

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**LUCAS HENRIQUE LOZANO DOURADO DE MATOS**

**PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO UTILIZANDO RESÍDUOS DE  
PET**

Ilha Solteira  
2019

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**LUCAS HENRIQUE LOZANO DOURADO DE MATOS**

**PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO UTILIZANDO  
RESÍDUOS DE PET**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Prof. Dr. Cesar Fabiano Fioriti  
**Orientador**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M433p Matos, Lucas Henrique Lozano Dourado de.  
Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de PET / Lucas Henrique Lozano Dourado de Matos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019  
146 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2019

Orientador: Cesar Fabiano Fioriti  
Inclui bibliografia

1. Paver. 2. Concreto. 3. PET.

*Raiane da Silva Santos*  
Raiane da Silva Santos

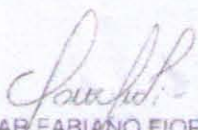
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de PET

**AUTOR:** LUCAS HENRIQUE LOZANO DOURADO DE MATOS

**ORIENTADOR:** CÉSAR FABIANO FIORITI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL, área: Estruturas pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. CÉSAR FABIANO FIORITI

Departamento de Planejamento, Urbanismo e Ambiente / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente



Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. CARLOS HUMBERTO MARTINS

Departamento de Engenharia Civil / Universidade Estadual de Maringá

Ilha Solteira, 07 de fevereiro de 2019

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, que diariamente ainda me ensinam lições sobre amor, carinho, respeito, honestidade, dedicação e todos os demais valores essenciais à vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus familiares e amigos, por todo o apoio, suporte e motivação durante o mestrado. Da mesma forma, agradeço à minha namorada, Tayla, pela companhia, paciência, compreensão, incentivo, carinho e amor.

Ao Prof. Dr. Cesar Fabiano Fioriti, pela dedicação, conselhos, ensinamentos, paciência, profissionalismo e pelas contribuições dadas a este trabalho.

Aos demais professores integrantes do grupo de pesquisa Materiais Alternativos de Construção (MAC), em especial ao Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki pelas contribuições e sugestões dadas ao trabalho, mas sobretudo, pela confiança depositada desde o início do trabalho.

Aos colegas do MAC, por todo o auxílio durante o desenvolvimento do trabalho, em especial aos alunos de iniciação científica Flávio Ferreira e Daniel Oliveira pela ajuda fundamental durante as fases experimentais.

Aos técnicos do Laboratório Central de Engenharia Civil, Flávio, Gilson, Mário, Natália e Ozias por toda a ajuda, atenção, paciência, disposição e bom humor demonstrados durante todo o tempo que passei com eles.

A todos do Departamento de Engenharia Civil, da Seção Técnica de Pós-Graduação e da Biblioteca da FEIS/UNESP, pela contribuição.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho e finalmente, mas não menos importante, a você, leitor. Que você ao ler este trabalho, seja por qualquer motivo, o faça com o mesmo prazer e dedicação com o qual ele foi desenvolvido e escrito.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenadoria de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Lembrem-se, crianças, a única diferença entre fazer bagunça e fazer ciência são as anotações”. (Adam Savage).

"Escreva algo que valha a pena ler ou faça algo que valha a pena escrever". (Benjamin Franklin).

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos". (Isaac Newton).

## RESUMO

O crescimento da população e do seu poder aquisitivo mudaram a geração de resíduos. Atualmente se produz resíduos diferentes em qualidade e volume diferentes daqueles produzidos por gerações passadas. Entre os resíduos gerados atualmente se encontram os resíduos de PET, oriundos de embalagens descartáveis, que acarretam problemas ambientais devido ao descarte incorreto. Este trabalho se propõe em estudar a aplicação destes resíduos para a produção de pavers de concreto, observando suas características de desempenho em relação aos pavers produzidos com concreto convencional, ambos produzidos por procedimentos manuais. Para atingir o objetivo proposto foram realizados ensaios de trabalhabilidade, ensaios de massa específica em estado fresco e endurecido, ensaios de absorção de água, medição da incorporação de ar, ensaios de resistência à compressão, tração e impacto e microscopia eletrônica de varredura para os traços produzidos com 5%, 10%, 15% e 20% de substituição em volume dos agregados miúdos e graúdos. Dessa maneira, foi possível buscar informações a respeito do comportamento obtido por meio da substituição parcial dos agregados pelos resíduos de PET produzindo peças com características semelhantes àquelas proporcionadas pelos pavers convencionais, atingindo a resistência à compressão de 35 MPa, definida em norma, em 4 traços produzidos, mesmo com valores de absorção superiores aos 6% estipulados em norma.

**Palavras-chave:** Paver. Concreto. PET.

## **ABSTRACT**

Population growth and purchasing power changed waste generation. Currently the wastes produced differs in quality and volume than that produced by past generations. Amongst the waste currently produced are the PET waste, originating from disposable packaging, which generate environmental problems due to incorrect disposal. The purpose of this work is to study the application of these residues in concrete pavers production, observing the performance characteristics in comparison to those produced with conventional concrete, both produced by manual procedures. To achieve the proposed goal were performed workability tests, specific weight in both fresh and hardened conditions, water absorption tests, air content tests, compressive strength, splitting tensile strength and impact tests and scanning electron microscopy for the concrete designs containing 5%, 10%, 15% and 20% by volume of both fine and coarse aggregate. Thus, it was possible to achieve information about the concrete behavior produced with partial substitution of the aggregates by the PET waste, producing pavers with similar characteristics of those provided by pavers produced with conventional concrete, achieving the compressive strength of 35 MPa, required by standard, in 4 mixtures with substitution, although the absorption values were above the 6% required by standard.

**Keywords:** Paver. Concrete. PET.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	- Rua XV de Novembro em Blumenau, SC.....	14
<b>Figura 2</b>	- Modelos de pavers de concreto para pavimentação intertravada.....	15
<b>Figura 3</b>	- Via Ápia: precursora do pavimento intertravado.....	22
<b>Figura 4</b>	- Aplicação de pavimento em Rio Branco, AC.....	24
<b>Figura 5</b>	- Reparo de pavimentação com paralelepípedos em Sorocaba, SP.....	25
<b>Figura 6</b>	- Rua Direita em Tiradentes, MG, pavimentação em pé-de-moleque.....	26
<b>Figura 7a</b>	- Pavimento de blocos de madeira em Roslyn Place, Pittsburgh.....	27
<b>Figura 7b</b>	- Pavimento de blocos de madeira em South Camac Street, Philadelphia.....	27
<b>Figura 8</b>	- Trecho da rodovia RJ-165 pavimentado com pavers.....	29
<b>Figura 9</b>	- Elementos constituintes do pavimento intertravado.....	30
<b>Figura 10</b>	- Formatos e tipos usuais de pavers com intertravamento horizontal.....	32
<b>Figura 11</b>	- Efeito de solicitação da espessura dos pavers no desempenho do pavimento.....	33
<b>Figura 12</b>	- Assentamentos típicos.....	34
<b>Figura 13</b>	- Efeito da espessura da camada de areia de assentamento no desempenho do pavimento.....	36
<b>Figura 14</b>	- Ensaio de resistência à tração indireta em pavers.....	42
<b>Figura 15</b>	- Estrutura química do PET.....	55
<b>Figura 16</b>	- Processo de formação do PET.....	56
<b>Figura 17</b>	- Fluxograma de produção das garrafas PET.....	58
<b>Figura 18</b>	- Forma inicial do PET após a esterificação.....	59
<b>Figura 19</b>	- Exemplos de pré-forma de PET.....	60
<b>Figura 20</b>	- Exemplo de descarte incorreto de garrafas PET.....	61
<b>Figura 21</b>	- Fardos de garrafas PET separadas e prensadas.....	63
<b>Figura 22</b>	- Linha de moagem e lavagem de PET.....	64
<b>Figura 23</b>	- Flocos de PET reciclado.....	64
<b>Figura 24</b>	- Aplicação do PET reciclado nas indústrias brasileiras.....	65
<b>Figura 25a</b>	- Flocos de PET utilizados.....	78
<b>Figura 25b</b>	- Detalhe das dimensões dos flocos.....	78
<b>Figura 26</b>	- Curva granulométrica do agregado miúdo.....	80
<b>Figura 27</b>	- Curva granulométrica do agregado graúdo.....	82
<b>Figura 28</b>	- Curva granulométrica do PET.....	84
<b>Figura 29a</b>	- Disposição dos pavers na estufa.....	93
<b>Figura 29b</b>	- Pavers imersos em água.....	93
<b>Figura 30a</b>	- Paver submetido ao carregamento.....	94
<b>Figura 30b</b>	- Detalhe das chapas de papelão na superfície das placas auxiliares.....	94
<b>Figura 31a</b>	- Início do surgimento das fissuras.....	95
<b>Figura 31b</b>	- Fissura indicando o seccionamento total do paver.....	95
<b>Figura 32</b>	- Aparato utilizado para o ensaio de resistência ao impacto.....	96
<b>Figura 33</b>	- Dispositivo para ensaio de compressão diametral.....	98

<b>Figura 34</b>	- Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone.....	102
<b>Figura 35</b>	- Resultados da massa específica no estado fresco.....	103
<b>Figura 36</b>	- Resultados da massa específica no estado endurecido.....	103
<b>Figura 37</b>	- Resultados da incorporação de ar.....	104
<b>Figura 38</b>	- Resultados da absorção de água.....	106
<b>Figura 39</b>	- Resultados da resistência à compressão.....	108
<b>Figura 40</b>	- Relação entre a resistência à compressão dos traços contendo PET e a resistência à compressão do controle.....	109
<b>Figura 41</b>	- Resultados da resistência à tração.....	112
<b>Figura 42</b>	- Envolvimento da areia pela matriz no traço 5%A.....	114
<b>Figura 43</b>	- Envolvimento do PET pela matriz e vazios no traço 5%A.....	114
<b>Figura 44</b>	- Envolvimento do PET e da areia pela matriz para o traço 10%A.....	116
<b>Figura 45</b>	- Envolvimento do PET pela matriz para o traço 15%A.....	117
<b>Figura 46</b>	- Trabalhabilidade para substituições do agregado miúdo.....	118
<b>Figura 47</b>	- Massa específica para as substituições do agregado miúdo....	119
<b>Figura 48</b>	- Incorporação de ar para substituições do agregado miúdo.....	120
<b>Figura 49</b>	- Absorção de água para substituições do agregado miúdo.....	121
<b>Figura 50</b>	- Resistência à compressão para substituições do agregado miúdo.....	122
<b>Figura 51</b>	- Resistência ao impacto para substituições do agregado miúdo.....	123
<b>Figura 52</b>	- Resistência à tração para substituições do agregado miúdo....	123
<b>Figura 53</b>	- Trabalhabilidade para substituições do agregado graúdo.....	124
<b>Figura 54</b>	- Massa específica para as substituições do agregado graúdo.....	125
<b>Figura 55</b>	- Incorporação de ar para substituições do agregado graúdo.....	126
<b>Figura 56</b>	- Absorção de água para substituições do agregado graúdo.....	126
<b>Figura 57</b>	- Resistência à compressão para substituições do agregado graúdo.....	127
<b>Figura 58</b>	- Resistência ao impacto para substituições do agregado graúdo.....	128
<b>Figura 59</b>	- Resistência à tração para substituições do agregado graúdo.....	129

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	- Enquadramento recomendado da granulometria para a areia de assentamento, segundo a NBR 15953.....	37
<b>Tabela 2</b>	- Recomendações da granulometria da areia a ser utilizada na camada de assentamento.....	37
<b>Tabela 3</b>	- Resumo dos requisitos da norma SANS 1058.....	43
<b>Tabela 4</b>	- Resumo dos requisitos da norma NA 11656.....	43
<b>Tabela 5</b>	- Resumo dos requisitos da norma AS/NZS 4455.....	44
<b>Tabela 6</b>	- Resumo dos requisitos da norma CSA A231.1/A231.2.....	45
<b>Tabela 7</b>	- Resumo dos requisitos da norma NTC 2017.....	45
<b>Tabela 8</b>	- Resumo dos requisitos da norma NTE 1488.....	46
<b>Tabela 9</b>	- Resumo dos requisitos da norma ASTM C936.....	47
<b>Tabela 10</b>	- Resumo dos requisitos da norma EN 1338.....	48
<b>Tabela 11</b>	- Resistência característica à compressão de acordo com a solicitação, segundo a NBR 9781.....	49
<b>Tabela 12</b>	- Critérios de resistência ao impacto para o sistema de pisos segundo a NBR 15575-3.....	52
<b>Tabela 13</b>	- Massas de corpo duro, altura e energia de impacto segundo a NBR 15575-3.....	52
<b>Tabela 14</b>	- Resumo dos requisitos para aceitação dos pavers, conforme a NBR 9781.....	54
<b>Tabela 15</b>	- Nomenclaturas usuais do PET.....	57
<b>Tabela 16</b>	- Processos de reciclagem do PET.....	62
<b>Tabela 17</b>	- Propriedades físico-químicas do cimento utilizado.....	79
<b>Tabela 18</b>	- Composição granulométrica do agregado miúdo.....	80
<b>Tabela 19</b>	- Índices de caracterização do agregado miúdo.....	81
<b>Tabela 20</b>	- Composição granulométrica do agregado graúdo.....	82
<b>Tabela 21</b>	- Índices de caracterização do agregado graúdo.....	83
<b>Tabela 22</b>	- Composição granulométrica do PET.....	84
<b>Tabela 23</b>	- Índices de caracterização do PET.....	85
<b>Tabela 24</b>	- Dados do superplastificante.....	86
<b>Tabela 25</b>	- Variáveis analisadas no programa experimental e quantidade de corpos de prova ensaiados.....	88
<b>Tabela 26</b>	- Traços com resíduos de PET utilizadas para a produção dos pavers.....	90
<b>Tabela 27</b>	- Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone.....	101
<b>Tabela 28</b>	- Relação entre trabalhabilidade e abatimento.....	101
<b>Tabela 29</b>	- Resistência ao impacto dos pavers.....	111
<b>Tabela 30</b>	- Síntese das propriedades estudadas.....	130

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
<b>2</b>	<b>PAVIMENTOS INTERTRAVADOS.....</b>	<b>21</b>
2.1	BREVE HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO.....	21
2.2	ESTRUTURA DO PAVIMENTO INTERTRAVADO.....	29
2.3	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DAS PEÇAS.....	39
2.4	NORMAS TÉCNICAS SOBRE PAVERS.....	40
<b>2.4.1</b>	<b>Visão geral.....</b>	<b>40</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Comentários sobre algumas normas internacionais.....</b>	<b>41</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Comentários sobre a norma brasileira.....</b>	<b>48</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Critérios de aceitação das peças segundo a norma brasileira.....</b>	<b>53</b>
<b>3</b>	<b>PET – POLITEREFTALATO DE ETILENO.....</b>	<b>55</b>
3.1	DEFINIÇÃO E ESTRUTURA MOLECULAR DO PET.....	55
3.2	GARRAFAS PET.....	57
3.3	MEIO AMBIENTE E RECICLAGEM.....	60
3.4	CONCRETO COM RESÍDUOS DE PET.....	65
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>77</b>
4.1	MATERIAIS.....	77
<b>4.1.1</b>	<b>Cimento.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Agregado miúdo.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Agregado graúdo.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Água de amassamento.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1.5</b>	<b>PET.....</b>	<b>78</b>
<b>4.1.6</b>	<b>Superplastificante.....</b>	<b>78</b>
4.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	78
<b>4.2.1</b>	<b>Caracterização dos materiais.....</b>	<b>78</b>

4.2.2	<b>Planejamento dos ensaios.....</b>	86
4.2.3	<b>Produção dos pavers.....</b>	88
4.2.4	<b>Determinação da consistência.....</b>	90
4.2.5	<b>Determinação da massa específica em estado fresco e endurecido.....</b>	91
4.2.6	<b>Determinação do teor de ar incorporado.....</b>	91
4.2.7	<b>Determinação da absorção de água.....</b>	92
4.2.8	<b>Determinação da resistência à compressão.....</b>	93
4.2.9	<b>Determinação da resistência ao impacto.....</b>	95
4.2.10	<b>Determinação da resistência à tração por compressão diametral....</b>	97
4.2.11	<b>Microscopia eletrônica de varredura.....</b>	98
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	100
5.1	TRABALHABILIDADE DO CONCRETO.....	100
5.2	MASSA ESPECÍFICA NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO.....	102
5.3	INCORPORAÇÃO DE AR DO CONCRETO.....	104
5.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS PAVERS.....	105
5.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PAVERS.....	107
5.6	RESISTÊNCIA AO IMPACTO DOS PAVERS.....	110
5.7	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO CONCRETO.....	112
5.8	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DO CONCRETO.....	113
5.9	INFLUÊNCIA DO MATERIAL SUBSTITUÍDO.....	117
5.9.1	<b>Substituições de agregado miúdo por PET.....</b>	118
5.9.2	<b>Substituições de agregado graúdo por PET.....</b>	124
5.10	SÍNTESE DAS PROPRIEDADES ANALISADAS.....	129
5.11	CENÁRIOS DE REDUÇÃO DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS DE PET.....	130
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	132
6.1	DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	134
6.2	CONTINUIDADE DO TRABALHO.....	135
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	137

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos é notável o crescimento da utilização de pavimentos intertravados com blocos pré-moldados de concreto no Brasil e no mundo. Portanto, a possibilidade da utilização de materiais alternativos em que a principal preocupação é o equilíbrio entre as questões econômicas, ambientais e tecnológicas, contribui para o desenvolvimento do sistema. A Figura 1 apresenta um exemplo de pavimento realizado com blocos pré-moldados de concreto.

Figura 1 – Rua XV de Novembro em Blumenau, SC.



Fonte: Blumenau (2018).

Com diversas opções de cores, formatos e padrões, a pavimentação intertravada possibilita diversas soluções estéticas, sendo adotada com sucesso em: praças, parques, jardins, calçadas, vias urbanas, estradas, entre outras aplicações.

O pavimento intertravado também possui boa durabilidade, da ordem de 20 a 25 anos, uma vez que se utilizem blocos de boa qualidade e se tenha um projeto

apropriado para a sub-base do pavimento, além de uma boa execução no assentamento dos blocos (PONTE; OLIVEIRA, 2004).

Os blocos utilizados para pavimentação, também são conhecidos como bloquetes ou “*pavers*” (este último nome será adotado ao longo do trabalho) ou pavimentos intertravados de concreto. Os pavers são blocos maciços, pré-fabricados de concreto, como mostra a Figura 2, e que permitem, por meio do arranjo adequado, pavimentar uma superfície completa. O deslocamento individual – seja ele horizontal, vertical, de rotação ou giração – das peças em relação às vizinhas é limitado pelo intertravamento. Portanto, existe um campo vasto para estudo na pavimentação com pavers em relação à racionalização, industrialização, produtividade e qualidade não só dos blocos, em si, mas dos materiais e procedimentos utilizados para fabricação e aplicação.

Figura 2 – Modelos de pavers de concreto para pavimentação intertravada.



Fonte: ABCP (2010).

Paralelamente ao desenvolvimento da pavimentação intertravada, as discussões dos impactos ambientais oriundos dos resíduos é uma mostra do quanto necessário é a inclusão destes aspectos para o desenvolvimento de pesquisa. A questão ambiental é discutida há anos, no âmbito nacional e global, mobilizando a opinião pública e se tornando um fator importante no cotidiano.

É certo que a sustentabilidade, tão abordada nos últimos anos, é produto da percepção, cada vez maior, dos impactos causados pela interferência humana na natureza. Temas como o efeito estufa, aquecimento global, o buraco na camada de ozônio, alteração no comportamento de animais, são exemplos de alterações originadas pela ação humana. Uma vez que o homem é parte da natureza, estas mudanças influem, necessariamente, em sua qualidade de vida e, talvez num futuro não tão distante, nas condições para a sobrevivência de sua espécie.

A indústria da construção civil é responsável pelo maior impacto ambiental negativo, devido ao alto consumo de matéria-prima. Conforme John (2000), a construção civil consome de 40% a 75% da matéria-prima mundial.

De acordo com a ANEPAC (2015), a construção civil nacional consome, para a produção de concreto e argamassa, em torno de 500 milhões de toneladas de agregados, em que aproximadamente 60% deste consumo é de areia. Por outro lado, as indústrias relacionadas à construção civil geram um elevado número de poluentes ambientais.

Cerca de 3% das emissões mundiais de gases de Efeito Estufa e aproximadamente 5% das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são provenientes da indústria cimenteira. Devido ao alto consumo de combustíveis, estima-se, que para cada tonelada de clínquer produzido, seja lançado na atmosfera entre 0,7 e 1,0 tonelada de CO<sub>2</sub>, dependendo do tipo de combustíveis utilizados no processo (DEJA; ULIASZ-BOCHENCZYK; MOKRZYCKI, 2010).

Em virtude disso, reduzir a produção de resíduos é um objetivo a ser alcançado. No entanto, apesar do empenho considerável das indústrias, é impossível eliminar totalmente a geração de resíduos em diversos processos. Agopyan e John (2011), estimam que entre 50% e 75% dos materiais retirados da natureza retornem como resíduos dentro do período de um ano.

A reciclagem ou reutilização é uma alternativa ao problema de geração de resíduos, propiciando economia de energia e conservação de recursos naturais. Principalmente quando esta alternativa é aplicada na construção civil, setor da indústria que mais consome recursos naturais e um dos maiores poluentes globais.

Diversas instituições de pesquisa, ao redor do mundo, desenvolvem estudos e pesquisas sobre a utilização de resíduos. Neste âmbito foi desenvolvido, no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, como trabalho de mestrado, um estudo sobre a

utilização de resíduos de PET como substituição parcial do agregado miúdo na composição do concreto dos pavers. Os resíduos utilizados no estudo são provenientes do processo de reciclagem de PET e foram fornecidos pela empresa Global PET SA, de São Carlos, SP. O material adquirido é denominado de *pet flakes*, e são flocos de PET, obtidos após um procedimento de lavagem e secagem e trituração.

O Brasil produziu, somente em 2015, cerca de 537 mil toneladas de resina de pet, e apesar do alto índice de reciclagem, de 51%, os 49% restantes, que foram para o lixo, são suficientes para preencherem aproximadamente 40 mil caminhões. Mas parte deste material não encontra sua destinação adequada e acaba parando nas calçadas e bueiros, provocando enchentes e propiciando o desenvolvimento de agentes transmissores de doenças, beira de estradas, rios e, por fim, nos mares e oceanos, onde estima-se que até 2050 este resíduo ultrapasse a quantidade de peixes nas águas (ABIPET, 2016). Por não ser um material biodegradável, onde o tempo de decomposição do pet na natureza é indeterminado, a pesquisa se torna relevante, e o seu aprofundamento necessariamente será uma tarefa coletiva.

## 1.1 OBJETIVOS

O **objetivo geral** deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica da incorporação de resíduos gerados pelo processo de reciclagem de PET, na produção de pavers de concreto para pavimentação intertravada.

Como **objetivos específicos**, têm-se:

- Definir quais as aplicações para os pavers com resíduos de PET, levando em consideração o desempenho técnico;
- Avaliar diferentes proporções de substituição dos agregados miúdo e graúdo pelos resíduos de PET nos pavers produzidos;
- Definir e realizar os ensaios laboratoriais que possam avaliar os pavers com resíduos de PET, no que se refere às características mecânicas e durabilidade.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A opção pela utilização dos resíduos de reciclagem de PET, justifica-se principalmente pelo aspecto tecnológico frente a uma análise ambiental. Definindo-se os resíduos de PET como sólidos indesejáveis, uma vez que sua decomposição é de ordem indeterminada, podendo se estender por centenas de anos na natureza, por ser um resíduo não biodegradável, e sua queima em incineradores de resíduos domésticos gera substâncias nocivas ao meio ambiente e à saúde de humanos e animais, podendo agravar o surgimento de doenças neurológicas, cardiovasculares e cânceres (VERMA *et al.*, 2016).

Considerando-se o fato da reciclagem no Brasil ser insuficiente, frente à imensa quantidade de resíduos de PET que é acumulada, como também é ainda insuficiente o mercado para esse tipo de material reciclado, em seus diversos tipos. Quando se fala em reciclagem de resíduos de PET, existe o caminho a seguir, dividido em recuperação, revalorização e transformação.

O ciclo de reciclagem do PET se inicia na recuperação, que consiste na coleta do material; logo após, tem-se a triagem, que é a separação por cor, conteúdo e origem; e, por fim, a prensagem, constituída da compactação das embalagens e amarração e separação em fardos para o transporte.

A etapa de revalorização se inicia com os fardos sendo desfeitos e as embalagens colocadas em uma esteira. Esta esteira leva a uma peneira para lavagem e classificação primordial, retirando pedras, tampas soltas e outros materiais contaminantes e as embalagens passam para a esteira de seleção. Na esteira de seleção, a presença de outros materiais é detectada, como PVC, polipropileno, poliestireno e metais, que também são retirados, sobrando assim só as embalagens de PET que entram na esteira de alimentação do moinho. No moinho, o material é moído e lavado continuamente, até chegar na granulometria desejada. O material moído é retirado e passa pela separação e descontaminação, em que o plástico proveniente das tampas e rótulos são separados do PET por meio de decantação. Após a separação, o material passa por uma centrífuga para uma secagem prévia. Após a secagem prévia em centrífuga, o material passa por um secador elétrico a ar quente, com ventilador e sistema de exaustão para retirada do

pó. Após a secagem, o material pode ser classificado de acordo com as granulometrias desejadas, por meio de peneiras, e ensacado.

A última etapa do ciclo de reciclagem do PET é a transformação, em que os sacos com o PET reciclado são vendidos às empresas que transformarão o material, por meio de processos químicos ou de extrusão, em novos materiais a serem aplicados, como fibras, filmes, resinas e embalagens.

Sabe-se que os resíduos de PET, classificados como material potencialmente poluidor começam a ser estudados no Brasil com relação a sua aplicação em compósitos de concreto. Contribuindo de certa forma na busca de alternativas para reduzir os impactos negativos causados e na conquista de seu principal objetivo, que visa à disposição final a este material.

De acordo com essas considerações, o uso de resíduos provenientes do processo de reciclagem de PET na produção de pavers para pavimentos, pode apresentar algumas vantagens, tais como:

- redução do grande volume de um resíduo que causa problemas de saúde e degradação ambiental;
- otimização da vida útil dos aterros sanitários;
- redução do tempo de monitoramento após a desativação dos aterros, pois o PET tem sua decomposição muito lenta;
- redução do consumo das fontes naturais de agregados utilizados na produção de pavers de concreto;
- redução da emissão de alguns poluentes na atmosfera, já que a queima deste material libera gases tóxicos.

Tendo em vista estas vantagens levantadas, a proposta deste trabalho pode perfeitamente contribuir para que os resíduos de reciclagem de PET deixem de ser um problema ambiental e de saúde pública, e passar a ser mais uma fonte de material alternativo a ser empregado na construção civil.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos, o trabalho será apresentado ao longo de cinco capítulos, descritos a seguir.

O capítulo 1 apresenta o contexto da pesquisa, suas justificativas e objetivos e a estrutura do trabalho.

No capítulo 2 são discutidos os conceitos principais sobre a pavimentação intertravada com peças de concreto, além do desempenho técnico exigido.

O capítulo 3 apresenta os principais conceitos sobre o PET e sua reciclagem, além da situação gerada em virtude do acúmulo deste material, e relata a crescente utilização destes resíduos em compósitos cimentícios.

No capítulo 4 descreve-se os materiais e métodos envolvidos no programa experimental.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos referentes aos ensaios do programa experimental.

Por fim, no capítulo 6, são apresentadas propostas de continuidade ao trabalho, formadas a partir dos resultados obtidos.

## 2 PAVIMENTOS INTERTRAVADOS

### 2.1 BREVE HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO

De forma a ressaltar a importância dos pavimentos intertravados com blocos de concreto recorre-se à história da pavimentação.

O desenvolvimento desta técnica de pavimentação intertravada é resultado da evolução de procedimentos datados do século V a.C., com a aplicação de peças justapostas em seu estado natural (MULLER, 2005).

São tomados como base os estudos realizados por Cruz (2003), Knapton (1996) e Prego (2001) para apresentar a evolução da pavimentação intertravada.

Os Etruscos, povos que dominaram a Itália entre 800 e 350 a.C., são considerados os pioneiros na construção de caminhos com a finalidade específica de transporte de pessoas e cargas entre suas vilas. Estes povos procuravam ligar grandes distâncias garantindo conforto e resistência por meio de uma superfície tão plana quanto fosse possível, com a utilização das técnicas e materiais conhecidos e disponíveis à época. O revestimento destas vias era feito com a combinação de pedra de mão e um material mais fino, para preenchimento das juntas entre as pedras, proporcionando uma maior segurança às pessoas quanto ao escorregamento, na presença de água na superfície (CRUZ, 2003).

Grande parte dos conhecimentos dos Etruscos sobre a construção de estradas foram herdados pelos Romanos, o que contribuiu significativamente para a expansão de seu império. Com a conquista de novas regiões, os Romanos necessitavam de construir ligações entre todo o império, para possibilitar um deslocamento rápido de seu exército em caso de necessidade.

Os caminhos Romanos de longa distância eram, geralmente, constituídos por pedras naturais do tipo seixo rolado misturadas a solos arenosos. Já os caminhos mais utilizados, situados nas ruas mais movimentadas das cidades, tinham seu revestimento executado em pedras talhadas manualmente em formas retangulares e poligonais, para garantir a resistência ao desgaste.

Os Romanos possuíam preocupações com a capacidade estrutural das camadas de suas estradas, reconhecendo a importância do tipo de areia utilizada e classificando-as de acordo com a sua origem como: de rio, extraídas de canais e

provenientes do solo natural. Propostas de mistura entre os diferentes tipos de areia eram feitas, juntamente com a adição de cal ou calcário na mistura, formando uma argamassa sobre a qual, posteriormente, adicionava-se o seixo rolado ou as pedras de mão sobre o caminho.

As técnicas de pavimentação aplicadas pelos Romanos foram evidenciadas através das escavações arqueológicas da Via Ápia, uma estrada importante que ligava a cidade de Roma ao sul da Itália, com trechos ainda preservados em partes da Itália. A Via Ápia teve sua construção iniciada pelo censor Appius Claudius e tinha como objetivo transportar mantimentos, tropas e armamentos da costa do Mediterrâneo à costa do Adriático ao longo de seus quase 580 km de extensão (BERECHMAN, 2003). Grande parte da Via Ápia foi pavimentada por seus construtores com peças de pedras aparelhadas em formatos poligonais, sendo considerada a precursora do pavimento intertravado, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Via Ápia: precursora do pavimento intertravado.



Garza (2014).

Com a queda do império Romano as estradas europeias foram se deteriorando e, apenas no século XVII, os franceses retomaram as atividades de reconstrução de estradas. As estradas construídas pelos franceses utilizavam

revestimento de pedra britada, evidenciando a preocupação com a aderência e drenagem dos caminhos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Com o passar dos séculos, os caminhos foram sendo cada vez mais utilizados com finalidades comerciais, onde a velocidade é fator fundamental. O aumento das cargas transportadas e a necessidade de se percorrer o trajeto cada vez mais rápido, a fim de se diminuir o tempo de viagem, culminaram em uma maior exigência das camadas de revestimento e, portanto, a necessidade de aplicação de materiais com maior durabilidade nos mesmos. As peças de revestimento utilizadas apresentaram o seguinte caminho evolutivo: blocos de argila; blocos de pedras talhadas e aparelhadas manualmente; blocos de madeira; e peças pré-moldadas de concreto.

#### **a) Blocos de argila**

Foram encontradas evidências da aplicação de tijolos de argila em revestimento há 5.000 anos na Mesopotâmia. O procedimento consistia na colocação dos tijolos sobre uma camada de betume, conferindo aderência das peças ao terreno. No entanto, a durabilidade das peças era pequena em razão do desgaste excessivo proporcionado pelo tráfego, então sua utilização se restringia a regiões onde materiais mais resistentes não eram disponíveis. No final do século XIX, surgem os primeiros fornos para queima da argila em temperaturas elevadas, resultando no aumento da resistência mecânica da peça e, com isto, difundindo a aplicação dos tijolos de argila na Europa e América. (MULLER, 2005).

Ainda segundo Muller (2005), historicamente, a cidade de Rio Branco, capital do Acre, utiliza o procedimento de pavimentação com blocos de argila em suas vias desde 1940. A grande disponibilidade de argila para produção das peças, aliada à escassez de pedras naquela região foram os fatores principais para essa decisão. A matéria prima para a fabricação dos blocos de argila deve apresentar elevada resistência à compressão, para que, quando preparada e queimada apropriadamente, origine peças com boa resistência mecânica (FUNTAC, 1999). A Figura 4 apresenta a execução de um trecho de pavimento revestido com blocos de argila em Rio Branco, no Acre, no ano de 2015.

Figura 4 – Aplicação de pavimento em Rio Branco, AC.



Fonte: Acre (2018).

## **b) Blocos de pedra talhadas e aparelhadas manualmente**

Muller (2005) afirmou que os primeiros modelos de assentamento de pedras talhadas em fileiras ou em espinha de peixe surgiram no século XVIII e que naquela época já se havia uma grande preocupação em estreitar as juntas entre as peças, exigindo esforços para homogeneizar suas dimensões. A técnica de selar as juntas utilizando argamassa de cimento Portland ou mistura de asfalto e areia surgiu no século XX com a principal finalidade de se atenuar o barulho sob a ação do tráfego.

A técnica ficou conhecida no Brasil como pavimento de paralelepípedos ou paralelos e pé-de-moleque.

No pavimento de paralelepípedos, as dimensões as peças são de aproximadamente 12 cm de largura, 20 cm de comprimento e 20 cm de altura e ainda é amplamente utilizado em cidades interioranas e áreas de tráfego de veículos pesados. As peças são aplicadas sobre uma camada espessa de areia e suas juntas possuem até 2 cm de espessura (CRUZ, 2003).

O revestimento com pedras tipo pé-de-moleque é mais antigo do que os paralelepípedos, e foi trazido ao Brasil pelos portugueses a partir de 1600. As pedras utilizadas possuem formatos irregulares e dimensões de até 50 cm, sendo arrumadas sobre o terreno natural. Cidades históricas como Paraty, no Rio de

Janeiro, e Tiradentes, em Minas Gerais, preservam este tipo de pavimento em suas ruas. Na Figura 5 se apresenta um pavimento de paralelepípedos situado na cidade de Sorocaba, SP. Já a Figura 6 ilustra a rua Direita em Tiradentes, MG.

Figura 5 – Reparo de pavimentação com paralelepípedos em Sorocaba, SP.



Fonte: Sorocaba (2018).

Figura 6 – Rua Direita em Tiradentes, MG, pavimentação em pé-de-moleque.



Fonte: Boas (2014).

### c) Blocos de madeira

Os revestimentos de peças de madeira, como mostrados na Figura 7, foram utilizados durante o início do século XIX com o intuito de reduzir o ruído dos veículos, principalmente o das carruagens equipadas com rodas de ferro. Os blocos de madeira tinham, em média, dimensões entre 12,5 e 25 cm de comprimento e 7,5 e 10 cm de largura. As peças eram envolvidas por uma camada de masticagem betuminosa recoberta por pequenos grãos de pedra de forma a auxiliar sua ancoragem à base do pavimento (CRUZ, 2003).

Ainda que os pavimentos com revestimento de madeira atenuassem o barulho ocasionado pelo tráfego, tornavam-se escorregadios na presença de água. Este tipo de pavimento foi totalmente abandonado com o surgimento do automóvel dotado de pneus compostos de borracha (CRUZ, 2003).

Figura 7 – (a) Pavimento de blocos de madeira em Roslyn Place, Pittsburgh; (b) Pavimento de blocos de madeira em South Camac Street, Philadelphia.



Fonte: (a) Krauss (2015), (b) Wood... (2015).

#### **d) Peças pré-moldadas de concreto**

A evolução das soluções para os revestimentos de pavimentos, descritos acima, para o revestimento utilizando pavers parece ter sido natural. No entanto, os primeiros pavers foram fabricadas ao final do século XIX e algumas patentes foram registradas ainda antes da Primeira Guerra Mundial (1914 – 1918). Reconheceu-se rapidamente que estes proporcionavam uma uniformidade melhor do que as pedras naturais aparelhadas (MULLER, 2005).

Após a Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945), Holanda e Alemanha, em reconstrução, apresentaram os primeiros avanços no desenvolvimento da utilização do pavimento de pavers. A partir de 1950, as fôrmas existentes para a fabricação foram evoluindo. Primeiramente as peças imitavam os tijolos e pedras aparelhadas utilizadas na época, buscando a sua substituição gradual. Durante esta fase, as únicas vantagens de utilização dos pavers eram os custos mais baixos e a homogeneidade dimensional (CRUZ, 2003).

Após este período, incorporou-se um refinamento maior no formato das peças, permitindo a produção de novos modelos de peças com formatos dentados, principalmente. O conceito de intertravamento e um melhor controle da espessura das juntas começou a ser implantado. Benefícios práticos para o assentamento das peças eram facilmente descobertos, permitindo a utilização de mão de obra pouco especializada. Por fim, o desenvolvimento da pavimentação utilizando os pavers

permitiu relacionar a escolha da forma geométrica da peça com o desempenho do pavimento, em função do tipo de tráfego.

Na década de 1960, o pavimento de pavers já estava consolidado comercialmente nas Américas Central e do Sul, além de grande parte dos países europeus e África do Sul. Na década de 1970 cresceu o uso nos Estados Unidos, Austrália, Nova Zelândia e Japão (GODINHO, 2009).

Ao final da década de 1970, os sistemas de fabricação de pavers difundiram-se ao redor do mundo e pelo menos 200 tipos de fôrmas e diversos tipos de equipamentos de fabricação eram comercializados (CRUZ, 2003).

