apresentou uma redução de em média, 6,88% de massa em relação ao modelo tradicional (BCT).

4.2.4 Resistência à Compressão Axial

Os resultados da resistência à compressão axial dos corpos de prova aos 28 dias são apresentados na Tabela 15. Os dados indicam uma tendência de redução da resistência mecânica à medida que os agregados reciclados são incorporados. Os resultados individuais obtidos para cada espécime estão demonstrados no Apêndice C.

Tabela 15: Resistência mecânica à compressão axial dos corpos de prova

		BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15	BCR-20	BCR-30	BCR-40
Resistência (MPa)	Média	18,52	13,07	13,63	7,80	7,75	7,48	7,12
	D.P.	1,78	0,50	0,68	0,48	0,95	0,42	0,26
	C.V.	9,59%	3,82%	4,99%	6,12%	12,23%	5,57%	3,60%

Fonte: Autor (2021)

Nota-se que o traço de referência (BCT), e os modelos com menor quantidade de material reciclado (BCR-5 e BCR-10) tiveram um desempenho mecânico superior aos demais. Esse comportamento era previsto, considerando os dados levantados em estudos com o emprego destes materiais reciclados em compósitos cimentícios na literatura (SABAA; RASIAH, 1997; ALBANO et al., 2009; CHOI et al., 2009; MADANDOUST; RANJBAR; YASIN MOUSAVI, 2011; DETOMI, 2012; FABIAN S. CAMPOS et al., 2014; PEREIRA, 2016; SILVA, 2016; GUERRA; ROCHA; OKABAYASHI, 2017; RODRIGUES et al., 2017; GONÇALVES, 2018).

Por outro lado, não se notou diferenças significativas entre a resistência mecânica das demais composições (BCR-15, BCR-20, BCR-30 e BCR-40). Os resultados apresentaram valores próximos, com variação entre 7,12 MPa a 7,8 MPa, o que representa de 38 a 42% da resistência atingida pelo modelo de referência.

Dentro do propósito desta etapa da pesquisa, buscando uma avaliação preliminar das misturas, utilizando parâmetros empregados na literatura. A Tabela 16 apresenta as estimativas de resistência mecânica à compressão axial que os blocos de

concreto poderão assumir, a partir dos resultados obtidos para os corpos de prova cilíndricos.

Tabela 16: Estimativa da resistência mecânica dos blocos de concreto

		BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15	BCR-20	BCR-30	BCR-40
Resistência média F_{bm} (MPa)	Min.	6,69	4,72	4,93	2,82	2,80	2,71	2,57
	Máx.	10,88	7,68	8,01	4,58	4,55	4,40	4,18
Resistência característica F_{bk} (MPa)	Min.	5,80	4,51	4,23	2,42	2,39	2,57	2,42
	Máx.	9,43	7,33	6,87	3,94	3,88	4,17	3,94

Fonte: Autor (2021)

O objetivo do trabalho é avaliação do uso dos agregados reciclados, para obtenção de blocos de classe C, cuja resistência mínima de projeto (F_{bk}) seja superior a 3 MPa. Considerando que os três primeiros modelos (BCT, BCR-5 e BCR-10) atingiram resistências mecânicas mais elevadas, a estimativa dos valores caso fossem blocos, seria mais alta em relação as demais misturas, superando o valor mínimo de 3 MPa.

Os modelos BCR-15, BCR-20, BCR-30 e BCR-40, obtiveram valores próximos de resistência característica, sendo estimado em faixas entre 2,4 MPa até 4,2 MPa. Neste caso, o método indica a possibilidade de que tais modelos de blocos não atinjam a resistência desejada.

4.2.5 Análise Estatística – Resultados Ensaio dos Corpos de Prova

Como forma de avaliação dos dados, procedeu-se uma análise estatística de variância (ANOVA) com os resultados da etapa 3 do trabalho, apresentada na Tabela 17. Considerando um nível de significância de 95%.

Tabela 17: Teste ANOVA para os resultados dos corpos de prova

Variável de resposta	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Resultado
Coesão	Entre grupos	109,37	6	18,22757	9,24	0,000457	2,92	Significativo
	Dentro grupos	25,66	13	1,97357				
	Total	135,02	19					
Absorção	Entre grupos	2,35	6	0,392452	11,39	0,000107	2,85	Significativo
	Dentro grupos	0,48	14	0,034448				
	Total	2,84	20					
Índice de Vazios	Entre grupos	6,14	6	1,022983	5,80	0,003232	2,85	Significativo
	Dentro grupos	2,47	14	0,176329				
	Total	8,61	20					
Massa específica	Entre grupos	0,08	6	0,013321	54,85	6,31E-09	2,85	Significativo
	Dentro grupos	0,00	14	0,0002429				
	Total	0,08	20					
Resistência à compressão	Entre grupos	693,34	6	115,5563	154,59	1,09E-23	2,37	Significativo
	Dentro grupos	26,16	35	0,74751				
	Total	719,50	41					

Fonte: Autor (2021)

Os resultados demonstraram que todas as variáveis analisadas, possuem a significância estatística requerida, evidenciando que a adição dos materiais reciclados modificou as propriedades estudadas entre grupos.

4.2.6 Traços Empregados na Produção dos Blocos

Seguindo o objetivo da etapa 03 da pesquisa, buscou-se uma avaliação preliminar dos traços estabelecidos na Tabela 7. Estudando a composição desde o menor percentual de inserção de reciclados de pó de PET e EPS (BCR-5) até a maior (BCR-40). Através dos dados, observou-se a influência quando do uso dos reciclados como agregados para as características analisadas, misturas com um percentual menor de adição, promoveram condições de desempenho superior em quesitos como o de resistência mecânica à compressão, coesão e absorção de água. Por outro lado, a inserção de uma maior quantidade dos reciclados trouxe consigo a redução de massa dos espécimes.

Um dos principais pontos que se destaca nesta fase, e que foi determinante para a escolha dos traços direcionados a moldagem em fábrica, foi a característica dos traços com maior quantidade de reciclados (BCR-20, BCR-30 e BCR-40), de seccionamento no plano transversal aos espécimes. Como descrito, ocasionado pelo movimento de expansão durante o processo de compactação nos moldes cilíndricos, tal

comportamento atribui-se ao EPS, levando em conta sua baixa capacidade resistiva.

O emprego destes traços em um equipamento de vibroprensa, poderia trazer problemas dentro do processo de fabricação. Além disso, o traço BCR-40, obteve valores de coesão pouco abaixo do indicado pelo método de (FRASSON, 2000). Com isso, optou-se por seguir o estudo com a moldagem em fábrica, nos traços apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Traços utilizados na moldagem em fábrica

Traço	Substituição em volume de agregados	
	PET (miúdo)	EPS (graúdo)
BCT	0%	0%
BCR-5	2,5%	2,5%
BCR-10	5,0%	5,0%
BCR-15	7,5%	7,5%

Fonte: Autor (2021)

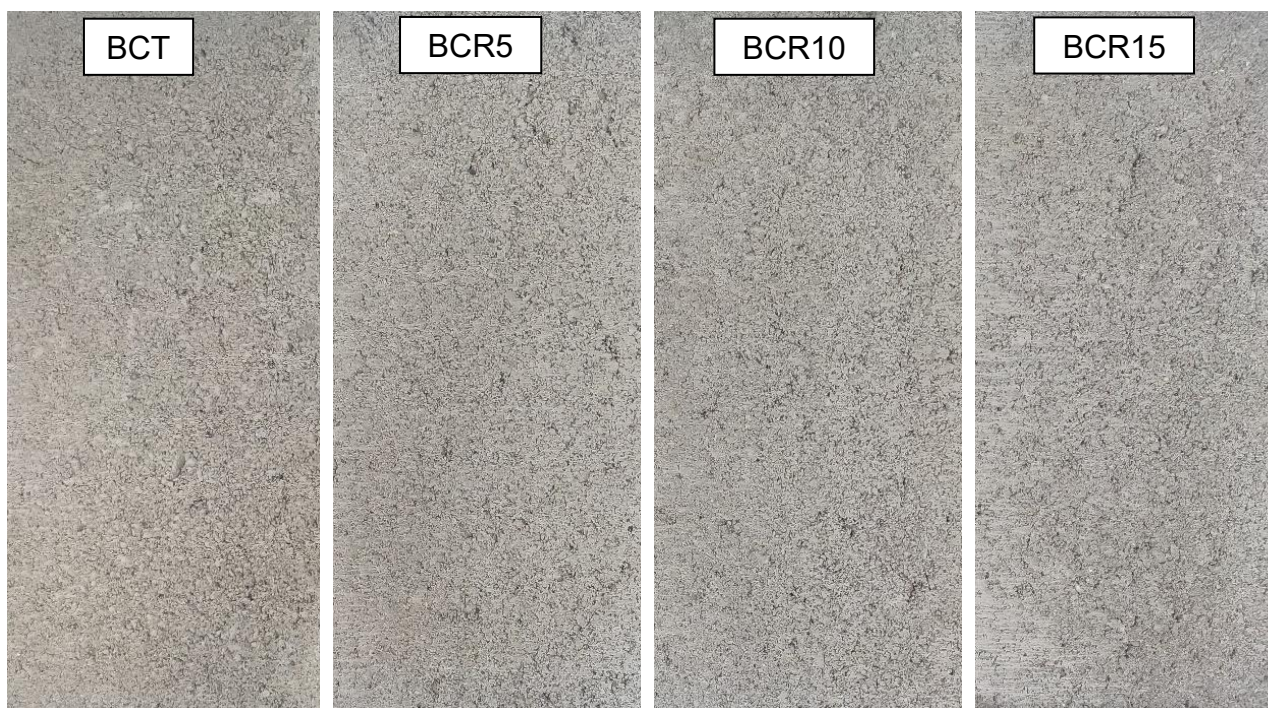
4.3 RESULTADOS ENSAIOS DOS BLOCOS DE CONCRETO DO TIPO BCT E BCR (ETAPA 4)

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos nos ensaios previstos para os blocos de concreto no modelo tradicional (BCT), e para os modelos reciclados (BCR).

4.3.1 Textura Superficial dos Blocos de Concreto

A NBR 6136 (ABNT, 2016) aponta que os blocos devam apresentar arestas vivas, ausência de trincas, inexistência de fraturas ou outros defeitos, que de alguma forma possam prejudicar o processo de assentamento, resistência ou a durabilidade dos elementos. De forma geral, tanto o bloco tradicional (BCT) quanto os modelos com agregados reciclados (BCR) tiveram resultados satisfatórios nos requisitos prescritos pela norma, possibilitando o uso em sistemas de alvenaria. Na Figura 29, são exibidas as texturas obtidas para cada modelo.

