



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS



**USO DE POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET) COMO
AGREGADO EM PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTO
INTERTRAVADO**

Salomão Pereira de Almeida

Campina Grande-PB
Outubro/2016

SALOMÃO PEREIRA DE ALMEIDA

**USO DE POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET) COMO
AGREGADO EM PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTO
INTERTRAVADO**

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Engenharia de Processos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos

Linha de pesquisa: Desenvolvimento e Tecnologia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

Campina Grande – PB
Outubro/2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A447u Almeida, Salomão Pereira de.

Uso de politereftalato de etileno (PET) como agregado em peças de concreto para pavimento intertravado / Salomão Pereira de Almeida. – Campina Grande, 2016.

119f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues".

Referências.

1. Engenharia de Processos. 2. Desenvolvimento de Processos. 3. Politereftalato de Etileno (PET). 4. Materiais Alternativos. I. Rodrigues, John Kennedy Guedes. II. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (PB). III. Título.

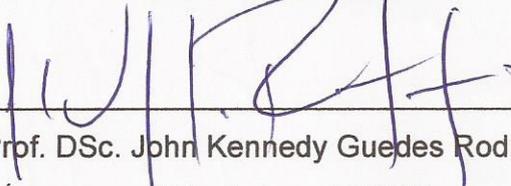
CDU 62-04(043)

SALOMÃO PEREIRA DE ALMEIDA

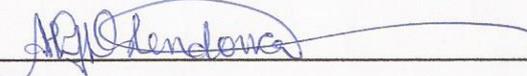
Uso de politereftalato de etileno (PET) como agregado em peças de concreto para pavimento intertravado

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Engenharia de Processos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

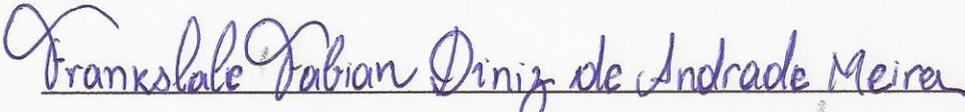
COMISSÃO JULGADORA



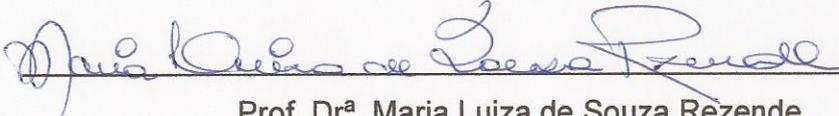
Prof. DSc. John Kennedy Guedes Rodrigues
(Orientador – UFCG)



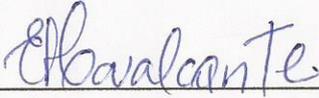
Prof. Drª. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça
(Examinadora Externa – UFCG)



Prof. Dr. Franklale Fabian Diniz de Andrade Meira
(Examinador Externo – IFPB)



Prof. Drª. Maria Luiza de Souza Rezende
(Examinadora Externa – UFCG)



Prof. DSc. Erinaldo Hilário Cavalcante
(Examinador Externo – UFCG)

Aprovada em: 07 de Outubro de 2016.

Local de defesa: Lab. de Eng. de Pavimentos do CTRN/UFCG

AGRADECIMENTOS

Nesta página muito especial deste trabalho, gostaria de agradecer a algumas pessoas, dentre as muitas que me ajudaram a realizá-lo.

A Deus, por ter me driblado diante de tantas dificuldades; por ter me dado inteligência suficiente para saber ser filho, esposo e professor; por ter me feito entender que o doutorado é também uma oportunidade de mostrar o tamanho do Seu poder; por ter me honrado com uma Pós-Graduação; pela misericórdia; pela justiça; pela sua presença; por me dizer: “EU SOU CONTIGO POR ONDE QUER QUE ANDARES”; e eu hoje O digo: “Esta vitória é sua, SENHOR, porque em ti confiei e hoje vejo a tua glória”.