A produção anual de pavers ultrapassava os 45 milhões de metros quadrados no início da década de 1980, em que 66% deste valor era aplicado em vias de tráfego urbano. Segundo Madrid (2004), a África do Sul utiliza o pavimento intertravado de pavers em avenidas e corredores de tráfego urbanos desde os anos 1980. A indústria mundial de fabricação de pavers chegou à marca de produção de 100 m<sup>2</sup> por segundo durante os dias úteis de trabalho ao final da década de 1990 (SMITH, 2003).

A indústria de pavimentos intertravados cresce em grandes proporções mundo afora desde então. O material que, inicialmente, era utilizado apenas para efeitos arquitetônicos ou paisagísticos possui a versatilidade para ser aplicado em qualquer tipo de ambiente, sendo utilizado com êxito em rodovias e indústrias.

No Brasil, a utilização deste pavimento cresce em escala exponencial, principalmente na pavimentação de vias urbanas, portos, pátios industriais, estacionamentos e praças públicas, em virtude de sua facilidade de aplicação, rapidez na execução e menor manutenção quando comparado ao pavimento asfáltico. A Figura 8 mostra um trecho da rodovia RJ-165, Estrada Parque Comendador Antonio Conti, que liga os municípios de Paraty, no RJ, e Cunha, em SP. A rodovia, que atravessa o Parque Nacional da Serra da Bocaina, possui cerca de 50 km de extensão onde 10 km são dentro da área do parque e totalmente pavimentados com pavers.

Figura 8 – Trecho da rodovia RJ-165 pavimentado com pavers.



Fonte: Estrada... (2016).

## 2.2 ESTRUTURA DO PAVIMENTO INTERTRAVADO

A estrutura usual do pavimento intertravado é caracterizada pelo revestimento em pavers assentados sobre uma camada de areia, chamada areia de assentamento ou colchão de areia, a base, a sub-base, quando necessário, e o subleito. A areia de assentamento e o revestimento são contidos lateralmente por sarjetas ou guias de concreto, normalmente. A Figura 9 apresenta o corte esquemático dos elementos constituintes do pavimento intertravado.

Figura 9 – Elementos constituintes do pavimento intertravado.



Fonte: ABCP (2010).

O revestimento do pavimento intertravado é constituído por blocos resistentes e duráveis, assentados sobre uma fina camada de areia. Este revestimento deve suportar as cargas e tensões provocadas pelo tráfego protegendo a camada de base do desgaste por abrasão e a mantendo com níveis baixos de umidade, permitindo a melhor estabilidade do material constituinte (HALLACK, 1998).

A principal função da camada de base é a de receber as tensões distribuídas pela camada de revestimento e redistribuí-las uniformemente, protegendo o subleito dos efeitos das cargas externas, evitando as deformações permanentes do subleito e a deterioração do pavimento.

Dependendo da magnitude das cargas geradas pelo tráfego e das características mecânicas e dos módulos de elasticidade da base e do leito, o dimensionamento pode requerer, ainda, uma camada de sub-base, suplementar e executada diretamente sobre o leito regularizado ou sobre o reforço de subleito (SHACKEL, 1990).

As espessuras das camadas do pavimento intertravado, assim como nos pavimentos asfálticos, dependerão das seguintes características (ABCP, 2010):

- intensidade do tráfego que circulará sobre o pavimento;
- características do terreno de fundação;
- características dos materiais constituintes das camadas.

O intertravamento das peças é definido como sendo a capacidade adquirida pelos blocos, em conjunto, de resistir a movimentos de deslocamento individual. A resistência adquirida nas direções horizontais, verticais e rotacionais em relação a

cada peça vizinha caracteriza o princípio do intertravamento do pavimento (KNAPTON, 1996).

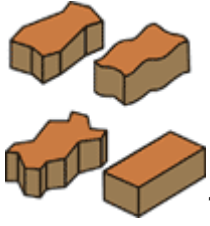
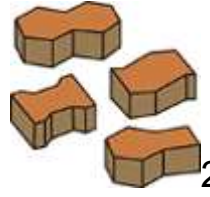
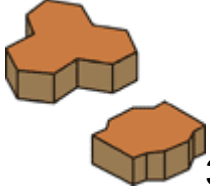
#### **a) Camada de revestimento do pavimento intertravado**

A superfície de rolamento do pavimento é composta pelos pavers. Sua função estrutural é a de transmitir conforto aos usuários, conferir durabilidade ao pavimento, resistir às tensões cisalhantes superficiais provenientes do contato das rodas dos veículos e contribuem fundamentalmente para a integridade do pavimento através das características de intertravamento das peças.

##### **l) Formato das peças**

A única recomendação em relação ao formato das peças é que estas permitam o assentamento em combinação bidirecional. A ABCP (2010) classifica os blocos em três tipos, onde os pavers do Tipo 1 são as que apresentam um melhor intertravamento por permitir que sejam entrelaçadas entre si em seus quatro lados, os pavers do Tipo 2 apresentam intertravamento inferior ao Tipo 1 por se entrelaçarem somente em dois lados, e os pavers do Tipo 3 são as de maiores dimensões e são assentadas sempre no mesmo padrão. A Figura 10 apresenta os formatos usuais de pavers.

Figura 10 – Formatos e tipos usuais de pavers com intertravamento horizontal.

	<p>Constituído por formas retangulares, apresenta facilidade de produção e aplicação, além de facilitar a construção dos detalhes nos pavimentos. Normalmente possuem 20 cm de comprimento e 10 cm de largura e as suas faces laterais podem ser retas, curvilíneas ou poliédricas.</p>
	<p>Apresenta, genericamente, o formato "I" e podem ser montadas somente em fileiras travadas. Suas dimensões são, usualmente, as mesmas dos pavers de Tipo 1.</p>
	<p>É a peça que, por seu tamanho e peso, não pode ser apanhada utilizando somente uma mão. Suas dimensões são de, pelo menos, 20 por 20 cm e só são arranjadas em um único padrão.</p>

Fonte: ABCP (2010).

Os formatos usuais de pavers dispostos na Figura 10 são utilizadas com a finalidade do intertravamento horizontal, definido por Knapton (1996) como sendo a impossibilidade do deslocamento horizontal em relação às peças vizinhas qualquer que seja o arranjo de assentamento. O intertravamento horizontal contribui para a melhor distribuição de esforços de cisalhamento horizontal proveniente do tráfego, principalmente durante situações de aceleração e frenagem, onde as juntas de assentamento são responsáveis pelo bom desempenho do intertravamento, desde que adequadamente preenchidas com areia e compactadas.

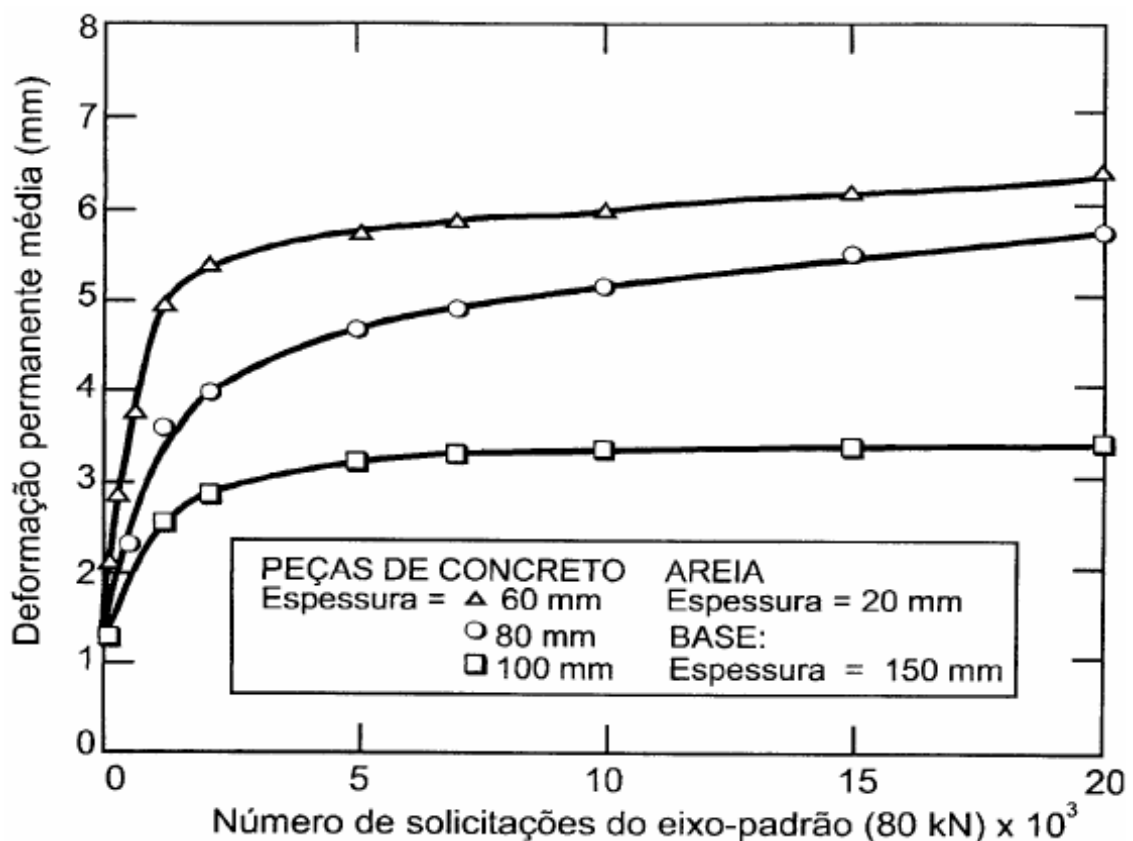
Knapton (1996) também define o intertravamento vertical como a impossibilidade da peça se mover verticalmente em relação às peças vizinhas, e o intertravamento rotacional como a impossibilidade da peça girar em relação ao seu próprio eixo em qualquer direção, ambos de forma análoga ao intertravamento horizontal.

No entanto, tais possibilidades são utilizadas com menor frequência em comparação ao intertravamento horizontal, pelo fato de necessitarem de peças com geometrias complexas e maiores dificuldades de aplicação, tornando-se dispendiosas.

## II) Espessura das peças

Segundo Knapton (1976) as espessuras das peças não são significativas para o comportamento estrutural e funcional dos pavimentos, no entanto os estudos de Shackel (1990) demonstram que um aumento na espessura das peças, em um intervalo de 60 mm a 100 mm, é benéfico ao desempenho do pavimento. Ensaios efetuados no Simulador de Veículos Pesados, realizados na África do Sul, evidenciaram que as deformações permanentes nas peças do pavimento eram consideravelmente menores com peças de espessura de 80 mm do que em peças de 60 mm, para o mesmo nível de solicitação. O teste com peças de 100 mm demonstrou deformações permanentes inferiores e uma variação acentuada em relação às peças de 80 mm, ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Efeito de solicitação da espessura dos pavers no desempenho do pavimento.



Fonte: Shackel (1990).

## III) Modelos de assentamento dos pavers

O tipo de arranjo escolhido para o assentamento dos pavers influenciará tanto a aparência estética quanto o desempenho do pavimento. Embora não haja

consenso entre os pesquisadores sobre as interferências do tipo de assentamento para a durabilidade do pavimento, há concordância de que o tipo de assentamento influencia a durabilidade.

O boletim técnico nº 4 do Interlocking Concrete Institute (ICPI, 2014) recomenda o assentamento do tipo “espinha de peixe” para áreas de tráfego veicular, uma vez que este arranjo apresenta maior nível de intertravamento e um melhor desempenho estrutural, conseqüentemente. Na seqüência, a Figura 12 mostra os tipos de arranjos mais utilizados no pavimento intertravado.

Figura 12 – Assentamentos típicos.



Fileira



Reto



Inclinado



Trama

Fonte: ABCP (2010).

## **b) Areia de assentamento**

De acordo com Beaty (1992) as funções principais da areia de assentamento são:

- dar início ao processo de intertravamento através do preenchimento das juntas na parte inferior, no momento da compactação;
- proporcionar suporte homogêneo para as peças assentadas, evitando a concentração de tensões em uma determinada área podendo deteriorar o pavimento;
- proporcionar uma superfície lisa onde as peças possam ser assentadas;
- acomodar as possíveis diferenças de espessuras das peças e desníveis da base permitindo a regularização final do pavimento;
- barreira de proteção contra a propagação de fissuras às camadas inferiores do pavimento.

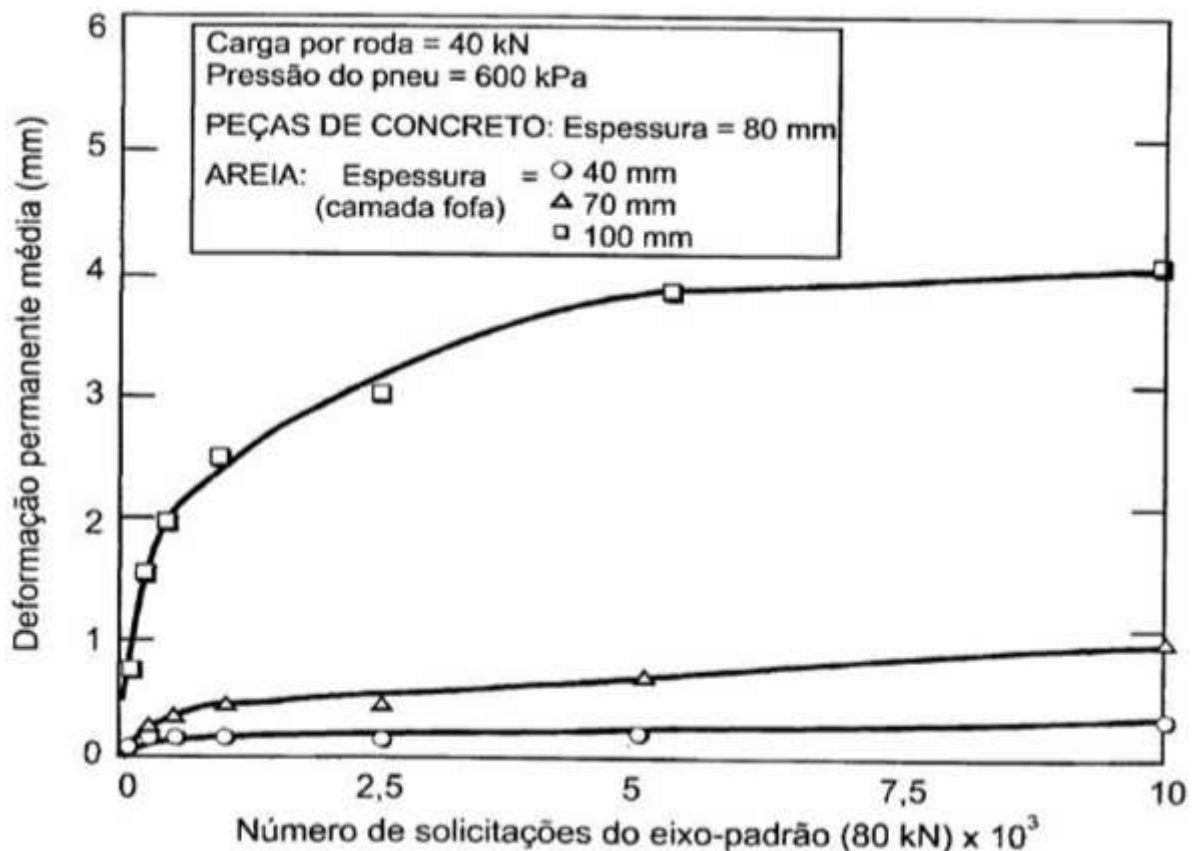
### **l) Influência da espessura da camada de areia de assentamento**

Ainda que a espessura da camada de areia de assentamento corresponda a menos de 10% da espessura total do pavimento, sua função estrutural não é menos importante que a das outras camadas. Portanto, o desempenho final do pavimento depende da metodologia de execução desta camada, assim como a correta especificação do tipo de areia a ser utilizada (BURAK, 2002).

Na Austrália, a espessura recomendada varia de 20 a 40 mm, ao passo que na Bélgica é de 30 a 50 mm, no entanto o valor mínimo recomendado da espessura é de 15 mm, após a compactação. Ressalta-se que uma espessura excessiva na camada de assentamento gera problemas graves de afundamento da camada de revestimento (BEATY, 1996).

Na Figura 13 Shackel (1990) mostrou as deformações permanentes ocorridas em pavimentos de pavers para diferentes espessuras da camada de areia de assentamento. Observa-se que, para a espessura entre 40 e 70 mm as deformações são pequenas e muito próximas, já para a espessura de 100 mm o valor da deformação aumenta muito, praticamente quadruplicando, em relação à espessura de 70 mm.

Figura 13 – Efeito da espessura da camada de areia de assentamento no desempenho do pavimento.



Fonte: SHACKEL (1990).

## II) Influência da granulometria da areia de assentamento

A areia que constituirá a camada de assentamento e selagem das peças deve ser selecionada considerando a disponibilidade local de material, mas não deve comprometer a função estrutural do pavimento.

No Brasil, a camada de assentamento dos pavers será sempre composta de areia, de no máximo 10% de material retido na peneira de abertura de malha 4,8 mm, com umidade entre 3% e 7%, com espessura de 5 cm ± 2 cm, na condição não compactada ou conforme especificação de projeto. Segundo a NBR 15953 (ABNT, 2011a), é recomendada a areia cujo enquadramento se encontra na Tabela 1.

Tabela 1 – Enquadramento recomendado da granulometria para a areia de assentamento, segundo a NBR 15953.

Abertura da peneira (mm)	% Passada
	Camada de assentamento
6,30	0 a 7
4,75	0 a 10
2,36	0 a 25
1,18	5 a 50
0,60	15 a 70
0,30	50 a 95
0,15	85 a 100
0,075	90 a 100

Fonte: ABNT (2011a).

As recomendações técnicas para a granulometria das areias de assentamento utilizadas em alguns países são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Recomendações da granulometria da areia a ser utilizada na camada de assentamento.

Granulometria a ser utilizada na camada de assentamento					
Peneiras (mm)	Austrália	Inglaterra	África do Sul	E.U.A.	Canadá
	% Passante				
9,52	100	100	100	100	100
4,75	90 a 100	90 a 100	95 a 100	95 a 100	95 a 100
2,36	80 a 100	75 a 100	80 a 100	85 a 100	80 a 100
1,18	50 a 85	55 a 90	50 a 85	50 a 85	50 a 90
0,60	25 a 60	35 a 59	25 a 60	25 a 60	25 a 65
0,30	10 a 30	8 a 30	10 a 30	10 a 30	10 a 35
0,15	5 a 15	0 a 10	5 a 15	2 a 10	2 a 10
0,075	0 a 10	0 a 3	0 a 10	0 a 1	0 a 1

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Caso o pavimento receba tráfego pesado, é recomendável se considerar, nas especificações do projeto, que sejam realizados ensaios de durabilidade ou

degradação das areias a serem utilizadas na camada de assentamento e na selagem (HALLACK, 1998).

A forma dos grãos de areia utilizada na camada de assentamento influi diretamente no comportamento e na deformação do pavimento, sendo que as partículas angulares possuem coeficiente de atrito maior, proporcionando a melhor distribuição dos esforços, conforme Shackel (1990), Cruz (2003) e Muller (2005).

A presença de silte e argila na areia influencia negativamente o desempenho da camada de assentamento. De acordo com Yaginuma *et al.* (2000) *apud* Muller (2005), a presença de partículas com diâmetro inferior a 75 µm causa perda de selagem e desnível entre as peças, além de provocar um excessivo endurecimento desta camada.

Portanto, nota-se que alguns dos defeitos prematuros do pavimento estão relacionados com a qualidade da camada de assentamento e rejuntamento das peças.

### **c) Demais camadas do pavimento intertravado**

De acordo com Shackel (1990), a espessura, tipo e qualidade do material utilizado na base e sub-base afetam diretamente o desempenho estrutural destas camadas do pavimento.

Knapton (1996) relatou que a metodologia utilizada pela Federal Aviation Administration (FAA) é a mesma tanto para os pavimentos flexíveis como para os pavimentos intertravados, em que, as variáveis independentes ou de entrada, no procedimento de dimensionamento, são:

- dar início ao processo de intertravamento por meio do preenchimento de juntas na parte inferior, no momento da compactação;
- determinar a resistência do subleito, por meio do ensaio ISC ou CBR;
- determinar o tipo de material a ser utilizado na base, granular ou estabilizado quimicamente;
- tráfego.

As variáveis dependentes ou de resposta são:

- espessura total do pavimento;

- espessura do revestimento = (pavers + camada de areia de assentamento) + camada de base;
- espessura mínima da base.

## 2.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DAS PEÇAS

Os procedimentos de moldagem dos pavers são divididos em dois grandes grupos: mecânico e manual.

### **a) Processo de moldagem mecânico**

No processo mecânico de moldagem, a durabilidade e resistência dos pavers são obtidas por meio de cuidadosa regulagem de vibração e alta pressão dos equipamentos especificamente projetados para a produção em larga escala, que, necessariamente, utiliza concreto com consistência mais seca. O controle de homogeneidade das propriedades mecânicas, textura e dimensões são benefícios da utilização de tais equipamentos e da produção em escala industrial.

Os equipamentos utilizados para este procedimento são as vibro prensas multifuncionais que podem ser utilizadas para a fabricação de diversos artefatos de cimento como: blocos de concreto, tijolos, grelhas, placas e peças pré-moldadas de concreto.

### **b) Processo de moldagem manual**

No processo manual de moldagem, a capacidade produtiva é determinada com base na quantidade de moldes disponíveis e na qualidade da mão de obra empregada.

Os moldes são preenchidos manualmente, utilizando um concreto de consistência plástica, sobre uma mesa vibratória, geralmente. Este procedimento de moldagem apresenta a vantagem de propiciar um ótimo aspecto visual superficial, em virtude do tipo de molde utilizado (PVC, metal ou fibra de vidro) e da consistência plástica do concreto utilizado. No entanto, perde-se a homogeneidade das propriedades mecânicas das peças.

## 2.4 NORMAS TÉCNICAS SOBRE PAVERS

### 2.4.1 Visão geral

Conforme citado anteriormente, os países europeus são pioneiros na utilização do pavimento intertravado, portanto são os pioneiros ao apresentarem as normas técnicas que serviram como referência para as demais normas técnicas ao redor do mundo.

As especificações gerais sobre os pavers compreendem cinco características importantes para o seu controle, que são:

#### a) Materiais

Especificações sobre os materiais que podem ser utilizados para a fabricação e execução do pavimento intertravado. Seguem as mesmas especificações relativas ao concreto e normalmente se utilizam as normas de cada país. O objetivo é de se estabelecer padrões de qualidade para os materiais utilizados

#### b) Tolerâncias dimensionais

Especificações sobre a padronização dimensional dos pavers. A falta de padronização quanto às medidas leva ao assentamento incorreto, afetando o alinhamento das peças, a distância entre juntas e o desempenho final do pavimento como um todo. O objetivo é garantir o perfeito alinhamento das peças utilizadas, estabelecendo padrões aceitáveis para as variações dimensionais.

#### c) Resistência mecânica

Especificações sobre a resistência mecânica dos pavers, buscando garantir o desempenho nas etapas de fabricação, execução e utilização das peças. Não existe um consenso entre as normas internacionais a respeito das características necessárias à execução do ensaio de avaliação dessa propriedade, mas observa-se

que os valores exigidos são, em geral, razoavelmente altos, garantindo, assim, o desempenho esperado na utilização do pavimento.

#### **d) Durabilidade**

Especificações que dizem respeito à vida útil do pavimento, no que diz respeito ao desgaste dos pavers. Esta questão é norteadada por fatores climáticos, tendo a resistência ao desgaste por abrasão como parâmetro geral para países de clima quente e utilizando também a resistência a ciclos de gelo e degelo em países onde há a incidência de neve, além da utilização da absorção de água das peças. Busca-se garantir a vida útil e o bom desempenho dos pavers aplicando-os de acordo com suas características de durabilidade ao tipo de tráfego adequado.

#### **e) Aparência**

Especificações sobre o aspecto visual dos pavers. Geralmente o aspecto visual é tratado de forma subjetiva nas normas, não estabelecendo um critério objetivo para sua avaliação. Busca-se avaliar os pavers visualmente, de forma a garantir a padronização de cores, tamanhos, arestas e defeitos superficiais que possam prejudicar o assentamento, o desempenho estrutural ou a estética do pavimento.

### **2.4.2 Comentários sobre algumas normas internacionais**

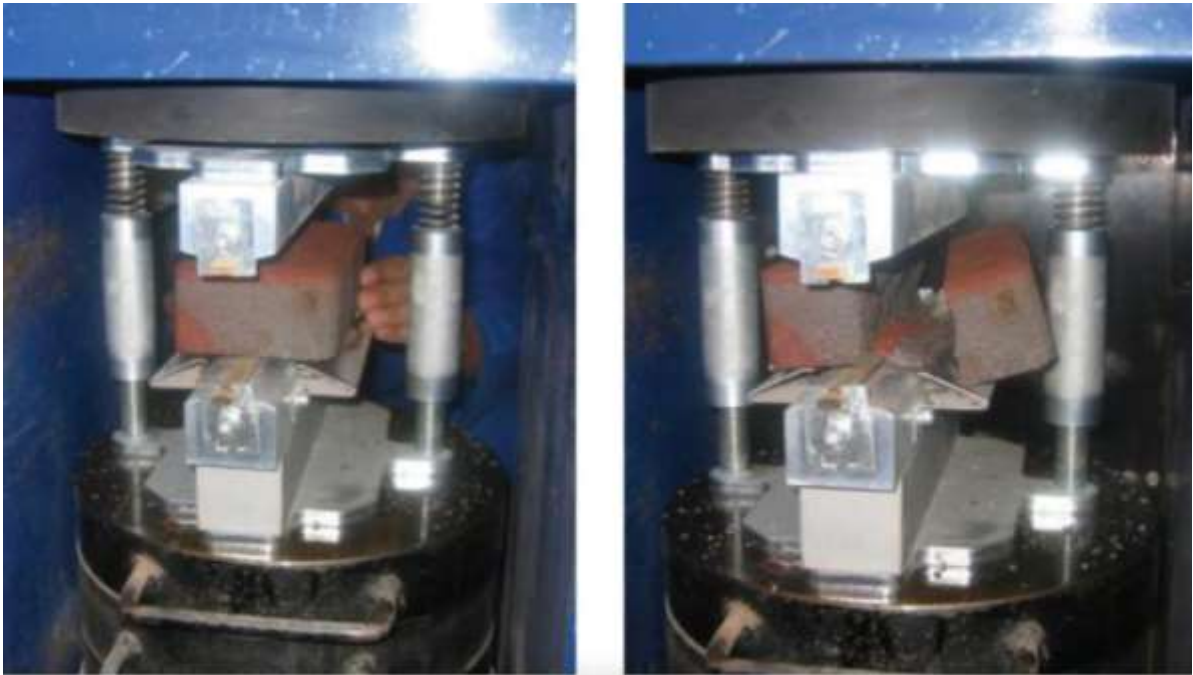
As normas técnicas de pavers representam não só os parâmetros de conformidade exigidos para as peças, mas também indicam um pouco da realidade do país em relação à tecnologia de pavimentação intertravada. Os comentários tecidos nesta seção se referem, principalmente, às propriedades geométricas e mecânicas exigidas nas normas internacionais e as adaptações realizadas.

#### **a) África do Sul**

A norma sul-africana SANS 1058 (SABS, 2012) mudou, principalmente, o método de avaliação de resistência em relação às normas anteriores.

A norma que anteriormente se utilizava da resistência à compressão das peças passou a utilizar a *splitting tensile strength*, que seria a resistência à tração indireta, obtida por meio da compressão, em tradução livre. O ensaio, ilustrado na Figura 14, também é adotado por alguns outros países.

Figura 14 – Ensaio de resistência à tração indireta em pavers.



Fonte: CMA (2012).

A norma ainda incluiu um ensaio de resistência à abrasão, baseado nas normas australiana e neozelandesa, que consiste em fixar o paver em uma das faces de uma caixa rotativa de aço contendo 600 bolas de aço de 16g e proporcionar o choque destas bolas com a peça durante uma hora.

Quanto à absorção de água, a norma removeu a obrigatoriedade do ensaio, mas mantendo-o como um ensaio informativo e voluntário.

A Tabela 3 apresenta um resumo das exigências da norma sul-africana.

Tabela 3 – Resumo dos requisitos da norma SANS 1058.

Requisitos		Tolerâncias
<b>Tolerância dimensional</b>	Comprimento	± 2,0 mm
	Largura	± 2,0 mm
	Altura	± 3,0 mm
<b>Resistência mecânica</b>	Resistência à tração indireta	Classe 1: > 2,0 MPa Classe 2: > 2,6 MPa
<b>Durabilidade</b>	Abrasão	< 12 g
	Absorção de água (opcional)	< 6,5%

Fonte: Adaptado de SABS (2012).

## b) Argentina

A norma argentina NA 11656 (IRAM, 2010) se assemelha à norma brasileira em suas disposições, diferindo, principalmente, na avaliação da resistência mecânica das peças. Enquanto a norma brasileira ainda adota a resistência à compressão, a norma argentina, desde sua atualização em 2010, passou a adotar o ensaio de resistência à flexão em três pontos. O ensaio de desgaste por abrasão, por meio da medição da cavidade produzida por um disco metálico e material abrasivo, é condicionado de acordo com a resistência à flexão, sendo realizada somente para resistências inferiores a 5,0 MPa e superiores a 4,2 MPa. A Tabela 4 apresenta um resumo das exigências da norma argentina.

Tabela 4 – Resumo dos requisitos da norma NA 11656.

Requisitos		Tolerâncias
<b>Tolerância dimensional</b>	Comprimento	± 2,0 mm
	Largura	± 2,0 mm
	Altura	± 3,0 mm
<b>Resistência mecânica</b>	Resistência à flexão	> 4,2 MPa
<b>Durabilidade</b>	Abrasão*	< 23 mm
	Absorção de água	< 5,0%

Fonte: Adaptado de IRAM (2010).

### c) Austrália e Nova Zelândia

A norma australiana e neozelandesa AS/NZS 4455 (SA, 2010) pode ser considerada uma das mais completas no que diz respeito aos requisitos de aplicação, existindo divisões de aplicação de acordo com o tráfego.

Esta norma faz uso da resistência à flexão como forma de avaliação da resistência mecânica dos pavers, por meio da aplicação de uma carga pontual na peça biapoada, e se utiliza de uma correlação entre o tipo de tráfego e o resultado do ensaio de abrasão, originando um índice de abrasão médio. A Tabela 5 apresenta um resumo das exigências da norma australiana.

Tabela 5 – Resumo dos requisitos da norma AS/NZS 4455.

Requisitos		Aplicação					
		Residencial		Passeios Públicos		Vias urbanas	
		Tráfego Leve	Tráfego médio	Baixo volume	Alto volume	Locais	Coletoras
<b>Tolerância dimensional (mm)</b>	Comprimento	± 3,0	± 3,0	± 2,5	± 2,5	± 2,5	± 2,5
	Largura	± 3,0	± 3,0	± 2,5	± 2,5	± 2,5	± 2,5
	Altura	± 2,5	± 2,5	± 2,0	± 2,0	± 2,0	± 2,0
<b>Resistência mecânica</b>	Resistência à flexão	> 2,0 MPa	> 3,0 MPa	> 3,0 MPa	> 3,0 MPa	> 4,0 MPa	> 4,0 MPa
<b>Durabilidade</b>	Desgaste	7	7	5	3,5	5	5

Fonte: Adaptado de SA (2010).

### d) Canadá

A norma canadense CSA A231.1/A231.2 (CSA, 2014) dispõe sobre pavers e lajotas de concreto para pavimentação. Um dos destaques da norma é a utilização da resistência à compressão como requisito, apesar de dispor sobre a resistência à flexão. Por se tratar de um país de clima frio, a questão de durabilidade é abordada quanto à perda de massa em ciclos de congelamento e descongelamento. A Tabela 6 apresenta um resumo das exigências da norma canadense.

Tabela 6 – Resumo dos requisitos da norma CSA A231.1/A231.2.

Requisitos		Tolerâncias
<b>Tolerância dimensional</b>	Comprimento	- 1,0 mm; + 2,0 mm
	Largura	- 1,0 mm; + 2,0 mm
	Altura	± 3,0 mm
<b>Resistência mecânica</b>	Resistência à compressão	> 50,0 MPa
<b>Durabilidade</b>	Gelo-degelo	< 225 g/m <sup>2</sup> (depois de 28 ciclos) < 500 g/m <sup>2</sup> (depois de 49 ciclos)

Fonte: Adaptado de CSA (2014).

### e) Colômbia

A norma colombiana NTC 2017 (ICONTEC, 2004) se destaca devido a sua riqueza de detalhes para com os seus requisitos, apresentando-os de forma detalhada.

Salienta-se que a norma dispõe sobre a diferença de espessura do paver para diferentes tipos de tráfego e condiciona a resistência à abrasão, por meio da medição da cavidade produzida por um disco metálico e material abrasivo, com a resistência à flexão, sendo realizada somente para resistências inferiores a 5,0 MPa e superiores a 4,2 MPa. A Tabela 7 apresenta um resumo dos requisitos da norma colombiana.

Tabela 7 – Resumo dos requisitos da norma NTC 2017.

Requisitos		Tolerâncias
<b>Tolerância dimensional</b>	Comprimento	± 1,5 mm
	Largura	± 1,5 mm
	Altura	± 2,0 mm
<b>Resistência mecânica</b>	Resistência à flexão	> 5,0 MPa > 4,2 MPa
<b>Durabilidade</b>	Abrasão*	< 23 mm
	Absorção de água	< 7,0%

Fonte: Adaptado de ICONTEC (2004).

## f) Equador

A norma equatoriana NTE 3040 (INEN, 2016) apresenta os requisitos das propriedades para os pavers, além de apresentar seus métodos de ensaio e avaliação. É uma versão adaptada da norma europeia EN 1338 (CEN, 2003), apresentando os mesmos tipos de ensaio e diversas disposições em comum, como a menção a resistência à derrapagem/deslizamento, o comportamento em situações de incêndio e a condutividade térmica. A Tabela 8 apresenta um resumo dos principais requisitos da norma equatoriana.

Tabela 8 – Resumo dos requisitos da norma NTE 3040.

Requisitos		Tolerâncias
Tolerância dimensional	Comprimento	$\pm 2,0$ mm
	Largura	$\pm 2,0$ mm
	Altura	$\pm 3,0$ mm
Resistência mecânica	Resistência à tração indireta	$> 3,6$ MPa
Durabilidade	Absorção de água	$\leq 6,0\%$
	Abrasão	$\leq 25$ mm para situações usuais $\leq 20$ mm para situações especiais

Fonte: Adaptado de INEN (2016).

## g) Estados Unidos

A norma americana ASTM C936 (ASTM, 2016) apresenta, de forma bem concisa, os requisitos das propriedades para os pavers, apresentando os métodos de ensaios em outras normas. Entretanto, apesar de concisa, a norma americana é bem objetiva quanto aos requisitos, facilitando sua interpretação e utilização.

Destaca-se a apresentação de três requisitos de durabilidade, utilizando a absorção como requisito geral, a resistência ao congelamento e descongelamento em regiões onde se aplica e a resistência à abrasão em casos específicos, quando solicitada pelo comprador. A Tabela 9 apresenta um resumo dos requisitos da norma americana.

Tabela 9 – Resumo dos requisitos da norma ASTM C936.

Requisitos		Tolerâncias
<b>Tolerância dimensional</b>	Comprimento	± 1,6 mm
	Largura	± 1,6 mm
	Altura	± 3,2 mm
<b>Resistência mecânica</b>	Resistência à compressão	> 55 MPa
<b>Durabilidade</b>	Absorção de água	< 5%
	Gelo-degelo	< 225 g/m <sup>2</sup> (depois de 28 ciclos) < 500 g/m <sup>2</sup> (depois de 49 ciclos)
	Abrasão	15 cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>2</sup>

Fonte: Adaptado de ASTM (2016).

#### h) Europa

A norma europeia EN 1338 (CEN, 2003) dispõe sobre os requisitos das propriedades e os métodos de ensaio e avaliação para os pavers. Assim como a norma australiana, é uma das normas mais completas sobre o assunto, com diversos anexos sobre os métodos de ensaio. Destaca-se a utilização do ensaio de tração por compressão para avaliação da resistência mecânica, a presença de dois ensaios para determinação da resistência à abrasão, além do ensaio de congelamento e descongelamento, e ainda a existência de um ensaio para avaliação da resistência ao escorregamento/derrapagem.

A Tabela 10 apresenta um resumo dos requisitos da norma europeia.

Tabela 10 – Resumo dos requisitos da norma EN 1338.

Requisitos		Tolerâncias
Tolerância dimensional (para espessuras < 100 mm)	Comprimento (< 100 mm / ≥ 100 mm)	± (2,0 / 3,0) mm
	Largura	± 2,0 mm
	Altura	± 3,0 mm
Resistência mecânica	Resistência à tração indireta	> 3,6 MPa
Durabilidade	Absorção de água	< 6%
	Gelo-degelo	< 1,0 kg/m <sup>2</sup>
	Abrasão	≤ 23 mm para tráfego leve ≤ 20 mm para tráfego intenso

Fonte: Adaptado de CEN (2003).

### 2.4.3 Comentários sobre a norma brasileira

A norma brasileira para as peças de concreto destinadas à pavimentação é a NBR 9781 (ABNT, 2013a) – **“Peças de concreto para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio”**. Também é válido citar a norma NBR 15953 (ABNT, 2011a) – **“Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução”**, que, como o nome sugere, aborda todas as fases do pavimento, desde o projeto, até a execução, fiscalização e manutenção do pavimento pronto. E por último, mas não menos importante, a norma NBR 15575-3 (ABNT, 2013b) – **“Edificações habitacionais – Desempenho Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos”**, que, apesar de tratar basicamente dos pisos residenciais, possui considerações que podem ser incorporadas à norma de pavers.