Figura 29: Textura superficial blocos

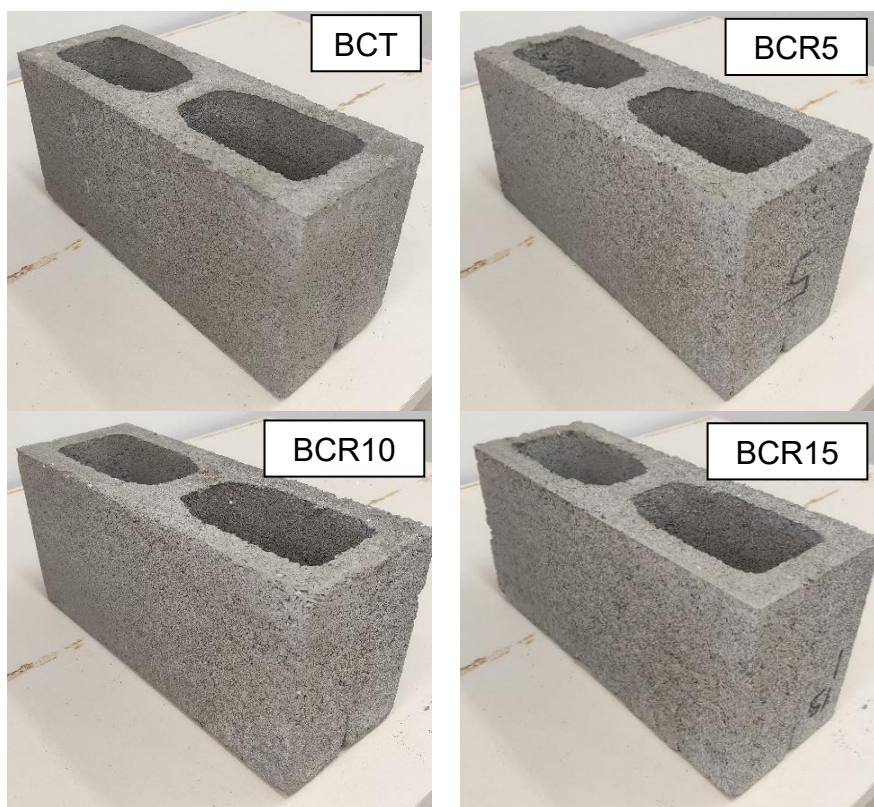


Fonte: Autor (2021)

Apesar de terem apresentado uma textura homogênea, sem excesso de falhas ou imperfeições, os modelos BCR-10 e BCR-15 apresentaram faces ligeiramente mais ásperas que o restante dos modelos. Possivelmente ocasionado pela redução da quantidade de finos, quando da substituição do pó de pedra pelo PET, cujo percentual de finos (passantes peneira 0,3mm) é de 30,3% e 10,3%, respectivamente. Parte dos blocos apresentaram ranhuras na face, segundo Fernandes (2019), causada quando a umidade presente na mistura está adequada para a moldagem. É o resultado da fuga de pasta de cimento para a superfície após o preenchimento interno.

A Figura 30 apresenta uma vista em perspectiva dos blocos. No decorrer do processo de moldagem, não se constatou problemas relacionados a excessiva quebra ou esboroamento das peças moldadas com os reciclados. Durante a etapa 3 do trabalho, os traços dos modelos BCT, BCR-5, BCR-10 e BCR-15 apresentaram os maiores valores no ensaio de coesão proposto por Frasson (2000), variando entre 11 e 12 Kg. Valor superior ao mínimo recomendado pelo pesquisador, que é de 6 Kg. Trazendo a sinalização de viabilidade do emprego dos traços, sem prejuízo ao processo de produção.

Figura 30: Vista dos blocos em perspectiva



Fonte: Autor (2021)

Apesar das condições distintas de mistura dos traços na etapa 03 e 04 do trabalho (manual x mecânica), em geral, a textura dos blocos foi semelhante aos dos corpos de prova cilíndricos. O que apresenta, a possibilidade de uso da técnica como um estudo antecipado à moldagem dos blocos, para a obtenção de um indicativo da aparência e condição de moldagem da mistura.

4.3.2 Propriedades Físicas dos Blocos

Neste item são apresentados os resultados obtidos na realização dos ensaios das características físicas de blocos tipo BCT e BCR. Como descrito, a NBR 6136 (ABNT, 2016) estabelece requisitos que devem ser cumpridos pelas unidades de blocos, de forma a garantir o desempenho durante o seu uso.

4.3.2.1 Análise Dimensional

A dimensão nominal dos blocos é de 14x19x39cm (largura, altura e comprimento). A Tabela 19, apresenta os resultados da avaliação dimensional para cada

modelo.

Tabela 19: Análise dimensional dos blocos

		BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15
Altura (mm)	Média	191,7	191,3	190,7	191,1
	Min.	187,3	189,5	188,0	190,1
	Máx.	194,1	192,3	191,6	192,2
	D.P.	1,99	0,36	0,35	0,37
	C.V. (%)	1,04%	0,19%	0,18%	0,19%
Largura (mm)	Média	140,5	141,0	140,9	141,1
	Min.	139,8	140,4	140,5	140,4
	Máx.	141,3	141,3	141,3	142,1
	D.P.	0,46	0,32	0,29	0,49
	C.V. (%)	0,32%	0,22%	0,21%	0,35%
Comprimento (mm)	Média	391,6	391,7	392,0	392,6
	Min.	390,7	390,8	390,9	391,4
	Máx.	392,5	392,3	393,0	394,2
	D.P.	0,55	0,39	0,75	0,88
	C.V. (%)	0,14%	0,10%	0,19%	0,22%
Paredes longitudinais (mm)	Média	22,6	22,8	22,7	23,0
	Min.	21,6	22,1	22,2	22,4
	Máx.	23,1	23,5	23,4	23,5
	D.P.	0,47	0,48	0,51	0,40
	C.V. (%)	2,10%	2,09%	2,24%	1,75%
Paredes transversais (mm)	Média	19,4	19,5	19,6	19,4
	Min.	18,9	19,1	19,1	18,7
	Máx.	19,9	19,7	19,9	19,9
	D.P.	0,29	0,24	0,22	0,38
	C.V. (%)	1,51%	1,22%	1,13%	1,94%

Fonte: Autor (2021)

Quase todas as 48 unidades de blocos analisadas, atenderam aos limites estabelecidos pela NBR 6136 (ABNT, 2016). Durante a aferição, uma unidade do modelo BCT e duas do modelo BCR-15 ultrapassaram as tolerâncias estabelecidas pela norma (+/- 2,00mm para a largura, e +/- 3,00mm para altura e comprimento).

O modelo BCT apresentou altura de 194,1mm, quando o limite superior é de 193mm. Acredita-se que possa ter ocorrido um preenchimento desuniforme nos moldes do equipamento, concentrando mais material em um determinado ponto da bandeja. Uma unidade de BCR-15, apresentou uma largura de 142,1mm (limite superior até 142mm), outra, comprimento registrado em 394,2 (limite superior até 393mm).

Apesar da distorção registrada nas três unidades, de forma geral, os

resultados obtidos indicam que o uso do agregado reciclado não produziu efeitos a qual induzissem problemas relacionados a estabilidade dimensional dos blocos. As unidades com valores destoantes, foram em decorrência de ações ligadas ao próprio processo produtivo de fabricação.

Com relação a espessura de paredes (transversal e longitudinal), as unidades apresentaram dimensões que ultrapassam as mínimas exigidas pela NBR 6136 (ABNT, 2016) para o modelo de classe C, que é de 18mm. Apesar de não constar na Tabela 19, todos os blocos atenderam ao requisito de espessura equivalente, que deve ser superior a 135 mm/m (razão entre soma das espessuras das paredes transversais e o comprimento nominal do bloco).

4.3.2.2 Massa Específica, Índice de Vazios e Absorção de Água

Os resultados dos ensaios das propriedades físicas de massa específica, índices de vazios e absorção de água dos blocos estão demonstrados na Tabela 20.

Tabela 20: Massa específica, índice de vazios e absorção dos blocos

		BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15
Massa específica (g/cm ³)	Média	2,195	2,206	2,167	2,107
	D.P.	0,015	0,029	0,039	0,027
	C.V.	0,68%	1,34%	1,78%	1,27%
Índice de vazios (%)	Média	16,81%	15,62%	16,82%	17,22%
	D.P.	1,00%	0,86%	0,73%	0,98%
	C.V.	5,95%	5,52%	4,35%	5,68%
Absorção (%)	Média	7,66%	7,09%	7,77%	8,17%
	D.P.	0,45%	0,49%	0,44%	0,42%
	C.V.	5,92%	6,85%	5,63%	5,08%

Fonte: Autor (2021)

Observa-se que a massa específica seca dos blocos apresenta uma tendência de queda, a medida da inserção dos agregados reciclados. Esse comportamento era esperado, levando em conta a menor densidade destes materiais em relação aos agregados tradicionais. Entretanto, a inserção destes teores de reciclados, não promoveu uma diminuição considerável de peso nos blocos, o modelo BCR-15, com o maior percentual de substituição, obteve uma redução média da ordem de 4% da massa específica em relação ao tradicional BCT. A NBR 8953 (ABNT, 2015), direcionada à classificação de concretos para fins estruturais, estabelece concreto com característica leve

quando sua massa específica seca seja inferior a $2,0 \text{ g/cm}^3$. Neste caso, o material seria enquadrado como concreto de massa normal ($2,0 \text{ g/cm}^3$ a $2,8 \text{ g/cm}^3$).

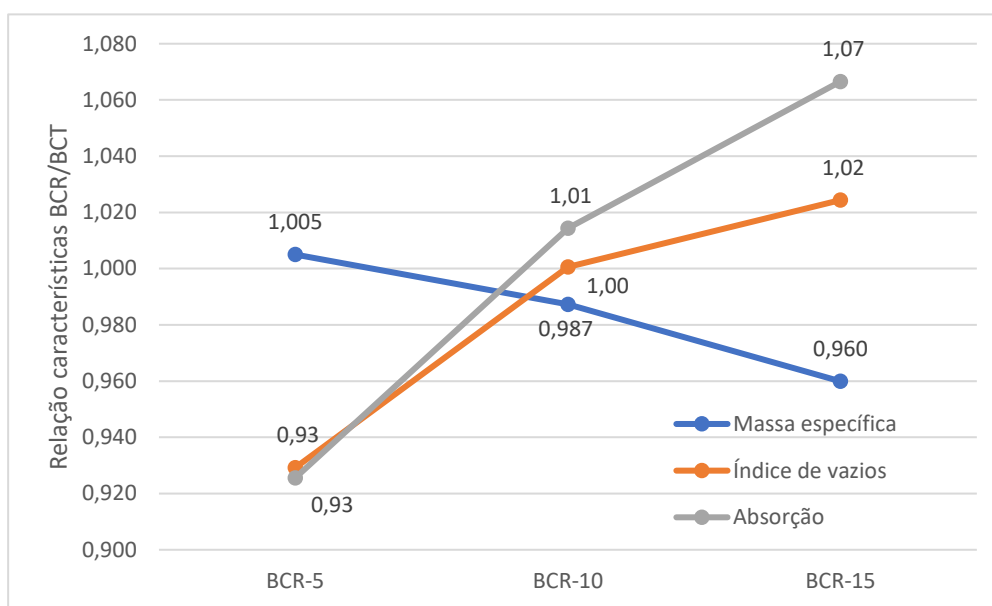
Ademais, o modelo BCR-5 apresentou um valor pouco superior em relação ao BCT neste quesito (cerca de 0,5%). Acredita-se que esse comportamento se deva a variações dentro do processo produtivo durante a fabricação dos blocos, relacionado principalmente a variação de umidade da mistura. Que apesar de ter sido fixada constante para todos os modelos, foi realizada através do ajuste do traço com ensaio de umidade dos agregados miúdos, antes da moldagem. O procedimento de secagem em estufa foi inviabilizado, dado a quantidade de material e a ausência de estufa nas instalações da fábrica. Segundo Frasson (2000), alterações de umidade na mistura podem intervir de maneira expressiva na massa dos elementos.