A Dona Alice, minha mãe, pelo exemplo.

A Adriana, minha esposa, pelo incentivo, pela paciência, pelo amor.

A Antonela e Alexia, minhas filhinhas, cujo sorriso revigora minhas forças.

À Professora Ana Maria, pela sua amizade, pelo incentivo, por sua disponibilidade.

À UFCG, pelo oferecimento deste curso.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos, pela infraestrutura e recursos oferecidos para a realização deste trabalho.

Sem vocês este trabalho não seria realizado. Muito obrigado.

“Nos céus e na terra há incontestáveis demonstrações da maravilhosa sabedoria de DEUS. É bem verdade que os que receberam instrução sobre as Ciências Naturais, ou que provaram algo delas, tem nesse conhecimento uma ajuda especial para aprofundar-se na sabedoria divina”.

João Calvino

RESUMO

O politereftalato de etileno (PET) é um dos plásticos mais produzidos no mundo devido à excelente relação entre as suas propriedades e seu custo de produção relativamente baixo. No entanto, devido ao tempo de degradação deste ser relativamente longo, quando descartados de forma inadequada, geram um elevado volume de resíduos. A reciclagem sistemática e a reutilização são soluções para minimizar esse impacto ao meio ambiente e, nesse sentido, a engenharia de pavimentos pode contribuir encontrando alternativas técnica e ambientalmente adequadas e o pavimento intertravado pode ser uma dessas alternativas. Pisos intertravados são formados por peças pré-moldadas de concreto, cuja camada superficial deve apresentar acabamento confortável para o trânsito de pessoas e sua estrutura deve suportar cargas de veículos. Como os agregados que compõem as peças podem ser naturais ou artificiais, buscou-se nesse trabalho avaliar o comportamento das peças produzidas com a substituição parcial do agregado miúdo por PET. Inicialmente, foram realizados ensaios de caracterização para determinar as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e de estado dos agregados, do cimento e do PET. Em seguida, foram moldadas peças com substituição do agregado miúdo por PET nos teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0%. Utilizaram-se os traços 1:1,5:1,5, 1:2:2 e 1:2,5:2,5, com variações do fator a/c de 0,45, 0,50 e 0,55. Após 28 dias de cura, as peças foram submetidas aos ensaios de absorção de água e de resistência característica à compressão. Posteriormente, as peças do traço 1:1,5:1,5, com fator a/c 0,45, foram submetidas aos ensaios de resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, microscopia eletrônica de varredura, desgaste por abrasão, suscetibilidade ao ataque por sulfatos e suscetibilidade à ação do calor e da chuva. Os resultados obtidos indicaram que a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão diminuíram à medida que o teor de PET aumentou; os ensaios de desgaste por abrasão indicaram que as peças, com qualquer um dos teores utilizados, podem ser usadas em situações com efeitos de abrasão acentuados; as peças apresentaram-se resistentes ao ataque por sulfatos, independentemente da presença de PET; quando suscetíveis à ação do calor e da chuva, a peça analisada teve variação de massa e perda de resistência na ordem de 21%, todavia, a água lixiviada não apresentou risco de contaminação para o solo.

Palavras-chave: Propriedades, materiais alternativos, durabilidade.