Os comentários tecidos nesta seção ficam limitados à norma NBR 9781 (ABNT, 2013a), visto que é a norma específica sobre as propriedades exigidas e os métodos de ensaio utilizados para os pavers.

#### a) Tipo de tráfego

A primeira ponderação a se fazer sobre a norma brasileira é a inexistência de considerações sobre os diferentes tipos de tráfego, presente na norma australiana, por exemplo. A norma australiana diferencia os tipos de tráfego a que o pavimento

estará submetido e relaciona esta informação à resistência mecânica mínima do pavimento, além de diferenciar tráfego de veículos e de pedestres ainda diferencia os respectivos volumes de tráfego.

A Prefeitura de São Paulo, por meio da instrução de projeto IP-06 (PMSP, 2004) – “**Dimensionamento de pavimentos com blocos intertravados de concreto**”, possui considerações sobre a caracterização do tráfego de forma mais completa, e semelhante ao utilizado pela norma australiana, classificando as vias de acordo com o tipo de solicitação.

A inclusão de categorias de tráfego parece apropriado e necessário, buscando obter um pavimento cada vez mais econômico e que atenda às solicitações de serviço a que será sujeito.

## **b) Resistência mecânica**

A avaliação da resistência mecânica na norma brasileira é realizada por meio da resistência à compressão dos pavers e possui relação direta com o tráfego a que o pavimento estará sujeito. A Tabela 11 apresenta a situação atual da norma brasileira.

Tabela 11 – Resistência característica à compressão de acordo com a solicitação, segundo a NBR 9781.

<b>Solicitação</b>	<b>Resistência característica à compressão (MPa) aos 28 dias</b>
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	≥ 35
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	≥ 50

Fonte: ABNT (2013a).

Percebe-se a preocupação explícita com o desgaste por abrasão, o que justifica os valores elevados de resistência à compressão. No entanto, Pearson e Shackel (2003) afirmam que a incidência de falha mecânica em pavimentos intertravados originada pela resistência insuficiente das peças é extremamente

pequena e, portanto, a norma australiana utiliza a resistência à flexão como parâmetro de avaliação da resistência mecânica.

Em face da afirmação anterior, torna-se necessário dissociar a resistência à compressão da durabilidade do pavimento, objetivando a economia e desempenho adequado. A resistência à flexão, ou à tração indireta, adotada por algumas normas citadas anteriormente, se mostra eficiente em virtude do comportamento individual das peças que compõem o pavimento, admitindo que elas estão devidamente travadas em suas extremidades, o esforço predominante tende a ser a flexão.

Um exemplo disso é a norma sul-africana que teve seu ensaio alterado alegando que a resistência à flexão, obtida por meio da tração indireta, é uma medida de desempenho mais apropriada do que a resistência à compressão pois avalia a resistência ao seccionamento e à ruptura ao invés da resistência ao esmagamento por compressão. A justificativa para tal alteração é que os pavers raramente são levados à falha por compressão, ao passo que o seccionamento e a ruptura por flexão são as principais causas de problemas no pavimento, assim como o desgaste por abrasão (CMA, 2012).

### **c) Durabilidade**

A norma brasileira apresenta a absorção de água e a resistência ao desgaste por abrasão como avaliação da durabilidade dos pavers. A absorção de água indica indiretamente a porosidade do paver, com valores mais baixos indicando uma peça mais densa, compacta e com menor quantidade de vazios, sinônimo de maior durabilidade. A NBR 9781 (ABNT 2013a) estabelece que o lote deve apresentar absorção máxima de 6%, em média, não sendo admitido valores individuais superiores a 7%. A resistência ao desgaste por abrasão de disco metálico indica a resistência do paver ao desgaste por meio da rotação de um disco metálico e da passagem de material abrasivo, indicando a durabilidade da peça e resistência à abrasão. Entretanto, apenas a absorção de água é um fator indispensável para a aceitação e/ou rejeição de um lote de pavers, ao passo que a realização do ensaio de abrasão é opcional, segundo a norma. Salienta-se que a resistência à abrasão foi incluída na norma brasileira em sua última edição, em 2013.

Por não ser um ensaio obrigatório, não foi possível encontrar um laboratório que possuísse a realização deste ensaio em seu escopo de acreditação. E por não

haver laboratórios acreditados, as pesquisas nacionais ou optam por ignorar este importante aspecto da pavimentação intertravada, em razão da impossibilidade de realização do ensaio, ou optam pela realização de outros ensaios de forma adaptada.

As adaptações realizadas por pesquisadores nacionais se concentram em dois ensaios de abrasão. O primeiro, e mais utilizado, é o ensaio de abrasão utilizando o equipamento de Amsler-Laffon, normatizado pela NBR 12042 (ABNT, 2012) e conhecido em algumas regiões como “Método CIENTEC”, para materiais inorgânicos. O segundo, e um pouco menos utilizado, é o ensaio de desgaste por abrasão profunda da NBR 13818 (1997), para placas cerâmicas.

São exemplos de utilização do ensaio de Amsler, as pesquisas desenvolvidas por Cruz (2003), Godinho (2009), Amadei (2011), Altoé e Martins (2013), Moosher (2013) e Martins Filho e Martins (2017). A utilização do ensaio adaptado da NBR 13818 (1997) foi apresentada por Fioriti (2007), Santos (2014) e Vaz (2015). Destacam-se ainda as pesquisas de Alcantara (2015) e Nascimento (2016), ambas da mesma instituição, onde as pesquisadoras produziram um abrasímetro com base no desenho esquemático da norma NBR 9781 (ABNT, 2013a).

#### **d) Resistência ao impacto**

A NBR 15575-3 (ABNT, 2013b) trata sobre diversos aspectos dos sistemas de pisos para edificações habitacionais e possui apontamentos que podem ser utilizados para as peças de pavimentação intertravada, como a resistência ao impacto.

A resistência ao impacto de corpo duro, presente na norma de pisos cerâmicos, considera as situações de utilização do piso cerâmico, como os impactos e choques causados pela queda de objetos em ambientes residenciais. Ao se utilizar a pavimentação intertravada para praças e passeios públicos, principalmente, estamos sujeitando este piso a choques e impactos causados por objetos, situação de menor ocorrência em caminhos e vias utilizadas majoritariamente por veículos.

A norma de desempenho estabelece que o sistema de pisos não pode sofrer ruptura sob impactos de corpo duro para qualquer energia de impacto. Estabelecendo os critérios admissíveis para o comportamento das peças e

relacionando as energias de impacto aos estados limites últimos e de utilização. A Tabela 12 apresenta os critérios de desempenho exigidos.

Tabela 12 – Critérios de resistência ao impacto para os sistemas de pisos segundo a NBR 15575-3.

<b>Energia de impacto (J)</b>	<b>Critério de desempenho</b>
5	Não ocorrência de ruptura total da camada de acabamento Falhas superficiais como mossas, lascamentos, fissuras e desagregações são permitidas
30	Não ocorrência de ruína e traspassamento Falhas superficiais como mossas, lascamentos, fissuras e desagregações são permitidas

Fonte: ABNT (2013b).

O ensaio consiste na queda livre de esferas de aço de massa conhecida, em alturas determinadas para atingir as energias de impacto desejadas, como mostra a Tabela 13.

Tabela 13 – Massas de corpo duro, altura e energia de impacto, segundo a NBR 15575-3.

<b>Impacto</b>	<b>m (kg)</b>	<b>h (m)</b>	<b>E (J)</b>
Aplicar impacto de corpo duro de grandes dimensões	1,00	1,00	10,00
	1,00	2,00	20,00
	1,00	3,00	30,00
Aplicar impacto de corpo duro de pequenas dimensões	0,50	0,50	2,50
	0,50	0,75	3,75
	0,50	1,00	5,00

Fonte: ABNT (2013b).

#### **2.4.4 Critérios de aceitação das peças segundo a norma brasileira**

Apesar do mercado nacional ter registrado um grande crescimento na pavimentação utilizando pavers nos últimos anos, a aplicação deste material tem sido maior em áreas de reurbanização e revitalização das cidades, mesmo com a própria norma brasileira estabelecendo os critérios adequados para aceitação das peças para aplicações como portos, pátios de indústria pesada e outros locais onde o pavimento sofra com o desgaste por atrito.

De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013a), o paver é definido como uma peça de formato geométrico regular, com comprimento máximo de 250 mm, medida real da largura mínima de 97 mm e altura mínima de 60 mm. Quando sua utilização for em vias com tráfego de veículos ou áreas de armazenamento, deve possuir índice de forma, razão entre o comprimento e espessura, igual ou inferior a 4.

Primeiramente, realiza-se a inspeção visual das peças, com o objetivo de identificar, e descartar, peças defeituosas que possam prejudicar o assentamento, a estética e o desempenho estrutural do pavimento. Segundo a norma, as peças devem apresentar aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos e devem ser livres de rebarbas, defeitos, delaminações e descamações.

Para a aceitação, todas as peças devem ser separadas em lotes constituídos a critério do comprador e submetidos ao controle de aceitação, satisfazendo aos seguintes critérios, conforme a norma:

- o lote deve ser formado por peças com as mesmas características, produzidas sob as mesmas condições e utilizando os mesmos materiais;
- o lote é limitado à produção diária, no máximo, utilizando-se o mesmo equipamento e materiais;
- a amostra deve ter no mínimo 3 peças, para lotes de até 300 m<sup>2</sup>, para o ensaio de absorção de água; no mínimo 6 peças, para lotes de até 300 m<sup>2</sup>, para ensaios de inspeção visual, avaliação dimensional e resistência à compressão e uma peça adicional para cada 50 m<sup>2</sup> suplementar, até o máximo de 32 peças para estes ensaios.

Os ensaios para aceitação dos lotes de peças para pavimentação são dados nos Anexos da NBR 9781 (ABNT, 2013a). No entanto, o resumo dos requisitos para aceitação é apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Resumo dos requisitos para aceitação dos pavers, conforme a NBR 9871.

Requisitos Físicos		Limites Admissíveis
Inspeção Visual	Homogeneidade	$\leq 5\%$
Tolerância Dimensional (mm)	Comprimento	$\pm 3$
	Largura	$\pm 3$
	Espessura	$\pm 3$
Resistência característica à compressão (MPa)	1	$\geq 35$ Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha
	2	$\geq 50$ Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados
Absorção de água		Valor médio $\leq 6\%$ , não se admitindo valor individual maior do que 7%
Resistência à abrasão (mm)	1	$\leq 23$ Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha
	2	$\leq 20$ Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados

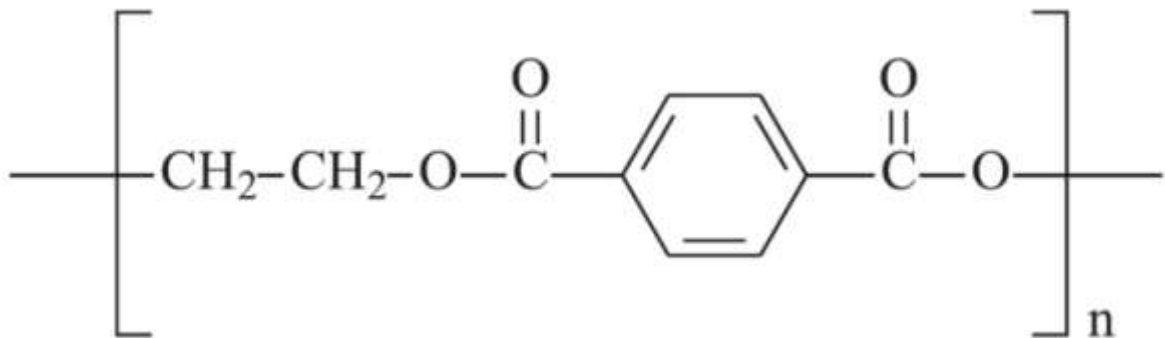
Fonte: Adaptado de ABNT (2013a).

### 3 PET – POLITEREFTALATO DE ETILENO

#### 3.1 DEFINIÇÃO E ESTRUTURA MOLECULAR DO PET

O PET, representado estruturalmente na Figura 15, é definido como um polímero termoplástico, da família dos poliésteres, considerado um dos plásticos mais versáteis da engenharia. O químico Wallace H. Carothers sintetizou o primeiro poliéster em 1930. Entretanto, foram os químicos John Rex Whinfield e James Tennant Dickson, em 1941, que conseguiram desenvolver um poliéster com elevada temperatura do ponto de fusão e alta estabilidade hidrolítica, denominado Poli Tereftalato de Etileno ou PET (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009).

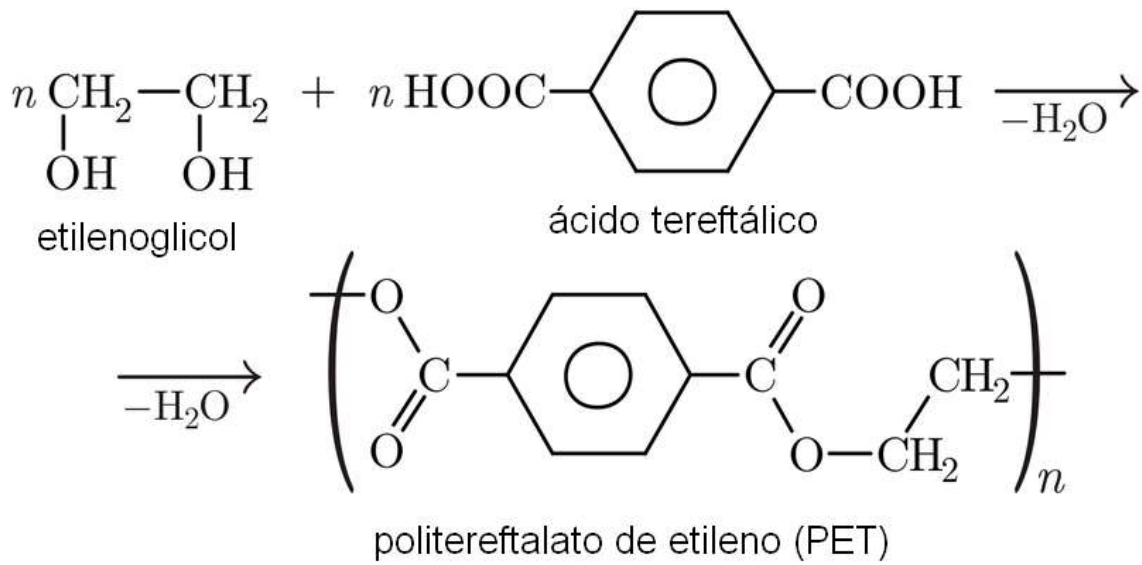
Figura 15 – Estrutura química do PET.



Fonte: Bannach e Perpétuo (2011).

Para Melo (2004) a estrutura molecular do PET resulta da reação entre dois monômeros: etileno glicol ou glicol etilênico – um álcool, líquido a temperatura ambiente e com ponto de ebulição de 197°C – e ácido tereftálico ou tereftalato de metila – um monômero sólido com ponto de fusão de 140°C – ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Processo de formação do PET.



Fonte: Adaptado de Romão, Spinacé e Paoli (2009)

O PET pode ser apresentado como homopolímero, repetindo somente um mero, ou apresentado como copolímero, com a repetição de dois meros. O PET homopolímero é pouco utilizado em virtude da sua facilidade de cristalização (MELO, 2004).

De acordo com a International Union of Pure and Applied Chemistry – IUPAC (2018), o PET se apresenta em diversas formas, mostradas na Tabela 15.

Tabela 15 – Nomenclaturas usuais do PET.

Nomenclatura	Definição
PET ou PETE	Pela IUPAC, Poly (ethyleneterephthalate) que, em português, se torna Poli (tereftalato de etileno)
PETP	Pelos grupos industriais, utilizados na produção de garrafas biorientadas molecularmente
PETG	Copolíéster utilizado na extrusão-sopro de garrafas não biorientadas molecularmente
OPET	PET orientado, estirado antes do sopro da garrafa, com finalidade de aumentar a resistência mecânica e propriedades de barreira à gases
APET	PET amorfo, sem orientação de baixa cristalinidade, pouco resistente, alto brilho e transparência, utilizado em produtos termoformados como bandejas para alimentos
CPET	PET cristalino, contém aditivos como iniciadores e nucleadores, alto grau de cristalinidade, opaco, utilizado em produtos que podem ser resfriados e aquecidos simultaneamente sem sofrer alterações

Fonte: IUPAC (2018).

Para Romão, Spinacé e Paoli (2009), o PET divide-se em relação às suas formas e etapas do processo de transformação, em que as mais usuais são: PET Polímero, PET Resina, PET Pré-Forma e PET Garrafa.

Tonet (2009) apontou que o PET pode ser considerado o recipiente ideal para transporte e armazenamento de líquidos em razão das seguintes características:

- boa resistência química e mecânica;
- impossibilita o contato com gases e odores externos;
- massa específica menor que as tradicionais embalagens de vidro;
- baixo custo de produção, armazenamento e transporte.

### 3.2 GARRAFAS PET

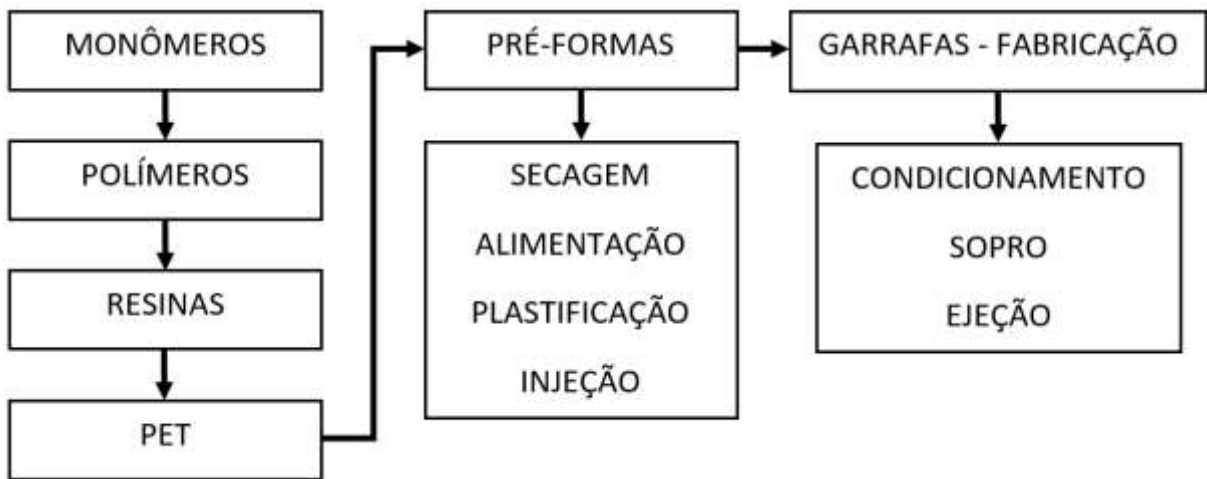
As primeiras embalagens produzidas em PET surgiram nos EUA, seguido dos países europeus, no início da década de 1970, chegando ao Brasil em 1988. O objetivo principal das garrafas PET era suprir as demandas logísticas da indústria de

refrigerantes, uma vez que, neste período, as bebidas eram armazenadas e transportadas em garrafas de vidro (MELO, 2004).

Segundo Romão, Spinacé e Paoli (2009), a principal aplicação do PET no Brasil é na indústria de embalagens e, conseqüentemente, a representatividade na composição do resíduo sólido urbano apresenta um crescimento.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de PET – ABIPET (2016), o ciclo de produção da garrafa PET passa desde a reação dos monômeros até o processo de transformação em garrafas, apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Fluxograma de produção das garrafas PET.



Fonte: Adaptado de ABIPET (2016).

O PET inicialmente é formado por grãos brancos e opacos, como disposto na Figura 18, consequência de uma reação química reversível de esterificação direta do ácido tereftálico purificado (PTA) com monoetileno glicol (MEG). Os dois elementos são misturados e o produto desta reação química é uma pasta que, ao cristalizar, formará os grãos.

Figura 18 – Forma inicial do PET após a esterificação.



Fonte: Syntex America (2015).

Partindo do PET granular se inicia o processo de produção da resina PET, onde procedimentos de polimerização e condensação são realizados. O processo de polimerização visa a eliminação de moléculas de água através de um procedimento químico. O processo de condensação consiste na cristalização do material, dando origem à resina PET (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009).

Após a produção da resina, a fase de produção das pré-formas é iniciada com a secagem da resina. Concluído o processo de secagem, o processo de alimentação se inicia, consistindo na transição entre o silo onde a resina está armazenada e a entrada do PET na injetora. O processo de plastificação consiste na mudança de estado físico através do aquecimento da resina PET para que possa ser injetada. A injeção é a etapa de transferência da resina PET plastificada para o molde das pré-formas, concluindo assim esta etapa de produção. Modelos de pré-forma são apresentados na Figura 19.

Figura 19 – Exemplos de pré-forma de PET.



Fonte: ABIPET (2018).

O processo de produção das garrafas PET se dá com as pré-formas já produzidas. O condicionamento é a primeira etapa e consiste em um tratamento térmico para moldagem do formato da embalagem. Em seguida é a etapa do sopro, em que a pré-forma é colocada dentro do molde, cuja cavidade forma a figura final da embalagem, e o ar é soprado em seu interior conferindo o formato final. O procedimento final é a ejeção, onde a embalagem já pronta é retirada e está pronta para uso.

### 3.3 MEIO AMBIENTE E RECICLAGEM

O aumento da população e seu poder de compra mudaram a geração de resíduos. Os resíduos produzidos atualmente são diferentes em volume e qualidade dos resíduos produzidos em épocas passadas. A industrialização trouxe, naturalmente, mais materiais descartáveis e como consequência desse acréscimo, mais materiais são encontrados nos aterros sanitários.

Para Mano e Mendes (1999) a sociedade começa a sentir os efeitos da intensa poluição ambiental no início dos anos 1970, por meio do aumento no volume de materiais descartados de forma incorreta, como o plástico.

Formigoni e Campos (2007) relacionaram o aumento do consumo de materiais descartáveis com o nível socioeconômico do cidadão, concluindo que quanto maior o nível socioeconômico, maior é o seu consumo de embalagens descartáveis. A consequência do aumento deste consumo é o aumento na geração de resíduos e no volume de materiais depositados nos aterros.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2017) foram produzidos 78,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos no Brasil, em 2016. Deste montante, 91% foi alvo de coleta e teve seu destino adequado. Dos 71,3 milhões de toneladas coletados, a grande maioria foi destinada aos aterros sanitários (58,4%), seguido dos aterros controlados (24,2%) e o restante (17,4%) foi destinado aos lixões.

Dois terços do volume total de resíduos sólidos produzidos no Brasil são provenientes do descarte incorreto de embalagens (LEITE, 2003).

A Figura 20 apresenta um exemplo de descarte incorreto das garrafas PET.

Figura 20 – Exemplo de descarte incorreto de garrafas PET.



Fonte: G1 (2014).

A reciclagem surge como alternativa para minimizar a situação atual dos resíduos sólidos, quando não se pode mais reduzir e reutilizar o material. A reciclagem

se apresenta como uma alternativa viável para o desenvolvimento de novos produtos, evitando o descarte incorreto dos materiais.

No ano de 2015, foram recicladas 274 mil toneladas de PET, correspondendo a 51% das unidades consumidas no país (ABIPET, 2016).

A reciclagem do PET pode ser dividida em três processos, conforme a Tabela 16 (MELO, 2004).

Tabela 16 – Processos de reciclagem do PET.

<b>Processo</b>	<b>Descrição</b>
Químico	Consiste na separação dos componentes que constituem o PET fornecendo matéria-prima para solventes e resinas. Principais processos: Hidrogenação, Gaseificação, Quimólise e Pirólise
Energético	Consiste na queima do PET para geração de calor e geração de energia elétrica
Mecânico	Consiste no uso de máquinas e equipamentos para moer e triturar o PET. O processo pode ser dividido em: coleta, separação, revalorização e transformação.

Fonte: Melo (2004).

Praticamente todo o PET reciclado no Brasil passa pelo processo mecânico, que pode ser dividido em três fases: recuperação, revalorização e transformação.

De acordo com a ABIPET (2016), a recuperação se inicia por meio da coleta seletiva das garrafas, evitando seu descarte nos aterros. A triagem separa as embalagens por cor, separação dos rótulos e tampas. O processo final desta etapa é a prensagem dos fardos das garrafas devidamente separadas e organizadas, como mostra a Figura 21.

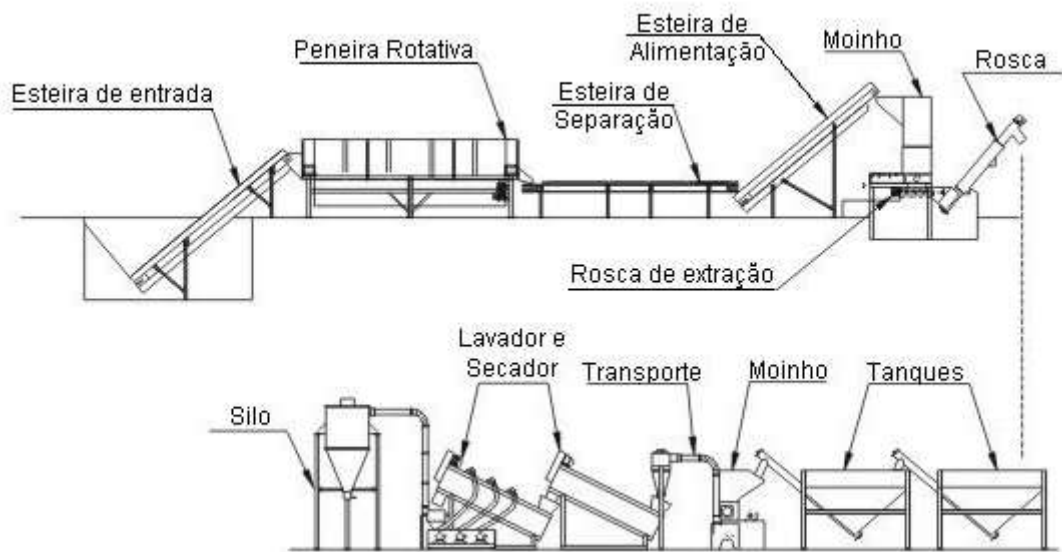
Figura 21 – Fardos de garrafas PET separadas e prensadas.



Fonte: Ricchini (2013).

Após a conclusão da fase de recuperação, a fase de valorização se inicia com os fardos sendo transportados por esteiras para realizar o processo da primeira lavagem. Depois as garrafas PET são trituradas e moídas. Após o final da moagem, o material passa por uma segunda lavagem e por um processo de peneiramento para classificação de sua granulometria (ABIPET, 2016). A Figura 22 apresenta o esquema da fase de valorização.

Figura 22 – Linha de moagem e lavagem de PET.



Fonte: Adaptado de Beltrão (2007).

A matéria-prima resultante da moagem são os flocos, ou *flakes* em nome comercial, de PET, apresentados na Figura 23. Os flocos mais refinados podem ser utilizados diretamente como matéria-prima para a fabricação de resina reciclada (ABIPET, 2016).

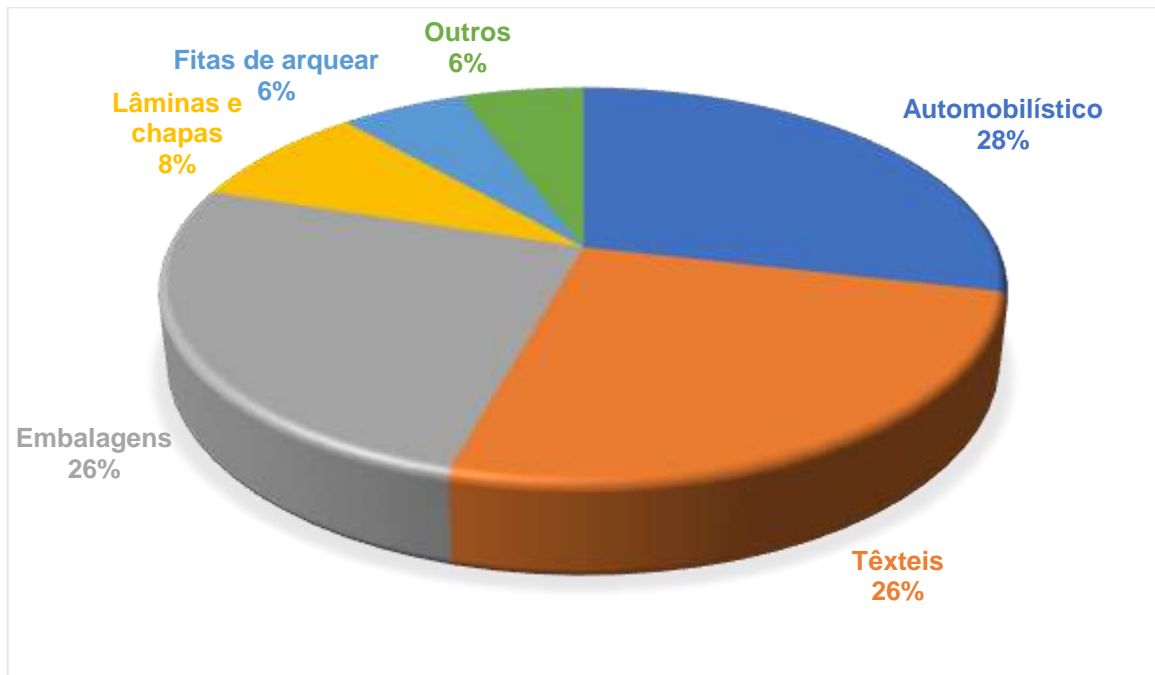
Figura 23 – Flocos de PET reciclado.



Fonte: Ricchini (2013).

A etapa final é a transformação, consistindo na aplicação dos flocos para a produção de novos produtos. A Figura 24 mostra que a maior aplicação é no setor automobilístico, na produção de resinas insaturadas e alquídicas, com os setores têxtil e de embalagens empatados na segunda posição de consumo (ABIPET, 2016).

Figura 24 – Aplicação do PET reciclado nas indústrias brasileiras.



Fonte: ABIPET (2016).

### 3.4 CONCRETO COM RESÍDUOS DE PET

A reutilização e reciclagem do resíduo de PET vêm sendo incorporada às práticas ambientais, ao longo dos anos, com a finalidade de atenuar os impactos causados. Diversos estudos demonstram, e sugerem, a utilização deste resíduo na indústria da construção civil, podendo ser inserido como matéria-prima ou adição aos materiais já consolidados no segmento (CHOI *et al.*, 2005; CHOI *et al.*, 2009; TAAFFE *et al.*, 2014).

A indústria da construção civil parece ser adequada para o recebimento do resíduo de PET, primeiro por consumir uma grande quantidade de materiais e segundo por necessitar de grandes volumes de materiais renováveis (PACHECO-TORGAL; DING; JALALI, 2012; FOTI, 2013; TAAFFE *et al.*, 2014). Este tema é aceito

e discutido por autores mundo afora, com estudos publicados abordando a utilização do PET inserido nos produtos da construção civil.

Choi *et al.* (2005), investigaram o efeito da adição de escória de alto-forno granulada em concretos produzidos com agregados miúdos oriundos de resíduos de garrafas PET em substituições de 25%, 50% e 75% do volume de agregados finos naturais e fator água/cimento de 0,45, 0,49 e 0,53. Concluíram que a resistência à compressão e a densidade do concreto reduzia à medida em que a taxa de substituição e o fator água/cimento aumentava, que a trabalhabilidade dos concretos com PET melhorou conforme a taxa de substituição e o fator água cimento aumentaram e que a adesão da escória à superfície do PET é capaz de fortalecer o concreto e reduzir a zona de transição em virtude da reação com o hidróxido de cálcio.

Ismail e Al-Hashmi (2008), estudaram a eficiência das substituições de areia por resíduos plásticos, compostos aproximadamente por 80% de PET e 20% de poliestireno, em concretos nas porcentagens de 10%, 15% e 20% e em idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Concluíram que a resistência à compressão tende a diminuir em todas as idades conforme o aumento da substituição, concluíram também que a densidade no estado fresco e endurecido tende a diminuir, mas não de forma tão significativa, e, por fim, que os valores de *slump* das misturas contendo resíduos tendem a reduzir conforme aumenta a quantidade da substituição.

Yesilata, Isiker e Turgut (2009), estudaram a melhoria do isolamento térmico em concretos com adições de resíduos de PET e borracha de pneu. O estudo consistiu na produção de concreto e inserção de resíduos em diferentes formas (tiras, quadrados e formas irregulares) para analisar a circunstância mais favorável ao isolamento térmico e a conclusão foi que tanto a borracha quanto o PET reduzem de forma considerável a transmissão de calor em comparação ao concreto convencional. A porcentagem para a borracha utilizada reduziu em 18,52% a transmissão de calor e o PET reduziu entre 10,27% e 18,16% dependendo do formato dos pedaços utilizados.

Choi *et al.* (2009), estudaram as características de argamassas e concretos contendo agregados miúdos produzidos a partir de garrafas PET recicladas. As argamassas produzidas possuíam uma relação cimento/agregado de 1:2,44 e fator água/cimento de 0,60 e substituições de 25%, 50%, 75% e 100% do volume de agregado miúdo natural. Os concretos foram produzidos com fator água/cimento de 0,45, 0,49 e 0,53 e substituições de 25%, 50% e 75%, em massa do agregado miúdo,

para cada traço. Concluíram que o *flow*, ou espalhamento, da argamassa aumentou proporcionalmente com o aumento da utilização do resíduo, que a absorção de água para 25% de utilização do resíduo foi menor do que para a argamassa de controle, e que a resistência à compressão diminuiu conforme se aumenta a quantidade de resíduo. As conclusões foram semelhantes para o concreto, afirmando que o *slump*, ou abatimento, do concreto também aumentou em relação ao controle e que a resistência à compressão também caiu à medida que se aumentou a quantidade de resíduos.

Modro *et al.* (2009), estudaram a influência da adição do resíduo de PET no concreto de cimento Portland. Para o estudo, substituíram parte do agregado natural por resíduo de PET nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40% da dosagem padrão. A conclusão foi que à medida que se aumentava a porcentagem de PET, menor era a resistência mecânica do concreto. Os autores complementam que os traços contendo resíduos de PET podem ser utilizados na construção civil para finalidades não estruturais como alvenarias de vedação, capas de lajes e material de preenchimento.

Akçaözöğlü, Atiş e Akçaözöğlü (2010), investigaram a utilização de partículas trituradas de garrafas PET, com tamanhos entre 0 e 4 mm, como agregados leves para argamassas. O estudo consistiu na produção de dois grupos de amostragem, um contendo somente agregado de PET e o outro constituído de agregado natural e de PET em iguais proporções. Adicionalmente, utilizaram escória de alto forno como substituto parcial do cimento para gerar economia. Utilizaram uma relação água/cimento e PET/aglomerante de 0,45 e 0,50, respectivamente. Os ensaios provaram que todos os tipos de argamassas produzidas poderiam ser aplicadas para a produção de concreto estrutural leve. Portanto, concluíram que existia um potencial para a aplicação do PET triturado como agregado para a produção deste tipo de concreto.

Frigione (2010), estudou a substituição de 5% da massa do agregado miúdo natural por uma mesma massa de agregados produzidos a partir de resíduos de garrafas PET. As partículas do agregado de PET possuíam granulometria similar à da areia substituída. Amostras com diferentes quantidades de cimento e relação água/cimento foram produzidas. A caracterização reológica do concreto fresco e ensaios mecânicos no concreto endurecido em idades de 28 e 365 dias foram realizados nas amostras contendo PET e nas amostras contendo apenas agregado

natural para investigar a influência da substituição de PET no material. Ficou concluído que, para a quantidade de cimento (300 e 400 kg/m<sup>3</sup>) e relação água/cimento (0,45 e 0,55) analisadas, a substituição de 5% em massa de areia natural por partículas de PET, obtidas a partir da trituração de resíduos de PET, permite obter um concreto caracterizado pela mesma trabalhabilidade e sem segregação em comparação ao concreto de referência. A resistência à compressão e resistência à flexão do concreto com PET ficou pouco abaixo dos valores das amostras referenciais, mas com uma ductilidade um pouco maior.

Reis *et al.* (2011), estudaram a aplicação de partículas trituradas de PET em substituições parciais do agregado natural em argamassas. Porções de 5%, 10%, 15% e 20% da massa de agregado natural foi substituída pela mesma massa do PET triturado. Ficou concluído que a adição das partículas de PET contribui para a redução da massa específica das argamassas. Concluiu-se também que conforme a quantidade da substituição cresce, a ductilidade cresce também, fazendo com que o material apresente rupturas cada vez menos frágeis. Mostrou também que o módulo de elasticidade e a tenacidade à fratura são afetados adversamente pela inserção de qualquer quantidade de PET analisado, mas afirma que para algumas aplicações, como pavimentações, esta redução pode ser atrativa. Afirma ainda que o material produzido com PET possui alta absorção de energia, o que é importante para estruturas que sofrem com cargas dinâmicas e de impacto.

Ahmadinia *et al.* (2011), estudaram a incorporação de resíduos de garrafas PET trituradas em misturas asfálticas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA). Foram analisadas as inclusões de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, além da referência, sem PET. A quantidade apropriada de PET foi definida em 6% da massa de betume. Concluiu-se que conforme se introduzia mais PET na mistura, a Estabilidade Marshall crescia significativamente, mas decaiu após 6%. No entanto, a Fluência Marshall iniciou com uma queda, seguida por um crescimento conforme o aumento da quantidade de PET na mistura. Devido ao alto Quociente Marshall, o PET aumentou a rigidez da mistura, melhorando sua resistência às deformações permanentes. Independentemente da quantidade de PET incluído, adicionar PET à mistura aumenta o índice de vazios, reduzindo sua massa específica.