O acréscimo de massa específica nos blocos do tipo BCR-5, conduziu ao modelo, os menores valores de índice de vazios e absorção. Contudo, os resultados indicam maior percentual nestas propriedades para exemplares com maior grau de inserção de agregados reciclados. Segundo Silva (2016) e Gonçalves (2018), os materiais de pó de PET e EPS possuem características hidrofóbicas, o que para os pesquisadores, faz com que a água excedente seja absorvida pela matriz cimentícia. A umidade além da necessária ao processo de hidratação do cimento, pode induzir a um aumento do índice de vazios, e consequentemente a absorção de água.

A NBR 6136 (ABNT, 2016) estabelece que a absorção de água de um bloco de classe C, deva ser, em média, igual ou inferior a 10%. Os resultados da Tabela 20, demonstram que, apesar da absorção maior nos exemplares com maior quantidade de reciclados, todos os modelos cumpriram com os requisitos da norma. A condição de atendimento da norma no índice de absorção dos blocos era prevista, durante o estudo dos traços com os corpos de prova cilíndricos a absorção média obtida (modelos BCT e BCR-5, BCR-10 e BCR-15) foi de 5,24%, valor bem abaixo do limite estabelecido. Ainda que nos blocos a absorção média foi superior (7,67%), acredita-se que motivada pela diferença de massa específica, com média de $2,296 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ nos corpos de prova cilíndricos e $2,169 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ para os blocos.

A Figura 31 apresenta uma relação comparativa, utilizando dados médios, entre as propriedades físicas de massa específica, índice de vazios e absorção para os blocos de modelo BCR em relação ao modelo tradicional (BCT).

Figura 31: Relação entre as propriedades físicas do modelo BCR e BCT



Fonte: Autor (2021)

Pela imagem, nota-se que os modelos de blocos BCR-5 e BCR-10, tem desempenho superior ou equivalente ao modelo BCT para os quesitos analisados. Já o BCR15, com maior grau de inserção de reciclados, apresenta a tendência de aumento na absorção, índice de vazios e redução de massa.

Como forma de avaliação dos dados obtidos, a Tabela 21 apresenta a análise estatística de variância (ANOVA) com os resultados das propriedades avaliadas nesta parte do estudo. Considerando para isso, um nível de significância de 95%. A análise procedeu a comparação entre todos os grupos de blocos estudados (BCT, BCR-5, BCR-10 e BCR-15).

Tabela 21: Teste ANOVA para os resultados propriedades físicas blocos

Variável de resposta	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Resultado
Massa específica	Entre grupos	0,02	3	0,0081	9,77	0,0015	3,49	Significativo
	Dentro dos grupos	0,01	12	0,0008				
	Total	0,03	15					
Índice de vazios	Entre grupos	5,68	3	1,8947	2,34	0,1244	3,49	Não significativo
	Dentro dos grupos	9,70	12	0,8082				
	Total	15,38	15					
Absorção	Entre grupos	2,42	3	0,8057	4,04	0,0337	3,49	Significativo
	Dentro dos grupos	2,40	12	0,1996				
	Total	4,81	15					

Fonte: Autor (2021)

A análise demonstrou que para as variáveis analisadas relacionadas a massa específica e absorção, existe significância estatística requerida. Portanto, a inserção dos reciclados alterou as propriedades entre os grupos, para o índice de vazios, o teste indicou que, estatisticamente, não há diferença entre os grupos.

Em complemento ao teste de análise de variância, levando em conta a proximidade entre as médias dos grupos apresentados na Tabela 20, e buscando identificar até qual teor de substituição de reciclados mantém-se as condições de desempenho em relação ao BCT. A Tabela 22, apresenta a análise estatística utilizando o teste “t de student”, considerando os dados de forma isolada (par a par) entre o modelo de referência (BCT), e os modelos de blocos com agregados reciclados.

Tabela 22: Teste "t de student" para avaliação das propriedades físicas estudadas no modelo BCT e BCR

Variável de resposta	BCT X BCR-5		BCT X BCR-10		BCT X BCR-15	
Massa específica	Valor-P	0,19335	Valor-P	0,116815	Valor-P	0,00060
	Não Significativo		Não Significativo		Significativo	
Índice de vazios	Valor-P	0,12238	Valor-P	0,99073	Valor-P	0,58603
	Não Significativo		Não Significativo		Não Significativo	
Absorção	Valor-P	0,13337	Valor-P	0,74292	Valor-P	0,14478
	Não Significativo		Não Significativo		Não Significativo	

Fonte: Autor (2021)

O teste indicou que para as propriedades estudadas, não existe significância estatística entre os grupos BCT x BCR-5 e BCT x BCR-10, ou seja, para estes requisitos, a adição dos reciclados não modificou nenhuma das propriedades avaliadas. A análise dos modelos BCT x BCR-15, demonstrou que apenas a massa específica obteve resultados com estatisticamente significativos, induzido pela redução de massa nos blocos com maior quantidade de reciclados. Além disso, demonstrou que até o modelo BCR-15, a inserção não prejudicou o requisito normativo de absorção de água dos blocos ou mesmo a propriedade de índice de vazios.

Os resultados individuais, obtidos durante a realização dos ensaios para cada espécime estão demonstrados no Apêndice D.

4.3.2.3 Umidade Relativa

Os dados dos ensaios obtidos na aferição da umidade relativa dos blocos

estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Umidade relativa blocos

		BCT	BCR-5	BCR-10	BCR15
Umidade Relativa	Média	24,12%	27,21%	20,69%	20,40%
	D.P.	3,45%	5,37%	1,26%	2,12%
	C.V.	14,29%	19,75%	6,07%	10,40%

Fonte: Autor (2021)

Os procedimentos previstos na NBR 12118 (ABNT, 2013), impõem a condição de que, no momento dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias, o teor de umidade relativa média dos blocos com resistência até 8 MPa, esteja entre 10 e 40%. Neste quesito, todos os modelos de blocos atenderam a norma.

4.3.3 Resistência à Compressão Axial dos Blocos de Concreto

A Tabela 24 apresenta os resultados de resistência à compressão axial dos blocos aos 7 dias de idade.

Tabela 24: Resistência à compressão axial aos 7 dias de idade

	BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15
Média (MPa)	4,34	4,17	3,95	3,65
D.P.	0,48	0,18	0,19	0,31
C.V.	11,07%	4,40%	4,93%	8,39%
Resistência característica - F_{bk} (MPa)	3,75	3,66	3,57	3,13

Fonte: Autor (2021)

Mirando a obtenção de blocos de classe C, cuja NBR 6136 (ABNT, 2016) determina que a resistência característica à compressão axial seja superior a 3 MPa aos 28 dias. Logo aos 7 dias de idade, todos os modelos de blocos atenderam a resistência mínima requerida. A obtenção de resistência mais alta poucos dias após a moldagem, é uma característica atribuída ao cimento tipo CP-V-ARI, que devido a sua composição e finura, eleva a resistência em baixas idades.

Observando os valores médios, os resultados da Tabela 24, demonstram uma tendência de decréscimo na resistência dos blocos à medida que aumenta a inserção de agregados reciclados. Como descrito, os reciclados possuem capacidade resistiva menor do que os agregados tradicionais empregados nesta pesquisa, situação que reflete

na redução da resistência mecânica dos elementos. Em relação ao modelo tradicional (BCT), houve uma diminuição da resistência média de 3,92%, 8,99% e 15,90%, nos modelos BCR-5, BCR-10 e BCR-15, respectivamente.

A Tabela 25 apresenta os dados de resistência à compressão axial dos blocos aos 28 dias de idade.

Tabela 25: Resistência à compressão axial aos 28 dias de idade

	BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15
Média (MPa)	5,02	5,80	4,95	4,38
D.P.	0,26	0,61	0,23	0,50
C.V.	5,26%	10,54%	4,71%	11,36%
Resistência característica - F_{bk} (MPa)	4,83	4,88	4,32	3,62

Fonte: Autor (2021)

O resultado da resistência à compressão axial média dos blocos apresentou valores próximos a 5 MPa. Considerando a proporção de cimento e agregado da mistura (1:12), pode se dizer que os blocos atingiram resultados de resistência satisfatórios. Acredita-se que motivado além do emprego do equipamento hidráulico na moldagem, pelo percentual de agregado graúdo presente na mistura, de 40,09% a partir do traço de referência (retido nas peneiras 4,8mm e 2,4mm). Valor este recomendado pela literatura, a qual indica que maiores quantidades de agregado graúdo, tendem a conferir maior resistência mecânica ao sistema (FRASSON, 2000; FERNANDES, 2016).

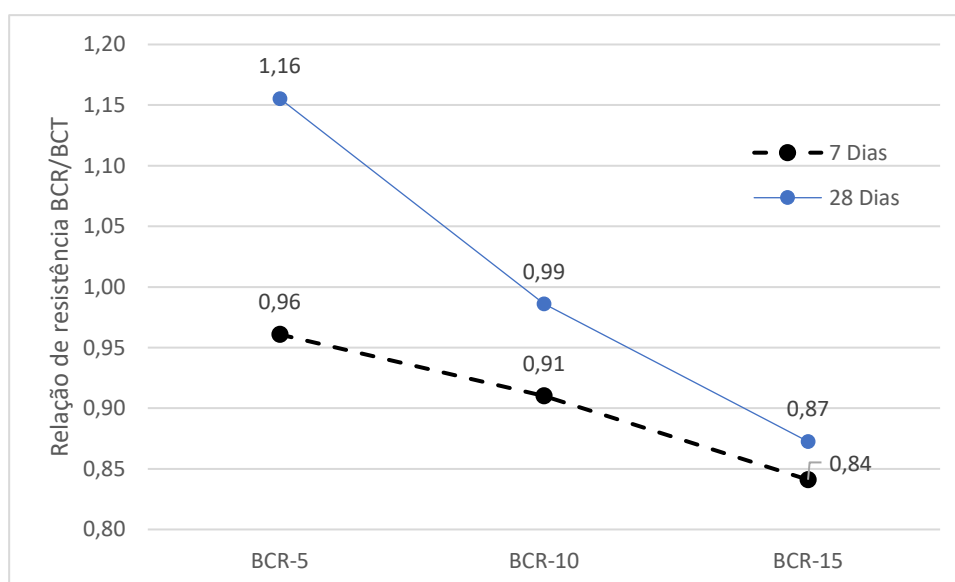
Levando em conta o resultado de resistência característica à compressão axial obtida nos ensaios, caso os modelos BCT, BCR-5 e BCR-10, tivessem seções das paredes transversais e longitudinais maiores que 25mm, ou seja, emprego de moldes de classe A/B. Atenderiam aos requisitos de resistência para serem classificados como blocos de Classe B pela NBR 6136 (ABNT, 2016), visto que atingiram resistência característica à compressão entre 4 e 8 MPa.

O modelo BCR-5 atingiu a maior resistência em relação aos demais (5,80 MPa), superior inclusive ao BCT (5,02 MPa). Considera-se que o resultado ocorreu em decorrência do processo de produção dos blocos, e não motivada pela inserção dos agregados reciclados. Como descrito, é possível que tenha ocorrido variação de umidade nos modelos durante a moldagem, levando em conta a água presente nos agregados miúdos. Nos resultados dos ensaios físicos, o modelo apresentou maior massa específica, e menores valores de absorção e índice de vazios, o que induz a maior resistência mecânica. Além disso, o bloco do modelo BCR-5 obteve um coeficiente de variação mais

elevado que o BCT, 10,54% e 5,26%, respectivamente, o que pode ter corroborado para o acréscimo de resistência média no modelo BCR-5.