ABSTRACT

The polyethylene terephthalate (PET) is one of the most produced plastics in the world because of the excellent relationship between their properties and their relatively low cost of production. However, due to degradation of the time be relatively long, when improperly disposed of, generating a large volume of waste. The systematic recycling and reuse are solutions to minimize the impact on the environment. Accordingly, the engineering floor can contribute finding technical and environmentally suitable alternatives and can be interlocked pavement of these alternatives. interlocked floors are made of precast concrete parts, whose surface layer should provide comfortable finish for the transit of people and their structure must support vehicle loads. As the aggregates that make up the parts can be natural or artificial, we sought to evaluate this work the behavior of parts produced with the partial replacement of fine aggregate by PET. Initially, characterization tests were conducted to determine the physical, chemical, mineralogical and state of aggregate, cement and PET. Then, they were molded parts with replacement of fine aggregate PET at 2.5% content, 5.0%, 7.5% and 10.0%. Used was drawn 1:1.5:1.5, 1:2:2 and 1:2.5:2.5, by a factor of variation a / c of 0.45, 0.50 and 0.55 . After 28 days of curing, the specimens were subjected to water absorption tests and resistance to compression feature. Later, trace the pieces of 1:1.5:1.5, with factor w/c 0.45 were subjected to tensile strength tests in bending modulus, scanning electron microscopy, abrasive wear, susceptibility to attack by sulfates and susceptibility to the action of heat and rain. The results showed that the compressive strength, modulus of elasticity and tensile strength in bending decreased as PET content increased; The wear tests indicated that the abrasion parts, with any of the concentrations used, can be used in situations with marked abrasion effects; the pieces were resistant to attack by sulfates, regardless of the presence of PET; When susceptible to the action of heat and rain, the piece was analyzed mass variation and loss of strength in the order of 21%, however, the leachate showed no risk of contamination of the soil.

Keywords: Properties, alternative materials, durability.

ARTIGOS PUBLICADOS/SUBMETIDOS SOBRE O TEMA DA TESE

ALMEIDA, Salomão Pereira de. MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte. RODRIGUES, John Kennedy Guedes. **Evaluation of mechanical properties and durability of concrete produced with PET blocks for the production of floor Interlocked.** In: 16º NOCMAT Non-Conventional Materials and Technologies. Winnipeg – Canada, 2015. (Publicado)

ALMEIDA, Salomão Pereira de. MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte. RODRIGUES, John Kennedy Guedes. **Application of PET as aggregate in concrete to paving.** In: 16º NOCMAT Non-Conventional Materials and Technologies. Winnipeg – Canada, 2015. (Publicado)

ALMEIDA, Salomão Pereira de. **Determinação da resistência do concreto com politereftalato de etileno para fabricação de pisos intertravados.** In: Anais do 57º IBRACON Congresso Brasileiro do Concreto. ISBN/ISSN: 2175-8185. Bonito – MS, 2015. (Publicado)

ALMEIDA, Salomão Pereira de. **Análise da viabilidade de utilização do PET na fabricação de peças intertravadas para pavimentação.** In: Anais do 57º IBRACON Congresso Brasileiro do Concreto. ISBN/ISSN: 2175-8185. Bonito – MS, 2015. (Publicado)

ALMEIDA, Salomão Pereira de. MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte. RODRIGUES, John Kennedy Guedes. **Evaluation of Mechanical Properties and Durability of Concrete Produced with PET Blocks for the Production of Floor Interlocked.** In: Road Materials Pavement Design (Qualis A2). (Aguardando aceitação)

ALMEIDA, Salomão Pereira de. MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte. RODRIGUES, John Kennedy Guedes. **Durability of concrete pavement produced with polyethylene terephthalate (PET)**. In: International Journal of Environment and Waste Management. (Qualis B2). (Aguardando aceitação)

ALMEIDA, Salomão Pereira de. MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte. RODRIGUES, John Kennedy Guedes. **Durability assessment of concrete made with PET for the production of interlocked floor**. In: ACI Materials Journal. (Qualis B1). (Aguardando aceitação)