Reis e Carneiro (2012), utilizaram PET triturado de garrafas plásticas em substituições parciais de agregado natural em argamassas poliméricas para avaliar suas propriedades mecânicas. As porcentagens de 5%, 10%, 15% e 20% da massa

do agregado natural foram substituídas pela mesma massa de PET. Ensaio de flexão e compressão foram realizados para obtenção do comportamento mecânico do material. A introdução do resíduo de PET triturado contribui para reduzir a massa específica das argamassas poliméricas testadas e altera, de forma significativa, o comportamento do material sob esforços de flexão e compressão. Ambas as resistências, à compressão e à flexão, sofreram uma queda conforme o aumento do resíduo de PET na mistura. Já o módulo de elasticidade é afetado diferentemente, crescendo até certo limite de resíduo de PET adicionado, dependendo do aglomerante utilizado. E concluem que o material se torna mais dúctil e apresenta fraturas menos frágeis.

Ferreira, Brito e Saikia (2012), estudaram a influência das condições de cura nas propriedades mecânicas do concreto contendo diferentes substituições (7,5% e 15%) de agregados naturais por agregados produzidos com resíduo de PET em três formatos diferentes. A performance mecânica foi avaliada utilizando três ambientes de cura distintos, condições de laboratório, câmara úmida e cura ao ar livre em ambiente externo, para representar as condições diferentes ao que o concreto pode estar sujeito. Concluíram que ao aumentar o teor de PET substituído e o tamanho da partícula propicia quedas nas resistências à compressão e à flexão, e também à queda no módulo de elasticidade do concreto. No entanto, melhora sua resistência à abrasão. Para os concretos sem resíduos de PET, ambientes mais úmidos melhoram as propriedades mecânicas. A sensibilidade do concreto contendo resíduos de PET às condições de cura varia conforme a taxa de substituição e depende da propriedade estudada. Com taxas maiores de substituição, a cura ao ar livre, em ambiente externo, proporcionou os melhores resultados para as propriedades mais dependentes da ligação entre os agregados plásticos e a pasta de cimento.

Foti (2013), estudou a aplicação de fibras de resíduos de PET como reforço em elementos de concreto, sendo que as fibras foram obtidas apenas cortando garrafas plásticas em tiras, produzindo vigas de concreto com reforço das fibras de PET na região a ser tracionada por meio do ensaio de flexão de três pontos. E concluiu que a inserção das tiras confere ao concreto um comportamento mais dúctil e que o material possui uma alta aderência entre o concreto e o PET. E ainda descreveu possíveis aplicações das tiras de PET como reforços uni ou bidirecionais em lajes e pavimentos de concreto e em argamassas de assentamento para alvenarias.

Rahman e Wahab (2013), analisaram a substituição parcial de agregados miúdos por resíduos de PET obtidos de reciclagem em misturas asfálticas modificadas. Essas misturas modificadas consistiram na substituição de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% da massa de agregado miúdo da mistura, a fim de avaliar a rigidez do material e o seu comportamento em relação à deformação permanente. Concluíram que a mistura contendo 20% de PET pode ser capaz de resistir aos esforços de uma rodovia, evitando fissuras provenientes de sobrecargas e variação de temperatura, em função de seu comportamento menos rígido e maior capacidade de absorver esforços de deformação.

Duarte (2013), estudou a viabilidade da utilização de resíduos de construção civil (RCC) juntamente com o PET. Diversas dosagens de argamassa foram produzidas substituindo totalmente o agregado miúdo natural em proporções variáveis entre os dois resíduos. O autor concluiu que as argamassas produzidas são boas alternativas para a execução de artefatos decorativos, calçamento de passeios públicos, fabricação de guias e sarjetas, por exemplo. A dosagem composta por 80% de RCC e 20% de PET obteve alto índice de permeabilidade, mostrando um material com capacidade drenante e que pode ser explorado para áreas expostas ao intemperismo.

Ge *et al.* (2013), estudaram os efeitos que a graduação dos agregados, a relação areia/PET e as condições de cura implicam sobre as propriedades mecânicas de argamassas produzidas com PET reciclado. As variáveis foram subdivididas em quatro grupos distintos: graduação dos agregados; relação areia/PET, em massa; tempo de cura; temperatura de cura. Para a graduação dos agregados, duas graduações únicas (1,18 mm e 2,36 mm) e uma graduação contínua foi utilizada. A relação areia/PET usada nas misturas foi de 1:1, 2:1, 3:1 e 4:1. Em relação ao tempo de cura, as amostras foram curadas à temperatura ambiente e desmoldadas em 3 h, 6 h, 18 h, 24 h e 7 dias, respectivamente. Três temperaturas diferentes de cura foram analisadas: 100°C, 140°C e 180°C, onde as amostras foram colocadas em uma estufa preaquecida durante 30 minutos, logo após a mistura e moldagem, e depois colocadas em temperatura ambiente por um tempo total de 24 horas. Concluíram que à medida que a relação areia/PET aumentava, a densidade e a absorção de água aumentavam, mas afirmam que todas as argamassas contendo PET apresentaram baixo nível de absorção de água. Ainda concluíram que a areia contendo granulometria contínua apresentou maior resistência à compressão. Com o aumento da relação areia/PET a

resistência à compressão também aumentou, mas a relação de 4:1 possuía um espalhamento menor, o que dificultou a compactação da argamassa. Dentro de 3 horas, as amostras de relação 3:1 apresentaram mais de 90% de sua resistência à compressão aos 7 dias. Também concluíram que quanto maior a temperatura de cura, maior a quantidade de formação de cristais durante o processo de cura e maior a resistência à compressão da argamassa. A resistência à flexão apresentada pela argamassa de relação 3:1 foi superior àquela de relação 2:1, apresentando comportamento similar à resistência à compressão, portanto, concluíram que a relação areia/PET ideal era de 3:1.

Rahmani *et al.* (2013), analisaram os efeitos da substituição de 5%, 10% e 15% do volume de agregados miúdos naturais por agregados de PET reciclado nas propriedades do concreto fresco e endurecido, utilizando dois traços distintos no fator água/cimento: 0,42 e 0,54. Observaram que para a mesma relação água/cimento, a trabalhabilidade do concreto fresco diminuía à medida que aumentavam a quantidade de PET. Perceberam ainda que a substituição de 5% do agregado natural proporcionou um aumento na resistência à compressão de 8,86% e 11,97% para os a/c de 0,42 e 0,54, respectivamente. No entanto, ao se aumentar a substituição, a resistência à compressão diminuiu. Identificaram que as amostras contendo PET possuíam menor massa específica, menores resistências à flexão e menor módulo de elasticidade, além de deficiências na estrutura interna do concreto, causando quedas na resistência às tensões e na rigidez do material. Concluíram que, por sua baixa trabalhabilidade, a mistura contendo PET possui maior tendência à porosidade, causando redução na velocidade da onda ultrassônica, podendo ser aplicado como material de isolamento acústico. Ainda concluíram que os resultados analisados apresentaram padrões semelhantes para as duas relações água/cimento utilizadas.

Taaffe *et al.* (2014), sugeriram em seu estudo a execução de obras utilizando tijolos produzidos à base de garrafas de PET preenchidas com resíduos plásticos, denominados *Eco-bricks*, em alternativa ao tijolo convencional de alvenaria. Os resultados obtidos em ensaios de resistência mecânica, isolamento acústico e transmissão de luz foram satisfatórios, em comparação aos tijolos convencionais.

Saikia e Brito (2014), analisaram as ocorrências da adição do PET ao concreto em seu estado fresco e endurecido. O estudo consistiu da substituição de 5%, 10% e 15% do agregado natural, em volume, por PET de três granulometrias diferentes durante a dosagem. O ensaio de abatimento (*slump test*) apresentou um pequeno

aumento ao se adicionar o PET em formato esférico, mas apresentou uma redução quando se adicionou o PET em flocos, e foi reduzindo ainda mais conforme se aumentava o volume e a dimensão do material. Com o acréscimo do volume de PET substituído e o aumento da dimensão do material, o concreto apresentou queda nas propriedades mecânicas.

Akçaözoğlu e Ulu (2014), estudaram a utilização de agregado de resíduo de PET em argamassas produzidas através de escória álcali-ativada e mistura de escória/metacaulim. Os ativadores utilizados foram hidróxido de sódio em escamas e silicato de sódio líquido. Dezoito misturas diferentes foram preparadas para os ensaios. Nas misturas contendo PET, a escória foi substituída por PET nas porcentagens de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% em volume. A relação água/aglomerante e a relação agregado/aglomerante utilizada nas misturas foram de 0,50 e 2,75, respectivamente. A massa específica, resistência à compressão, resistência à flexão, velocidade de onda ultrassônica e absorção de água e porosidade das misturas foram avaliadas. Concluíram que todas as argamassas produzidas utilizando escória ativada alcalinamente obtiveram alta resistência mecânica em poucos dias. As argamassas de escória álcali-ativada contendo 60% e 80% de resíduo de PET puderam ser consideradas na categoria de concreto estrutural leve. Por outro lado, as argamassas produzidas com escória e metacaulim obtiveram desempenho abaixo da categoria. A massa específica, resistência à compressão, resistência à flexão e velocidade de onda ultrassônica das amostras apresentaram queda conforme o aumento da quantidade do resíduo de PET nas misturas. Já a absorção de água e porosidade das misturas aumentaram conforme a inclusão de PET.

Foti e Paparella (2014), estudaram a resistência ao impacto de placas de concreto reforçadas com fibras produzidas de PET reciclado. As fibras foram confeccionadas apenas cortando as garrafas plásticas e utilizadas como reforços das amostras substituindo as barras de aço. Os reforços foram dispostos lado a lado, espaçados de cerca de 3 cm, e colocados entre camadas de cerca de 2 cm de concreto, com uma camada perpendicular à anterior, para melhoria do desempenho, e distantes cerca de 2 cm das bordas das placas, evitando tensões iniciais e espaços vazios entre os reforços. Foi possível concluir que a presença dos reforços conferiu às placas um comportamento dúctil, fazendo com que não atingissem a ruptura completa, confirmando a melhoria na resistência ao impacto. Também observaram uma boa aderência das malhas de PET ao concreto, mesmo após a perda de

resistência da placa e a presença de fissuras, em virtude da ausência de deslocamentos e o colapso ter afetado todas as malhas ao mesmo tempo.

Silva, Brito e Veiga (2014), analisaram a aplicação de resíduos de PET em argamassas, e seus efeitos. Para isso, utilizaram a substituição de 5%, 10% e 15%, em volume, do agregado natural pelo resíduo plástico, e somente na fração entre 1 – 2 mm, utilizando dois tipos de PET, os *pellets*, em formato cúbico, e os *flakes*, flocos finos de forma mais irregular. Após analisar diversas propriedades como: consistência em estado fresco, massa específica em estado fresco e endurecido, homogeneidade da mistura, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à compressão e flexão e ensaios sobre permeabilidade, impacto e retenção de água, e concluíram que a substituição prejudica algumas propriedades ao passo que melhora algumas outras. Concluíram que a aderência entre o agregado plástico e a pasta de cimento não é tão forte quanto entre os agregados naturais e a pasta, em virtude das diferenças entre as superfícies dos materiais. Observaram uma perda de resistência mecânica, atribuída à ligação mais fraca entre o PET e a matriz cimentante, mas que pode não ser relevante ao se utilizar os compósitos para fins não estruturais. Observaram, ainda, que o material apresenta comportamento dúctil, apresenta falhas graduais à compressão. Perceberam uma redução no módulo de elasticidade e um aumento na capacidade de resistência aos choques, mostrando um material com maior capacidade de deformação e absorção de energia. Em virtude da maior porosidade do material, as argamassas de PET perceberam um aumento na absorção de água e na permeabilidade ao vapor, mas também observaram uma redução na retração, mostrando uma melhora na estabilidade dimensional do material.

Mazzoli, Monosi e Plescia (2015), estudaram a retração precoce do concreto com adições de fibras de diferentes materiais em relação ao concreto convencional. Utilizaram fibras de polipropileno, álcool polivinílico, polietileno e aço, adicionadas em 0,3% do volume da mistura de concreto e técnicas de análise digital de imagem para observação das fissuras. A conclusão foi de que as fibras de polipropileno e polietileno apresentaram os melhores desempenhos em relação à formação de fissuras e diminuição do comprimento e também na espessura das fissuras, que não ultrapassaram 0,3 mm em nenhum caso, para as duas fibras.

Ge, Yue e Sun (2015), estudaram a fabricação e propriedades de argamassas produzidas utilizando de tijolos de barro reciclados, para a produção de agregado miúdo, e PET reciclado. Utilizou-se a mistura entre cinza volante e PET, como

aglomerantes, e uma relação aglomerante/agregado de 1:1, 1:2 e 1:3. A cinza volante foi utilizada como substituição parcial do PET, em 5%, 10% e 15% em massa. O efeito da temperatura de cura também foi analisado, utilizando cura em temperatura ambiente, a 100°C, 120°C e 180°C. A produção da argamassa consistiu da mistura entre PET, agregado miúdo de tijolos reciclados e cinza volante, de acordo com as proporções escolhidas, e misturados uniformemente à mão. Essa mistura foi, então, levada à um forno, a 280°C, por 2 horas, tempo para o PET derreter completamente. Após o derretimento do PET, a mistura foi homogeneizada, colocada nos moldes e compactada, para a produção das amostras, e curada. Os resultados indicaram que a relação aglomerante/agregado tem grande influência na resistência, indicando a relação 1:2 como ideal. Quanto às condições de cura, as amostras curadas a 180°C durante 2 horas, apresentaram maior resistência à compressão. Apontaram também que após 4 horas, a resistência à compressão já era de 85% a resistência obtida em 28 dias. Relataram ainda que a argamassa possuía baixa absorção de água, 0,87%, e alta resistência à ataques químicos. A microscopia eletrônica de varredura mostrou que a argamassa possuía uma microestrutura uniforme, com porosidade muito baixa e que o agregado reciclado estava bem envolto em PET, e que a interface agregado-pasta não apresentava microfissuras.

Islam, Meherier e Islam (2016), estudaram os efeitos da substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos produzidos de PET em concretos com diferentes dosagens. O agregado de PET é obtido através do derretimento de partículas de PET e, após a secagem, a nova massa de PET é triturada no tamanho desejado. Foram analisadas três dosagens com diferentes relações água/cimento, 0,42; 0,48 e 0,57, e substituições de 20%, 30%, 40% e 50% do volume de agregados graúdos naturais por agregados de PET. As propriedades analisadas foram a resistência à compressão das amostras, a massa específica do material produzido, além da trabalhabilidade que os materiais apresentaram. Observaram que a trabalhabilidade do concreto com PET foi superior à do concreto regular, para o mesmo fator água/cimento. Também observaram uma redução de 4 a 10% na massa específica do material. Relataram também que é possível atingir uma alta resistência utilizando-se de baixo fator água/cimento e de menor quantidade de agregado reciclado. Ainda salientaram que a superfície do agregado de PET não proporciona uma boa ligação com a matriz cimentante.

Azhdarpour, Nikoudel e Taheri (2016) analisaram algumas propriedades do concreto contendo agregado miúdo de PET. A dosagem padrão utilizada foi de 1:2,5:2,5 e relação água/cimento de 50%. A partir desta dosagem padrão, os agregados finos foram sendo substituídos nas parcelas de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, em massa, por agregados de PET. Os concretos foram ensaiados, aos 3, 14 e 28 dias, quanto às suas resistências à compressão, à tração, obtida através da compressão diametral, à flexão, além do ensaio de onda ultrassônica. Observaram que a resistência à compressão e à flexão do concreto aumentou nas substituições de 5% e 10%. Observaram ainda que a substituição aumentou a deformabilidade do concreto e diminuiu seu módulo de elasticidade. Notaram também que a velocidade da onda sonora diminuiu conforme o aumento da taxa de PET no concreto. Perceberam um aumento na resistência à tração nas substituições entre 5% e 15%, de 26% até 34%, respectivamente. Também perceberam que, em todas as idades, quanto maior o tempo de cura, melhor o desempenho em relação à tração dos concretos contendo PET.

Nursyamsi e Zebua (2017) estudaram a utilização de resíduos de PET como agregado graúdo leve em concreto por meio da resistência à compressão. O agregado graúdo de PET foi obtido por meio do aquecimento das partículas, para produzir aglomeração, e a moagem após o resfriamento para obter diferentes granulometrias. Utilizaram o PET com três módulos de finura distintos: 6,01; 6,5 e 7,0. Concluíram que quanto menor o módulo de finura do agregado graúdo utilizado, menor a massa específica do concreto produzido, com 1741,23 kg/m<sup>3</sup> para o módulo de finura 6,01, 1784,69 para o módulo de finura 6,5 e 1801,48 para o módulo de finura 7,0. Obtiveram uma resistência à compressão de 16,57 MPa para o concreto utilizando o agregado graúdo de módulo de finura 7,0, 16,27 para o módulo de finura 6,5 e 13,89 para o módulo de finura 6,01, concluindo que o concreto produzido utilizando apenas agregados graúdos de PET possui resistência adequada para elementos de baixa responsabilidade estrutural.

Hama e Hilal (2017) investigaram o efeito da utilização de resíduos plásticos como substituição parcial do agregado miúdo nas características do concreto auto adensável em estado fresco, além da resistência à compressão aos 28 dias. Para este propósito foram produzidos diferentes traços de concreto, com água/cimento constante de 0,32 e consumo de aglomerante de 520 kg/m<sup>2</sup>, utilizando cinza volante como substituto parcial do cimento em 30% da massa de cimento e o uso de aditivo

superplastificante. Além do traço de controle produzido, foram produzidos traços com substituição de 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5% em volume do agregado miúdo natural por agregado reciclado de três diferentes granulometrias, definidos como agregado miúdo de resíduo plástico, passante pela peneira de 1 mm, agregado graúdo de resíduo plástico, passante pela peneira de 4 mm e retido na peneira de 1 mm, e uma mistura contendo 40% do agregado miúdo de resíduo plástico e 60% do agregado graúdo de resíduo plástico. Concluíram que os agregados de resíduos plásticos utilizados no trabalho poderiam ser utilizados como agregados miúdos para a produção de concreto auto adensável com resultados satisfatórios em relação às propriedades no estado fresco. Observaram, ainda, que a resistência à compressão de 35 MPa pode ser obtida facilmente com a utilização dos agregados de resíduos plásticos, salientando a queda na resistência causada conforme o aumento da porcentagem de agregados naturais substituída.

Pereira, Oliveira Junior e Fineza (2017) estudaram a inserção de fibras de PET reciclado no concreto, buscando otimizar as propriedades mecânicas de compressão e tração. Produziram fibras de PET, oriundo de garrafas descartadas, com uma espessura padrão de 3 mm e comprimentos variáveis entre: 7,9 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm e 22 mm a serem incorporados no concreto. Foram produzidos traços de concreto com diferentes porcentagens de fibras adicionadas, para cada comprimento adotado. Os corpos de prova produzidos foram curados em água saturada em cal até a idade de 28 dias, quando os ensaios foram realizados. Concluíram que a capacidade de carga do concreto produzido com fibras de PET é maior do que a do concreto convencional, em virtude da melhora no comportamento mecânico do concreto nos termos de compressão, tração e flexão. Concluíram que a porcentagem de fibras adicionadas afeta diretamente a resistência à compressão e à tração do concreto e que o comprimento das fibras atua diretamente na resistência à tração.

Em face dos trabalhos publicados é possível concluir que existe a preocupação com a destinação final do resíduo de PET. A variedade de estudos sugere a inovação tecnológica por meio da obtenção de novos materiais de construção com a utilização de resíduos industriais é crescente e a intenção de viabilizar sua aplicação na construção civil é marcante.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Desenvolveu-se um planejamento experimental para análise do comportamento do concreto com incorporação de resíduos de PET em pavers buscando atingir os objetivos propostos. Para tal, algumas propriedades destes concretos foram estudadas, com diferentes teores de substituição dos agregados naturais por resíduos de PET.

### **4.1 MATERIAIS**

#### **4.1.1 Cimento**

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento Portland CP-V-ARI da marca Itaú.

Para a produção dos concretos optou-se por utilizar o cimento Portland de alta resistência inicial – CP V ARI, fornecido pelo fabricante Itaú, normalizado pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Optou-se por este tipo de cimento por ser indicado para o preparo de concretos e argamassas para a produção de artefatos cimentícios em indústrias de pré-moldados, onde o local destinado à cura dos artefatos produzidos nem sempre tem dimensões apropriadas, e o uso do CP V ARI faz com que o tempo de cura seja reduzido.

#### **4.1.2 Agregado miúdo**

O agregado miúdo utilizado foi areia natural lavada.

#### **4.1.3 Agregado graúdo**

Utilizou-se agregado graúdo natural basáltico.

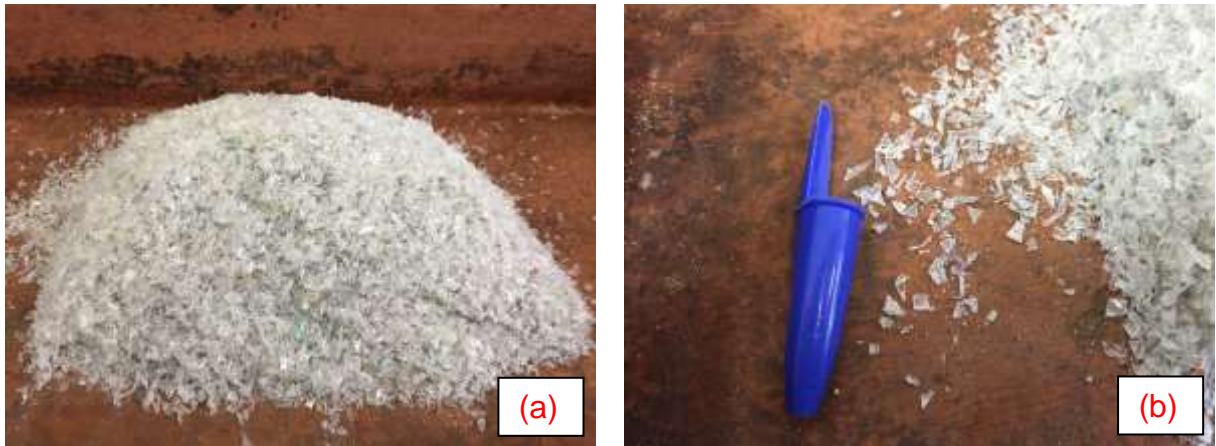
#### **4.1.4 Água de amassamento**

A água de amassamento utilizada foi oriunda da rede pública e fornecida pela Prefeitura Municipal de Ilha Solteira – SP.

#### 4.1.5 PET

O PET utilizado foi fornecido em formato de flocos pela empresa Global PET SA, localizada na cidade de São Carlos, SP. A Figura 25 apresenta e detalha o PET utilizado neste trabalho.

Figura 25 – (a) Flocos de PET utilizados; (b) Detalhe das dimensões dos flocos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 4.1.6 Superplastificante

Foi utilizado aditivo superplastificante Viscocrete 5800 FTN, da marca Sika, visando diminuir a relação a/c necessária em alguns traços, melhorando a resistência do concreto e permitindo melhor controle da trabalhabilidade.

### 4.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 4.2.1 Caracterização dos materiais

##### a) Caracterização do cimento

Os cimentos Portland destinados à fabricação de artefatos de cimento devem atender às especificações das normas brasileiras relacionadas aos limites mínimos de qualidade.

Sua composição típica é formada por clínquer (90% a 100%) e material carbonático (0% a 10%). A Tabela 17 apresenta as especificações do cimento, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) e os valores fornecidos pelo fabricante.

Tabela 17 – Propriedades físico-químicas do cimento utilizado.

<b>Ensaio Físicos</b>		
<b>CP V ARI</b>	<b>Especificações</b>	<b>Resultados</b>
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	0,28
Tempo de início de pega (h:min)	≥1	3:17
Tempo de fim de pega (h:min)	≤10	4:03
Finura na peneira # 200 (%)	≤6,0	0,10
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	≥14,0	23,3
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥24,0	37,7
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥34,0	44,4
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	-	52,3
<b>Ensaio Químicos</b>		
<b>CP V ARI</b>	<b>Especificações</b>	<b>Resultados</b>
Perda ao fogo (%)	≤6,5	3,51
Resíduo insolúvel (%)	≤3,5	0,80
Trióxido de enxofre - SO <sub>3</sub> (%)	≤4,5	3,10
Óxido de magnésio - MgO (%)	≤6,5	3,58

Fonte: Votorantim Cimentos S.A. (2018).

## **b) Caracterização do agregado miúdo**

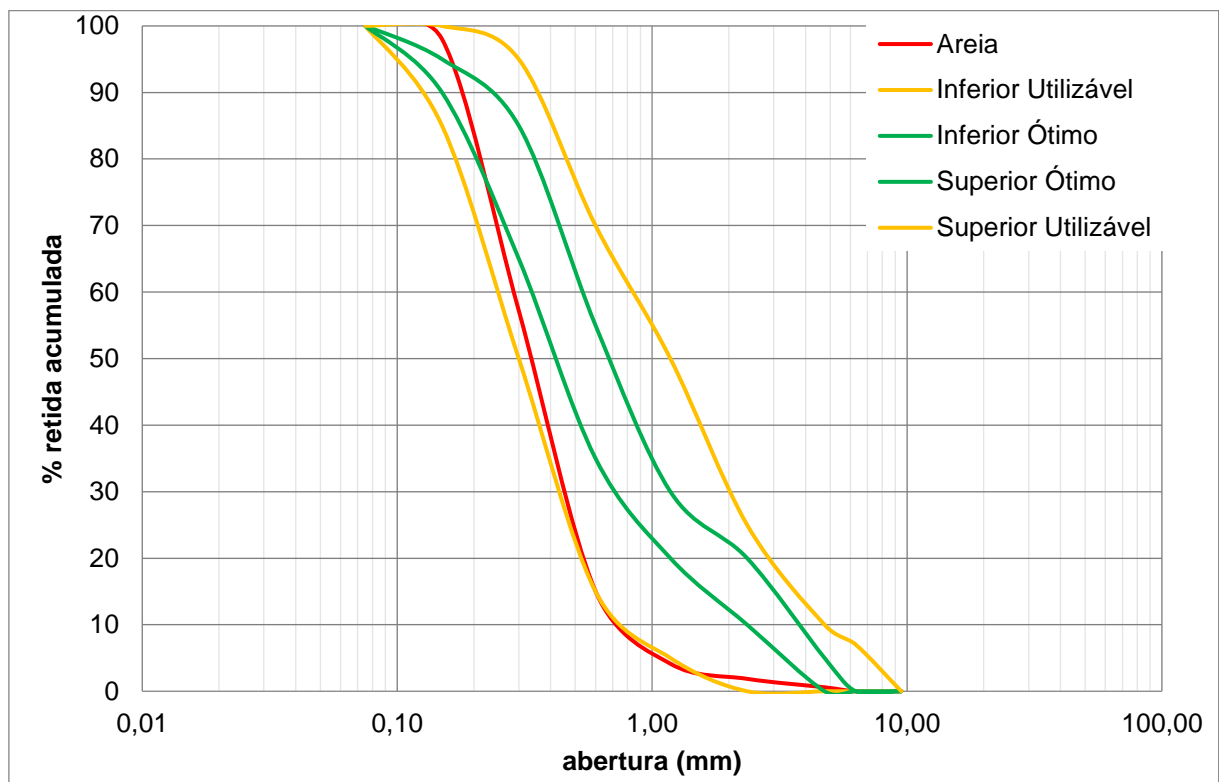
A composição granulométrica do agregado miúdo foi obtida conforme prescrito na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). A composição granulométrica pode ser visualizada na Tabela 18, com a curva granulométrica correspondente apresentada na Figura 26.

Tabela 18 – Composição granulométrica do agregado miúdo.

Ø Peneira (mm)	Massa retirada (g)	% Retida em cada peneira	% Retida acumulada
6,3	0	0	0
4,75	6	0,60	0,60
2,36	12,69	1,27	1,87
1,18	22,78	2,28	4,15
0,6	109,07	10,90	15,05
0,3	421,77	42,15	57,2
0,15	408,41	40,81	98,01
0,075	19,9	1,99	100,00
Total	1000,62	100,00	276,88

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 26 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A determinação da massa específica dos materiais é importante para a elaboração de dosagens e traços do concreto, pois conhecendo o seu resultado é possível calcular o consumo de materiais utilizados para a produção das misturas. A

massa específica do material pode ser definida como a massa do material por unidade de volume excluindo-se os poros permeáveis, e na massa unitária inclui-se os poros permeáveis.

Para a determinação da massa unitária e massa específica seguiram-se as prescrições da NBR NM 52 (ABNT, 2009a).

Na Tabela 19 são apresentados os índices de caracterização para o agregado miúdo utilizado.

Tabela 19 – Índices de caracterização do agregado miúdo.

<b>Diâmetro máximo (mm)</b>	<b>Módulo de finura</b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Pulverulento (%)</b>
1,18	2,77	1,64	2,65	0,36	0,44

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### **c) Caracterização do agregado graúdo**

Os agregados cujos grãos ficam retidos, em sua maior parte, na peneira com abertura de 4,75 mm são classificados como agregado graúdo.

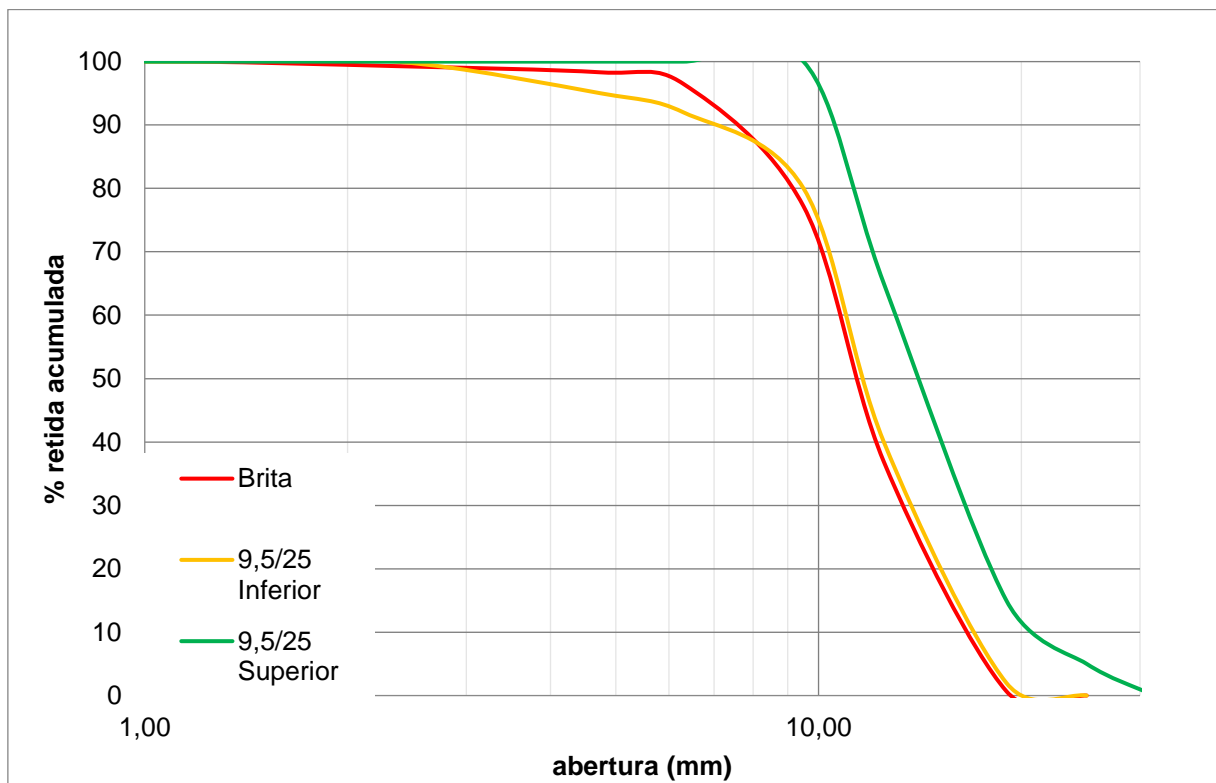
A composição granulométrica do agregado graúdo foi obtida conforme prescrito na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). A composição granulométrica pode ser visualizada na Tabela 20, com a curva granulométrica correspondente apresentada na Figura 27.

Tabela 20 – Composição granulométrica do agregado graúdo.

Ø Peneira (mm)	Massa retirada (g)	% Retida em cada peneira	% Retida acumulada
25	0	0	0
19	21,83	0,69	0,69
12,5	1150,3	36,19	36,88
9,5	1280,4	40,29	77,17
6,3	614,2	19,32	96,49
4,75	57,75	1,82	98,31
2,36	31,12	0,98	99,29
1,18	22,68	0,71	100,00
Total	3178,28	100,00	508,83

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 27 – Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para a determinação da massa unitária e massa específica seguiram-se as prescrições da NBR NM 53 (ABNT, 2009b).

Na Tabela 21 são apresentados os índices de caracterização para o agregado graúdo utilizado.

Tabela 21 – Índices de caracterização do agregado graúdo.

<b>Diâmetro máximo (mm)</b>	<b>Módulo de finura</b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Pulverulento (%)</b>
19	5,09	1,39	2,93	1,19	1,23

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O diâmetro máximo característico do agregado graúdo é de 19 mm, o que caracteriza o material como sendo brita 9,5/25 de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009c).

#### **d) Caracterização da água de amassamento**

Segundo a NBR 15900-1 (ABNT, 2009d) a água de abastecimento público é considerada adequada para a produção de concreto e não necessita ser ensaiada.

#### **e) Caracterização do PET**

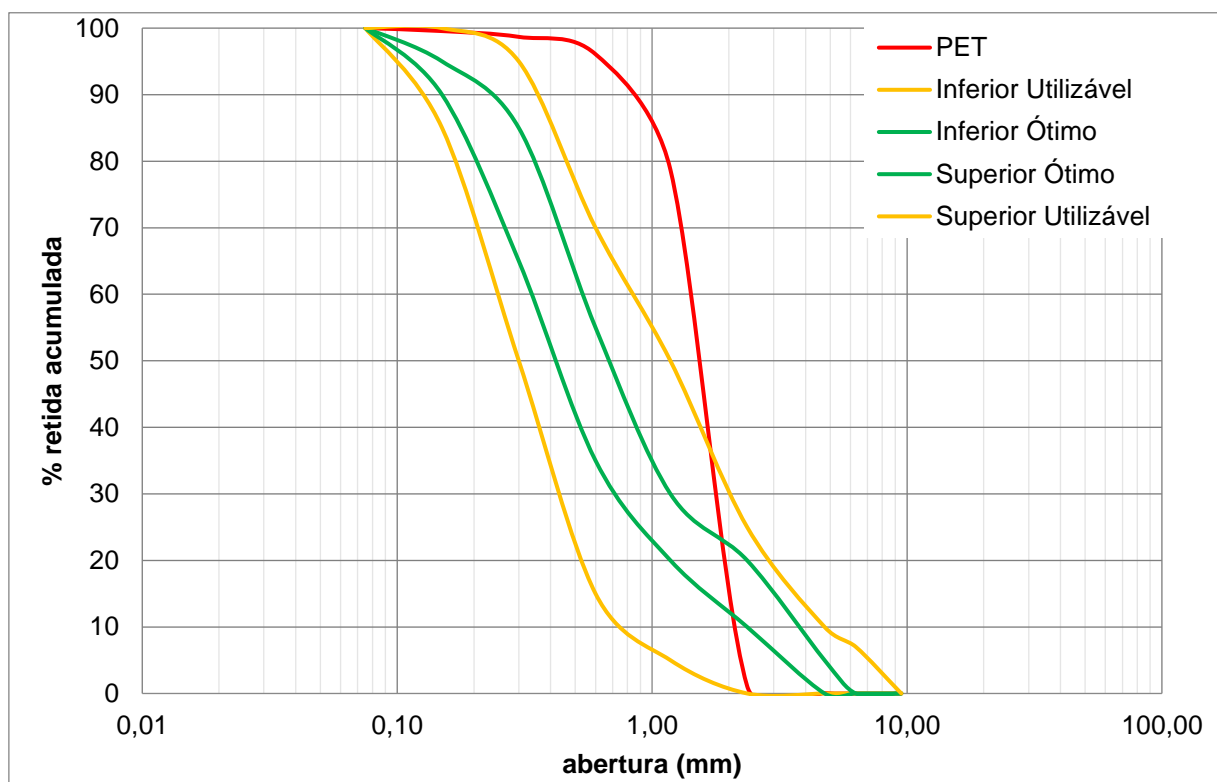
A composição granulométrica do PET foi obtida utilizando como referência a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A composição granulométrica pode ser visualizada na Tabela 22, com a curva granulométrica correspondente apresentada na Figura 28.

Tabela 22 – Composição granulométrica do PET.

Ø Peneira (mm)	Massa retirada (g)	% Retida em cada peneira	% Retida acumulada
6,3	0	0	0
4,75	0,7	0,07	0,07
2,36	10,7	1,05	1,12
1,18	789,5	77,61	78,73
0,6	176,5	17,35	96,08
0,3	26,5	2,60	98,68
0,15	8,9	0,87	99,56
0,075	4,5	0,44	100,00
Total	1017,2	100,00	374,24

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 28 – Curva granulométrica do PET.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Analisando a granulometria do PET, apresentada na Tabela 22 e Figura 28, verifica-se que o módulo de finura fica acima dos valores normalmente encontrados nos agregados naturais. Isso se deve às diferenças do PET em relação ao agregado

natural no que diz respeito à distribuição granulométrica, formato e textura das partículas, proporcionados pelo processo de reciclagem pelo qual o material foi submetido. Processo este que faz com que a granulometria obtida apresente alguma continuidade, mas com um tamanho de partícula se sobressaindo em relação aos demais tamanhos. Considera-se que esta propriedade do PET deve influenciar diretamente os resultados obtidos.