Contudo, assim como os dados apresentados para os 7 dias de idade, considerando os dados médios obtidos, a resistência mecânica à compressão axial demonstrou uma tendência de queda com a inserção dos reciclados. Os modelos BCR-10 e BCR-15, apresentaram uma redução da resistência média de, respectivamente, 1,39% e 12,75% em relação ao BCT. A Figura 32 apresenta a relação comparativa entre a resistência mecânica registrada nos blocos de modelo BCR e o modelo tradicional (BCT), levando em conta os dados médios obtidos aos 7 e 28 dias de idade.

Figura 32: Relação entre a resistência mecânica do modelo BCR e BCT



Fonte: Autor (2021)

Através da análise dos dados relativos apresentados na Figura 32, demonstra-se que a inserção de teores de reciclados no modelo BCR-5 e BCR10, não produziram, de forma significativa, prejuízos à resistência mecânica dos blocos. Em geral, a variação na redução foi até 9% em relação ao tradicional. Neste quesito, demonstra-se a viabilidade do uso de determinada proporção dos agregados reciclados (BCR-10), sem prejuízo significativo a tal propriedade.

Para avaliação dos dados, procedeu-se a análise estatística de variância (ANOVA) com os resultados das resistências obtidas, considerando um nível de confiança de 95%. A avaliação foi realizada levando em conta todos os modelos de blocos e suas interações e são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26: Teste ANOVA para os resultados de resistência à compressão axial dos blocos

Variável de resposta	Variável controlada	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Resultado
Resistência à compressão	Idade	Amostra	12,31	1	12,3120	86,35	1,53E-11	4,08	Significativo
	Modelo bloco	Colunas	6,01	3	2,0038	14,05	2,11E-06	2,84	Significativo
	Idade * Modelo bloco	Interações	1,71	3	0,5699	4,00	1,40E-02	2,84	Significativo
		Dentro (resíduo)	5,70	40	0,1426				

Fonte: Autor (2021)

A análise envolvendo todos os modelos de blocos, demonstrou que todas as variáveis analisadas possuem significância estatística. Tanto de forma isolada, pela idade de rompimento e modelo do bloco (traço), quanto em relação a interação entre estes fatores. Assim, sugere-se que a inserção dos reciclados promoveu alterações nas propriedades de resistência dos blocos de concreto.

Em complemento ao teste de análise de variância, buscando identificar até qual teor de substituição de reciclados mantém-se condições de desempenho em relação ao modelo BCT. A Tabela 27, apresenta a análise estatística utilizando o teste “t de student”, considerando os dados de forma isolada (par a par) entre o modelo de referência (BCT) e os modelos de blocos com agregados reciclados. O teste considerou um nível de confiança de 95%.

Tabela 27: Teste "t de student" para avaliação da resistência mecânica à compressão axial aos 7 e 28 dias de idade no modelo BCT e BCR

Variável de resposta	BCT X BCR-5		BCT X BCR-10		BCT X BCR-15	
Resistência à compressão (7 dias)	Valor-P	0,43227	Valor-P	0,096182	Valor-P	0,01373
	Não Significativo		Não Significativo		Significativo	
Resistência à compressão (28 dias)	Valor-P	0,01683	Valor-P	0,653213	Valor-P	0,01936
	Significativo		Não Significativo		Significativo	

Fonte: Autor (2021)

A avaliação comparativa entre o modelo BCT x BCR-5 e BCT x BCR-10, aos 7 dias de idade, indicou que não existe significância, do ponto de vista estatístico, entre a média dos grupos comparados. Já o teste entre o modelo BCT x BCR-15, para a mesma idade, se apresentou como estatisticamente significativo, assim, os dados indicam uma equivalência relacionada a propriedade de resistência à compressão axial quando da

inserção dos reciclados, até o teor percentual do modelo BCR-10. Já para o modelo BCR-15, os resultados demonstraram que a resistência mecânica foi prejudicada em relação ao modelo BCT, demonstrando perda de desempenho para este quesito.

A análise da resistência aos 28 dias, demonstrou no comparativo entre o modelo BCT x BCR-5, que existe significância estatística entre os grupos. O modelo BCR-5 apresentou um desempenho superior na propriedade avaliada, motivada pelo acréscimo de resistência obtida em relação ao BCT (15,53%), possivelmente relacionada a variação no processo de moldagem dos blocos. O comparativo entre o modelo BCT x BCR-10, indicou como não significativo, do ponto de vista estatístico, a diferença entre as médias dos grupos, ou seja, para o teor de inserção dos reciclados até o modelo BCR-10, não ocorreu perda de desempenho de resistência mecânica.

A comparação entre BCT x BCR-15, com dados aos 28 dias de idade, demonstra uma perda de desempenho no modelo BCR-15 em relação ao BCT. Assim como ocorrido aos 7 dias de idade, a inserção de reciclados para com este teor de substituição produziu alterações na propriedade dos blocos, apresentando redução de sua capacidade resistiva. De todo modo, é possível indicar a inserção dos agregados reciclados até o teor do modelo BCR-10, não prejudicou o desempenho mecânico. Os resultados individuais obtidos durante os ensaios para cada espécime, estão demonstrados no Apêndice D.

Quanto a forma de ruptura, de maneira geral, os blocos apresentaram comportamentos semelhantes. O rompimento foi em formato de cone, com o esfacelamento das paredes e desenvolvimento de fissuração vertical nas paredes laterais (largura do bloco) (Figura 33). Segundo Mohamad et al. (2007) e Izquierdo (2015), trata-se de um comportamento típico de corpos de prova submetidos à compressão axial. Com extremidades confinadas, o ensaio causa um estado de tensões multiaxiais induzindo uma concentração de tensões no elemento.

Figura 33: Forma de ruptura bloco



Fonte: Autor (2021)

4.3.3.1 Correlação dos Resultados de Resistência Mecânica – Corpos de Prova Cilíndricos e Blocos de Concreto

Durante a fase de análise preliminar das misturas, através da moldagem de corpos de prova cilíndricos em laboratório (Etapa 03), fez-se previsões da resistência que os blocos poderiam assumir a partir da resistência mecânica dos corpos de prova. A Tabela 28 apresenta os coeficientes de correlação final entre blocos e CP's cilíndricos, levando em conta os dados de resistência à compressão axial alcançados aos 28 dias de idade para a pesquisa.

Tabela 28: Coeficientes de correlação entre Corpos de prova cilíndricos e blocos

		BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15
Resistência média CP (MPa)		18,52	13,07	13,63	7,80
Previsão de resistência de blocos - Coeficiente de correlação 0,8 a 1,3 (MPa)	(1,3)	6,69	4,72	4,93	2,82
	(0,8)	10,88	7,68	8,01	4,58
Resistência média final do bloco (MPa)		5,02	5,80	4,95	4,38
Coeficiente de correlação (CP/Blocos)		1,70	1,04	1,27	0,82

Fonte: Autor (2021)

Com base nos coeficientes de correlação (0,80 e 1,30) obtidos na literatura

(BUTTLER, 2007), a expectativa era que a resistência final alcançada nos ensaios de compressão axial dos blocos se posicionasse dentro da faixa de valores prevista. Os modelos BCR-5, BCR-10 e BCR-15, apresentaram este comportamento, ou seja, situando o coeficiente de correlação entre 0,82 e 1,27. Entretanto, o modelo BCT não se enquadrou dentro da previsão, obtendo uma relação de 1,70, indicando que a resistência foi menor que a inicialmente prevista.

4.4 RESULTADO DA AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE NO ASPECTO CUSTO E EMISSÃO CO₂ (ETAPA 5)

4.4.1 Custo Unitário dos Blocos tipo BCT e BCR e Custo de Disposição Final dos Resíduos em Aterro Sanitário

A quantidade de blocos necessária à construção da alvenaria da habitação utilizada como referência na pesquisa é de 1429 unidades. A Tabela 29 apresenta os resultados obtidos na aferição do custo total de insumos para produção dos diferentes tipos de blocos.

Tabela 29: Estimativa de custo para produção de blocos tradicionais e com agregados reciclados

			BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15
Areia	Custo R\$/m ³	Consumo	2,032	1,982	1,931	1,880
	R\$ 122,24	Custo	R\$ 248,44	R\$ 242,23	R\$ 236,02	R\$ 229,81
Pó de pedra	Custo R\$/m ³	Consumo	3,971	3,872	3,773	3,674
	R\$ 105,55	Custo	R\$ 419,19	R\$ 408,71	R\$ 398,23	R\$ 387,75
Brita 0	Custo R\$/m ³	Consumo	3,745	3,651	3,558	3,464
	R\$ 105,55	Custo	R\$ 395,29	R\$ 385,41	R\$ 375,53	R\$ 365,65
Cimento	Custo R\$/kg	Consumo	1295,627	1295,627	1295,627	1295,627
	R\$ 0,67	Custo	R\$ 871,96	R\$ 871,96	R\$ 871,96	R\$ 871,96
Pó de PET	Custo R\$/kg	Consumo		60,038	120,077	180,115
	R\$ 0,80	Custo	R\$ -	R\$ 48,03	R\$ 96,06	R\$ 144,09
EPS	Custo R\$/m ³	Consumo		0,094	0,187	0,281
	R\$ 100,00	Custo	R\$ -	R\$ 9,36	R\$ 18,73	R\$ 28,09
Custo total para 1429 blocos			R\$ 1.934,88	R\$1.965,70	R\$1.996,52	R\$2.027,34
Custo por bloco			R\$ 1,35	R\$ 1,38	R\$ 1,40	R\$ 1,42

Fonte: Autor (2021)

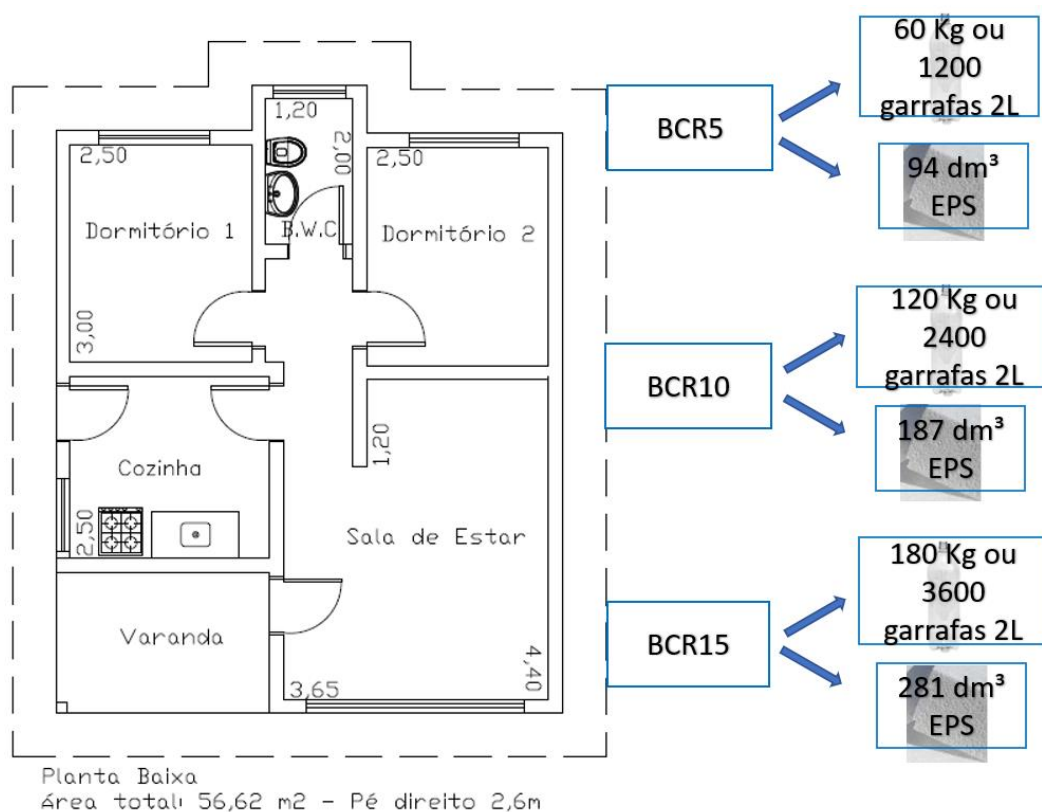
Constata-se que à medida que os agregados reciclados são incorporados, o custo das unidades é acrescido, com aumento em relação ao sistema tradicional em 2,22%, 3,70% e 5,18%, nos modelos BCR-5, BCR-10 e BCR-15, respectivamente. Nesta

condição, o agregado reciclado tem um valor de mercado maior que o tradicional, elevando o custo do sistema de alvenaria quando da adoção dos reciclados como insumo alternativo para produção dos blocos.