ALMEIDA, Salomão Pereira de. MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte. RODRIGUES, John Kennedy Guedes. **Mechanical characterization of interlocked floor concrete produced with PET (politerephthalate ethylene)**. In: The International Journal of Pavement Engineering. (Qualis B1). (Aguardando aceitação)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Unidade química repetitiva do PET.....	25
Figura 2 – Análise termodiferencial e termogravimétrica do PET.....	26
Figura 3 – Calorimetria diferencial exploratória (DSC) para o PET.....	27
Figura 4 – Espectrometria vibracional de absorção no infravermelho do PET..	28
Figura 5 – Resistência à compressão, Taherkhani (2014).....	35
Figura 6 – Resistência à flexão, Taherkhani (2014).....	36
Figura 7 – Resistência à tração indireta, Taherkhani (2014).....	36
Figura 8 – Módulo de elasticidade, Taherkhani (2014).....	36
Figura 9 – Resistência à abrasão, Taherkhani (2014).....	37
Figura 10 – Resistência à compressão, Sadeghifar e Sohrab (2014).....	38
Figura 11 – Resistência à tração, Sadeghifar e Sohrab (2014).....	39
Figura 12 – Estrutura típica de um pavimento intertravado.....	44
Figura 13 – Distribuição de carga normal vertical em um pavimento.....	45
Figura 14 – Pavimento intertravado.	49
Figura 15 – Fluxograma das etapas da pesquisa.....	52
Figura 16 – Distribuição granulométrica do PET.....	54
Figura 17 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo	56
Figura 18 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	58
Figura 19 – Fatores considerados na composição das peças.....	60
Figura 20 – Moldes utilizados para confecção dos corpos de prova.....	63
Figura 21 – Peças prismáticas. Peças de 16 faces. Peças cilíndricas.....	63
Figura 22 – Ensaio de resistência à compressão.....	65
Figura 23 – Microscópio eletrônico de varredura.	67
Figura 24 – Corpo de prova cilíndrico recebendo carga axialmente.....	68
Figura 25 – Ensaio de módulo de elasticidade.....	68
Figura 26 – Peça submetida ao ensaio de tração na flexão.....	69
Figura 27 – Ensaio de tração na flexão com peça de 16 faces..	70
Figura 28 – Ensaio de tração na flexão com peça prismática. .	70
Figura 29 – Ensaio de resistência à abrasão.....	71
Figura 30 – Ensaio de resistência ao ataque por sulfato.....	72
Figura 31 – Representação esquemática das etapas de exposição.....	74

Figura 32 – Ensaio de simulação de chuva.....	74
Figura 33 – Absorção de água do Traço 1.....	77
Figura 34 – Absorção de água do Traço 2.....	79
Figura 35 – Absorção de água do Traço 3.....	81
Figura 36 – Resistência à compressão do Traço 1.....	83
Figura 37 – Resistência à compressão do Traço 2.....	85
Figura 38 – Resistência à compressão do Traço 3.....	86
Figura 39 – Micrografia do concreto de referência.....	89
Figura 40 – Micrografia do concreto com 2,5% de PET.....	90
Figura 41 – Micrografia do concreto com 5,0% de PET.....	90
Figura 42 – Micrografia do concreto com 7,5% de PET.....	90
Figura 43 – Micrografia do concreto com 10,0% de PET.....	90
Figura 44 – Gráfico da resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	93
Figura 45 – Resistência à tração na flexão.....	95
Figura 46 – Corpo de prova com 10,0% de PET.....	97
Figura 47 – Variação de massa durante o ensaio de erosão.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência à compressão, Nibudey <i>et al.</i> (2013)..	33
Tabela 2 – Resultados dos ensaios mecânicos, Saikia e Brito (2013).....	34
Tabela 3 – Resultados dos ensaios mecânicos, Córdoba <i>et al.</i> (2013).....	35
Tabela 4 – Resultados dos ensaios mecânicos, Irwan <i>et al.</i> (2013).....	39
Tabela 5 – Resultados dos ensaios mecânicos, Reddy e Kumar (2014).....	41
Tabela 6 – Resultados apresentados por diferentes pesquisas.....	42
Tabela 7 – Caracterização física do PET.....	53
Tabela 8 – Caracterização física do agregado miúdo.....	55
Tabela 9 – Caracterização física do agregado graúdo.....	59
Tabela 10 – Caracterização física do cimento.....	58
Tabela 11 – Proporcionamento dos materiais do Traço 1.....	61
Tabela 12 – Proporcionamento dos materiais do Traço 2.....	61
Tabela 13 – Proporcionamento dos materiais do Traço 3.....	62
Tabela 14 – Critério para resistência à abrasão.....	71
Tabela 15 – Resistência característica à compressão e absorção de água das peças do Traço 1 com fator água/cimento igual a 0,45.....	88
Tabela 16 – Resultado do ensaio de resistência à abrasão.....	98
Tabela 17 – Análise química da água lixiviada.....	102