Para a determinação da massa unitária do PET seguiram-se as prescrições da NBR NM 52 (ABNT, 2009a). Na determinação da massa específica utilizou-se o ensaio conhecido como “Método do Frasco Picnômetro”. Os procedimentos adotados neste ensaio serão descritos na sequência:

- pesou-se uma quantidade dos resíduos de PET em estado natural, denominando a massa “A” (g);
- pesou-se o picnômetro + água denominando a massa “B” (g), sendo a água colocada até a altura da marca estabelecida no picnômetro;
- retirou-se certa quantidade de água do picnômetro e introduziram-se os resíduos no interior do picnômetro contendo a água;
- durante 5 minutos retirou-se todo o vazio do conjunto picnômetro + água + resíduos em uma bomba a vácuo, em seguida foi colocado o álcool neste conjunto até a marca estabelecida no picnômetro, pesando em seguida e determinando dessa maneira a massa “C” (g);
- a Equação 4.1 foi utilizada para determinar a massa específica ( $\gamma_{ab}$ ), em g/cm<sup>3</sup>:

$$\gamma_{ab} = \frac{A}{A+B-C} \quad (4.1)$$

Na Tabela 23 são apresentados os índices de caracterização para o PET utilizado.

Tabela 23 – Índices de caracterização do PET.

<b>Diâmetro máximo (mm)</b>	<b>Módulo de finura</b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção (%)</b>
2,36	3,74	0,43	1,35	0,10

NOTA: Absorção correspondente à retenção de água na superfície da partícula de PET

Os resultados da Tabela 23 mostram que a massa específica do PET utilizado pode ser considerada baixa, sendo que suas massas específica e unitária representam cerca de 50% e 26% do valor apresentado pelo agregado miúdo natural e sua massa unitária apresenta um valor 68,15% menor em relação à sua massa específica. A determinação da massa específica é importante para o proporcionamento dos materiais, visto que a substituição foi realizada em volume, pois conhecendo seus valores é possível calcular o consumo de materiais utilizados para a produção das misturas.

#### f) Caracterização do superplastificante

O superplastificante foi utilizado na concentração de 0,4% em relação à massa de cimento somente nos concretos com substituição parcial de brita por PET. Na Tabela 24 estão apresentados os dados técnicos fornecidos pelo fabricante.

Tabela 24 – Dados do superplastificante.

<b>Aspecto/cor</b>	Líquido marrom claro
<b>Composição básica</b>	Solução de policarboxilatos em meio aquoso
<b>Densidade</b>	1,07 kg ± 0,02 kg/litro
<b>pH</b>	4,5 ± 1,0

Fonte: Sika S.A. (2018).

#### 4.2.2 Planejamento dos ensaios

As variáveis são aspectos que permitem analisar as características de qualidade exigidas. No caso dos pavers deseja-se que os mesmos apresentem bom desempenho e sejam duráveis.

Considerando que o objetivo geral deste trabalho foi avaliar algumas das características dos pavers produzidos com PET, foram definidas as variáveis que caracterizaram o seu desempenho técnico, e estão abaixo relacionadas:

- consistência;
- massa específica em estado fresco e endurecido;
- teor de ar incorporado;

- absorção de água;
- resistência à compressão;
- resistência à tração por compressão diametral;
- resistência ao impacto;
- ensaios de microscopia eletrônica de varredura

O plano experimental inclui a produção, em laboratório, de 10 traços de concreto, em que serão substituídos parcialmente os agregados graúdos e miúdos por PET:

- **Controle (REF) (0-0)**→concreto convencional (sem PET);
- **5%A (5-0)**→concreto com 5% de substituição (volume) de areia por PET;
- **10%A (10-0)**→concreto com 10% de substituição (volume) de areia por PET;
- **15%A (15-0)**→concreto com 15% de substituição (volume) de areia por PET;
- **20%A (20-0)**→concreto com 20% de substituição (volume) de areia por PET;
- **5%B (0-5)**→concreto com 5% de substituição (volume) de brita por PET;
- **10%B (0-10)**→concreto com 10% de substituição (volume) de brita por PET;
- **15%B (0-15)**→concreto com 15% de substituição (volume) de brita por PET;
- **20%B (0-20)**→concreto com 20% de substituição (volume) de brita por PET;
- **5%AB (5-5)**→concreto com 10% de substituição (volume) de areia e brita por PET;

Na Tabela 25 está apresentada uma programação esquemática envolvendo todos os parâmetros de execução dos experimentos, bem como o número de corpos de prova que foram fabricados e utilizados para cada ensaio.

Tabela 25 – Variáveis analisadas no programa experimental e quantidade de corpos de prova ensaiados.

Nº de traços	Ensaio realizado por traço	Idade (dias)	Nº de corpos de prova	Nº total de corpos de prova (por traço)
10	Consistência	0	-	30
	Massa específica	0	4	
	Ar incorporado	0	4	
	Absorção de água	28	6	
	Resistência à compressão	28	10	
	Resistência ao impacto	28	6	
	Resistência à tração por compressão	28	4	
	Microscopia eletrônica de varredura	28	-	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 4.2.3 Produção dos pavers

A produção das amostras se deu da mesma maneira para todos os compósitos, utilizando a betoneira como misturador. Para a produção dos pavers, utilizou-se a fôrma prismática de base retangular de 10 centímetros por 20 centímetros e 6 centímetros de altura, e corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 centímetros e 20 centímetros de altura.

O procedimento adotado para o lançamento dos materiais na betoneira foi o seguinte:

- a)** 100% dos agregados naturais graúdos e miúdos e 80% da água foram colocados na betoneira, que foi ligada por 1 minuto;
- b)** em seguida, com a betoneira desligada, acrescentou-se 100% do cimento e o restante da água; ligou-se a betoneira por mais 3 minutos;
- c)** na sequência, com a betoneira ligada, acrescentou-se o PET em pequenas quantidades ao longo de 1 minuto;
- d)** passado este tempo, a betoneira permaneceu desligada por 3 minutos; durante este intervalo fez-se a limpeza das pás da betoneira;

e) finalmente, ligou-se a betoneira por mais 3 minutos.

A relação a/c utilizada neste trabalho foi determinada através da consistência obtida em todos os traços moldados. Foram testadas as relações a/c de 0,49; 0,50; 0,51; 0,52 e 0,53. A relação a/c de 0,51 foi escolhida por apresentar resultados satisfatórios em todos os traços, para todas as substituições, sem que o concreto ficasse muito fluido ou muito seco em todas as condições.

O método de proporcionamento dos materiais adotado permitiu o ajuste das quantidades dos materiais em relação ao tamanho dos agregados, fazendo com que o concreto apresentasse boa aparência superficial, evitando o surgimento de fissuras precoces e o perfeito envolvimento do agregado graúdo pela argamassa. Utilizando-se o método de proporcionamento dos materiais proposto por Helene e Terzian (1992), chegou-se em um teor de argamassa ideal, para os materiais utilizados e para a finalidade necessária, de 57%, o que leva a uma traço de 1:2,42:2,58 em partes de cimento : agregado miúdo : agregado graúdo.

As porcentagens de substituição adotadas, 5%, 10%, 15% e 20% do volume dos agregados, foram escolhidas com base no referencial teórico, em que a maioria, se não todos os trabalhos, se concentra nessa faixa de substituição.

Logo após a mistura, o concreto teve sua consistência analisada e colocado nas fôrmas de pavers para os ensaios de absorção de água, resistência à compressão e resistência ao impacto; e nas fôrmas cilíndricas para a determinação da massa específica nos estados fresco e endurecido. Todas as fôrmas tiveram seu interior coberto por uma fina camada de óleo mineral para que o material não fosse danificado durante a desforma.

O adensamento das amostras foi realizado utilizando uma mesa vibratória, para que houvesse um melhor adensamento do material o processo se encerrava quando a saída de ar diminuía. Após o adensamento das amostras, as mesmas foram protegidas por filme plástico e colocadas em local protegido.

As amostras foram retiradas das fôrmas 24 horas após a moldagem. Após a desforma, as amostras foram colocadas em câmara úmida com temperatura próxima a 25°C e umidade relativa do ar superior a 95%. As amostras permaneceram na câmara úmida durante 21 dias, permanecendo por mais 7 dias em cura ambiente para realização dos ensaios. Este procedimento foi adotado em face do tipo de cimento utilizado, que apresenta maior crescimento de resistência nos primeiros dias de cura.

A Tabela 26 apresenta os traços em massa utilizados neste trabalho para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto. Todos os traços produzidos tiveram como origem o mesmo traço intitulado controle, com consumo de cimento de 371,62 kg/m<sup>3</sup> e fator água/cimento de 0,51, resultando em consumo igual a 189,53 kg/m<sup>3</sup> de água.

Tabela 26 – Traços com resíduos de PET utilizadas para a produção dos pavers.

Traço	Resíduos % Volume	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Brita (kg/m <sup>3</sup> )	PET (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )
REF	-	899,32	958,78	-	-
5%A	5	854,35	958,78	22,91	-
10%A	10	809,39	958,78	45,81	-
15%A	15	764,422	958,78	68,72	-
20%A	20	719,456	958,78	91,63	-
5%AB	10	854,35	910,84	45,00	-
5%B	5	899,32	910,84	22,09	1,49
10%B	10	899,32	862,90	44,18	1,49
15%B	15	899,32	814,96	66,26	1,49
20%B	20	899,32	767,02	88,35	1,49

NOTA: Todos os traços tiveram o mesmo consumo de cimento: 371,62 kg/m<sup>3</sup> e mesmo consumo de água: 189,53 kg/m<sup>3</sup>, seguindo a base estabelecida pelo traço de controle.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 4.2.4 Determinação da consistência

A determinação da consistência foi realizada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, conhecido como *slump test*, que tem seu procedimento definido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

A haste metálica, o molde e a placa foram umedecidos antes de iniciar o ensaio. Após colocar o molde sobre a placa de base, seu interior foi preenchido com concreto até completar 1/3 de sua altura e 25 golpes foram aplicados com a haste, de forma aleatória, a fim de compactar a camada de concreto. O procedimento foi repetido para 2/3 da altura e para o terço final, tomando cuidado para que os golpes aplicados não penetrassem as camadas anteriores. Após a devida compactação das camadas, o molde foi retirado de forma sutil e constante, entre 5 e 10 segundos, de

forma a evitar a inserção de forças exteriores no ensaio, e a altura da amostra resultante foi comparada com a altura do molde em três pontos distintos.

O valor apresentado como resultado final do ensaio será a média aritmética obtida pelas três medidas tomadas, para cada um dos traços produzidos.

#### **4.2.5 Determinação da massa específica em estado fresco e endurecido**

A determinação da massa específica do concreto em estado fresco e endurecido foi realizada utilizando um ensaio próprio, não normatizado, adaptado de Helene e Terzian (1992).

Após a mistura do concreto, foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos, de 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura, utilizando-se de adensamento por mesa vibratória, assim como para os pavers.

O molde utilizado teve sua massa aferida previamente, e a massa total do molde preenchido com concreto fresco foi aferida. Após o procedimento de desforma, a massa do concreto endurecido foi aferida.

A massa específica do concreto fresco e endurecido é dada pela Equação 4.2:

$$\gamma_c = \frac{\text{massa de concreto}}{\text{volume do corpo de prova}} \quad (4.2)$$

O valor apresentado como resultado final do ensaio foi a média aritmética obtida pela aferição da massa específica nos estados fresco e endurecido para 4 corpos de prova cilíndricos por traço produzido.

#### **4.2.6 Determinação do teor de ar incorporado**

O teor de incorporação de ar no concreto indica a quantidade de espaços vazios presentes no material. Quanto maior o teor de incorporação de ar, maior a quantidade de espaços vazios, permitindo que as propriedades mecânicas e características técnicas sejam melhores.

A determinação do teor de ar incorporado foi realizada segundo o método gravimétrico, de acordo com as prescrições da NBR 9833 (ABNT, 2008). Este método foi adotado em razão da impossibilidade de realização do ensaio segundo o

método pressométrico, em virtude da baixa trabalhabilidade apresentada por alguns traços produzidos.

O método gravimétrico consiste, basicamente, na razão percentual entre a massa específica do concreto fresco ( $\gamma_{cf}$ ) e a massa específica do concreto fresco sem considerar o volume de ar aprisionado ( $\gamma_{ca}$ ), segundo a Equação 4.3:

$$\text{Teor de ar (\%)} = \left(1 - \frac{\gamma_{cf}}{\gamma_{ca}}\right) \times 100 \quad (4.3)$$

O valor apresentado como resultado final do ensaio foi a média aritmética obtida dos resultados de incorporação de ar de quatro corpos de prova por traço produzido.

#### 4.2.7 Determinação da absorção de água

A absorção de água indica o nível de porosidade de uma peça. Quanto menor a porosidade de uma peça, menor a quantidade de água que ela absorve, conseqüentemente maiores poderão ser suas resistências mecânicas e suas características técnicas. Este ensaio foi realizado com o objetivo de analisar essa propriedade com as demais características dos pavers produzidos.

A determinação da absorção de água foi realizada de acordo com as prescrições do Anexo B da NBR 9781 (ABNT, 2013a).

Os pavers foram imersos em água por 24 horas. Após a imersão, as peças foram pesadas na condição saturada com superfície seca, obtida removendo a água superficial das peças. O procedimento foi repetido a cada duas horas, até que as peças apresentassem constância de massa, anotando-se a massa saturada (M2).

Posteriormente, os pavers saturados foram levados à estufa com temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 horas. Após a secagem, as peças foram pesadas na condição seca em estufa. O procedimento foi repetido a cada duas horas, até que as peças apresentassem constância de massa, anotando-se a massa seca (M1). A disposição dos pavers na estufa e durante a imersão está representada na Figura 29.

O valor da absorção de água de cada peça, em porcentagem, é calculado utilizando-se a Equação 4.4:

$$A = \frac{M2 - M1}{M1} \times 100 \quad (4.4)$$

O valor apresentado como resultado final do ensaio foi a média aritmética obtida dos resultados de absorção de 6 pavers por traço produzido.

Figura 29 – (a) Disposição dos pavers na estufa; (b) Pavers imersos em água.



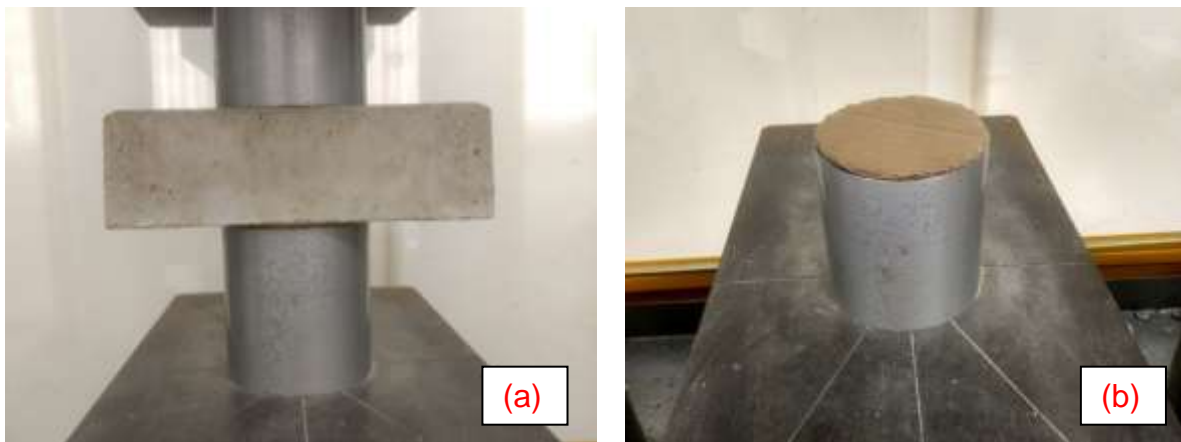
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 4.2.8 Determinação da resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão é referenciado na maioria das normas, nacionais e internacionais, como um dos principais parâmetros na avaliação do desempenho dos pavers, o que justifica a realização do ensaio.

Os pavers foram ensaiados de acordo com o Anexo A da NBR 9781 (ABNT, 2013a). Para a realização deste ensaio adotou-se o método de capeamento utilizado por Fioriti (2007), que consiste na substituição do capeamento retificado, recomendado pela norma, por chapas de papelão superposto nas faces onde os carregamentos são aplicados, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 – (a) Paver submetido ao carregamento; (b) Detalhe das chapas de papelão na superfície das placas auxiliares.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os pavers foram ensaiados de modo que a carga foi aplicada na direção do esforço que a peça deve suportar durante sua utilização. O alinhamento do paver na prensa foi realizado de modo que coincidissem com o alinhamento do centro de carga das placas auxiliares. Os comandos da prensa foram controlados de forma que a tensão aplicada, calculada em relação à área bruta, foi aumentando progressivamente em uma razão de  $550 \pm 200$  kPa/segundo.

Foram ensaiados 10 exemplares por traço de concreto, obedecendo a idade definida de 28 dias.

A resistência de cada paver ( $f_{pi}$ ), expressa em MPa, foi obtida utilizando-se a Equação 4.5:

$$f_{pi} = \frac{\text{carga (N)}}{\text{área (mm}^2)} \times 0,95 \text{ (fator multiplicativo p)} \quad (4.5)$$

No cálculo da resistência característica à compressão ( $f_{pk,est}$ ), em MPa, utilizou-se a Equação 4.6 apresentada no subitem A.5 do Anexo A, conforme determina a NBR 9781 (ABNT, 2013a).

$$f_{pk,est} = f_p - t \times s \quad (4.6)$$

sendo  $s$ , o desvio-padrão da amostra, calculado por meio da Equação 4.7:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_p - f_{pi})^2}{n-1}} \quad (4.7)$$

e  $t$ , o coeficiente de Student, fornecido na Tabela A.2 do Anexo A, em função do tamanho da amostra. Para amostras correspondentes a 10 peças, o valor de  $t$  é:

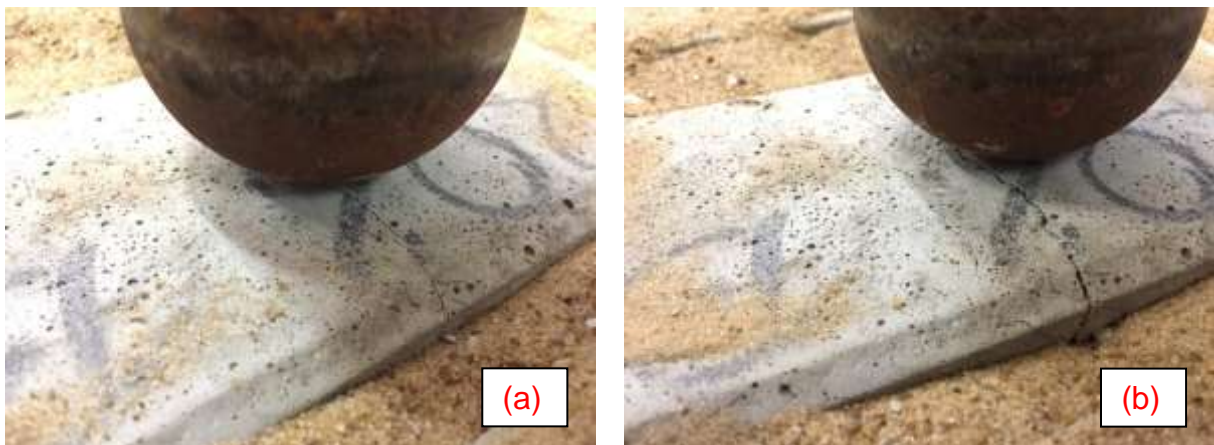
0,883. O resultado final apresentado é o próprio  $f_{pk,est}$ , calculado conforme as Equações 4.5 a 4.7.

#### 4.2.9 Determinação da resistência ao impacto

O ensaio de resistência ao impacto, normatizado pela NBR 15575-3 (ABNT, 2013b), busca avaliar a resistência ao impacto de pisos cerâmicos e será utilizado como referência para avaliação desta propriedade dos pavers em virtude da inexistência de ensaio normatizado na NBR 9781 (ABNT, 2013a) para esta avaliação. O ensaio será realizado conforme o proposto por Fioriti (2007).

O ensaio consiste na queda livre de uma esfera metálica de massa 1,065 kg, através de um tubo guia com perfurações transversais distanciadas de 10 cm, onde, por meio da inserção e retirada de um pino metálico induz-se a esfera à queda livre. A esfera é ligada a um fio leve apoiado sobre uma roldana, possibilitando sua suspensão. O procedimento se inicia com a contenção e o nivelamento do paver na caixa de areia localizada abaixo do tubo guia. Os carregamentos de impacto se iniciam com uma altura de 0,30 m da superfície do paver, sendo incrementadas por 0,10 m até a altura limite de 2,20 m. Ao longo das repetições observou-se o surgimento de fissuras, continuando-se o ensaio até o seccionamento total do paver por meio da energia de impacto aplicada, como mostrado na Figura 31. Todo o aparato utilizado para a realização do ensaio é apresentado na Figura 32.

Figura 31 – (a) Início do surgimento de fissuras; (b) Fissura indicando o seccionamento total do paver.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Fioriti (2007) destaca que a observação das fissuras fica limitada à face superior do paver em razão da impossibilidade de se retirar e reassentar o paver sem que haja interferência externa no ensaio, ressaltando que a contenção proporcionada pela areia é suficiente para que o paver não se desloque durante o ensaio.

Figura 32 – Aparato utilizado para o ensaio de resistência ao impacto.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O procedimento apresentado, adaptado da extinta norma NBR 9454 (ABNT, 1986), utiliza premissas de simplificação do problema, desprezando o atrito entre a esfera e o tubo e as eventuais perdas de energia ocorrentes.

A partir da metodologia descrita, Fioriti (2007) calcula a energia de cada impacto aplicado, em J, como sendo a energia potencial gravitacional relativa à cada altura de queda realizada, através da Equação 4.8.

$$E = m \times g \times h \quad (4.8)$$

onde  $m$  corresponde à massa da esfera (kg),  $g$  corresponde à aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ) e  $h$  corresponde à altura de queda livre (m).

Os resultados apresentados foram a média aritmética dos resultados obtidos dos ensaios de 6 pavers por traço, considerando a somatória total de energia necessária ao seccionamento do paver.

#### **4.2.10 Determinação da resistência à tração por compressão diametral**

Como já dito no item 2.4.3 deste trabalho, a incidência de falha mecânica em pavimentos intertravados em virtude da resistência insuficiente dos pavers é extremamente pequena (PEARSON; SHACKEL, 2003). Os comentários tecidos no item 2.4.2 sobre algumas normas internacionais apontam uma tendência de utilização de ensaios de flexão e/ou de tração por compressão das peças para determinação da resistência, visto que este comportamento se assemelha mais com a realidade do pavimento em serviço.

Como a norma brasileira não possui orientações para a realização deste ensaio em pavers, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011b), utilizando corpos de prova cilíndricos e um dispositivo auxiliar de aço e tiras de madeira, conforme mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Dispositivo para ensaio de compressão diametral.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A resistência à tração por compressão diametral, em MPa, é calculada pela Equação 4.9.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times l} \quad (4.9)$$

onde  $F$  corresponde à força máxima obtida no ensaio (N),  $d$  corresponde ao diâmetro do corpo de prova (mm) e  $l$  corresponde ao comprimento do corpo de prova (mm).

O valor apresentado como resultado final do ensaio foi a média aritmética obtida dos resultados de 4 corpos de prova por traço produzido.

#### 4.2.11 Microscopia eletrônica de varredura

O microscópio eletrônico de varredura foi utilizado para verificar a morfologia e a composição da microestrutura dos concretos produzidos com substituição parcial do volume dos agregados por resíduos de PET.

Os corpos de prova foram coletados após 28 dias de idade e preparados para submissão à microscopia. Primeiramente, fragmentos do concreto, provenientes do ensaio de resistência à compressão, foram coletados e imersos em acetona durante

uma hora, processo realizado para interrupção da hidratação do cimento. Logo após a interrupção da hidratação, os fragmentos foram retirados da imersão e colocados em estufa durante duas horas, para que a acetona utilizada evaporasse.

Interrompida a hidratação do cimento, os fragmentos foram preparados para a microscopia. Sendo os materiais constituintes do concreto não condutores de eletricidade, foi necessário o recobrimento por uma fina camada de ouro para que o feixe de elétrons incidente no material possa ser conduzido de maneira a produzir corretamente as imagens geradas pelo ensaio.

Foram utilizados fragmentos dos traços 5%A, 10%A e 15%A, contendo 5%, 10% e 15% de substituição do agregado miúdo por PET, em volume.

## 5 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados de ensaios realizados com as respectivas discussões e análises prévias para cada propriedade avaliada, considerando o tipo de substituição, areia e brita, e a porcentagem da substituição realizada, seguindo o planejamento experimental:

- 1) Trabalhabilidade do concreto;
- 2) Massa específica do concreto no estado fresco e endurecido;
- 3) Teor de ar incorporado pelo concreto;
- 4) Absorção de água dos pavers;
- 5) Resistência à compressão dos pavers;
- 6) Resistência ao impacto dos pavers;
- 7) Resistência à tração por compressão diametral do concreto;
- 8) Microscopia eletrônica de varredura do concreto.

### 5.1 TRABALHABILIDADE DO CONCRETO

A trabalhabilidade do concreto, avaliada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, é uma das propriedades mais importantes do concreto no estado fresco. Um valor de abatimento muito baixo indica a necessidade de uma energia de vibração muito elevada, podendo ocasionar falta de homogeneidade no material e vazios oriundos da deficiência de adensamento. No estudo da trabalhabilidade do concreto com resíduos de PET, geralmente a incorporação desses resíduos faz com que esta propriedade seja influenciada negativamente.

Como mencionado no capítulo 4, subitem 4.2.3, esta propriedade influenciou diretamente a escolha do fator água/cimento utilizado, de forma que os concretos produzidos apresentassem resultados satisfatórios em todos os traços produzidos, permitindo o adensamento adequado. O ensaio de abatimento de tronco de cone foi realizado conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

A trabalhabilidade determina a facilidade com que o concreto pode ser manipulado sem segregação nociva (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Para Neville (1997), um concreto é trabalhável quando pode ser adensado com facilidade, mas complementa que esta definição é muito simples para uma propriedade tão importante para o concreto. A Tabela 27 apresenta os valores de abatimento encontrados.

Tabela 27 – Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone.

<b>Traço</b>	<b>Material substituído</b>	<b>Abatimento (cm)</b>
REF	-	5,7
5%A	Areia	4,7
10%A	Areia	5,7
15%A	Areia	5,0
20%A	Areia	4,5
5%AB	Areia/Brita	1,5
5%B	Brita	5,0
10%B	Brita	5,5
15%B	Brita	6,0
20%B	Brita	6,5

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

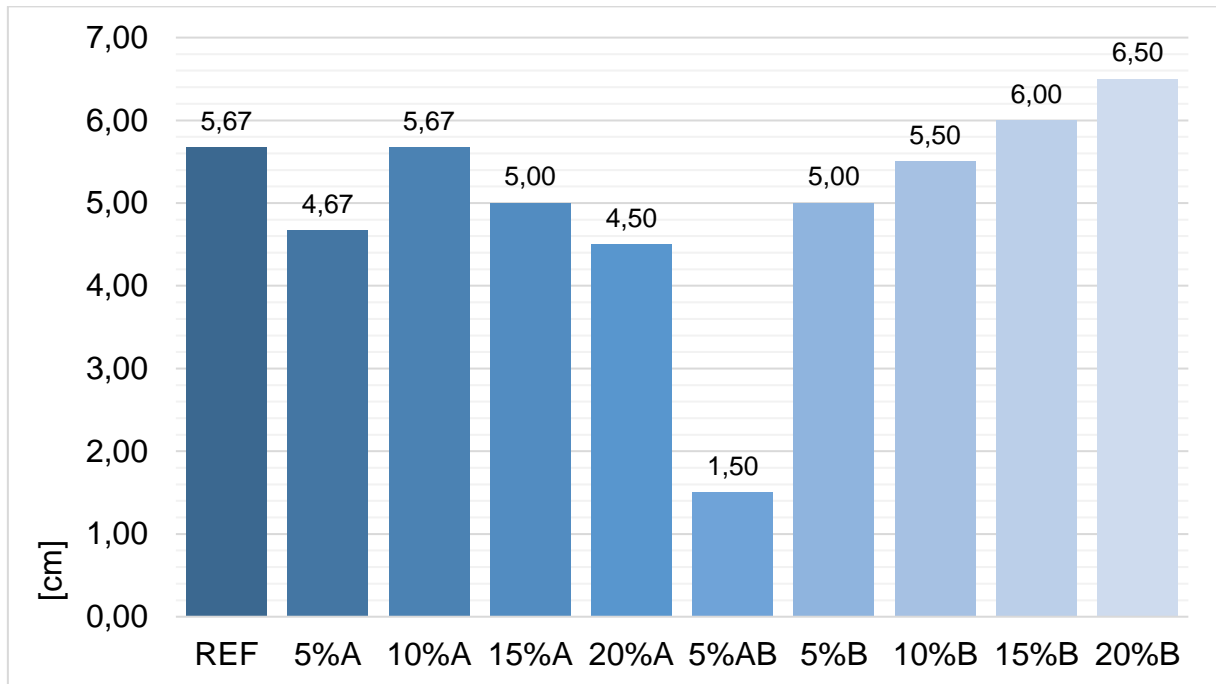
Por meio da avaliação dos resultados da Tabela 27, observa-se que o aumento dos percentuais de resíduos no concreto resulta em uma queda no abatimento dos compostos em que houve substituição de areia. Esta queda não foi observada nos compostos com apenas substituição de brita em virtude da utilização de aditivo superplastificante na mistura. A Figura 34 apresenta graficamente os resultados do abatimento apresentado pelos compostos. A Tabela 28 apresenta uma relação proposta por Neville (1997) entre o abatimento obtido e a trabalhabilidade do concreto.

Tabela 28 – Relação entre trabalhabilidade e abatimento.

<b>Trabalhabilidade</b>	<b>Abatimento (cm)</b>
Muito baixa	0 a 2,5
Baixa	2,5 a 5,0
Média	5,0 a 10,0
Alta	10,0 a 175

Fonte: Neville (1997).

Figura 34 – Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Utilizando-se da Tabela 28 é possível admitir que os concretos produzidos possuem, em geral, consistência seca, se situando entre o limite superior da trabalhabilidade baixa e o limite inferior da média trabalhabilidade, por volta de 5,0 cm.

Ismail e Al-Hashmi (2008), observaram variações negativas na trabalhabilidade dos concretos contendo substituições de agregados miúdos por resíduos contendo aproximadamente 80% de PET e 20% de poliestireno.

Rahmani *et al.* (2013) e Saikia e Brito (2014) também notaram a mesma tendência de comportamento apresentada, com a trabalhabilidade reduzindo à medida em que a da substituição, em volume, dos agregados naturais aumentava.

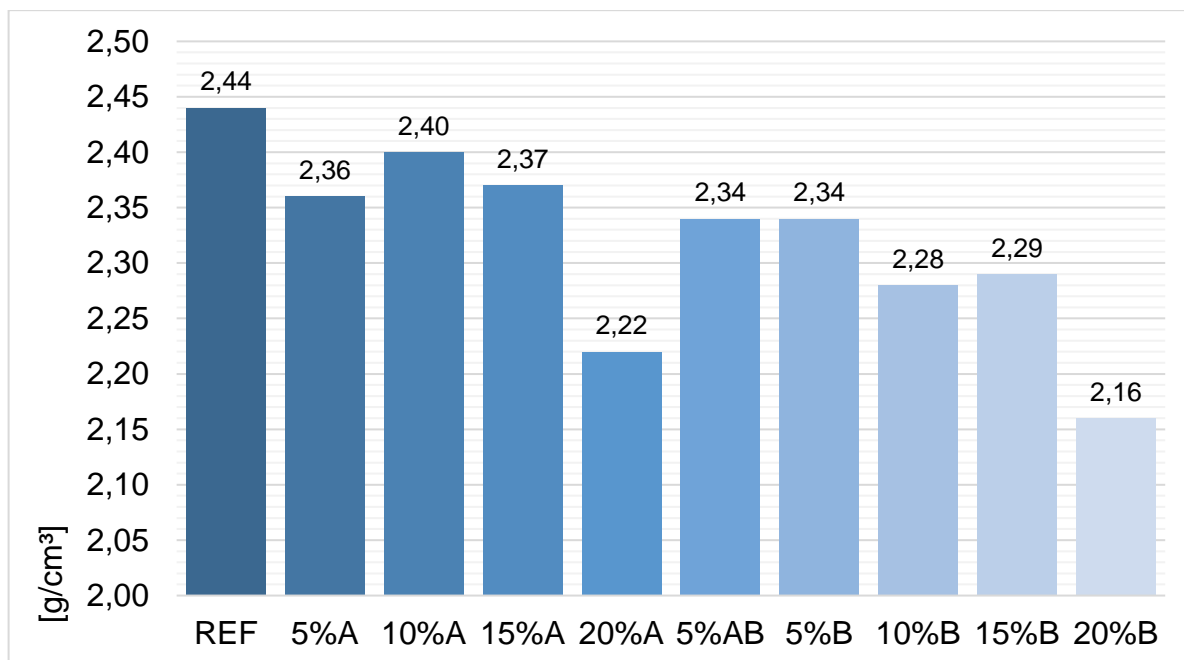
Comportamento também notado por Choi *et al.* (2009), relatando o aumento nos resultados do ensaio de abatimento conforme o acréscimo da substituição de agregados naturais pela mesma massa de PET.

## 5.2 MASSA ESPECÍFICA NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO

A massa específica do concreto é influenciada pela incorporação dos resíduos de PET, sendo reduzida em função da menor massa específica do resíduo quando

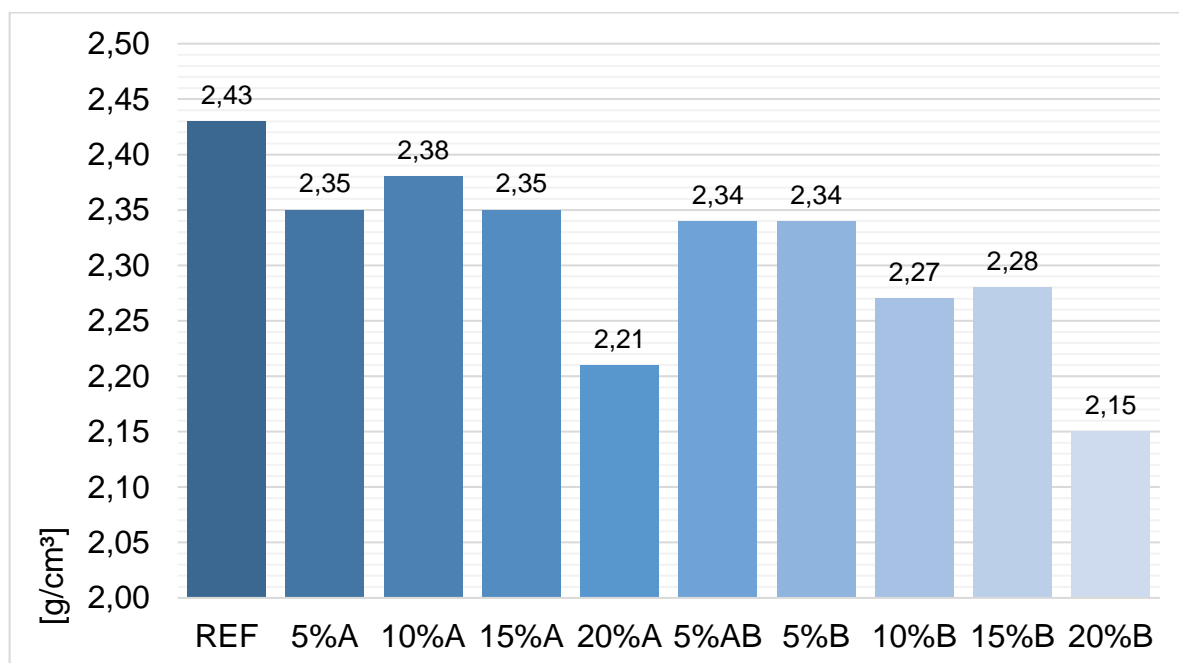
comparada às massas específicas dos materiais que estes substituem. As Figuras 35 e 36 ilustram a massa específica para os traços estudados.