No entanto, deve se levar em conta que a característica mercadológica dos agregados é influenciada localmente, portanto não absoluta. Ademais, existe a potencialidade de oferta de matéria prima de agregados reciclados nas mesmas áreas urbanas, onde se concentra a geração de resíduos, tais fatores de demanda e oferta podem alterar as condições de mercado.

A Figura 34 apresenta uma estimativa de consumo de material reciclado incorporado à edificação por cada modelo de bloco.

Figura 34: Quantidade de resíduos utilizados em uma habitação de 56,62m²



Fonte: Autor (2021)

O uso dos blocos BCR, possibilita a incorporação dos resíduos na edificação. Para o modelo BCR-15, representa até 280 dm³ de EPS, e o equivalente a 3600 garrafas PET com volume de 2 litros.

A Tabela 30 apresenta a estimativa de custo de manejo de um aterro sanitário de pequeno porte, considerando sua vida útil (42 anos). Como descrito, os dados

foram atualizados para o ano de 2021, do estudo da Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos (ABRETE) e a Fundação Getúlio Vargas (FGV).

Tabela 30: Custo de um aterro sanitário em sua vida útil

Etapa	Participação	Custo da etapa (R\$)
Pré-implantação	1,20%	R\$ 1.386.971,01
Implantação	5,10%	R\$ 5.894.626,80
Operação	86,70%	R\$ 100.208.655,63
Encerramento	0,90%	R\$ 1.040.228,26
Pós-encerramento	6,10%	R\$ 7.050.435,98
Custo estimado total aterro	100,00%	R\$ 115.580.917,68

Fonte: Adaptado de (ABETRE, 2009)

A capacidade útil prevista para o aterro é de 730 mil toneladas, ou 811 mil metros cúbicos de resíduos, assim, custo médio para destinação de 1m³ é de R\$ 142,50. A Tabela 31 apresenta uma simulação do custo, considerando que os resíduos quantificados na Figura 34, fossem destinados a um aterro sanitário. A quantificação de PET foi atribuída na forma usual de descarte, em garrafas, considerando o volume de 30% de uma embalagem de 2 litros, ponderando que no processo de transporte e aterro, o material sofra compactação mecânica.

Tabela 31: Custo de destinação dos resíduos em aterro sanitário por um período de 42 anos.

			BCR-5	BCR-10	BCR-15
PET	Custo R\$/m³	Quant. (m³)	0,72	1,44	2,16
	R\$ 142,50	Custo	R\$ 102,60	R\$ 205,20	R\$ 307,80
EPS reciclado		Quant. (m³)	0,094	0,187	0,281
		Custo	R\$ 13,40	R\$ 26,65	R\$ 40,04
Custo estimado de destinação ao aterro			R\$ 116,00	R\$ 231,85	R\$ 347,84

Fonte: Autor (2021)

Percebe-se que o custo de destinação dos resíduos em aterro, é alto se comparado ao acréscimo obtido em cada bloco pela inserção do PET e EPS, o aumento do custo do bloco representa cerca de 27% do valor de destinação ao aterro sanitário. A Tabela 32 associa o custo unitário de cada tipo de bloco (BCT/BCR) com a parcela de valor necessária à destinação do resíduo incorporado em cada bloco, obtendo o saldo do valor do BCR, considerando a subtração do custo de manejo em aterro.

Tabela 32: Custo unitário de cada tipo de bloco levando em conta o valor de manejo do resíduo

Descrição	BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15
Custo total por bloco	R\$ 1,35	R\$ 1,38	R\$ 1,40	R\$ 1,42
Custo devido ao reciclado (por bloco)	-	R\$ 0,03	R\$ 0,05	R\$ 0,07
Custo de destinação à aterro (por bloco)	R\$ -	R\$ 0,08	R\$ 0,16	R\$ 0,24
Saldo (Bloco-Destinação aterro)	R\$ 1,35	R\$ 1,30	R\$ 1,24	R\$ 1,18

Fonte: Autor (2021)

Nesta condição, nota-se que a partir do modelo BCR-5, o custo unitário do bloco já é 3,7% menor que o tradicional, a medida que é realizada a inserção dos materiais reciclados, o saldo do custo do bloco é reduzido, chegando a 12,6% no BCR-15. Justifica-se tal condição o alto valor do manejo de resíduos em aterro.

Entretanto, apesar dos valores indicarem a importância do trabalho de reciclagem, que além de promoverem a geração de emprego e renda ao setor, propiciam a redução do custo associado a destinação dos resíduos pela sociedade. Na prática, levando em conta as condições simuladas, o uso dos reciclados como agregado onera o custo de fabricação dos blocos pela fábrica, dado a ausência de incentivos diretos à indústria pelo uso deste tipo de material.

4.4.2 Avaliação da Emissão de CO₂ Devido a Extração e Transporte dos Insumos para Produção de BCT e BCR

A Tabela 33 apresenta o resultado da estimativa de emissões de CO₂, considerando a parcela atribuída ao transporte e a extração/processamento dos materiais tradicionais e reciclados, para o modelo de bloco tradicional (BCT) e blocos com agregados reciclados nos modelos BCR-5, BCR-10 e BCR-15. Como descrito, trata-se a quantificação do material necessário para a produção de blocos para construção de um total de 100 habitações de 56,62m², utilizada como referência no trabalho.

Tabela 33: Emissões de CO₂ para blocos tradicionais (BCT) e com reciclados (BCR)

BCT						
Material	Quantidade (t)	Transporte		Extração/Processamento		Total (t.CO ₂)
		Emissão TR (t.CO ₂ /t)	Emissão TR (t.CO ₂)	Emissão EN (t.CO ₂ /t)	Emissão EN (t.CO ₂)	
Cimento	129,56	0,0511	6,6220	0,6281	81,3783	88,0003
Brita 0	513,08	0,0053	2,6939	0,0719	36,8903	39,5842
Pó de pedra	730,75	0,0053	3,8367	0,0719	52,5407	56,3775
Areia	310,96	0,0163	5,0810	0,0722	22,4510	27,5320
Total (t.CO₂)						211,49
BCR-5						
Material	Quantidade (t)	Transporte		Extração/Processamento		Total (t.CO ₂)
		Emissão TR (t.CO ₂ /t)	Emissão TR (t.CO ₂)	Emissão EN (t.CO ₂ /t)	Emissão EN (t.CO ₂)	
Cimento	129,56	0,0511	6,6220	0,6281	81,3783	88,0003
Brita 0	500,25	0,0053	2,6265	0,0719	35,9680	38,5946
Pó de pedra	712,48	0,0053	3,7408	0,0719	51,2272	54,9680
Areia	303,18	0,0163	4,9540	0,0722	21,8898	26,8437
Pó de PET	6,0038	0,0207	0,1240	0,0000	0,0000	0,1240
EPS	0,0749	0,0264	0,0020	0,0162	0,0012	0,0032
Total (t.CO₂)						208,53
BCR-10						
Material	Quantidade (t)	Transporte		Extração/Processamento		Total (t.CO ₂)
		Emissão TR (t.CO ₂ /t)	Emissão TR (t.CO ₂)	Emissão EN (t.CO ₂ /t)	Emissão EN (t.CO ₂)	
Cimento	129,56	0,0511	6,6220	0,6281	81,3783	88,0003
Brita 0	487,42	0,0053	2,5592	0,0719	35,0458	37,6050
Pó de pedra	694,21	0,0053	3,6449	0,0719	49,9137	53,5586
Areia	295,41	0,0163	4,8269	0,0722	21,3285	26,1554
Pó de PET	12,0077	0,0207	0,2480	0,0000	0,0000	0,2480
EPS	0,1498	0,0264	0,0040	0,0162	0,0024	0,0064
Total (t.CO₂)						205,57
BCR-15						
Material	Quantidade (t)	Transporte		Extração/Processamento		Total (t.CO ₂)
		Emissão TR (t.CO ₂ /t)	Emissão TR (t.CO ₂)	Emissão EN (t.CO ₂ /t)	Emissão EN (t.CO ₂)	
Cimento	129,56	0,0511	6,6220	0,6281	81,3783	88,0003
Brita 0	474,60	0,0053	2,4918	0,0719	34,1235	36,6154
Pó de pedra	675,94	0,0053	3,5490	0,0719	48,6002	52,1492
Areia	287,63	0,0163	4,6999	0,0722	20,7672	25,4671
Pó de PET	18,0115	0,0207	0,3720	0,0000	0,0000	0,3720
EPS	0,2247	0,0264	0,0059	0,0162	0,0036	0,0096
Total (t.CO₂)						202,61

Fonte: Autor (2021)

A incorporação dos agregados reciclados promoveu uma redução da quantidade de CO₂ emitida em relação aos agregados tradicionais. Houve diminuição de 1,40%, 2,80% e 4,20% da emissão total de CO₂, respectivamente nos modelos BCR-5, BCR-10 e BCR-15, em relação ao BCT. O modelo BCR-15 apresentou uma redução de 5,92 toneladas de CO₂, promovendo um ganho ambiental com a solução, e indicando viabilidade para este quesito na proposta do trabalho.

Cabe destacar, que as emissões pertinentes ao transporte dos agregados reciclados, cuja simulação considerou distâncias da indústria de reciclagem mais próxima à Foz do Iguaçu, podem ser reduzidas. Considerando, por exemplo, a potencialidade da implementação da reciclagem no próprio município, levando em conta o porte da cidade cuja destinação de resíduos ao aterro sanitário municipal ultrapassa 200 toneladas/dia (PMFI, 2012).

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de um bloco de concreto reciclado (BCR) para sistemas de alvenaria, sem função estrutural. Confeccionado com a adição de Polietileno tereftalato (PET) em pó e Poliestireno expandido (EPS) reciclados, em substituição à agregados tradicionais comumente empregados na produção de blocos de concreto. Buscou-se a avaliação do bloco BCR, comparativamente a um modelo tradicional (BCT) e a normatização do tema. Ainda, avaliações complementares em aspecto de custo, e emissão de CO₂ vinculado a proposta.