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira do Cimento Portland
ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society of Testing Materials
DSC – Calorimetria Diferencial Exploratória
DTA – Análise térmica diferencial
FTIR – Espectroscopia vibracional de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier
LabSMaC – Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos
LCM – Laboratório de Caracterização dos Materiais
LEP – Laboratório de Engenharia de Pavimentos e Geotécnica
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR – Norma Brasileira
NM – Norma Mercosul
PET – Politereftalato de etileno
TG – Termogravimetria
UFCG – Universidade Federal de Campina Grande
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Introdução	17
1.2 Justificativa.....	19
1.3 Hipótese da Tese	19
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo Geral	20
1.4.2 Objetivos Específicos	20
1.5 Organização da Tese	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 Uso de resíduos em concreto de cimento portland	22
2.2 Politereftalato de etileno - PET.....	25
2.3 PET.....	26
2.4 Reusos do PET	29
2.5 Utilização do PET na produção de concreto	31
2.6 Pavimento intertravado.....	43
2.7 Considerações Finais	51
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1 Materiais.....	53
3.1.1 PET	53
3.1.2 Agregado miúdo	54
3.1.3 Agregado graúdo.....	57
3.1.4 Cimento	58
3.1.5 Água e aditivo.....	59
3.2 Métodos.....	59
3.2.1 Composição das peças	60
3.2.2 Moldagem dos corpos de prova	62
3.2.3 Caracterização física e mecânica dos corpos de prova	64
3.2.3.1 Caracterização física: absorção de água	64
3.2.3.2 Comportamento mecânica: resistência característica à compressão... 65	65

3.2.4 Ensaio com as peças do Traço 1 com fator a/c 0,45	66
3.2.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	66
3.2.4.2 Módulo de Elasticidade Estático.....	67
3.2.4.3 Resistência à Tração na Flexão	69
3.2.4.4 Desgaste por Abrasão.....	70
3.2.4.5 Suscetibilidade ao ataque por sulfato.....	72
3.2.4.6 Suscetibilidade à ação da chuva e do calor	73
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1 Caracterização física e mecânica dos corpos de prova	76
4.1.1 Caracterização física: absorção de água	76
4.1.2 Comportamento mecânica: resistência característica à compressão	82
4.2 Ensaio com as peças do Traço 1 com fator a/c 0,45	88
4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	88
4.2.2 Módulo de Elasticidade Estático.....	92
4.2.3 Resistência à Tração na Flexão	94
4.2.4 Desgaste por Abrasão.....	98
4.2.5 Suscetibilidade ao ataque por sulfato.....	99
4.2.6 Suscetibilidade à ação da chuva e do calor	100
4.2.6.1 Erosão	100
4.2.6.2 Resistência característica à compressão	101
4.2.6.3 Análise química da água lixiviada.....	102
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	104
5.1 Conclusões.....	104
5.2 Sugestões para pesquisas futuras	106
REFERÊNCIAS.....	107

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, devido ao crescimento populacional, aliado à intensa industrialização e ao advento de novas tecnologias, o consumo de matéria-prima tem se tornado excessivo, havendo, portanto, a necessidade da utilização de resíduos. A construção civil é responsável por uma grande parcela da produção de resíduos. Esta pode diminuir consideravelmente o aumento do consumo de matéria prima utilizando seus próprios resíduos, atendendo, dessa forma, ao que determina a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que atribui ao gerador do resíduo a responsabilidade por sua adequada disposição. Outra forma que a construção civil pode contribuir seria utilizando resíduos gerados por outros setores.