Figura 35 – Resultados da massa específica no estado fresco.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 36 – Resultados da massa específica no estado endurecido.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

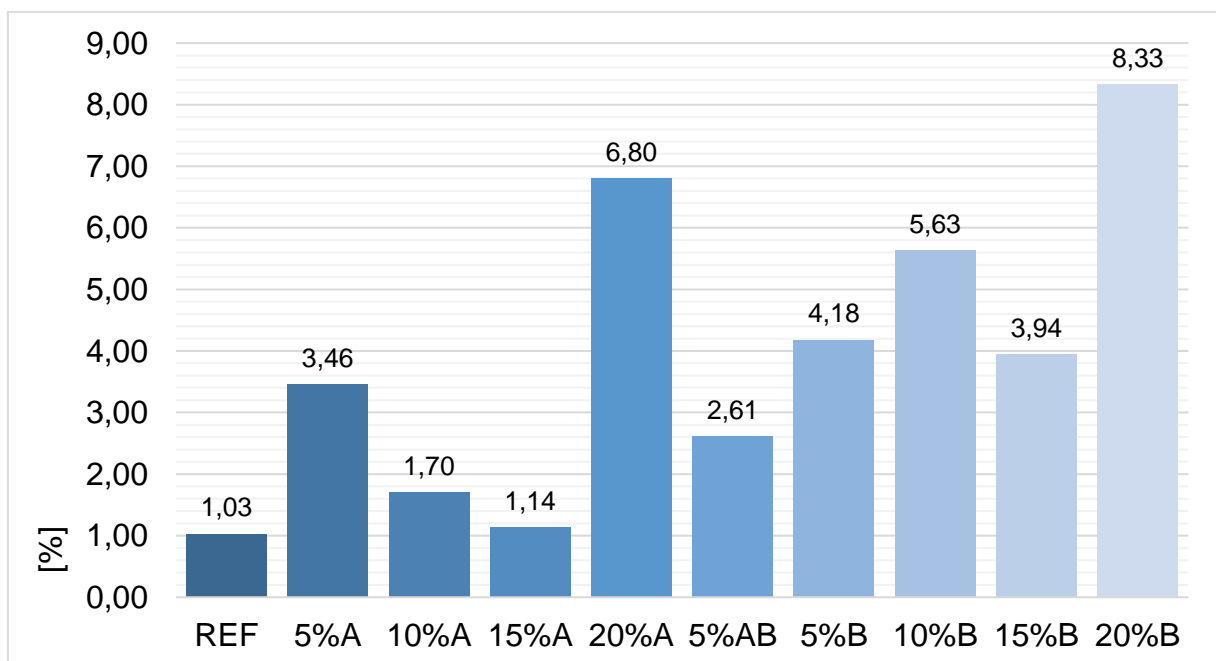
Por meio da observação das Figuras 35 e 36 percebe-se que a massa específica do concreto produzido sofreu redução em todas as situações. Nota-se que os traços contendo substituição de agregado graúdo geraram maiores reduções em relação à redução de massa específica do concreto de referência, em virtude da maior diferença entre a massa específica do agregado natural e a massa específica do resíduo.

Comportamento semelhante foi observado por Reis *et al.* (2011) e Reis e Carneiro (2012), que também relataram uma redução na massa específica de argamassas contendo substituições parciais de agregados miúdos pela mesma massa de resíduos de PET, e Rahmani *et al.* (2013), que relataram uma redução na massa específica do concreto produzido contendo substituições parciais de agregados miúdos pelo mesmo volume de resíduos de PET.

### 5.3 INCORPORAÇÃO DE AR DO CONCRETO

Representa as bolhas de ar aprisionadas nos espaços existentes entre os materiais constituintes do concreto, assumido a forma de microbolhas de formato irregular. A Figura 37 apresenta os resultados da incorporação de ar.

Figura 37 – Resultados da incorporação de ar.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Por meio da Figura 37 é possível perceber que, embora a incorporação de ar aumente em relação à referência, não existe uma tendência nítida de crescimento em relação a substituições subsequentes, como exemplifica os resultados apresentados pelos traços 5%A e 10%A. Portanto, é possível observar que determinadas substituições resultam em melhor, ou pior, preenchimento dos espaços vazios presentes na matriz cimentante.

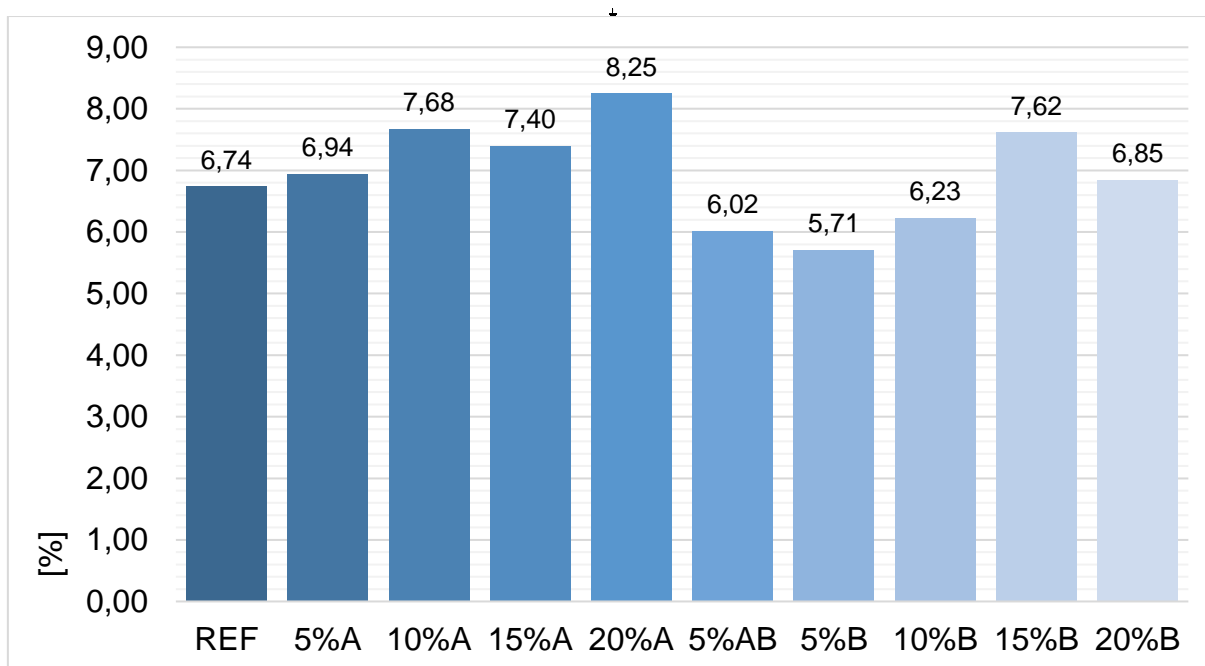
Gu e Ozbakkaloglu (2016) afirmaram que poucos estudos envolvendo agregados plásticos reciclados voltaram seus olhos para a incorporação de ar, relatando que a utilização de plásticos como agregados tende a aumentar a incorporação de ar do concreto, em virtude do arranjo espacial entre o agregado natural e o agregado reciclado na matriz cimentante não ser boa o suficiente.

Tang, Lo e Nadeem (2008) relataram o acréscimo do teor de ar incorporado no concreto e a melhora na trabalhabilidade, ao substituírem agregados graúdos naturais por agregados reciclados de poliestireno. Saindo de 1,5% para o traço de controle e chegando até 16%, para 80% de substituição em volume.

#### 5.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS PAVERS

A absorção por imersão é uma propriedade relacionada à medição da porosidade do concreto e não à facilidade com que o fluido pode penetrar no concreto. Conforme a NBR 9781 (ABNT, 2013a), a imersão dos pavers por 24 horas é suficiente para preencher totalmente os poros existentes na peça. A Figura 38 apresenta os resultados médios do ensaio de absorção de água.

Figura 38 – Resultados da absorção de água.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os resultados da Figura 38 mostraram que a absorção está associada aos materiais utilizados na composição do concreto. O controle da absorção de água dos pavers é importante, especialmente, para aplicação em áreas úmidas, onde as peças estarão sujeitas ao acelerado processo de eflorescência, por exemplo.

Com relação aos percentuais máximos admitidos, o valor de controle utilizado pela NBR 9781 (ABNT, 2013a) é de 6% de absorção, na média, não sendo admitido nenhum valor superior a 7%. Na Figura 38 observa-se que somente o traço 5%B, contendo 5% de substituição do agregado graúdo, em volume, por resíduo de PET apresentou resultado satisfatório quanto ao prescrito em norma. No entanto, até mesmo o traço de controle apresentou absorção 12% maior do que o permitido. Os traços 5%A, 10%A, 15%A e 20%A apresentaram absorção 16%, 28%, 23% e 38% superior ao permitido, respectivamente. O traço 5%AB apresentou absorção superior ao exigido em norma em menos de 0,5%. E os traços 10%B, 15%B e 20%B apresentaram absorção 4%, 27% e 14% superior ao permitido, respectivamente.

Rahmani *et al.* (2013) relataram que as misturas contendo PET possuem maior tendência à porosidade, o que justifica a maior tendência de absorção de água apresentada na Figura 38.

Silva, Brito e Veiga (2014), também notaram um aumento na porosidade e na absorção de água de argamassas contendo PET. Akçaözoğlu e Ulu (2014) relataram o aumento da absorção de água conforme o acréscimo de PET, saindo de 8,3% na mistura de controle para 20,2% na mistura substituindo 100% do volume de agregado por PET.

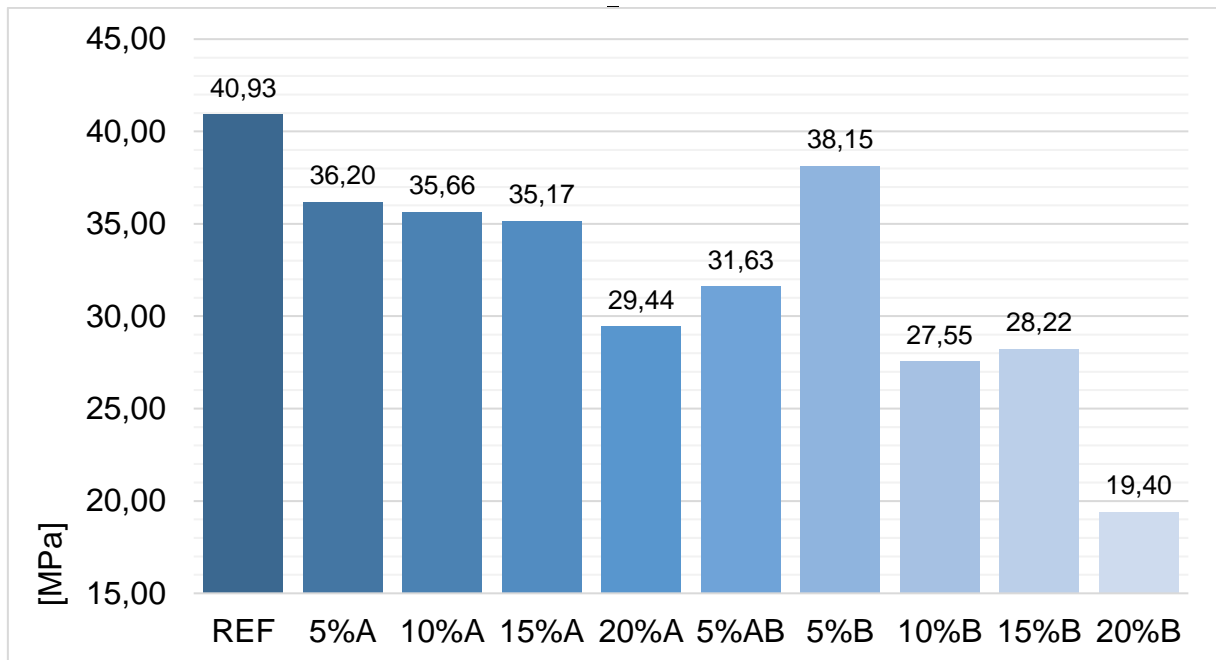
## 5.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PAVERS

A resistência à compressão do concreto é uma das propriedades mais importantes para se avaliar o desempenho de qualquer elemento estrutural. A resistência à compressão está ligada à capacidade dos materiais de resistirem a esforços sem que haja ruptura. No âmbito da resistência à compressão dos concretos contendo resíduos de PET, geralmente a utilização destes resíduos faz com que esta propriedade seja influenciada de forma negativa, causando uma redução na resistência quando comparada à resistência do concreto convencional.

Como mencionado no capítulo 4, subitem 4.2.8, esta propriedade é referência na maioria das normas nacionais e internacionais como um dos principais parâmetros de avaliação do desempenho dos pavers. O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme prescreve a NBR 9781 (ABNT, 2013a).

A Figura 39 apresenta os resultados de resistência à compressão dos pavers produzidos.

Figura 39 – Resultados da resistência à compressão.

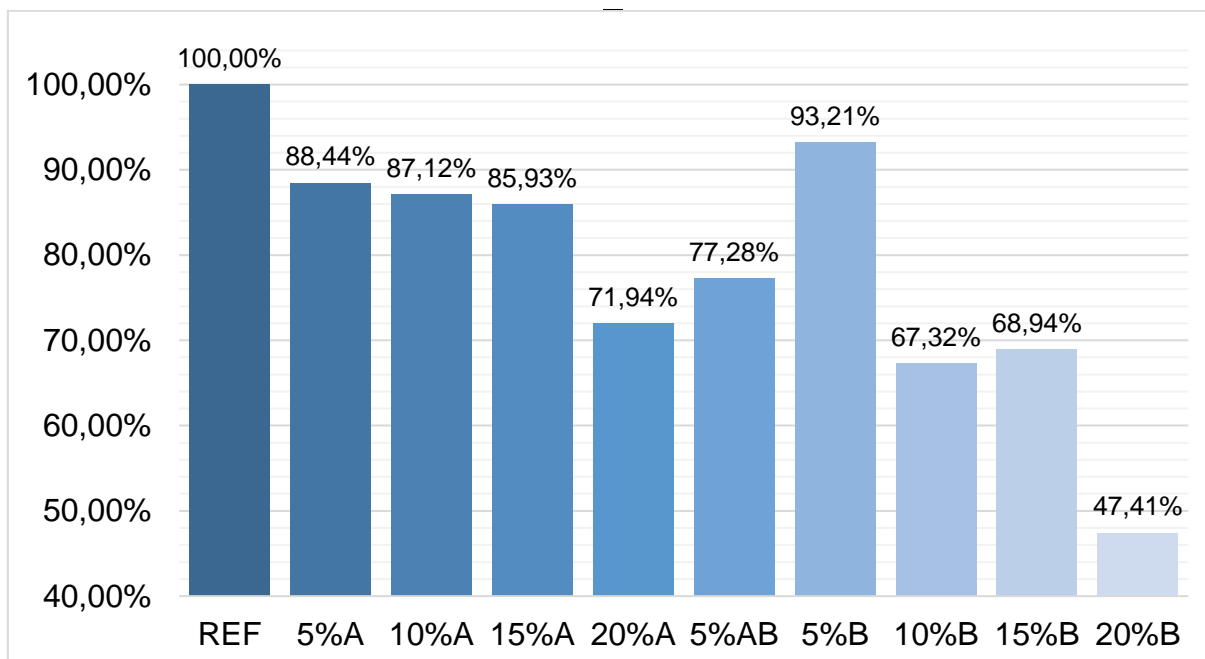


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Com relação aos valores mínimos admitidos, o valor de controle utilizado pela NBR 9781 (ABNT, 2013a), é de 35 MPa para pavers submetidos ao tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha. Na Figura 39 observa-se que parte dos traços produzidos apresentaram resultados satisfatórios, podendo ser aplicadas nas condições descritas. Os demais traços, com resistências inferiores a 35 MPa, indicam viabilidade de utilização em ambientes de solicitações leves, onde as sobrecargas não sejam elevadas, como praças, passeios públicos, áreas de lazer e ciclovias.

A Figura 40 apresenta a relação entre a resistência à compressão dos traços contendo resíduos e a resistência à compressão do traço convencional.

Figura 40 – Relação entre a resistência à compressão dos traços contendo PET e a resistência à compressão do controle.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Por meio das Figuras 39 e 40 é possível observar que a redução na resistência à compressão é muito mais significativa nos traços contendo substituição de brita do que nos traços onde a areia é substituída. As 3 primeiras substituições de areia apresentaram resistência à compressão superior a 85% do controle, de 40,93 MPa, e acima dos 35 MPa exigidos por norma, ao passo que apenas a primeira substituição de brita, 5%B, foi acima do valor exigido.

Choi *et al.* (2005), Silva, Brito e Veiga (2014) e Hama e Hilal (2017), utilizaram substituições de agregados naturais pelo mesmo volume de resíduos de PET. Todos relataram queda na resistência à compressão conforme o aumento de PET no material.

Ismail e Al-Hashmi (2008), Choi *et al.* (2009), Modro *et al.* (2009) e Reis e Carneiro (2012), também relataram a redução na resistência à compressão dos compostos contendo PET, seguindo a mesma tendência de comportamento de que a redução ocorre conforme o aumento de PET no composto.

Rahmani *et al.* (2013) relataram um aumento de até 8,86% e 14,72% na resistência à compressão do concreto contendo 5% de substituição do volume de agregados miúdos naturais por agregados de PET reciclado, para as relações água/cimento de 42% e 54%, respectivamente, mas registraram a queda na

resistência com substituições maiores, com reduções que chegaram até a 10,75% e 11,44% para as mesmas relações água/cimento, respectivamente.

Azhdarpour, Nikoudel e Taheri (2016), também registraram um aumento na resistência à compressão, aos 28 dias, do concreto contendo 5% e 10% de substituição da massa de agregado miúdo natural por agregado miúdo de PET, mas notaram a queda na resistência para substituições maiores. Os aumentos apresentados foram de 45,71% e 8,57% para as substituições de 5% e 10%, respectivamente. E a maior redução, de 45,72%, foi apresentada pela substituição de 30%.

Hama e Hilal (2017), por meio da substituição de 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5% do volume de agregados miúdos naturais por agregados de resíduos plásticos em concretos auto adensáveis, concluíram que a resistência de 35 MPa pode ser obtida com facilidade, mas ressaltam a redução na resistência apresentada conforme o aumento da substituição.

## 5.6 RESISTÊNCIA AO IMPACTO DOS PAVERS

A resistência ao impacto normalmente está relacionada à durabilidade de pisos cerâmicos, por conta de sua aplicação em ambientes internos onde a queda de objetos é um fator a ser considerado para a garantia do desempenho do piso ao longo de sua vida útil, evitando fissuras, lascamentos, delaminações e eventuais rupturas.

Quando consideramos a aplicação de pavimentos intertravados em ambientes cuja ação de principal ocorrência é a de pedestres caminhando, também se torna necessário considerar eventuais choques contra o piso, ocasionados pela queda de objetos. A Tabela 29 apresenta os resultados de resistência ao impacto dos pavers em relação ao surgimento de fissuras e ao seccionamento total, ocasionando a ruína da peça.

Tabela 29 – Resistência ao impacto dos pavers.

Traço	Material substituído	Surgimento de fissuras (J)	Seccionamento total (J)
REF	-	71,37	84,07
5%A	Areia	92,43	114,88
10%A	Areia	97,13	154,75
15%A	Areia	86,16	125,68
20%A	Areia	89,99	127,94
5%AB	Areia/Brita	81,29	102,53
5%B	Brita	39,34	51,00
10%B	Brita	31,85	40,91
15%B	Brita	28,90	40,91
20%B	Brita	55,35	80,07

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

De acordo com a NBR 15575-3 (ABNT, 2013b) o surgimento de fissuras e a ruptura devem ocorrer depois de choques com energia equivalente a 5 J e 30 J, respectivamente. Portanto, por meio da Tabela 29, é possível verificar que todos os traços produzidos proporcionam resistência adequada ao impacto.

Tal comportamento já era esperado, em virtude da resistência e espessuras apresentadas por um paver de concreto serem superiores à resistência e espessura apresentadas por um piso cerâmico.

Observando a Tabela 29 é possível perceber o acréscimo significativo de resistência ao impacto nos traços onde houve substituição de areia. Esse acréscimo pode ser creditado ao comportamento de fibra apresentado pelo PET e pelo aumento na ductilidade que a substituição proporciona ao concreto.

Comportamento semelhante foi observado por Al-Tayeb *et al.* (2017), que relatou um aumento na resistência ao impacto de 21%, 52% e 81% com a substituição de 5%, 10% e 15% em volume de areia por resíduo plástico, respectivamente.

Saxena *et al.* (2018), também relatou um acréscimo na resistência ao impacto e na ductilidade ao substituir 5%, 10%, 15% e 20% em massa de agregados naturais miúdos e graúdos por PET.

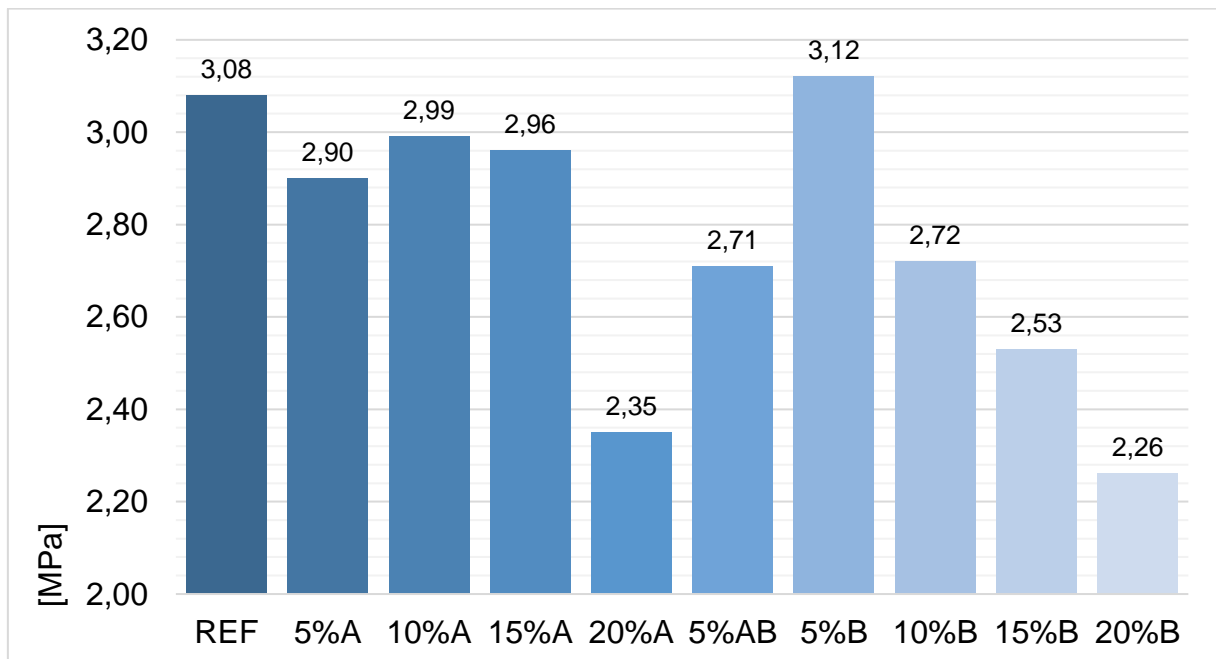
## 5.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO CONCRETO

A resistência à tração do concreto geralmente é uma propriedade desprezada em virtude de seu baixo valor quando comparado à resistência à compressão. Em situações em que a ocorrência de tração no concreto é relevante, reforços são utilizados de acordo com a necessidade.

Partindo do princípio já discutido no item 2.4, de que os principais esforços nos pavers são de flexão, torna-se interessante analisar a resistência à tração do concreto. O esquema estático individual dos pavers nesta situação, se assemelha ao de uma viga biapoiada, cujos apoios são dados pelo intertravamento proporcionado pelos pavers da vizinhança, e o carregamento resulta em esforços compressão na seção superior do paver e tração na seção inferior.

A Figura 41 apresenta os resultados de resistência à tração do concreto.

Figura 41 – Resultados da resistência à tração.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Por meio da Figura 41, é possível verificar que de forma geral a resistência à tração do concreto tende a reduzir conforme a substituição dos agregados naturais vai ocorrendo, devido à fraca interação do PET com a matriz cimentante. A Figura 41 apresenta semelhanças com a Figura 39 no que diz respeito ao comportamento

apresentado pelas resistências, onde as resistências apresentadas pelos traços 5%A, 10%A e 15%A são próximas e ligeiramente inferiores à resistência apresentada pelo controle, apresentando queda significativa no traço 20%A, indicando a relação já mencionada da porosidade e da resistência. Assim como na resistência à compressão, o traço 5%B apresentou os melhores resultados, indicando que o aumento no teor de finos causado pelo PET não prejudica o traço no que diz respeito à resistência, mas as substituições seguintes apresentam queda significativa na resistência, indicando o efeito negativo do aumento excessivo do teor de finos.

Frigione (2010) relatou reduções na resistência à tração por compressão diametral em 3 de 4 traços estudados, com teor de cimento entre 300 e 400 kg/m<sup>3</sup>, fator água/cimento entre 0,45 e 0,55 e com substituição de 5% em massa de agregado miúdo, atribuindo essa redução à ligação fraca do PET com a pasta.

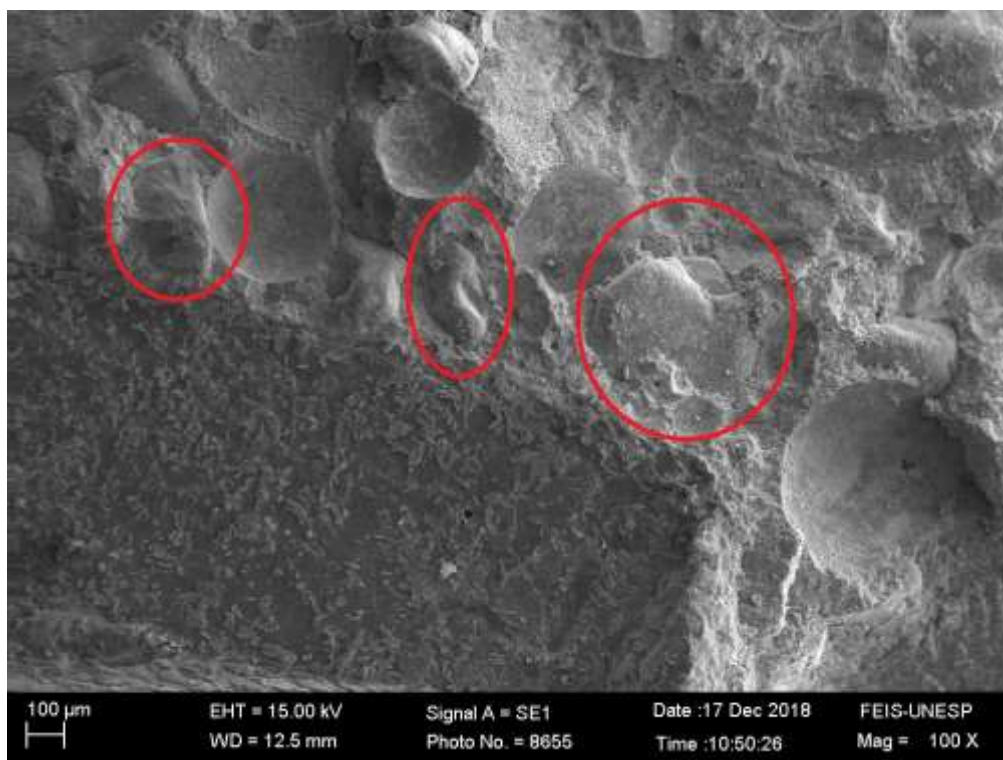
Al-Tayeb *et al.* (2017), também relataram reduções na resistência à tração por compressão diametral de 10%, 24% e 32% com a substituição de 5%, 10% e 15% em volume de areia por resíduo plástico, respectivamente.

## 5.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DO CONCRETO

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para avaliar a microestrutura dos traços 5%A, 10%A e 15%A, buscando um melhor entendimento das propriedades apresentadas. Estes traços foram escolhidos com base nos resultados das propriedades apresentadas, que indicam um melhor aproveitamento destes traços, indicando um comportamento mais parecido com o concreto de controle do que os demais traços estudados.

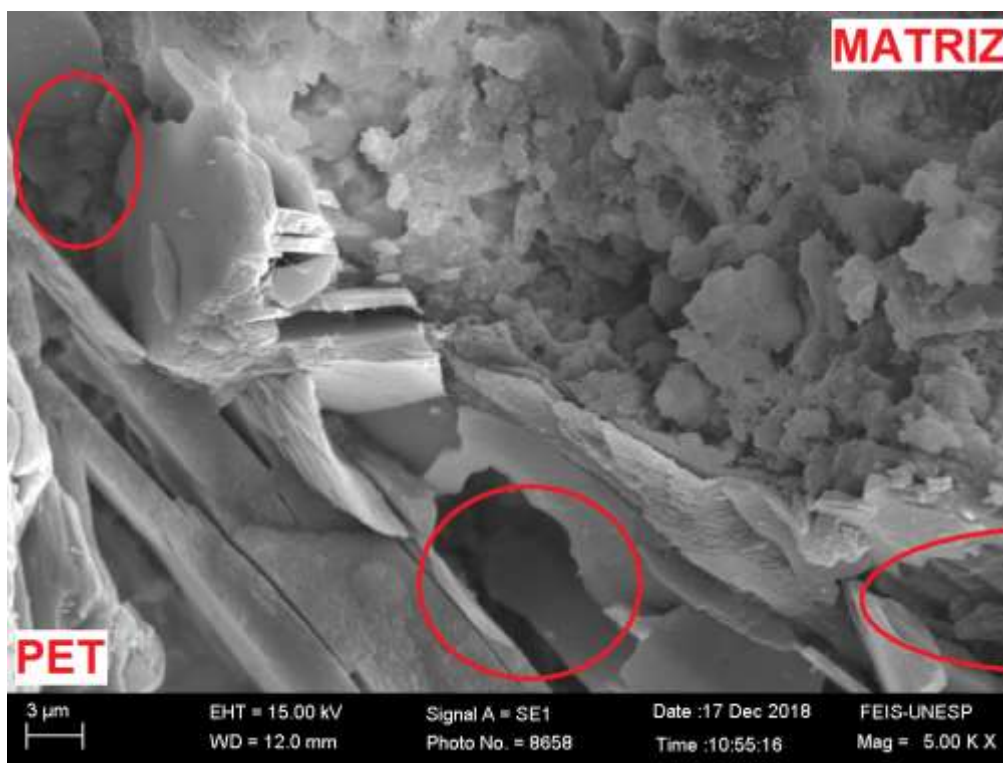
A Figura 42 apresenta o envolvimento da areia pela pasta de cimento e a Figura 43 apresenta o envolvimento do PET e os eventuais vazios ocasionados, ambas para o traço 5%A.

Figura 42 – Envolvimento da areia pela matriz no traço 5%A.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 43 – Envolvimento do PET pela matriz e vazios no traço 5%A.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

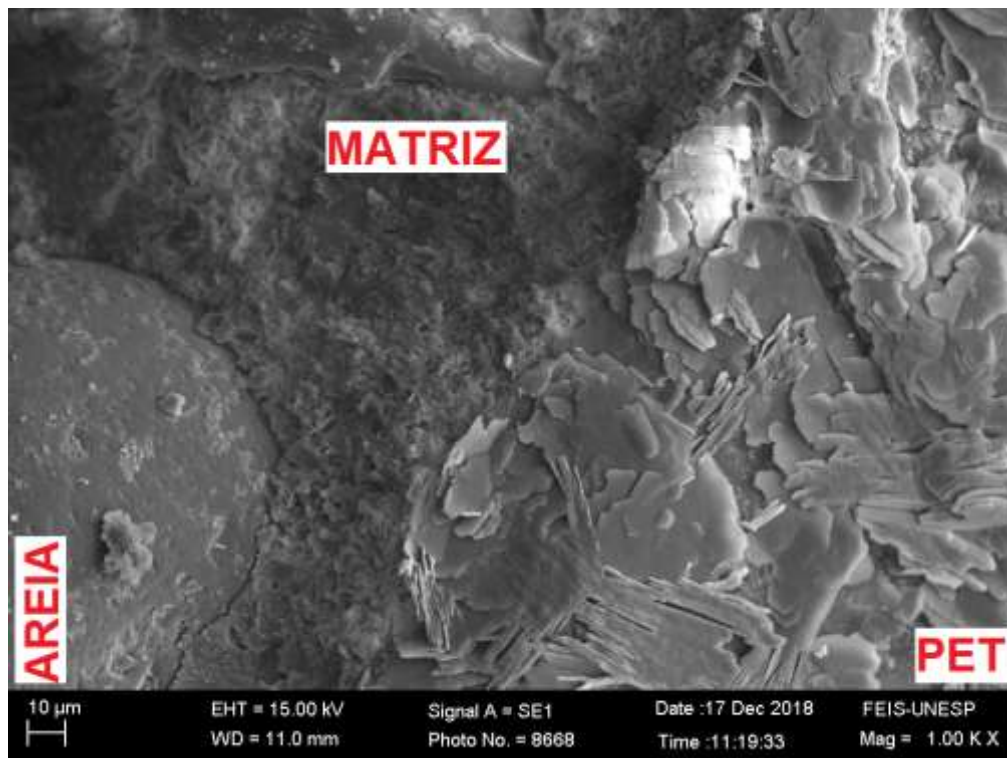
Por meio das Figuras 42 e 43 é possível perceber a diferença nítida no envolvimento da areia e do PET, causado pela textura e pelo formato do material. Ao passo que a areia apresenta um formato mais esférico e de superfície áspera, o PET apresenta formas laminares e superfície lisa.

Essa diferença no envolvimento acarreta em uma ligação mais fraca entre o PET e a matriz cimentante do que a ligação apresentada pela areia. E a diferença na força aderente entre os materiais se traduz na queda de resistência mecânica apresentada pelo concreto produzido, conforme apresentado nos itens 5.5 e 5.7 deste trabalho.

Os vazios indicados na Figura 43 são provenientes do formato da partícula de PET, que faz com que a pasta não consiga preenche-los tão bem quanto os vazios deixados pela areia. Esta diferença nos vazios se traduzem em um material mais poroso e que, conseqüentemente, absorve mais água, conforme apresentado nos itens 5.3 e 5.4 deste trabalho. A trabalhabilidade apresentada também é afetada pela incorporação de ar, como pode-se observar no item 5.1 deste trabalho, demonstrando uma relação inversamente proporcional, onde o abatimento cresce conforme a incorporação de ar reduz.

A Figura 44 apresenta o envolvimento do PET e da areia pela pasta de cimento para o traço 10%A.

Figura 44 – Envolvimento do PET e da areia pela matriz para o traço 10%A.



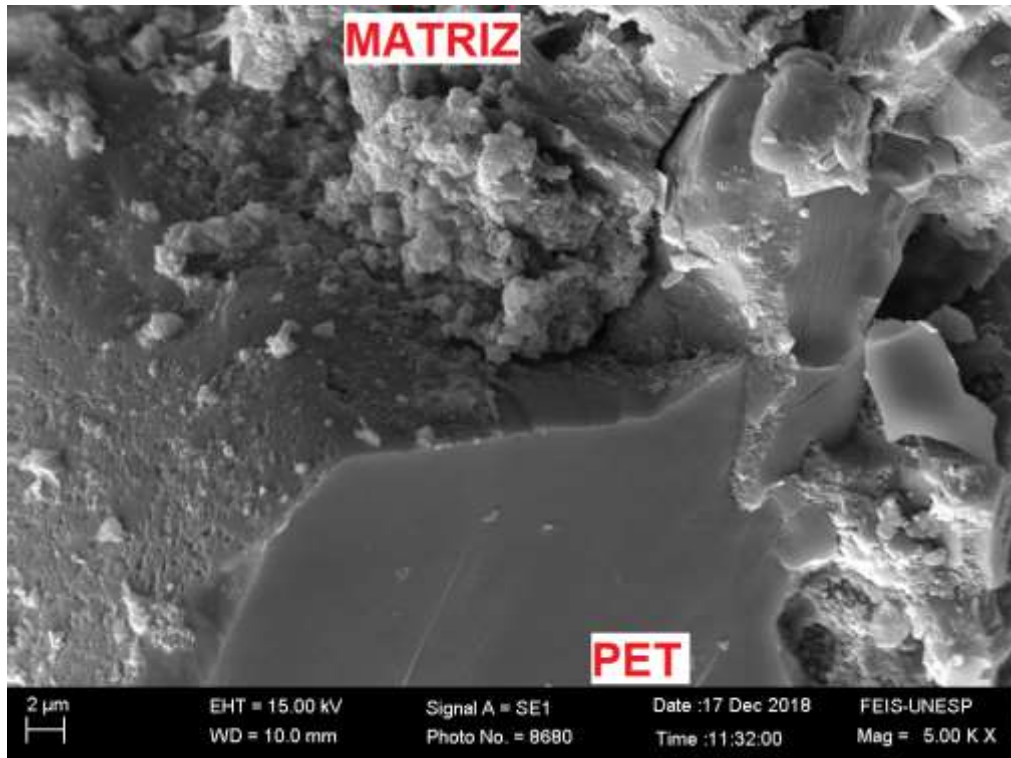
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 44 demonstra de forma mais nítida a diferença no envolvimento entre o PET e a areia pela pasta de cimento e os pequenos vazios formados em virtude da diferença de cobertura e da diferença de formato e textura entre os dois materiais.

Enquanto a areia apresenta boa interação com a matriz, o PET apresenta uma interação irregular, com espaços vazios entre a pasta de cimento e a partícula de PET.

A Figura 45 apresenta o envolvimento do PET pela pasta de cimento para o traço 15%A.

Figura 45 – Envolvimento do PET pela matriz para o traço 15%A.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 45 evidencia os vazios formados pela interação entre o PET e a pasta de cimento, além da diferença de textura entre os materiais.