Os reciclados de PET e EPS, apresentam uma granulometria semelhante aos agregados tradicionais empregados nesta pesquisa. O PET se aproximando da areia (agregado miúdo), e o EPS da brita 0 (agregado graúdo). Tal condição, propiciou o uso como insumo alternativo incorporado ao traço para a produção dos blocos. Durante a fase de avaliação da mistura em laboratório (Etapa 03), o uso do método de moldagem de corpos de prova cilindros, possibilitou uma avaliação preliminar dos traços, identificando características que poderiam afetar a etapa subsequente de moldagem dos blocos em fábrica. Obtendo um direcionamento do comportamento da mistura de forma antecipada, principalmente no quesito de textura superficial e coesão. No método, destaca-se a constatação, ocorrida durante a moldagem, do seccionamento dos corpos de prova cilíndricos, ocasionada pela presença de EPS em maior quantidade. Tal ocorrência, motivou a limitação do uso de misturas com maior percentual de EPS (a partir do modelo BCR-20), para evitar problemas no processo de produção em fábrica.

Ainda na etapa 03, a estimativa de resistência média que os blocos poderiam assumir a partir dos dados da resistência dos corpos de prova, proporcionaram resultado parcialmente em acordo com a literatura. O modelo BCT, apresentou um fator de correlação final de 1,70, fora da faixa estipulada por (BUTTLER, 2007) e adotada no trabalho (0,8 a 1,3). Para o restante dos modelos, o uso de corpos de prova cilíndricos possibilitou uma estimativa da resistência dos blocos, apresentando uma correlação dentro da prevista, de 1,04, 1,27 e 0,82, para os modelos BCR-5, BCR-10 e BCR15, respectivamente. Conclui-se que a avaliação preliminar das misturas, utilizando o método de moldagem dos corpos de prova cilíndricos revela-se interessante, uma vez que é possível moldar uma grande quantidade de espécimes, utilizando pouco material e tempo reduzido.

Quanto as propriedades dos blocos de concreto, os resultados indicaram

que os reciclados tendem a promover uma redução nas características de desempenho mecânico e propriedades físicas dos blocos. Características relacionadas a absorção e índices de vazios, acresceram, respectivamente, em valores médios de até 6,66% e 2,44% no modelo BCR-15, entretanto, não chegaram a demonstrar significância estatística na comparação par a par com o modelo BCT. A massa específica reduziu em até 4,00% com o uso dos reciclados. O BCR-5 destoou do comportamento do restante dos grupos, apresentando a maior massa específica, menor percentual de absorção, índice de vazios e maior resistência mecânica à compressão axial. Provavelmente ocasionado por variações na moldagem, devido a condição de umidade nos agregados miúdos.

Para as propriedades mecânicas, o BCR-15, modelo que contém o maior percentual de reciclados, apresentou redução de 12,75% na resistência à compressão axial aos 28 dias, maior redução entre os modelos avaliados. O BCR-5 apresentou aos 28 dias, uma resistência 1,04% superior ao modelo tradicional, o BCR-10 uma redução de 1,39%. Todos os blocos atenderam a requisitos impostos pela NBR 6136 (ABNT, 2016), relacionados a teores de absorção de água, umidade relativa e resistência mecânica à compressão axial, podendo ser classificados como blocos de Classe C. Considera-se que os modelos BCR-5, BCR-10, tiveram desempenho mecânico e propriedades físicas (absorção e índice de vazios) equivalentes ao modelo de referência (BCT). A avaliação de análise de variância (ANOVA) e teste “t de student”, demonstrou que não existe significância estatística nas propriedades analisadas, ou seja, indica que até tal grau de inserção destes materiais, as características dos blocos não foram alteradas de forma significativa. Por outro lado, não ocorreu, mesmo no modelo com maior quantidade de reciclados (BCR-15), uma redução expressiva da massa dos blocos nas misturas avaliadas (4,00%).

A avaliação de custo dos insumos para a produção dos blocos se mostrou com valores superiores ao tradicional, uso dos agregados reciclados elevou em 2,22% a 5,18% o custo das unidades. A pesquisa também quantificou o valor necessário à destinação correta de resíduos de PET e EPS incorporados nos blocos, levando em conta os materiais necessários para um projeto de habitação como exemplo, os valores alcançados indicaram um custo de até R\$ 347,84 no bloco com maior quantidade de reciclados (BCR-15). Ficando, inclusive, acima do acréscimo de custo correspondente aos insumos para a fabricação do modelo de bloco que é de R\$ 92,46.

A redução da emissão de CO₂ devido ao processo de obtenção dos insumos e transporte, demonstra a possibilidade de ganho ambiental da proposta. O resultado, apresentou uma diminuição de até 4,20% na emissão de CO₂, considerando as

premissas utilizadas. Como parte da conclusão da pesquisa, percebe-se a vantagem do ponto de vista ambiental, em considerar a possibilidade do uso de matéria prima próxima aos locais de produção e consumo, contrapondo a busca por recursos cada vez mais distantes para atendimento das nossas necessidades, priorizando o material disponível localmente. Os resíduos sólidos urbanos têm tal potencialidade, ao contrário de produtos extraídos em jazidas naturais. Considera-se muito importante a reutilização e reciclagem considerando a forma de exploração de recursos pelo ser humano, que além de consumir recursos naturais cria uma problemática de volume de resíduo a ser manejado pelo poder público, a qual representa um custo considerável à sociedade.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, apresenta-se algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros relacionados ao tema:

- Avaliação da durabilidade dos blocos com reciclados PET e EPS submetidos a ação de fogo.
- Aprimorar técnicas de avaliação preliminar de mistura de concreto seco utilizada na fabricação de blocos de concreto, de forma antecipada ao uso no equipamento de vibroprensa.
- Avaliação do comportamento físico e mecânico dos blocos com diferentes níveis de substituição para cada tipo de material reciclado PET e EPS.
- Avaliação de desempenho térmico e acústico de blocos com adição dos materiais PET e EPS em diferentes níveis.
- Estudar a microestrutura dos blocos produzidos com PET e EPS, avaliando o comportamento no compósito cimentício.
- Avaliação do uso de EPS em maior quantidade, e o impacto relacionado ao processo de produção de blocos utilizando um equipamento de vibroprensa.

6. REFERÊNCIAS

ABETRE. **Estudo sobre os Aspectos Econômicos e Financeiros da Implantação e Operação de Aterros Sanitários**, 2009. . Disponível em:

<https://limpezapublica.com.br/textos/fgv_-_estudos_dos_aspectos_economicos_de_aterros.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2020.

ABIPET, A. B. da I. do P. **Décimo censo da reciclagem de PET no Brasil**, 2016. .

Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/indexAjax.html?method=baixarArquivo&id=548>>. Acesso em: 8 maio. 2019.

ABNT. **NBR NM 27: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro, 2001. .

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

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

ABNT. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009a. .

ABNT. **NBR NM 26: Agregados-Amostragem**. Rio de Janeiro, 2009b. .

ABNT. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009c. .

ABNT. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009d. .

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

ABNT. **NBR 15873: Coordenação modular para edificações**. Rio de Janeiro, 2010. .

ABNT. **NBR 12118: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria**. Rio de Janeiro, 2013. .

ABNT. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015. .

ABNT. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016. .

ABNT. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017. .

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

ABNT. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019. . Disponível em: <<https://scihub.tw/https://doi.org/10.15628/holos.2019>>. Acesso em: 29 abr. 2020.

ALBANO, C. et al. Influence of Content and Particle Size of Waste Pet Bottles on Concrete Behavior at Different w/c Ratios. **Waste Management**, v. 29, n. 10, p. 2707–2716, out. 2009.

ANEPAC. **Mercado de agregados no Brasil - Panorama e perspectivas para o setor de agregados para construção**, 2015. . Disponível em: <https://www.anepac.org.br/agregados/mercado/item/download/69_04062b071b7171f3481b7a0e8f36f5ac>.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. p. 13, 2001.

AQUINO, J. G.; ALVES, D. de L. BENEFÍCIOS FINANCEIROS DA RECICLAGEM DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DOMICILIARES. p. 4, 2016.

AQUINO, J. L. S. **Desenvolvimento de compósitos de matriz cimentícia utilizando resíduos de politereftalato de etileno (pet) e de areia de britagem na produção de concreto**. 2013. Tese (Doutorado em engenharia de processos) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2349>>. Acesso em: 26 nov. 2019.

BACCI, D. de L. C.; LANDIM, P. M. B.; ESTON, S. M. de. Aspectos e impactos ambientais de pedreira em área urbana. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 59, n. 1, p. 47–54, mar. 2006.

BARBOSA, C. de S. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações com as propriedades mecânicas do material constituinte**. 2004. Dissertação (Mestrado em engenharia e estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-09022007-152735/>>. Acesso em: 5 maio. 2020.

BARRETO, J. M. L. et al. Análise das propriedades físicas e mecânicas de blocos de concreto prensados sem função estrutural com incorporação de PET reciclado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762019000200317&lng=pt>. Acesso em: 8 out. 2019.

BEZERRA, L. A. C. **Análise do desempenho térmico de sistema constutivo de concreto com EPS como agregado graúdo**. 2003. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15548>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. Tese (Doutorado em engenharia de estruturas) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-16102007-111106/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

CEMPRE. **CEMPRE- Review2019**, 2019. . Disponível em:

<<http://cempre.org.br/upload/CEMPRE-Review2019.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2020.

CHOI, Y. W. et al. Characteristics of Mortar and Concrete Containing Fine Aggregate Manufactured from Recycled Waste Polyethylene Terephthalate Bottles. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 8, p. 2829–2835, ago. 2009.

COSTA, B. L. de C. **Quantificações das emissões de CO2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CRUZ, T. T. da. **Uso da avaliação do ciclo de vida para a determinação na redução de emissões de gases do efeito estufa e do consumo de energia associados a reciclagem de EPS**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/127968>>. Acesso em: 27 nov. 2019.

DETOMI, A. C. **Investigação do efeito da incorporação de resíduos de PET em compósitos cimentícios**. 2012. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del Rei, 2012.

EPUSP/ENCOL. **Manual do processo construtivo POLI-ENCOL: Blocos e Pré-moldados**, out. 1991. .

FABIAN S. CAMPOS, C. et al. Análise das propriedades físicas do concreto obtido com uso de polietileno tereftalato (PET). **Colloquium Exactarum**, v. 6, n. 4, p. 31–39, 20 dez. 2014.

FERNANDES, G. D. **Desenvolvimento técnico e avaliação de custo e benefício do sistema construtivo de painéis sanduíche, com núcleo de garrafas PET, moldados no local**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/5607>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

FERNANDES, I. **Blocos e Pavers - Produção e controle de qualidade**. 08. ed. Ribeirão Preto: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda, 2019.

FERREIRA, S. **Produção de blocos de concreto para alvenaria - Prática recomendada** Associação Brasileira de Cimento Portland, , 1995. .

FRASSON, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FRASSON, A. **Metodologia de dosagem para blocos de concreto empregados em alvenaria estrutural**, 2007. .

GALLI, B. et al. Uso de garrafas de poli-tereftalato de etileno – PET como insumo alternativo na construção de edificações residenciais. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 1, n. 2, p. 174–181, 29 set. 2013.

GANESH BABU, K.; SARADHI BABU, D. Performance of Fly Ash Concretes Containing Lightweight EPS Aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 6, p. 605–611, ago. 2004.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made. **Science Advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 1 jul. 2017.