Um dos resíduos que ocupa maior volume nos aterros sanitários são os plásticos, devido suas aplicações terem evoluído rapidamente em todo o mundo e ao elevado tempo que este produto leva para se degradar (GORNÍ, 2013).

O Politereftalato de etileno (PET) é um tipo de plástico largamente utilizado para fabricação de embalagens e de diversos outros produtos porque apresenta boa resistência mecânica, química e térmica. Devido à crescente utilização deste material e ao descarte inadequado no meio ambiente, tornou-se imperativo o estudo e o conhecimento de suas propriedades buscando novos usos numa tentativa de atingir sua máxima utilização (FREIRE e REYES, 2009).

O PET tornou-se o recipiente de guardar bebidas mais prático do que o vidro devido ao seu peso, resistência e custo, razão pela qual é um dos plásticos mais produzidos no mundo, alcançando uma produção anual em torno de $2,4 \times 10^{10}$ Kg. Milhares dessas embalagens são descartadas diariamente em leitos de rios, nas ruas e nas rodovias (ABIPET, 2014). Por não ser biodegradável, mesmo que seu descarte seja realizado em aterros sanitários, prejudica a decomposição, pois impermeabiliza camadas de lixo, não deixando circular os gases e os líquidos. Dessa forma, a reciclagem sistemática e/ou a reutilização desse material são soluções para minimizar esse impacto sobre o meio ambiente.

Segundo Silvestre (2013), no Brasil, as garrafas fabricadas com PET movimentam um mercado que produz cerca de 9 bilhões de unidades ao ano. Destas, cerca de 4,7 bilhões são descartadas ou dispostas de forma ambientalmente inadequada (aproximadamente 53%). Para fazer a reciclagem desse excedente seria necessário 224 milhões de quilowatts por hora de energia elétrica e 120 milhões de litros de água.

No âmbito da engenharia civil, pavimento é a camada constituída por um ou mais materiais que se coloca sobre o terreno natural ou terraplenado, para aumentar sua resistência e servir para a circulação de pessoas ou veículos. Alguns materiais empregados na pavimentação têm custo elevado e estão se tornando escassos, desse modo, o setor tem grande potencial para absorver vários tipos de resíduos, a exemplo do resíduo de PET, seja em execução de camadas de sub-base e base ou em revestimentos (AMORIM, 2013).

Um tipo de revestimento cuja utilização vem crescendo em todo o mundo é aquele formado por peças pré-moldadas de concreto, sobrepostas em camadas de assentamento, conhecido como pavimento intertravado. O pavimento intertravado pode ser uma possibilidade de se utilizar materiais alternativos, desde que haja o equilíbrio entre os aspectos ambientais, tecnológicos e econômicos, por se tratar de um sistema prático e confiável (SANTOS, 2013).

Portanto, é necessário o desenvolvimento de técnicas que possibilitem a produção de peças de concreto para pavimento intertravado, utilizando como insumo o PET pós consumo, resultando na redução do volume a ser descartado e a possibilidade de confecções de produtos eficientes e com propriedades que satisfaçam os requisitos estabelecidos por norma (TAPKIRE, 2014).

A modificação dos elementos que compõem as peças intertravadas usadas na construção civil é um procedimento que é realizado com o intuito de melhorar as propriedades físicas e mecânicas e a durabilidade destes materiais (KUMAR, 2014).

Numa análise preliminar, levando-se em conta as propriedades do PET, é possível estabelecer a hipótese de que ele pode servir como um dos componentes para produção de peças de concreto para pavimento intertravado.