## 5.9 INFLUÊNCIA DO MATERIAL SUBSTITUÍDO

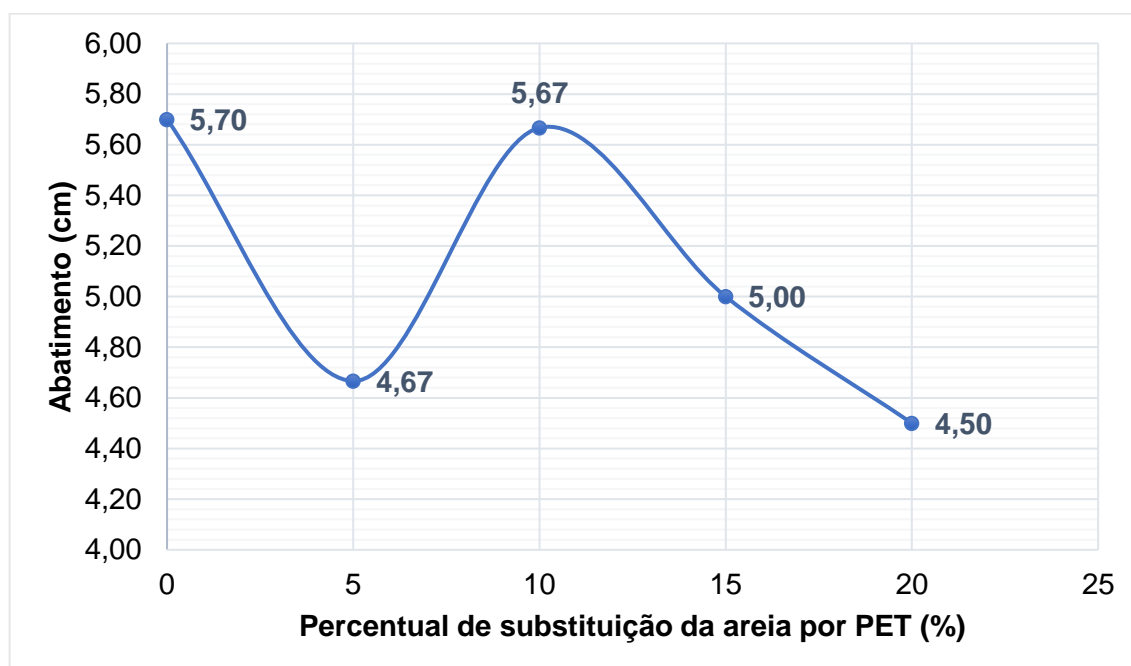
No que tange ao material substituído por PET, é notável a diferença entre o desempenho apresentado pelos traços contendo substituição de areia frente ao desempenho apresentado pelos traços contendo substituição de brita, principalmente no que diz respeito à resistência mecânica dos pavers produzidos. Apesar do traço 5%B apresentar valores satisfatórios, os demais traços apresentam desempenho inferior quando comparados aos traços com substituição de areia.

Essa diferença se deve à retirada do material resistente do concreto convencional, o agregado graúdo, e à inclusão de um material que possui resistência inferior. A forma do material também influencia, visto que o resíduo utilizado constitui um material fino, e os incrementos na substituição do agregado graúdo ocasionariam uma perda de resistência natural.

### 5.9.1 Substituições de agregado miúdo por PET

No que diz respeito à trabalhabilidade, os traços produzidos com substituição do agregado miúdo apresentaram, em geral, queda no abatimento, indicando queda na trabalhabilidade do material, como mostra a Figura 46.

Figura 46 – Trabalhabilidade para substituições do agregado miúdo.



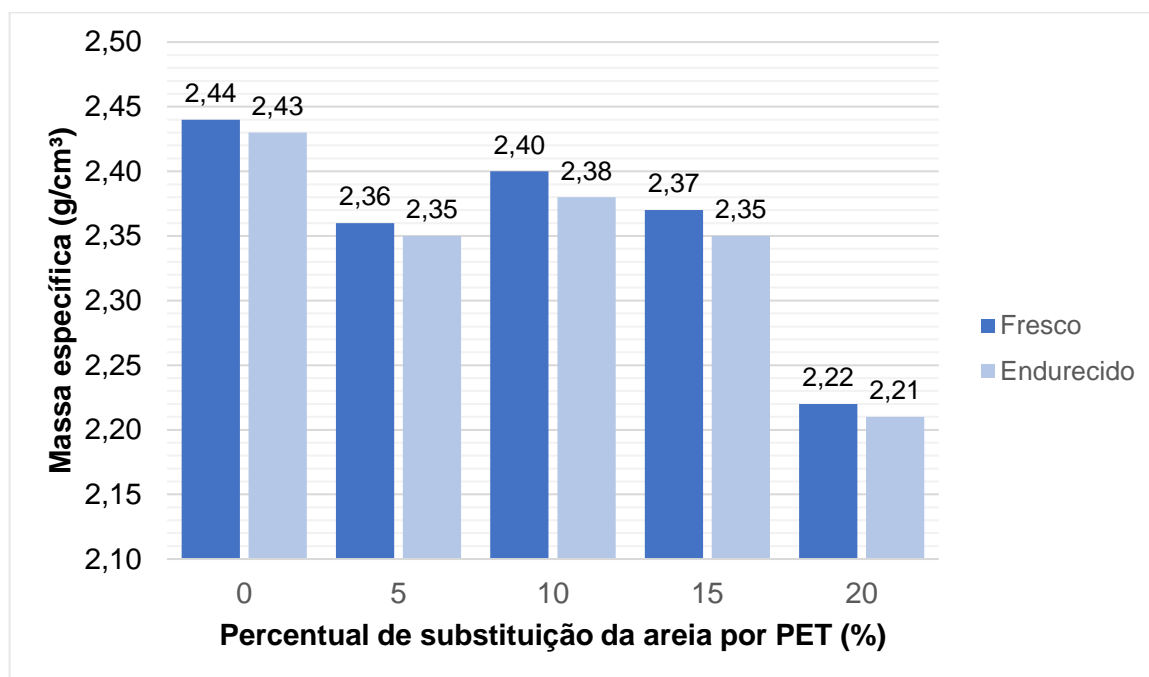
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Por meio da Figura 46 percebe-se uma redução de até 21,05% no abatimento em comparação com o traço de referência. Essa variação no abatimento pode ser atribuída em virtude da diferença de forma e de densidade do material, ocasionando variações no agrupamento das partículas e, conseqüentemente, variações no abatimento apresentado.

Para a massa específica, todos os traços apresentaram redução de massa específica em comparação ao traço de referência. Essa redução é devido ao fato da massa específica do PET ser inferior à massa específica do agregado miúdo, ocasionando reduções maiores com maiores substituições, conforme a Figura 47.

A massa específica apresenta uma relação clara com a incorporação de ar, visto que quanto maior o teor de ar incorporado ao concreto, menor será o espaço a ser ocupado pelo mesmo, causando a redução na massa específica do material.

Figura 47 – Massa específica para as substituições do agregado miúdo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

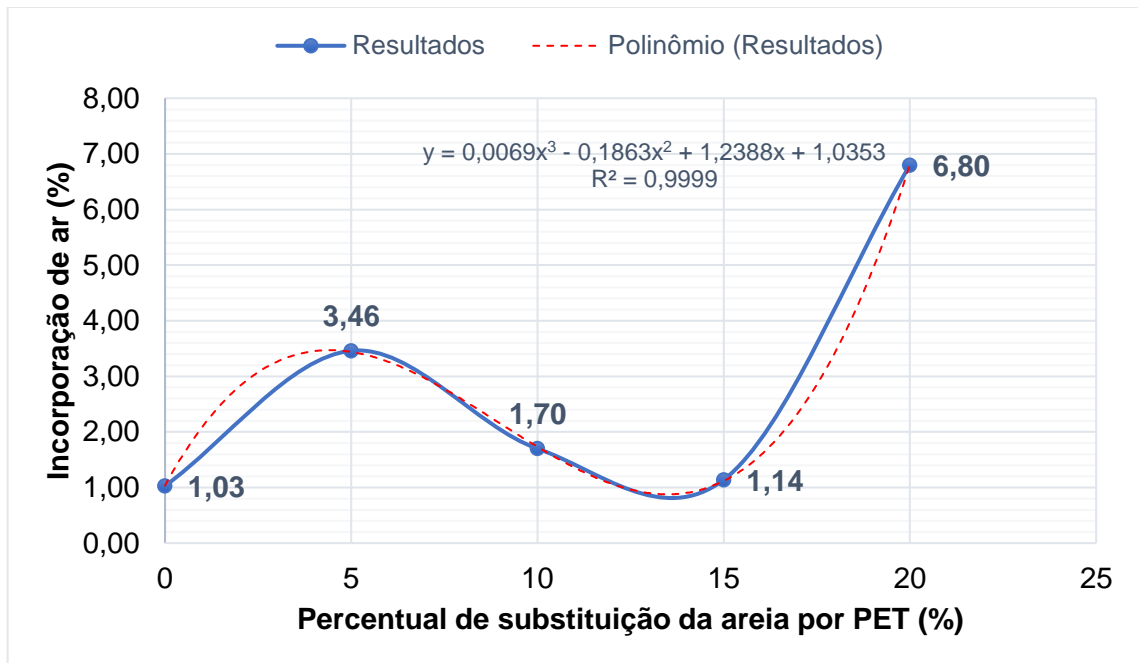
Por meio da Figura 47 nota-se a redução progressiva da massa específica, chegando a reduzir 9,02% e 9,05% para os estados fresco e endurecido, respectivamente, para a maior substituição realizada.

A incorporação de ar apresentou, de forma geral, característica inversa à trabalhabilidade. E influenciando diversas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, tração e impacto, cujos traços com as menores incorporações de ar, apresentaram os melhores resultados. A variação na incorporação de ar é função do arranjo das partículas e da interação entre a pasta de cimento e as partículas, deixando uma quantidade maior ou menor de espaços, como mostrado na Figura 48.

O comportamento descrito pela curva da incorporação de ar pode ser representado pela equação:  $y = 0,0069x^3 - 0,1863x^2 + 1,2388x + 1,0353$ ; com precisão de 99,99%, apresentado na Figura 48. Em razão da incorporação de ar depender de diversos fatores, como o próprio arranjo espacial dos grãos na matriz cimentante, e como a estrutura interna do concreto é amorfa, a variação da incorporação de ar conforme o aumento da substituição não apresenta comportamento linear, mas, para a situação apresentada neste trabalho, é bem representada pela equação polinomial

descrita acima. Observa-se um aumento de até 6,6 vezes na incorporação de ar do traço 20%A em comparação ao controle.

Figura 48 – Incorporação de ar para substituições do agregado miúdo.



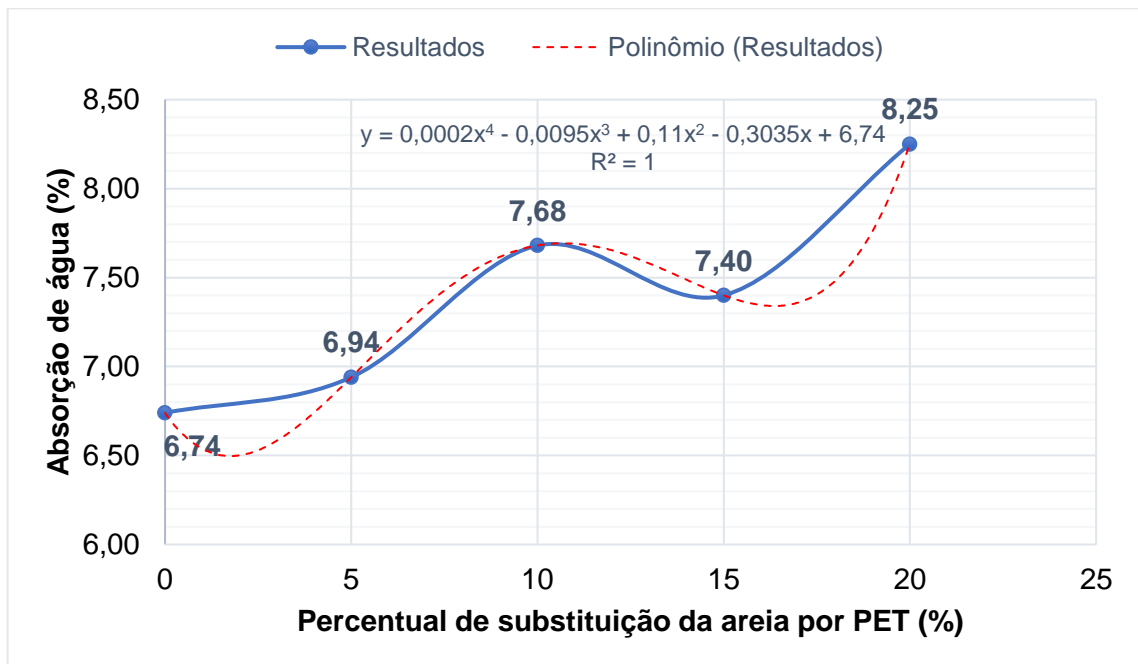
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A absorção de água apresentou o comportamento descrito no item 5.4, com o aumento de absorção seguindo o aumento das incorporações de PET, conforme mostra a Figura 49.

Assim como o comportamento descrito pela incorporação de ar, por ser uma propriedade correlacionada, o comportamento apresentado pela absorção de água não é linear. No entanto, os comportamentos apresentam algumas divergências, não significando que reduções na incorporação de ar, como a observada entre os traços 5%A e 10%A, acarreta em reduções na absorção de água.

Silva, Brito e Saikia (2013) e Silva, Brito e Veiga (2014) relataram aumentos na absorção de água em concretos e argamassas produzidas contendo agregados plásticos. Ambos os trabalhos relatam a relação da absorção com a porosidade do material, mas não fazem estudos aprofundados sobre o teor de ar dos materiais analisados. O aumento apresentado pelo traço 20%A chegou a 22,40% em relação à absorção apresentada pelo controle, com o menor aumento sendo de 2,97%, apresentado pelo traço 5%A.

Figura 49 – Absorção de água para substituições do agregado miúdo.



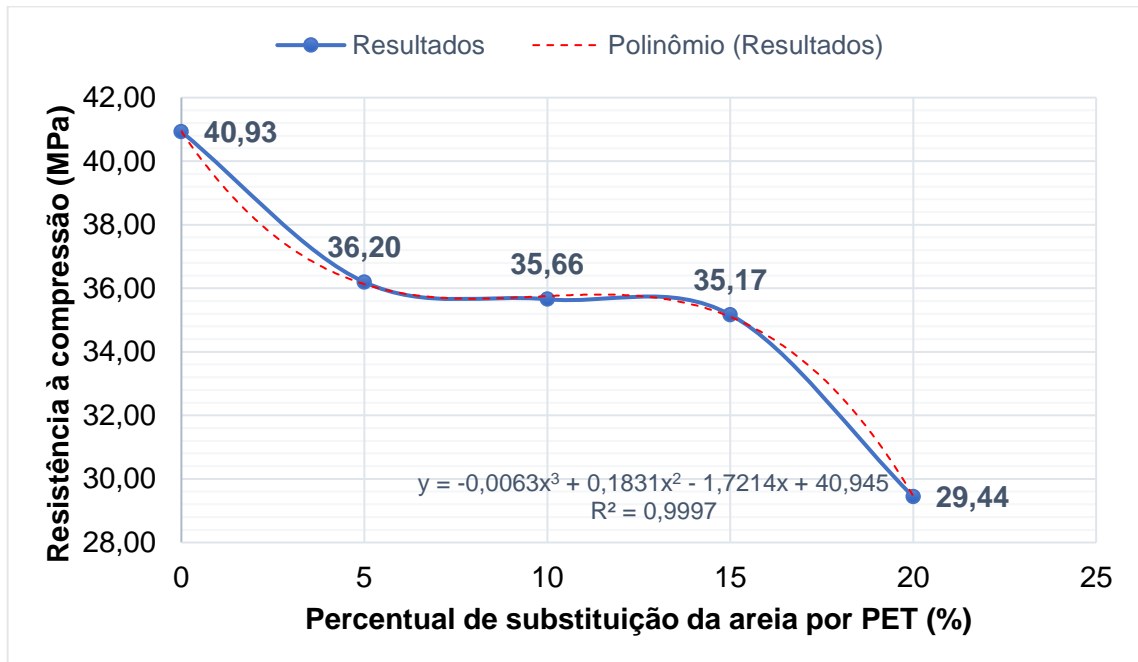
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O comportamento descrito pela curva da absorção de água, na Figura 49, pode ser representado pela equação:  $y = 0,0002x^4 - 0,0095x^3 + 0,11x^2 - 0,3035x + 6,74$ ; com precisão de 100%. Como a absorção de água depende, assim como a incorporação de ar, do arranjo interno e da natureza das partículas, e estes fatores apresentam grande variação, seu comportamento é descrito, para a situação deste trabalho, por meio da equação polinomial acima.

A resistência à compressão também apresentou redução conforme o incremento das substituições, como mostra a Figura 50. No entanto, as reduções, embora ocorram e sejam significativas, são atenuadas nas substituições de 10% e 15% pela redução na incorporação de ar. As reduções apresentadas são de 11,56%, 12,88%, 14,07% e 28,06% para os traços 5%A, 10%A, 15%A e 20%A respectivamente.

Assim como as propriedades acima, a resistência à compressão também foi descrita por uma equação polinomial, em virtude de seu comportamento ser influenciado pelo arranjo espacial dos materiais constituintes do concreto e da força de adesão entre as partículas e a pasta de cimento. A equação:  $y = -0,0063x^3 + 0,1831x^2 - 1,7214x + 40,945$ ; com precisão de 99,97%, na Figura 50, é válida para as situações observadas neste trabalho.

Figura 50 – Resistência à compressão para substituições do agregado miúdo.



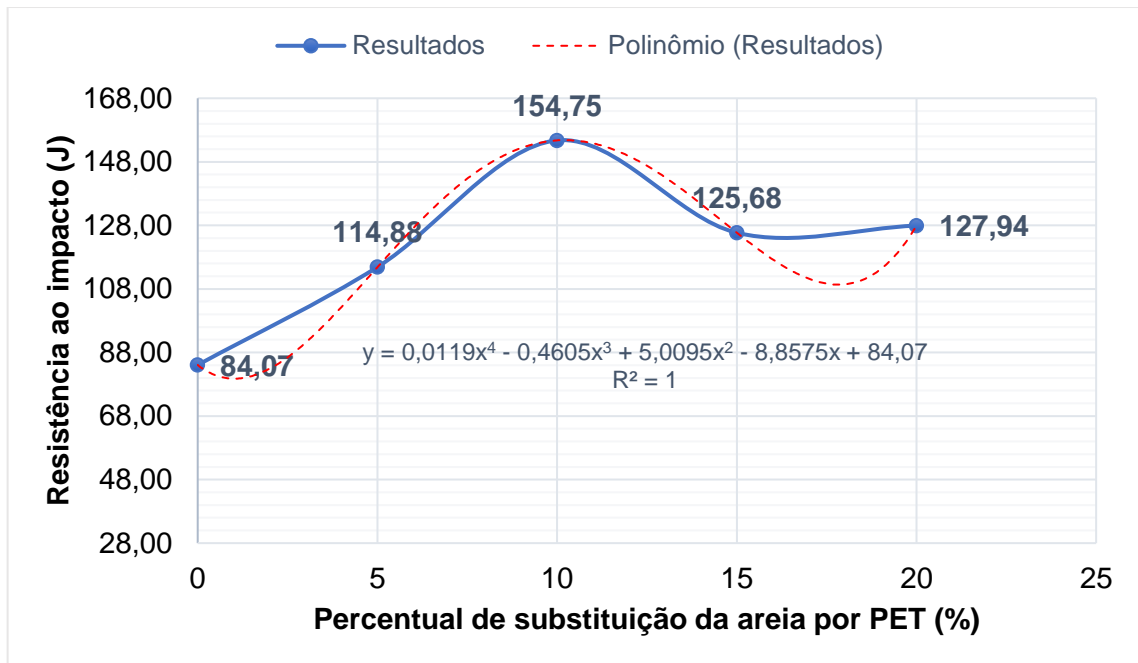
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A resistência ao impacto, demonstrada na Figura 51, seguiu o que foi demonstrado por Al-Tayeb *et al.* (2017) e Saxena *et al.* (2018), melhorando esta propriedade do concreto, ao aumentar seu comportamento dúctil por meio da inclusão de um material que permite uma deformação muito maior do que o concreto tradicional. E ainda há de se considerar o efeito de fibra que o PET exerce em função do formato de sua partícula e da possibilidade de deformação plástica que essa partícula tem antes da ruptura final. A equação:  $y = 0,0119x^4 - 0,4605x^3 + 5,0095x^2 - 8,8575x + 84,07$ ; com precisão de 100%, da Figura 51, é válida para as situações observadas neste trabalho e representa o comportamento apresentado pela resistência ao impacto.

A resistência à tração, ilustrada na Figura 52, concordou com o que foi disposto por Frigione (2010) e Al-Tayeb *et al.* (2017), apresentando perda de resistência conforme o aumento da substituição, em função da interação mais fraca entre a pasta de cimento e a partícula de PET. No entanto é válido ressaltar que a perda de resistência à tração é menor do que a apresentada na resistência à compressão. As reduções apresentadas na resistência à tração são de 5,85%, 2,84%, 3,74% e 23,59% para os traços 5%A, 10%A, 15%A e 20%A respectivamente. A equação:  $y = -0,0006x^3 + 0,0143x^2 - 0,0943x + 3,0801$ ; com precisão de 99,98%, da Figura 52, é válida para

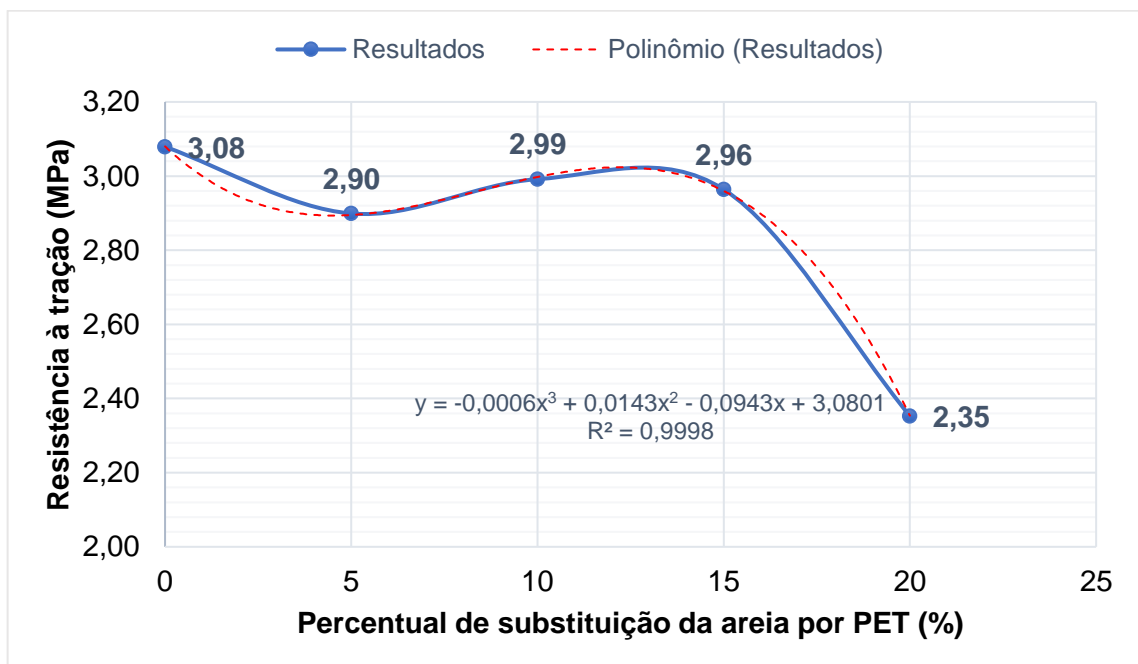
as situações observadas neste trabalho e representa o comportamento apresentado pela resistência à tração.

Figura 51 – Resistência ao impacto para substituições do agregado miúdo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 52 – Resistência à tração para substituições do agregado miúdo.

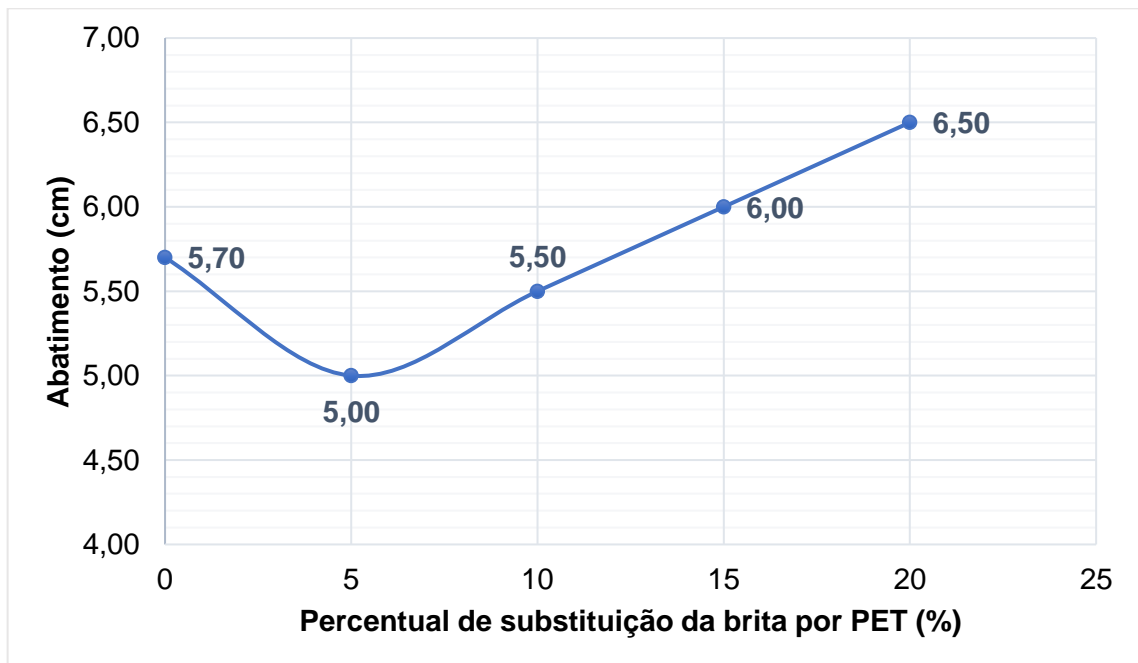


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 5.9.2 Substituições de agregado graúdo por PET

No que diz respeito à trabalhabilidade, os traços produzidos com substituição do agregado graúdo apresentaram, aumento no abatimento, indicando incremento na trabalhabilidade do material, como mostra a Figura 53. Esse aumento é proveniente do aditivo superplastificante utilizado, de modo a permitir que todos os traços fossem produzidos com os mesmos parâmetros, alterando-se apenas as substituições realizadas.

Figura 53 – Trabalhabilidade para substituições do agregado graúdo.

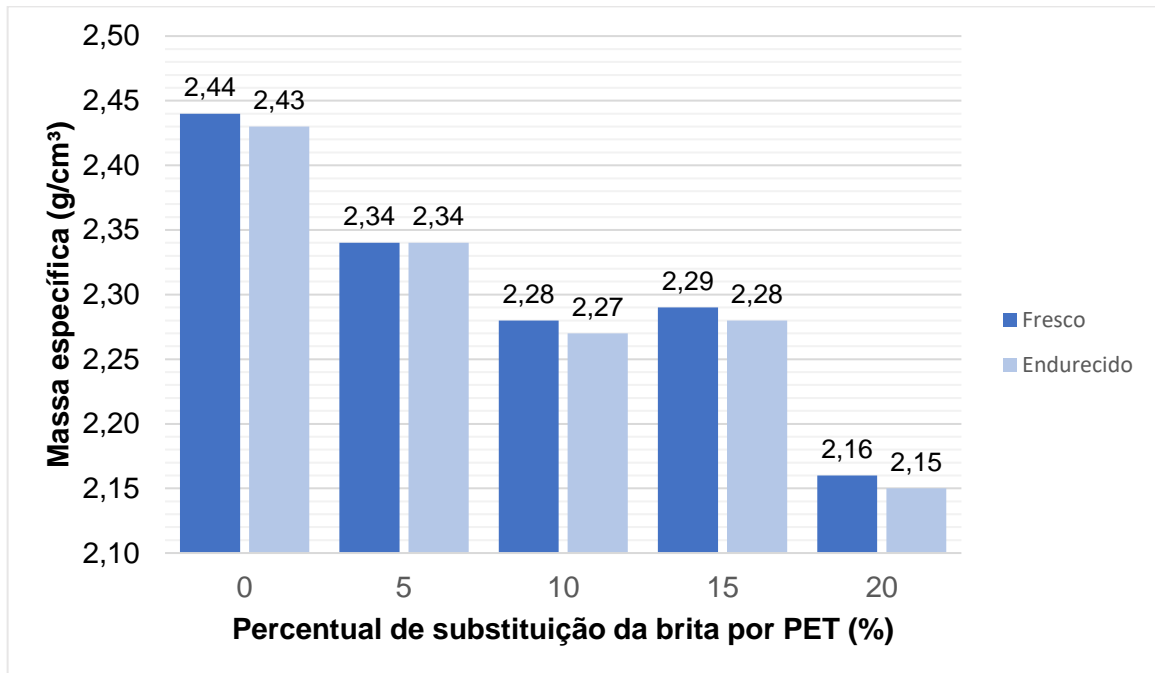


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para a massa específica, todos os traços apresentaram redução ainda maior de massa específica em comparação ao traço de referência do que as substituições de agregado miúdo. Essa redução maior é devido ao fato da relação entre a massa específica do PET e o agregado graúdo ser inferior à relação do agregado miúdo, ocasionando reduções mais significativas, conforme a Figura 54.

Percebem-se reduções de 11,48% e 11,52% nos estados fresco e endurecido para o traço 20%B, que apresenta a menor redução dentre os traços com substituição de agregado graúdo.

Figura 54 – Massa específica para as substituições do agregado graúdo.



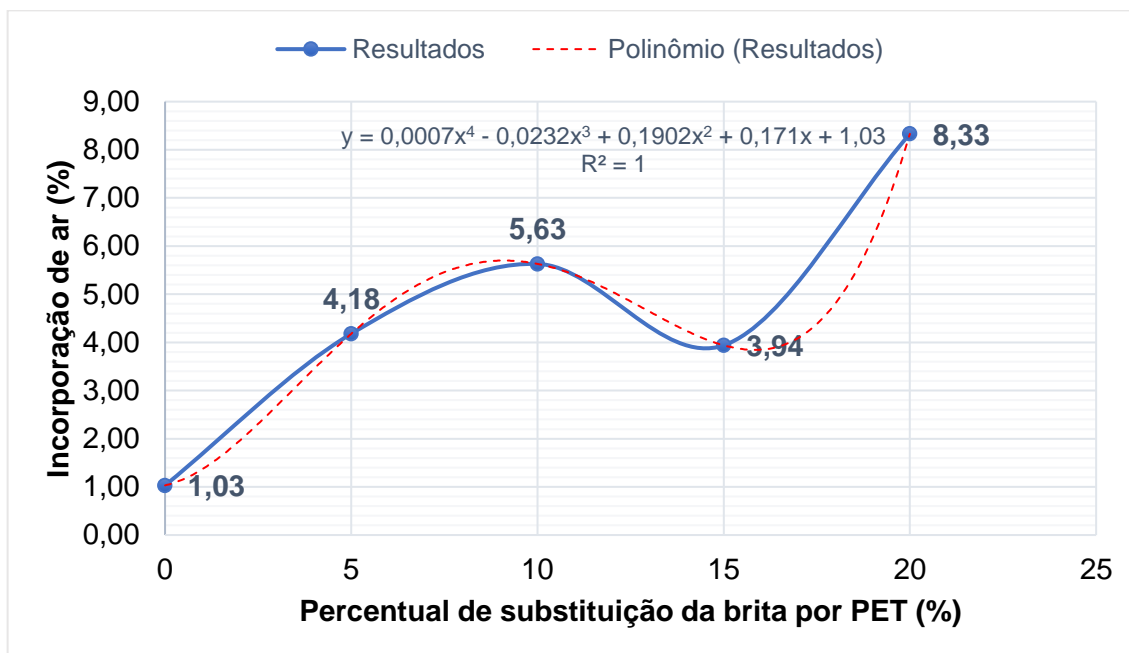
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A incorporação de ar nesta situação não representou uma influência tão significativa nas propriedades mecânicas e na trabalhabilidade. A substituição de brita, necessariamente remove material resistente e insere um material de baixíssima resistência, além de aumentar o teor de finos do concreto produzido, fazendo com que as propriedades mecânicas sejam afetadas negativamente. A trabalhabilidade do concreto foi influenciada primordialmente pela utilização de aditivo superplastificante.

O modelo que descreve o comportamento apresentado pela incorporação de ar nas substituições de agregado graúdo é dado pela equação:  $y = 0,0007x^4 - 0,0232x^3 + 0,1902x^2 + 0,171x + 1,03$ ; com precisão de 100%, na Figura 55, é válida para as situações descritas neste trabalho.

A incorporação de ar do traço 20%B apresentou aumento de 8,09 vezes em relação ao apresentado pelo controle. A Figura 55 mostra os valores da incorporação de ar para as substituições de agregado graúdo

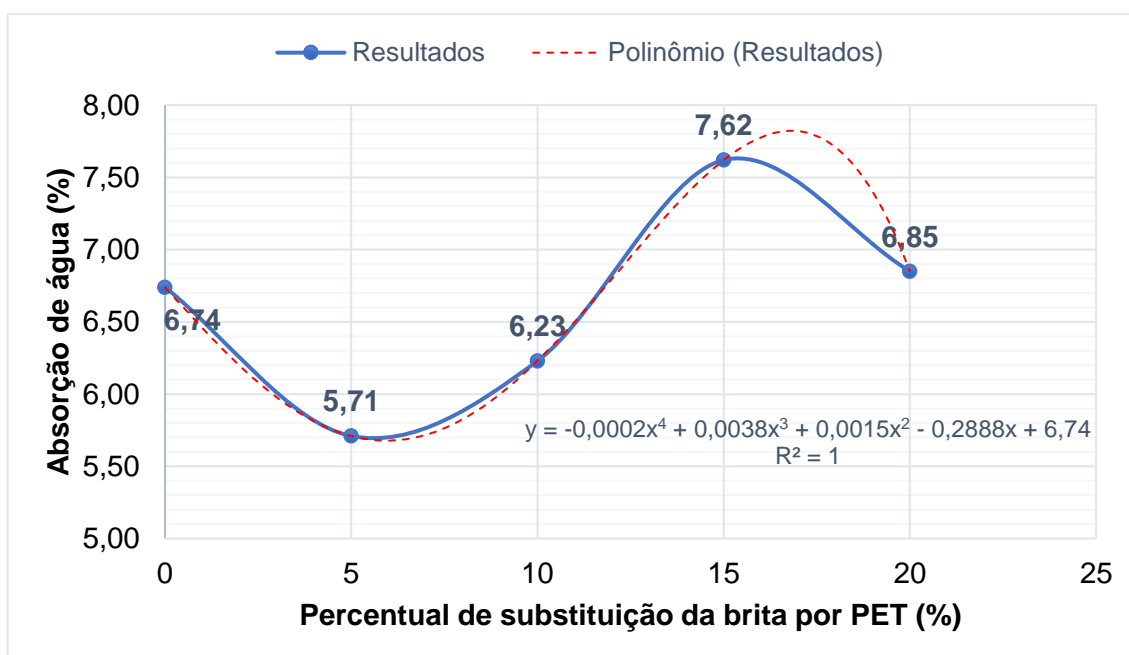
Figura 55 – Incorporação de ar para substituições do agregado graúdo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A absorção de água seguiu o mesmo comportamento da substituição de areia, com o aumento de absorção seguindo o aumento das incorporações de PET, conforme mostra a Figura 56.

Figura 56 – Absorção de água para substituições do agregado graúdo.

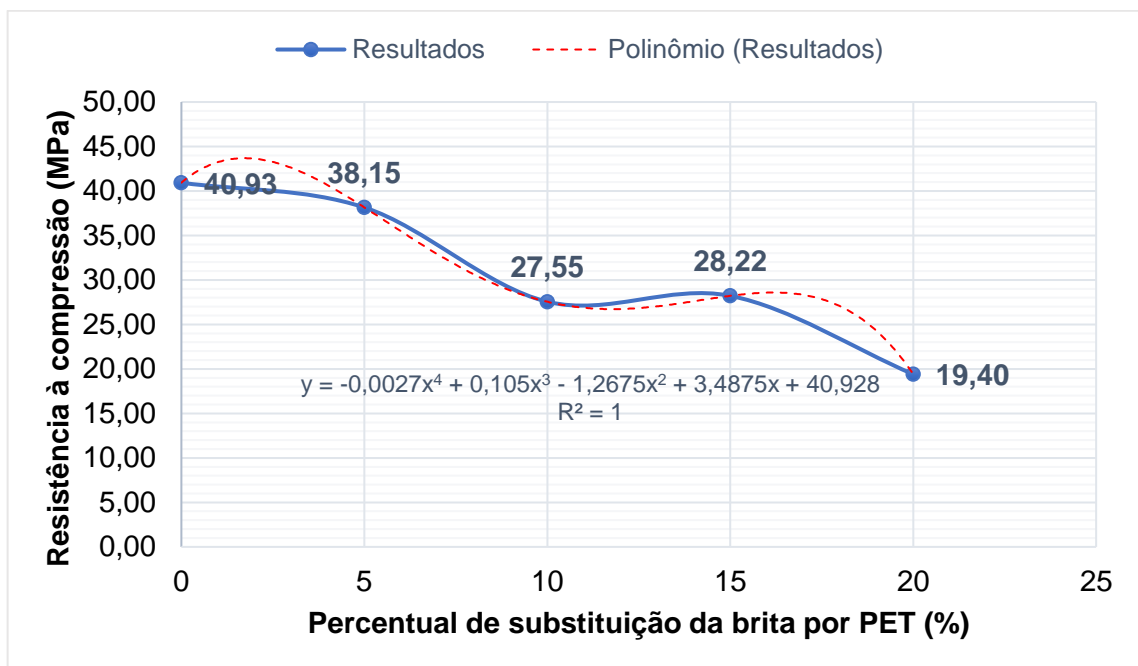


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A equação:  $y = -0,0002x^4 + 0,0038x^3 + 0,0015x^2 - 0,2888x + 6,74$ , com precisão de 100%, da Figura 56, descreve o comportamento da absorção de água para as situações deste trabalho.