GONÇALVES, P. J. S. **Emprego de EPS reciclado em blocos vazados de concreto para otimização do conforto térmico das edificações**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018. Disponível em: <<https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/6304>>. Acesso em: 27 nov. 2019.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, p. 1503–1510, jun. 2012.

GRABASCK, J. R. **Aspecto e impactos ambientais decorrentes da extração de agregado natural e produção de agregado reciclado: Estudo de caso no RS**. 2016. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

GUERRA, A. S.; ROCHA, E. R. D.; OKABAYASHI, J. Y. Estudo de viabilidade técnica para a reutilização de Polietileno Tereftalato (PET) residual em substituição ao agregado miúdo no concreto. **MIX Sustentável**, v. 3, n. 3, p. 35–40, 21 ago. 2017.

GUTIÉRREZ, C. et al. Recycling of Extruded Polystyrene Wastes by Dissolution and Supercritical CO₂ Technology. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 14, n. 4, p. 308–316, 1 out. 2012.

HOOD, R. da S. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia/Modalidade acadêmico) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/12112>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

IPEA. **A organização coletiva de Catadores de Material Reciclável no Brasil: Dilemas e Potencialidades sob a ótica da Economia Solidária**, 2017. .

KANNING, R. C. **Estudo das características mecânicas de paredes executadas com blocos ISOPET**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Campus Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <<https://www.acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/17135/rodrigo.PDF?sequence=1>>. Acesso em: 2 jul. 2019.

KAZA, S. et al. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. [s.l.] The World Bank, 2018.

MADANDOUST, R.; RANJBAR, M. M.; YASIN MOUSAVI, S. An Investigation on the Fresh Properties of Self-Compacted Lightweight Concrete Containing Expanded Polystyrene. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 9, p. 3721–3731, set. 2011.

MANSOUR, A. M. H.; ALI, S. A. Reusing Waste Plastic Bottles as an Alternative Sustainable Building Material. **Energy for Sustainable Development**, v. 24, p. 79–85, fev. 2015.

MAZONI, E. M. **Caracterização física e mecânica de concreto leve com EPS reciclado**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019. Disponível em: <<https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/7383>>.

MEDEIROS, J. S. **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: Produção de componentes e parâmetros de projeto**. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MEDEIROS, J. S.; SABBATINI, F. H. **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: Produção de componentes e parâmetros de projeto**, 1993. .

MELO, J. W. D. **Produção e caracterização de pó de PET – Poli (Tereftalato de etileno), obtido a partir de garrafas pós-consumo**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais - UFOP, CETEC. UEMG, Belo Horizonte, 2004.

MMA. **Manual de impactos ambientais - Orientações básicas sobre aspectos ambientais de atividades produtivas**, 1999. . Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/manual_bnb.pdf>.

MODRO, N. L. R. et al. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 14, n. 1, p. 725–736, 7 abr. 2009.

NETO, D. dos S. V.; GABRIEL, C. P. C.; FILHO, L. R. A. G. Análise do processo de construção de um ambiente contituído por garrafas PET. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 1, 10 nov. 2013. Disponível em: <http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/594>. Acesso em: 3 abr. 2019.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto - 5ª Edição**. [s.l.] Bookman Editora, 2015.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para a pavimentação**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

OZÓRIO, B. P. M. **Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas**. 2017. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-07032017-102857/>>. Acesso em: 28 out. 2019.

PATIL, U. et al. Utilization of Waste PET Bottles and Brick Kiln Dust as Construction Material for Low Cost Housing. v. 1, n. 6, p. 3, 2018.

PEREIRA, J. R. **Análise da produção de concreto auto adensável (CAA) e da adição de pó de poli tereftalato de etileno (PET) reciclado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2016.

PLASTIVIDA. **Brasil recicla 34,5% do EPS pós-consumo**, 2015. . Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/images/releases/Release_092_Indice_Reciclagem.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2019.

PMFI. **Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Foz do Iguaçu - PR**, 2012. . Disponível em: <<http://www.cmfi.pr.gov.br/pdf/projetos/1664c.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2020.

RATHINAM, R. M. Reuse of Bottles for Wall Construction and Crafting. p. 4, 2017.

RIBEIRO, F. de M.; KRUGLIANSKAS, I. A Economia Circular no contexto europeu: Conceito e potenciais de contribuição na modernização das políticas de resíduos sólidos. 2014. Disponível em: <<https://www.engema.org.br/XVIENGEMA/473.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2020.

RODRIGUES, K. F. Q. et al. Análise comparativa das propriedades físico-mecânicas de blocos de concreto leve de EPS e blocos de concreto convencional. p. 5, 2017.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M.-A. D. Poli(tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, v. 19, n. 2, p. 121–132, jun. 2009.

SABAA, B.; RASIAH, S. Engineering properties of lightweight concrete containing crushed expanded polystyrene waste. **Fall Meeting, Symposium MM, Advances in Materials for Cementitious Composites December 1997**, 1 jan. 1997.

SADRMOMTAZI, A. et al. Properties of Multi-Strength Grade EPS Concrete Containing Silica Fume and Rice Husk Ash. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 211–219, out. 2012.

SAFINIA, S.; ALKALBANI, A. Use of Recycled Plastic Water Bottles in Concrete Blocks. **Procedia Engineering**, Selected papers from Creative Construction Conference 2016. v. 164, p. 214–221, 1 jan. 2016.

SANTOS, R. D. dos. **Estudo térmico e de materiais de um compósito à base de gesso e EPS para construção de casas populares**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15563>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

SAXENA, S.; SINGH, M. Eco-Architecture: Pet Bottle Houses. **International Journal of Scientific Engineering and Technology**, p. 5, 2013.

SILVA, A. da R. **Estudo térmico e de materiais na construção de casas populares com blocos confeccionados a partir de um composto a base de cimento, gesso, EPS e raspa de pneu**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15621>>. Acesso em: 27 nov. 2019.

SILVA, G. R.; SANTOS, S. AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO LEVE COM O USO DO EPS RECICLADO E GARRAFA PET. p. 5, 2019.

SILVA, J. B. D. **Avaliação do desempenho de blocos de concreto estrutural dosados com politereftalato de etileno (PET) micronizado**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/952/1/JOS%C3%89%20BEZERRA%20DA%20SILVA%20%E2%80%93%20TESE%20%28PPGEP%29%202016.pdf>>.

SNIS. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**, 2019. . Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2018/Diagnostico_RS2018.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2020.

SOTO IZQUIERDO, I. **Utilização de pós residuais e fibra de sisal em blocos de concreto**. 2015. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-07072015-094257/>>. Acesso em: 15 out. 2020.

TANGO, C. E. de S. **Blocos de concreto: Produção dosagem e controle de qualidade**, 1984. .

TANGO, C. E. de S. **Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais**, ago. 1994. . Disponível em: <http://www.infohab.org.br/acervos/sobre-autor/codigo_biblio/18969/cod/1>.

TEODÓSIO, A. dos S. de S.; DIAS, S. G. **Reciclagem do PET: desafios e possibilidades**, 9 out. 2006. .

UN. **The state of plastics - World Environment Day Outlook**, 2018. . Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25513/state_plastics_WED.pdf?isAllowed=y&sequence=1>. Acesso em: 18 ago. 2020.

VIEGAS, L. S. **Blocos para execução de alvenaria de vedação empregando garrafas PET: avaliação mecânica e termoacústica**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/5465>>. Acesso em: 2 jul. 2019.

WWF; DALBERG. **Solucionar a Poluição Plástica: Transpârencia e responsabilização**, 2019. . Disponível em: <https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/51804/1552932397PLASTIC_REPORT_02-2019_Portugues_FINAL.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2020.

APÊNDICE A – DETALHAMENTO EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA CILINDRICOS

Empregou-se formas cilíndricas para moldagem dos corpos de prova de 5x10cm, seguindo as dimensões e características prescritas na NBR 7215 (ABNT, 2019). O soquete de compactação com comprimento total 25 cm, sendo 20cm de haste e 5cm de base, diâmetro da haste com 16mm e diâmetro de base com 32mm (Figura 35).

Figura 35: Detalhe molde e soquete utilizado para moldagem dos corpos de prova

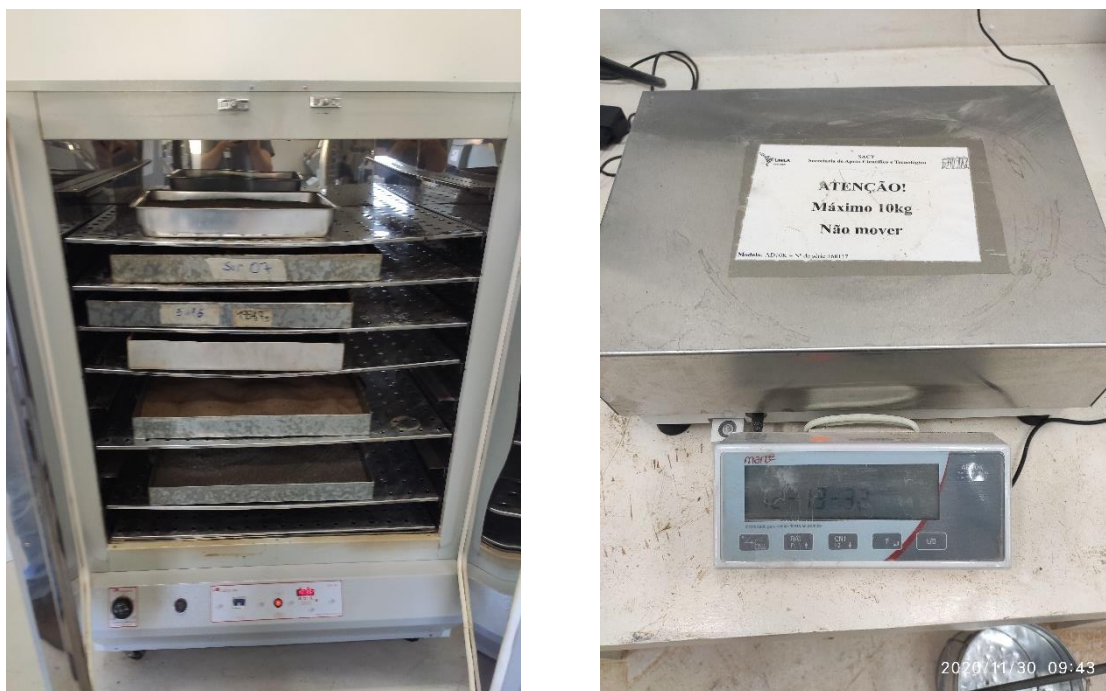


Fonte: Autor (2021)

APÊNDICE B – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

- a) Caracterização dos materiais: Conjunto de peneiras série normal da marca Bronzinox; Estufa marca Lucadema, modelo Luca 80/480 (Figura 36(a)); Balança marca Marte, modelo AD10K, nº de série 368117 (Figura 36(b)); Balança marca Marte, modelo AD2000, nº de série 383391.

Figura 36: (a) Estufa secagem agregados; (b) Balança modelo AD10K



Fonte: Autor (2021)

- b) Moldagem corpos de prova cilíndricos: Estufa marca Lucadema, modelo Luca 80/480; Balança marca Marte, modelo AD10K, nº de série 368117; Balança marca Marte, modelo AD2000, nº de série 383391 (proporcionamento PET e EPS).
- c) Ensaio de coesão de prova cilíndricos: Balança marca marte, modelo AD10K, nº de série 368117; chapas de MDF de 55cm X 65cm (base CP's) e 50cm X 20cm x 3,0 cm (base recipiente), conforme Figura 37. Durante a realização dos ensaios, verificou-se a necessidade de marcação prévia do posicionamento dos CP's e do recipiente, de modo a evitar distribuição de cargas de forma assimétrica, causada por possíveis excentricidades dos componentes.

Figura 37: Procedimento de ensaio de coesão



Fonte: Autor (2021)

- d) Análise dimensional blocos: Paquímetro digital, Marca Digimess, modelo 100,178BL.
- e) Ensaio de Massa específica, índice de vazios, absorção de água e umidade relativa de blocos: Estufa marca Lucadema, modelo Luca 80/480; Balança marca Marte, modelo AD16K, nº de série 383684, Balança marca Marte, modelo AD10K, nº de série 368117.

APÊNDICE C – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS COM CORPOS DE PROVA CILINDRICOS (5X10CM)

Tabela 34: Dados ensaio de coesão corpos de prova cilíndricos

	Exemplar	BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15	BCR-20	BCR-30	BCR-40
Coesão (Kg)	1	10,54	11,81	10,84	11,33	8,61	9,04	6,34
	2	10,04	11,92	9,36	11,24	7,98	0,00	5,94
	3	12,95	14,67	13,67	14,03	7,86	8,19	5,69

Tabela 35: Dados ensaios físicos corpos de prova cilíndricos

	Exemplar	BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15	BCR-20	BCR-30	BCR-40
M. seca (g)	1	435,6	445,2	437,1	437,2	417,6	417,0	422,6
	2	443,5	437,1	431,7	436,4	423,1	417,6	400,6

	3	455,2	442,7	447,6	415,8	411,2	419,6	403,3
M. imersa (g)	1	271,5	278,2	271,1	270,4	254,7	252,8	253,2
	2	276,1	271,5	268,0	267,6	256,8	251,1	241,8
	3	283,2	274,3	277,0	255,0	250,7	252,6	239,5
M. SSS (g)	1	458,7	470,8	460,2	463,8	442,5	444,1	447,5
	2	467,4	463,0	453,8	461,7	447,6	443,6	425,5
	3	478,9	466,9	470,8	442,0	436,4	445,3	428,4
Absorção	1	5,04%	5,44%	5,02%	5,74%	5,63%	6,10%	5,56%
	2	5,11%	5,59%	4,87%	5,48%	5,47%	5,86%	5,85%
	3	4,95%	5,18%	4,93%	5,93%	5,77%	5,77%	5,86%
Índice de vazios	1	12,34%	13,29%	12,22%	12,72%	13,26%	14,17%	12,82%
	2	12,49%	13,52%	11,89%	13,03%	12,84%	13,51%	13,55%
	3	12,11%	12,56%	11,97%	14,01%	13,57%	13,34%	13,29%
Massa específica (g/cm³)	1	2,33	2,31	2,31	2,27	2,22	2,18	2,17
	2	2,32	2,28	2,32	2,25	2,22	2,17	2,18
	3	2,33	2,30	2,31	2,22	2,21	2,18	2,13

Tabela 36: Dados resistência corpos de prova cilíndricos

	Exemplar	BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15	BCR-20	BCR-30	BCR-40
Resistência à compressão axial (MPa)	1	16,76	12,79	13,90	8,40	7,10	7,50	7,40
	2	17,53	13,76	14,20	7,20	7,70	8,30	7,40
	3	19,62	13,55	14,10	7,90	8,80	7,40	7,20
	4	16,82	13,04	12,50	7,80	9,00	7,20	6,90
	5	19,16	12,84	13,10	8,20	6,70	7,30	7,00
	6	21,20	12,43	14,00	7,30	7,20	7,20	6,80

APÊNDICE D – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS COM BLOCOS DE CONCRETO.

Tabela 37: Dados ensaios físicos blocos de concreto

	Exemplar	BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15
Massa natural (g)	1	10847,7	10929,3	10306,0	10454,2
	2	10446,4	10781,0	10665,2	10446,5
	3	10403,4	10788,5	9905,3	10410,0
	4	11214,4	10502,1	10679,9	10372,4
M. seca (g)	1	10637,7	10749,9	10144,5	10292,9
	2	10220,0	10537,5	10507,4	10237,8
	3	10261,2	10593,3	9750,1	10255,1

M.imersa (g)	4	11010,5	10313,2	10497,9	10212
	1	6663,4	6653,2	6294,8	6192,5
	2	6348,2	6517,2	6481,5	6339,1
	3	6294,7	6531,1	5929,0	6168,7
Massa SSS (g)	4	6860,1	6356,7	6494,6	6182,5
	1	11498,7	11482,8	10950,3	11148,5
	2	11033,4	11228,2	11260,3	11127,5
	3	10990,5	11399,7	10548,9	11066,8
Umidade relativa (%)	4	11833,6	11072,2	11313,4	11005,3
	1	24,39%	24,48%	20,04%	18,85%
	2	27,83%	35,25%	20,96%	23,46%
	3	19,50%	24,21%	19,43%	19,08%
Absorção	4	24,77%	24,89%	22,32%	20,22%
	1	8,09%	6,82%	7,94%	8,31%
	2	7,96%	6,55%	7,17%	8,69%
	3	7,11%	7,61%	8,19%	7,92%
Índice de vazios	4	7,48%	7,36%	7,77%	7,77%
	1	17,81%	17,36%	15,53%	16,55%
	2	15,18%	14,66%	16,56%	16,10%
	3	17,31%	15,76%	17,29%	16,92%
Massa específica (g/cm ³)	4	17,26%	18,58%	16,57%	16,45%
	1	2,20	2,23	2,18	2,08
	2	2,18	2,24	2,20	2,14
	3	2,19	2,18	2,11	2,09
	4	2,21	2,19	2,18	2,12

Tabela 38: Dados de ensaio de resistência bloco de concreto

7 dias					
Resistência à compressão axial (MPa)	Exemplar	BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15
	1	3,99	4,35	3,79	3,59
	2	4,60	3,89	3,91	3,64
	3	4,13	3,99	4,19	3,18
	4	3,89	4,22	4,14	3,82
	5	5,18	4,29	3,69	3,54
	6	4,24	4,26	3,98	4,10
	28 dias				
	Exemplar	BCT	BCR-5	BCR-10	BCR-15
	7	5,45	6,55	5,03	3,83
	8	4,99	5,18	4,57	4,20
	9	4,90	5,25	4,78	4,87
	10	5,21	5,55	5,03	5,09
	11	4,75	6,54	5,19	4,30
	12	4,82	5,72	5,12	3,99

ANEXO A – FORMULAÇÃO DE TESTES ESTATÍSTICOS APLICADOS NO TRABALHO

No presente trabalho, foram utilizados dois testes estatísticos. A análise de variância (ANOVA) para avaliação de dados contendo três grupos ou mais, e o teste “t de student” com o objetivo de análise de amostras com dois grupos. A seguir são detalhados as condições e aplicação dos testes de hipóteses.

1 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA - ANOVA

O teste de análise de variância ANOVA pressupõe o atendimento dos seguintes requisitos:

- Requer a condição de normalidade dos dados, a qual pode ser verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Cujas provas permitem comparar frequências acumuladas observadas e as calculadas para a distribuição normal, o teste é adequado inclusive a grupos com pequenas amostras ($n \geq 4$);
- As variâncias entre os grupos devem ser aproximadamente iguais;

Busca-se avaliar a influência de um parâmetro principal uma combinação de vários parâmetros nos grupos de estudo. Para tal, determina-se F_0 , que é dado pela divisão da média dos quadrados do fator principal ou combinação dos fatores, pela média dos quadrados dos erros. A determinação da relevância do parâmetro analisado (fixo ou combinado), é realizado pelo teste F. Na condição de F_0 ser maior que $F_{\text{crítico}}$, atribui-se que o parâmetro analisado tem influência estatística na propriedade considerada (levando em conta a significância estatística considerada). Caso o F_0 for menor que $F_{\text{crítico}}$, indica-se que não existe significância estatística, ou seja, o parâmetro não influi de forma significativa na propriedade analisada.

A Tabela 39 apresenta o equacionamento geral de uma análise de variância utilizando três fatores (BUTTLER, 2007)

Tabela 39: Equacionamento geral ANOVA três fatores

Parâmetros	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Média dos quadrados (MQ)	F ₀
A	SS _A	a - 1	MS _A = SS _A / (a - 1)	F ₀ = MS _A / MS _E
B	SS _B	b - 1	MS _B = SS _B / (b - 1)	F ₀ = MS _B / MS _E
C	SS _C	c - 1	MS _C = SS _C / (c - 1)	F ₀ = MS _C / MS _E
A X B	SS _{AB}	(a - 1)(b - 1)	MS _{AB} = SS _{AB} / [(a - 1)(b - 1)]	F ₀ = MS _{AB} / MS _E
A X C	SS _{AC}	(a - 1)(c - 1)	MS _{AC} = SS _{AC} / [(a - 1)(c - 1)]	F ₀ = MS _{AC} / MS _E
B X C	SS _{BC}	(b - 1)(c - 1)	MS _{BC} = SS _{BC} / [(b - 1)(c - 1)]	F ₀ = MS _{BC} / MS _E
A X B X C	SS _{ABC}	(a - 1)(b - 1)(c - 1)	MS _{ABC} = SS _{ABC} / [(a - 1)(b - 1)(c - 1)]	F ₀ = MS _{ABC} / MS _E
Erro	SS _E	abc(n - 1)	MS _E = SS _E / [abc(n - 1)]	
Total	SS _T	abcn-1		

Fonte: (BUTTLER, 2007)

A soma total dos quadrados, assim como a soma dos quadrados para cada parâmetro principal e parâmetro combinado são definidos pelas equações abaixo.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y^2}{abcn} \quad (6)$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{bcn} - \frac{y^2}{abcn} \quad (7) \quad SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{acn} - \frac{y^2}{abcn} \quad (8) \quad SS_C = \sum_{k=1}^c \frac{y_{..k}^2}{abn} - \frac{y^2}{abcn} \quad (9)$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij.}^2}{cn} - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_B \quad (10) \quad SS_{AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{y_{i.k.}^2}{bn} - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_C \quad (11)$$

$$SS_{BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{j.k.}^2}{an} - \frac{y^2}{abcn} - SS_B - SS_C \quad (12)$$

$$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{ijk.}^2}{n} - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (13)$$

A equação (14) define soma dos quadrados do erro

$$SS_E = SS_T - \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{ijk}^2}{n} - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (14)$$

Neste trabalho aplicou-se um nível de significância de 95% em todos os testes.

2 - TESTE T DE STUDENT

Aplicou-se o teste “t de Student” para avaliação de dois grupos de amostras. A comparação é realizada levando em conta a média das amostras, antes da realização do teste, os dados foram submetidos a verificação da variância através do teste F (Fischer). Grupos com amostras podem ser consideradas iguais quando apresentam variâncias e médias equivalentes.

Sendo o valor de “t” obtido através da fórmula (x) e comparado ao $t_{\alpha} (n-1)$ da tabela de distribuição de t de Student. Para o teste de hipóteses, a hipótese nula (H_0) refere-se à condição de igualdade de médias, já a hipótese alternativa (H_1), que as amostras sejam diferentes ($m_1 > m_2$; $m_1 < m_2$). Neste trabalho aplicou-se um nível de significância de 95%, demonstrando a aceitação da hipótese alternativa (H_1) quando $p\text{-valor} < 0,05$.

$$t = \frac{(XC - \mu_0)}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (15)$$