A resistência à compressão também apresentou comportamento condizente com o esperado, reduzindo conforme o aumento das substituições, como mostra a Figura 57. Essa redução é esperada devido à própria natureza da substituição de brita por PET, que retira um material graúdo e de boa resistência mecânica e o substitui por um material miúdo e de baixa resistência, apresentando reduções de até 52,61% em relação à resistência à compressão da referência, no traço 20%B.

Figura 57 – Resistência à compressão para substituições do agregado graúdo.



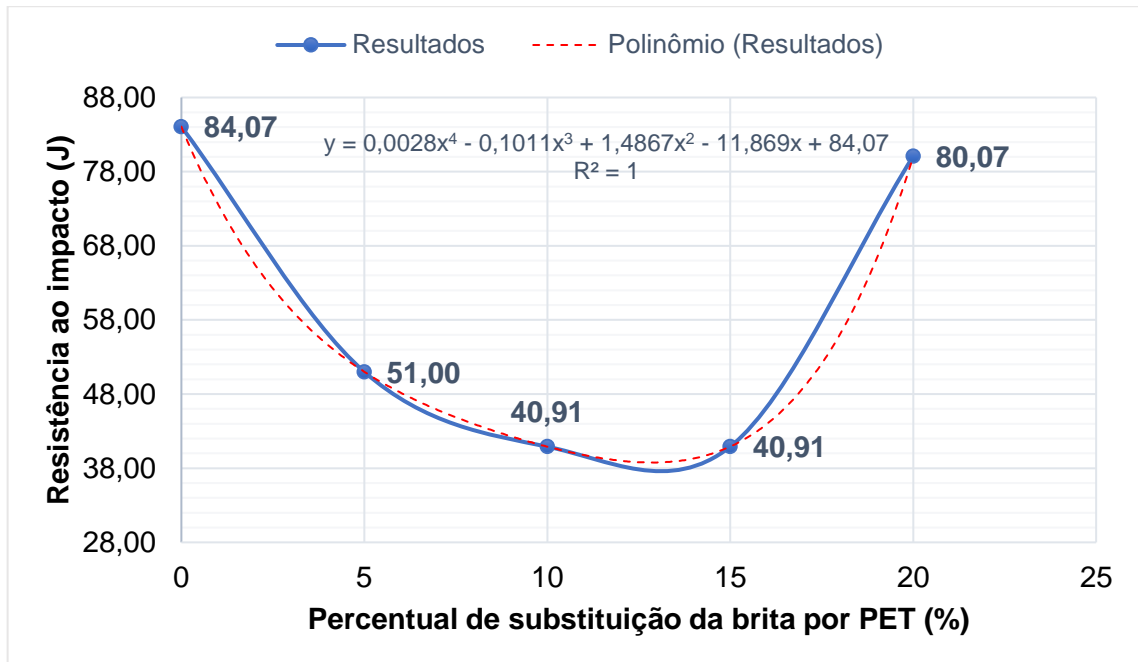
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A equação:  $y = -0,0027x^4 + 0,105x^3 - 1,2675x^2 + 3,4875x + 40,928$ , com precisão de 100%, na Figura 57, descreve o comportamento da resistência à compressão para as situações deste trabalho.

A resistência ao impacto, demonstrada na Figura 58, também apresentou redução. No entanto, o traço 20%B apresentou os melhores resultados, provavelmente em função da quantidade elevada de PET presente, o que acabou atenuando o efeito da baixa resistência mecânica e do elevado teor de finos do

concreto. As reduções apresentadas pelos traços 10%B e 15%B foram de 51,34% em relação ao controle, ao passo que o traço 20%B apresentou redução inferior a 5% em comparação ao controle.

Figura 58 – Resistência ao impacto para substituições do agregado graúdo.



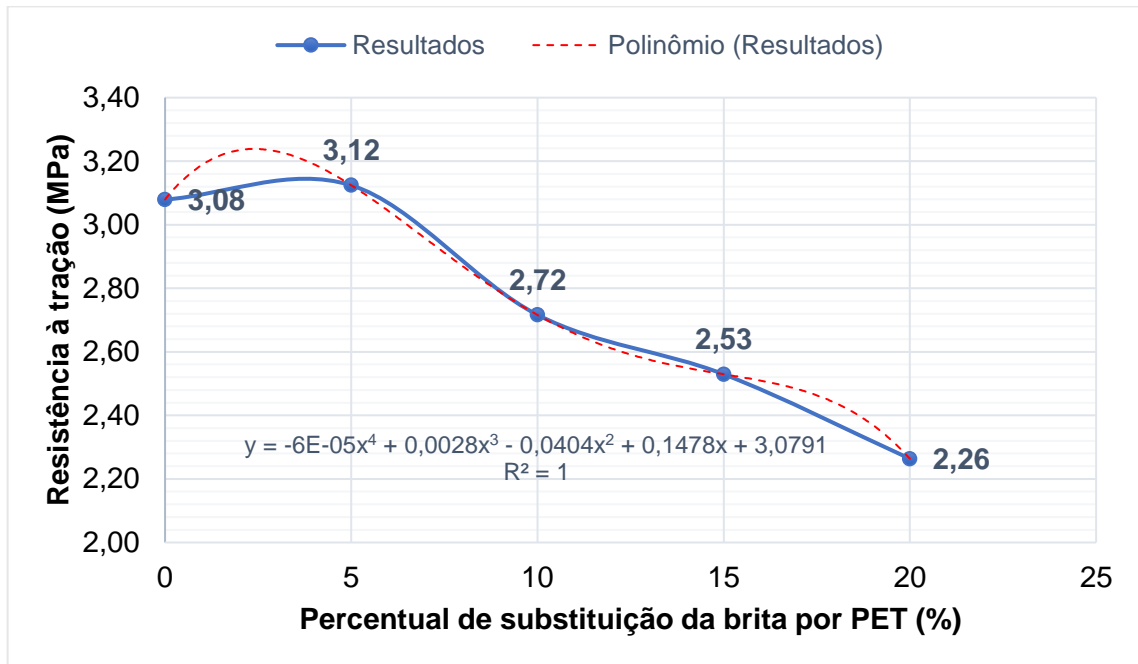
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A equação:  $y = 0,0028x^4 - 0,1011x^3 + 1,4867x^2 - 11,869x + 84,07$ , com precisão de 100%, da Figura 58, descreve o comportamento da resistência ao impacto para as situações deste trabalho.

A resistência à tração, ilustrada na Figura 59, também apresentou reduções e, assim como para a substituição de areia, as reduções foram menos significativas do que as apresentadas na resistência à compressão, com o destaque para o traço 5%B, que obteve resistência à tração superior ao traço de referência. Esse resultado pode ser admitido considerando o comportamento de fibra do PET e a resistência à compressão ainda elevada do concreto, o que mostra que o efeito negativo do aumento do teor de finos ainda não havia ocorrido.

O comportamento da resistência à tração é descrito pela equação:  $y = -6E-05x^4 + 0,0028x^3 - 0,0404x^2 + 0,1478x + 3,0791$ ; com precisão de 100%, apresentada na Figura 59, válida para as considerações deste trabalho.

Figura 59 – Resistência à tração para substituições do agregado graúdo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 5.10 SÍNTESE DAS PROPRIEDADES ANALISADAS

A Tabela 30 apresenta uma síntese das propriedades analisadas dos pavers de concreto, em que é possível identificar todos os resultados obtidos nos ensaios apresentados neste capítulo, seguindo a seguinte identificação:

Ab – Abatimento do concreto (cm);

$\gamma_f$  – Massa específica no estado fresco ( $g/cm^3$ );

$\gamma_e$  – Massa específica no estado endurecido ( $g/cm^3$ );

Ar – Teor de ar incorporado pelo concreto (%);

Abs – Absorção de água (%);

Rc – Resistência à compressão (MPa);

Ri – Resistência ao impacto (J);

Rt – Resistência à tração por compressão diametral (MPa).

Tabela 30 – Síntese das propriedades estudadas.

Traço	Ab	$\gamma_f$	$\gamma_e$	Ar	Abs	Rc	Ri	Rt
REF	5,70	2,37	2,31	1,03	6,74	40,93	84,07	3,08
5%A	4,70	2,29	2,28	3,46	6,94	36,20	114,88	2,90
10%A	5,70	2,22	2,15	1,70	7,68	35,66	154,75	2,99
15%A	5,00	2,21	2,11	1,14	7,40	35,17	125,68	2,96
20%A	4,50	2,17	2,09	6,80	8,25	29,44	127,94	2,35
5%AB	1,50	2,25	2,23	2,61	6,02	31,63	102,53	2,71
5%B	5,00	2,23	2,17	4,18	5,71	38,15	51,00	3,12
10%B	5,50	2,14	2,07	5,63	6,23	27,55	40,91	2,72
15%B	6,00	2,16	2,09	3,94	7,62	28,22	40,91	2,53
20%B	6,50	2,00	1,94	8,33	6,85	19,40	80,07	2,26

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 5.11 CENÁRIOS DE REDUÇÃO DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS DE PET

Em face dos resultados apresentados, considerando a aceitação do paver com resíduos de PET nos traços de melhor desempenho, 5%A, 10%A e 15%A, e considerando que este paver venha a ser utilizado em pavimentações, é possível realizar uma simulação de estimativas de consumo dos resíduos de PET.

Para tal simulação, vamos considerar o sistema de moldagem mecânico, utilizando uma máquina de fabricação de blocos, também conhecida como vibroprensa. Considerando uma máquina média, de potência 55 cv e ciclos de 15 a 20 segundos, pode-se tomar como estimativa de produção diária o total de 32000 pavers de 10 x 20 x (8-6) cm. Considerando que esta máquina trabalhará 23 dias por mês, a produção mensal será de 736000 blocos, equivalentes a uma área de cobertura de 14720 m<sup>2</sup>, suficiente para cobrir 2 campos de futebol oficiais (105 x 68 m) com sobras. Considerando o mesmo tipo de bloco deste trabalho, de dimensões

10 x 20 x 6 cm, e a produção mensal de 736000 blocos, o volume de produção mensal de concreto será de 883,2 m<sup>3</sup>.

**a) Primeiro cenário – Traço 5%A**

Considerando uma produção mensal de 883,2 m<sup>3</sup> de concreto e o consumo do traço 5%A, dado pela Tabela 26, de 22,91 kg/m<sup>3</sup>, tem-se um consumo de 20234,11 kg de resíduo de PET, ou seja, 20,23 toneladas de PET que seriam utilizadas para a fabricação de pavers. Essa massa de PET equivale a pouco mais de 47 m<sup>3</sup>, o que representa quase 4 caminhões compactadores de lixo (12 m<sup>3</sup> cada) cheios de PET.

**b) Segundo cenário – Traço 10%A**

Considerando uma produção mensal de 883,2 m<sup>3</sup> de concreto e o consumo do traço 10%A, dado pela Tabela 26, de 45,81 kg/m<sup>3</sup>, tem-se um consumo de 40459,39 kg de resíduo de PET, ou seja, 40,46 toneladas de PET que seriam utilizadas para a fabricação de pavers. Essa massa de PET equivale a pouco mais de 94 m<sup>3</sup>, o que representa quase 8 caminhões compactadores de lixo (12 m<sup>3</sup> cada) cheios de PET.

**c) Terceiro cenário – Traço 15%A**

Considerando uma produção mensal de 883,2 m<sup>3</sup> de concreto e o consumo do traço 15%A, dado pela Tabela 26, de 68,72 kg/m<sup>3</sup>, tem-se um consumo de 60693,50 kg de resíduo de PET, ou seja, 60,69 toneladas de PET que seriam utilizadas para a fabricação de pavers. Essa massa de PET equivale a pouco mais de 141 m<sup>3</sup>, o que representa quase 12 caminhões compactadores de lixo (12 m<sup>3</sup> cada) cheios de PET.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível perceber que a ampliação do conhecimento acerca do comportamento de concretos com incorporação de resíduos de PET é necessária. Neste intuito, esta pesquisa buscou avaliar o desempenho de pavers de concreto para pavimentação intertravada contendo diferentes teores de incorporação de resíduos de PET.

As conclusões aqui apresentadas foram baseadas nos resultados das experimentações realizadas, dentro das condições manuais de produção das peças analisadas.

Os ensaios de abatimento evidenciaram uma variação de comportamento em relação às substituições realizadas quando comparados ao concreto convencional. Para as substituições do agregado miúdo, o abatimento obtido foi, em sua maioria, menor do que o obtido pelo concreto convencional, evidenciando uma diferença no comportamento do concreto fresco em função da diferença no formato dos grãos do PET e do agregado natural, diminuindo à medida em que se aumentava a incorporação de resíduos. Para as substituições do agregado graúdo, este comportamento se mostrou inverso, aumentando conforme se aumentava a incorporação de resíduos. Este comportamento demonstrado pode ser atribuído ao aditivo superplastificante utilizado nestes traços, sendo que a produção destas misturas sem a utilização do aditivo se mostrou impraticável, com abatimentos mínimos, quase nulos.

Os ensaios de massa específica mostraram uma tendência de redução para todos os traços contendo resíduos. Esta redução é atribuída à menor massa específica do resíduo, em comparação aos agregados naturais utilizados, evidenciando-se nas diferenças maiores obtidas com a substituição do agregado graúdo.

A análise da incorporação de ar evidenciou uma tendência de aumento para todos os traços contendo PET. Este aumento é atribuído aos vazios formados entre as partículas de PET e a pasta de cimento, e ao arranjo dos materiais componentes que é prejudicado ao se inserir um material com formatos laminares, de arestas regulares e superfícies lisas, ao invés de um material de formato esférico e superfície rugosa, como é o caso da areia.

Os pavers produzidos com resíduos de PET apresentaram tendências de comportamento semelhantes em relação à absorção de água em comparação ao concreto convencional. Enquanto os pavers produzidos com substituição do agregado miúdo por resíduo de PET apresentaram valores iniciais superiores ao concreto convencional e crescendo conforme aumentava-se a incorporação do resíduo, os pavers produzidos com substituição do agregado graúdo por resíduos de PET apresentaram uma absorção inicial inferior ao concreto convencional e também aumentando conforme o aumento da incorporação de resíduos.

Os ensaios de resistência à compressão nos pavers com incorporação de resíduos apresentaram valores inferiores aos obtidos pelos pavers produzidos com concreto convencional, que obtiveram resistência à compressão estimada em 40,93 MPa. Porém, os traços contendo 5%, 10% e 15% de substituição de agregado miúdo natural e 5% de agregado graúdo natural, por agregados miúdos de PET obtiveram resistência acima de 35 MPa, valor mínimo prescrito na NBR 9781 (ABNT, 2013a) para pavers submetidos ao tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

A resistência ao impacto dos pavers foi melhorada nos traços contendo substituição de areia, porém piorada nos traços contendo substituição de brita. A melhora obtida pelos traços contendo substituição de areia chegou a 84% em relação ao concreto de referência, e essa melhora é atribuída ao comportamento dúctil proporcionado pelo PET e pelo seu formato de fibra, que auxilia na manutenção da integridade do paver. Já no caso da substituição de brita, a redução na resistência ao impacto chegou a 49%, em virtude da remoção de material resistente e do alto teor de finos presentes no concreto.

A resistência à tração também foi afetada pela substituição de agregados naturais por PET, apresentando reduções em praticamente todos os traços produzidos, com exceção do traço 5%B, que obteve desempenho praticamente igual (1,1% acima) ao desempenho apresentado pela referência. Essa redução se deve à ligação mais fraca entre o PET e a pasta de cimento e ao acréscimo no volume de vazios formados.

A utilização do aditivo superplastificante demonstrou ter influência na melhora do comportamento plástico do concreto fresco nos traços produzidas com substituição de agregado graúdo por resíduos de PET. Além de melhorar a textura, a compactação e desmoldagem dos pavers produzidos, se mostrou necessária à produção dos pavers

contendo substituição de agregados graúdos, uma vez que a produção destes traços sem a utilização do aditivo se mostrou inviável para os traços adotados.

Com base nos resultados apresentados e nas análises realizadas, percebe-se que, para as condições em que o trabalho foi realizado, alguns traços apresentaram propriedades satisfatórias em comparação às propriedades do concreto convencional e em relação à NBR 9781 (ABNT, 2013a). De forma geral, os pavers dos traços 5%A, 10%A, 15%A e 5%B apresentaram propriedades semelhantes às apresentadas pelos pavers de controle, e em algumas situações o comportamento mecânico foi até superior, indicando que há margem para aplicação do PET como substituto parcial dos agregados em concretos destinados à produção de pavers.

## 6.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS

O comportamento do concreto convencional é alvo de estudos constantes, tendo suas propriedades bem definidas, divulgadas e conhecidas. No entanto, como já citado anteriormente, o comportamento do concreto com resíduos de PET ainda precisa ser estudado de forma mais aprofundada.

Uma das grandes dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho foi descobrir o comportamento do concreto produzido com incorporação de resíduos de PET. Ensaio preliminares foram feitos com argamassas contendo resíduos de PET em diferentes teores de incorporação para se mensurar e conhecer algumas tendências de comportamento destes materiais, para depois exportá-los para o concreto e obter a verificação de semelhanças entre algumas propriedades, como a absorção, trabalhabilidade e resistência à compressão.

A incorporação de resíduos de PET afeta diretamente o comportamento da água no concreto. E este comportamento foi afetado com mais intensidade na produção dos traços em que o agregado graúdo foi substituído. Em razão do fator água/cimento ( $a/c$ ) baixo escolhido, os traços necessitaram da utilização de aditivo superplastificante para que sua mistura fosse viabilizada. Sem o aditivo, a mistura adequada não seria possível de ser realizada nos parâmetros estipulados, visto que os materiais não apresentavam homogeneidade. Ainda sobre o comportamento da água, o fator água/cimento foi cuidadosamente escolhido por meio de traços experimentais de todas as substituições com diferentes fatores água/cimento ( $a/c$ ),

em quantidades reduzidas, para se observar a influência que o acréscimo ou decréscimo na quantidade de água ocasionaria na mistura de concreto. Por sua baixa absorção, o concreto com resíduos de PET se mostrou muito sensível às variações no fator água/cimento, tendo o a/c de 0,51 apresentado os melhores resultados.

Outra dificuldade apresentada foi a de se encontrar laboratórios credenciados a realizar o ensaio de abrasão segundo a norma de pavers. A princípio, nenhum laboratório possui a acreditação do INMETRO para a realização deste ensaio e, como a NBR 9781 (ABNT, 2013a) não exige a realização, não foi possível realizar este ensaio nos laboratórios contatados.

## 6.2 CONTINUIDADE DO TRABALHO

Buscando continuar o desenvolvimento da pesquisa e aprofundar o conhecimento no comportamento do concreto contendo resíduos de PET, sugere-se como continuidade do trabalho os estudos sobre os critérios da norma brasileira de pavers, NBR 9781 (ABNT, 2013a), frente às normas internacionais, em que claramente se vê uma defasagem em relação aos métodos de ensaios utilizados, principalmente no que tange à durabilidade e forma de avaliação de resistência.

No capítulo 2 deste trabalho foi discutida a relação que a NBR 9781 (ABNT, 2013a) faz de resistência à compressão com durabilidade, sendo que em outras normas essa relação não é utilizada e trabalhos já foram realizados evidenciando que a durabilidade do pavimento intertravado se deve muito mais à execução adequada de sua camada de assentamento e da devida compactação do solo do que à própria resistência do pavimento.

Também seria interessante estudar a relação da absorção com a durabilidade, visto que este é um dos poucos critérios exigidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013a). Apesar da absorção evidenciar uma peça com maior compacidade, com menor teor de vazios, apenas a absorção não deveria ser um fator que desqualificasse a utilização das peças.

Também no capítulo 2 deste trabalho foram mostrados alguns dos ensaios utilizados em trabalhos anteriores para a avaliação da resistência à abrasão, e sendo o desgaste por abrasão um dos principais fatores de deterioração das peças que compõem o pavimento, principalmente quando a solicitação principal é a proveniente

de pedestres, o que é o caso de pavimentos intertravados em praças e em passeios públicos, seria interessante buscar métodos alternativos ao ensaio.

No item 2.3 deste trabalho são comentadas as características dos processos de moldagem mecânico e manual, sendo este último adotado no trabalho. Sugere-se, como forma de continuidade, a comparação das propriedades dos pavers produzidos mecanicamente, uma vez que a produção mecânica proporciona economia de materiais, resistências mais elevadas para um mesmo consumo de cimento e maior controle das características.

Ainda se faz necessário o aprofundamento do estudo de traços de concreto contendo PET para a aplicação em pavimentos intertravados, de modo a proporcionar características que atendam aos requisitos de serviço.

Por fim, ressalta-se que as conclusões aqui obtidas se limitam às situações deste trabalho e que a aplicação de concretos com substituições e/ou inclusões de PET em outras situações deve ser devidamente estudada e analisada para que se obtenha a devida economia sem perda da qualidade técnica.

## REFERÊNCIAS

ACRE. Secretaria de Estado de Comunicação. *Site*. Rio Branco, 2018. Disponível em: <http://www.agencia.ac.gov.br/>. Acesso em: 21 fev. 2019.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo: Blucher, 2011.

AHMADINIA, E. et al. Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. **Materials & Design**, London, v. 32, n. 10, p.4844-4849, dez. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.016>. Acesso em: 21 fev. 2019.

AKÇAÖZOĞLU, S.; ATIŞ, C. D.; AKÇAÖZOĞLU, K. An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. **Waste Management**, Kidlington, v. 30, n. 2, p.285-290, fev. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>. Acesso em: 21 fev. 2019.

AKÇAÖZOĞLU, S.; ULU, C. Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali-activated blast furnace slag/metakaolin blends. **Construction And Building Materials**, Kidlington, v. 58, p.31-37, maio 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.011>. Acesso em: 21 fev. 2019.

ALCANTARA, P. S. X. de. **Blocos intertravados coloridos para pavimentação com incorporação de resíduos de cerâmica vermelha em prol da redução de pigmentos**. 2015. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2015.

AL-TAYEB, M. M. et al. Ultimate failure resistance of concrete with partial replacements of sand by waste plastic of vehicles under impact load. **International Journal Of Sustainable Built Environment**, Amsterdam, v. 6, n. 2, p.610-616, dez. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.12.008>. Acesso em: 21 fev. 2019.

ALTOÉ, S. P. S.; MARTINS, C. H. Estudo da potencialidade da utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na confecção de pavers. In: ENCONTRO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA, 9., 2013, Maringá. **Anais [...]** Maringá: Dec, 2013. 10p.

AMADEI, D. I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR**. 2011. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **C936**: standard specification for solid concrete interlocking paving units. West Conshohocken, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PET – ABIPET. **Décimo censo da reciclagem de PET no Brasil**. São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **Preformas de**

**PET**: variedade para todos os fins. Disponível em:

<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=47>. Acesso em: 21 fev. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Manual de pavimento intertravado**: passeio público. São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12042**: materiais inorgânicos: determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13818**: placas cerâmicas para revestimento: especificações e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15575-3**: edificações habitacionais: desempenho: parte 3: requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15900-1**: água para amassamento do concreto: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2009d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15953**: pavimento intertravado com peças de concreto: execução. Rio de Janeiro, 2011a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16697**: cimento portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7222**: concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9454**: placas cerâmicas para revestimento: especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1986. norma extinta

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9781**: peças de concreto para pavimentação: especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9833**: concreto fresco: determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248:** agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52:** agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 53:** agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b.

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

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO – ANEPAC. **O mercado de agregados no Brasil.** São Paulo, 2015.

AZHARPOUR, A. M.; NIKOUDEL, Md. R.; TAHERI, M. The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 109, p.55-62, abr. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056>. Acesso em: 21 fev. 2019.

BANNACH, G.; PERPÉTUO, G. L. Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero pet: um experimento para ensino de análise térmica. 1825-1829p. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 10, p. 1825-1829, 2011.

BEATY, A. N. S. Predicting the performance of bedding sands. INTERNATIONAL CONCRETE BLOCK PAVING CONFERENCE, 4., 1992, Auckland, New Zealand. **Proceedings** [...] Auckland: [s.n.], feb. 1992. v. 2, p. 273-284.

BELTRÃO, K. R. A. **Reciclagem de PET.** Brasília: CDT/UnB, 2007. 24 p.

BERECHMAN, J. Transportation – economic aspects of Roman highway development: the case of Via Appia. **Transportation Research Part A: policy and practice**, Amsterdam, v. 37, n. 5, p.453-478, jun. 2003. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0965-8564\(02\)00056-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0965-8564(02)00056-3). Acesso em: 21 fev. 2019.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2006.

BLUMENAU. Prefeitura Municipal. *Site*. Blumenau, 2018. Disponível em <https://www.blumenau.sc.gov.br/>. Acesso em: 21 fev. 2019.

BOAS, Gustavo Villas (Ed.). **Tiradentes-MG:** Passado, ecologia e cultura. 2014. Elaborada por Roberto Farias. Disponível em: <https://muitaviagem.com.br/tiradentes-mg-passado-ecologia-e-cultura/>. Acesso em: 21 fev. 2019.

BURAK, R. Bedding sand for segmental concrete pavements. **Interlocking Concrete Pavement Magazine**, Herndon, v. 9, n. 9, p. 12-16, aug. 2002.

CHOI, Y. et al. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 23, n. 8, p.2829-2835, ago. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>. Acesso em: 21 fev. 2019.

CHOI, Y. et al. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. **Cement And Concrete Research**, Amsterdam, v. 35, n. 4, p.776-781, abr. 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.014>. Acesso em: 21 fev. 2019.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. **EN 1338**: concrete paving blocks: requirements and test methods. Brussels, 2003.

CONCRETE MANUFACTURERS ASSOCIATION – CMA. New concrete block paving standard amended. **Precast**, Johannesburg, v. 6, n. 1, p.14-15, jul. 2012.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto**: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento. 2003. 281 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CSA GROUP – CSA. **CSA A231.1/A231.2**: precast concrete paving slabs/precast concrete pavers. Mississauga, 2014.

DEJA, J.; ULIASZ-BOCHENCZYK, A.; MOKRZYCKI, E. CO2 emissions from Polish cement industry. **International Journal Of Greenhouse Gas Control**, Amsterdam, v. 4, n. 4, p.583-588, jul. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2010.02.002>. Acesso em: 21 fev. 2019.

DUARTE, E. B. de L. **Resistência à compressão de argamassa composta por resíduo de construção e demolição e politereftalato de etileno (PET) em flocos**. 2014. 166 f. Dissertação (Mestrado em Administração), Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2014.

ESTRADA Paraty-Cunha tem 97% das obras concluídas . 2016. Disponível em: <http://www.tribunadaserra.com.br/estrada-paraty-cunha-tem-97-das-obras-concluidas/>. Acesso em: 21 ago. 2018.

FERREIRA, L.; BRITO, J. de.; SAIKIA, N. Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 36, p.196-204, nov. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.098>. Acesso em: 21 fev. 2019.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 2007. 202 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FORMIGONI, A.; CAMPOS, I. P. de A. Reciclagem de PET no Brasil. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, SÃO PAULO, 2007, São Paulo. **Anais** [...] São Paulo: Universidade Paulista, 2007.

FOTI, D. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. **Composite Structures**, Amsterdam, v. 96, p.396-404, fev. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.019>. Acesso em: 21 fev. 2019.

FOTI, D.; PAPARELLA, F. Impact behavior of structural elements in concrete reinforced with PET grids. **Mechanics Research Communications**, Amsterdam, v. 57, p.57-66, abr. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechrescom.2014.02.007>. Acesso em: 21 fev. 2019.

FRIGIONE, M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. **Waste Management**, Amsterdam, v. 30, n. 6, p.1101-1106, jun. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>. Acesso em: 21 fev. 2019.

FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE – FUNTAC. **Relatório técnico**: setor cerâmico do Vale do Acre. Rio Branco, 1999.

G1. **Chuva acumula lixo e milhares de garrafas plásticas no rio Tietê**. 2014. Disponível em: <http://g1.globo.com/sao-paulo/sorocaba-jundiai/noticia/2014/02/chuva-acumula-lixo-e-milhares-de-garrafas-plasticas-no-rio-tiete.html>. Acesso em: 21 fev. 2019.

GARZA, S. J. **History hiking through the Via Appia Antica**: part 1. 2014. Disponível em: <https://historyhiker.com/2014/08/15/history-hiking-through-the-via-appia-antica-part-1/>. Acesso em: 21 fev. 2019.

GE, Z. et al. Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 44, p.81-86, jul. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.073>. Acesso em: 21 fev. 2019.

GE, Z.; YUE, H.; SUN, R. Properties of mortar produced with recycled clay brick aggregate and PET. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 93, p.851-856, set. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.081>. Acesso em: 21 fev. 2019.

GODINHO, D. P. **Pavimento intertravado**: uma reflexão sob a ótica da durabilidade e da sustentabilidade. 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

GU, L.; OZBAKKALOGLU, T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. **Waste Management**, Amsterdam, v. 51, p.19-42, maio 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>. Acesso em: 21 fev. 2019.

HALLACK, A. **Dimensionamento de pavimentos com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais**. 1998. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

HAMA, S. M.; HILAL, N. N. Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand. **International Journal Of Sustainable Built Environment**, Amsterdam, v. 6, n. 2, p.299-308, dez. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.01.001>. Acesso em: 21 fev. 2019.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN – IRAM. **NA 11656**: adoquines de hormigón para pavimentos intertrabados: requisitos y métodos de ensayo. Buenos Aires, 2010.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. **NTC 2017**: adoquines de concreto para pavimentos. Bogotá, 2004.

INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN – INEN. **NTE 3040**: adoquines de hormigón: requisitos y métodos de ensayo. Quito, 2016.

INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE – ICPI. **Tech Spec 4**: structural design of interlocking concrete pavement for roads and parking lots. [s.l.], 2014.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY – IUPAC. *Site*. Zurich, 2019. Disponível em: <http://www.iupac.org/>. Acesso em: 21 fev. 2019.

ISLAM, Md. J.; MEHERIER, Md. S.; ISLAM, A. K. M. R. Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 125, p.946-951, out. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.128>. Acesso em: 21 fev. 2019.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. **Waste Management**, Amsterdam, v. 28, n. 11, p.2041-2047, nov. 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023>. Acesso em: 21 fev. 2019.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113 f. Tese (Livre-docência), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KNAPTON, J. Romans and their roads: the original small element pavement technologists. INTERNATIONAL CONCRETE BLOCK PAVING CONFERENCE, 5., 1996, Tel-Aviv, Israel. **Proceedings** [...] Tel-Aviv, Israel: [s.n.], jun. 1996. p. 17-52.

KRAUSS, Margaret J. **Surviving on charm**: Pittsburgh's last wooden street. 2015. Disponível em: <https://www.wesa.fm/post/surviving-charm-pittsburgh-s-last-wooden-street>. Acesso em: 21 fev. 2019.

LEITE, P. R. **Logística reversa**: meio ambiente e competitividade. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003. 250 p.

MADRID, G. G. Acredite: rodovias com intertravados já são realidade. **Revista Prisma**, São Paulo, n. 10, 2004.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1999.

MARTINS FILHO, S. T.; MARTINS, C. H. Utilização da cinza leve e pesada do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na produção de blocos de concreto para pavimentação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 10, n. 4, p.1205-1224, 12 dez. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2017v10n4p1205-1224>. Acesso em: 21 fev. 2019.

MAZZOLI, A.; MONOSI, S.; PLESCIA, E. S. Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 101, p.596-601, dez. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.090>. Acesso em: 21 fev. 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, J. W. de. **Produção e caracterização de pó de PET – Poli (Tereftalato de etileno), obtido a partir de garrafas pós-consumo**. 2004. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

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. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-70762009000100007>. Acesso em: 21 fev. 2019.

MOOSHER, L. **Utilização de resíduos sólidos de fundição como matérias-primas para fabricação de blocos de concreto para pavimentação**. 2013. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

MULLER, R. M. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto**. 2005. 256 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

NASCIMENTO, M. V. L. de A. **Estudos de blocos intertravados de concreto para pavimentação com incorporação de resíduo do polimento do porcelanato**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NURSYAMSI; ZEBUA, W. S. B. The influence of pet plastic waste gradations as coarse aggregate towards compressive strength of light concrete. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 171, p.614-619, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.394>. Acesso em: 21 fev. 2019.

PACHECO-TORGAL, F.; DING, Y.; JALALI, S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 30, p.714-724, maio 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.047>. Acesso em: 21 fev. 2019.

PEARSON, A.; SHACKEL, B. Australian national standards for segmental and flag pavements. INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVING, 7., 2003, Sun City, South Africa. **Proceedings** [...] Sun City: [s.n.], oct. 2003.

PEREIRA, E. L.; OLIVEIRA JUNIOR, A. L. de.; FINEZA, A. G. Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 149, p.837-848, set. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.148>. Acesso em: 21 fev. 2019.

PONTE, A. G.; OLIVEIRA, L. P. de. **Manual técnico de piso intertravado de concreto**. Fortaleza: T&A Blocos e Pisos, 2004.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO – PMSP. **IP 06**: dimensionamento de pavimentos com blocos intertravados de concreto. São Paulo, 2004.

PREGO, A. S. S. **A memória da pavimentação no Brasil**: relatos históricos, recordações e depoimentos. Rio de Janeiro: ABPV, 2001.

RAHMAN, W. M. N. W. A.; WAHAB, A. F. A. Green pavement using recycled polyethylene terephthalate (PET) as partial fine aggregate replacement in modified asphalt. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 53, p.124-128, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.018>. Acesso em: 21 fev. 2019.

RAHMANI, E. et al. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 47, p.1302-1308, out. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>. Acesso em: 21 fev. 2019.

REIS, J. M. L. et al. Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 25, n. 6, p.2799-2804, jun. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.056>. Acesso em: 21 fev. 2019.

REIS, J. M. L.; CARNEIRO, E. P. Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 27, n. 1, p.107-111, fev. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.020>. Acesso em: 21 fev. 2019.

RICCHINI, R. **Reciclagem de garrafas de plástico**. 2013. Disponível em: <http://www.setorreciclagem.com.br/reciclagem-de-plastico/reciclagem-de-garrafas-de-plastico/>. Acesso em: 21 fev. 2019.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. de. Poli(tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, São Carlos, v. 19, n. 2, p.121-132, jun. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282009000200009>. Acesso em: 21 fev. 2019.

SAIKIA, N.; BRITO, J. de. Mechanical properties and abrasion behavior of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 52, p.236-244, fev. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>. Acesso em: 21 fev. 2019.

SANTOS, V. R. F. dos. **Análise do desempenho de pisos táteis, intertravados, produzidos com agregados de resíduos de construção civil - RCC e fibras de aço**. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014).

SAXENA, R. et al. Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste. **Construction And Building Materials**, Amsterdam v. 176, p.415-421, jul. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.019>. Acesso em: 21 fev. 2019.

SHACKEL, B. **Design and construction of interlocking concrete block pavement**. 5. ed. New York: Elsevier, 1990.

SIKA S.A. **Ficha técnica de produto**: Sika® ViscoCrete®-5800 FTN. Osasco: S.n., 2018.

SILVA, A. M. da.; BRITO, J. de.; VEIGA, R. Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 71, p.226-236, nov. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.026>. Acesso em: 21 fev. 2019.

SILVA, R.V.; BRITO, J. de; SAIKIA, N. Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. **Cement And Concrete Composites**, Amsterdam, v. 35, n. 1, p.23-31, jan. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017>. Acesso em: 21 fev. 2019.

SMITH, D. R. Grand entrances. **Interlocking concrete pavement magazine**, Herndon, v. 10, n. 2, 2003.

SOROCABA. Prefeitura Municipal. *Site*. Sorocaba, 2018. Disponível em <https://www.sorocaba.sp.gov.br/>. Acesso em: 21 ago. 2018.

SOUTH AFRICAN BUREAU OF STANDARDIZATION – SABS. **SANS 1058**: concrete paving blocks. Pretoria, 2012.

STANDARDS AUSTRALIA – SA. **AS/NZS 4455**: masonry units, pavers, flags and segmental retaining wall units. Sydney, 2010.

SYNTEX AMERICA. **Resina termoplástica**: Syntex se destaca e ganha as Américas. 2015. Disponível em: <https://syntexamerica.com/fornecedor-de-resina-termoplastica/?lang=pt-br>. Acesso em: 21 ago. 2018.

TAAFFE, J. et al. Experimental characterization of Polyethylene Terephthalate (PET) bottle Eco-bricks. **Materials & Design**, Amsterdam, v. 60, p.50-56, ago. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.045>. Acesso em: 21 fev. 2019.

TANG, W. C.; LO, Y.; NADEEM, A. Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. **Cement And Concrete Composites**, Amsterdam, v. 30, n. 5, p.403-409, maio 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.002>. Acesso em: 21 fev. 2019.

TONET, K. G. **Concreto polímero com resina reciclada de PET**: influência na combustibilidade frente à adição de resíduos industriais. 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2009.

VAZ, V. V. **Pavimento intertravado de concreto reforçado com fibras de vidro**. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais), Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2015.

VERMA, R. et al. Toxic pollutants from plastic waste: a review. **Procedia Environmental Sciences**, Amsterdam, v. 35, p.701-708, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.069>. Acesso em: 21 fev. 2019.

VOTORANTIM CIMENTOS S. A. **Relatório de Ensaios**. São Paulo: S.n., 2018.

WOOD block pavement at the 200 block of South Camac Street in Philadelphia. 2015. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wood\\_block\\_pavement\\_South\\_Camac\\_Street.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wood_block_pavement_South_Camac_Street.jpg). Acesso em: 21 fev. 2019.

YESILATA, B.; ISIKER, Y.; TURGUT, P. Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. **Construction And Building Materials**, Amsterdam v. 23, n. 5, p.1878-1882, maio 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.014>. Acesso em: 21 fev. 2019.