1.2 JUSTIFICATIVA

Como justificativa para a realização deste trabalho destacam-se:

- a) A importância da viabilização de uma destinação mais adequada para os resíduos de PET. Um método seguro de eliminação é utilizá-lo como um dos componentes do concreto usado para produção de peças para pavimento intertravado;
- b) A busca por um processo que consuma resíduo ao invés de matéria prima;
- c) A busca de mais uma fonte de material alternativo a ser empregado na construção civil.

1.3 HIPÓTESE DA TESE

Partiu-se da seguinte hipótese: *“O politereftalato de etileno (PET) pode ser utilizado como agente modificador das propriedades físicas, mecânicas e da durabilidade das peças para pavimentação intertravada utilizada na construção civil”*. Como consequência da aceitação desta hipótese, tem-se uma alternativa para diminuir a disposição desse resíduo sobre o meio ambiente e o desenvolvimento de um processo (procedimentos e técnicas) para o seu aproveitamento.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar os efeitos da incorporação de PET em substituição parcial ao agregado miúdo em concretos para produção de peças para pavimento intertravado.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudar as propriedades físicas e mecânicas das peças intertravadas incorporadas com PET;
- Avaliar a microestrutura do concreto incorporado com PET;
- Estudar a durabilidade das peças intertravadas incorporadas com PET;
- Prover uma forma de destinação segura para o resíduo de PET.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O texto desta Tese encontra-se em um volume único distribuído da seguinte forma:

[Capítulo 1] Introdução – Introdução, Justificativa, Hipótese da Tese, Objetivos da Pesquisa e Organização da Tese.

[Capítulo 2] Fundamentação Teórica – são abordados assuntos relacionados ao uso de resíduos em concretos, produção e características do PET e pisos intertravados.

[Capítulo 3] Materiais e Métodos – são apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados aspectos considerados importantes sobre os procedimentos da etapa experimental.

[Capítulo 4] Resultados e Discussões – são apresentados e analisados os resultados obtidos da caracterização física, mecânica e microestrutural das peças de concreto para pavimento intertravado produzidas com PET.

[Capítulo 5] Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros – são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas sobre o tema estudado.

Por fim, estão as Referências, onde foram listadas as pesquisas citadas no trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os Estados Unidos e o Canadá consideram o estudo das estruturas de concreto como um dos mais importantes investimentos na ciência e tecnologia para obter e manter a qualidade de vida de seu povo e a liderança de seu parque industrial. Essas sociedades entendem que o profundo conhecimento sobre concreto posiciona e mantém a sua indústria na liderança do conhecimento, assegurando sua alta competitividade (HELENE & ANDRADE, 2010).

Neste capítulo é apresentada uma revisão da bibliografia relacionada com o tema deste trabalho. O capítulo está dividido em quatro tópicos. No primeiro, é feito um estudo sobre o uso de resíduos em concreto de cimento Portland. No segundo é feita uma revisão sobre o politereftalato de etileno (PET), mostrando algumas de suas propriedades e algumas formas de reutilização. No terceiro, são apresentados alguns estudos realizados sobre a utilização do PET na produção de concreto. O quarto tópico comenta sobre o pavimento intertravado.

2.1 USO DE RESÍDUOS EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

O concreto é um dos materiais da construção civil mais consumidos no mundo e este é formado basicamente por cimento, agregado graúdo, agregado miúdo e água. A exploração destes materiais em sua fonte (pedreira, depósito sedimentar) depende basicamente de três fatores: a qualidade do material, o volume de material útil e o transporte, ou seja, a localização geográfica da jazida.

A utilização de resíduos é uma das formas de melhorar a oferta de materiais de construção, tornando possível a redução do valor dos insumos e gerando benefícios sociais por meio da política habitacional. Estes benefícios podem surgir devido aos incentivos dados à produção de habitações de baixa renda, empregando-se produtos de desempenho comprovado. Há uma grande possibilidade de se reaproveitar o agregado artificial em substituições parciais

ou totais do agregado natural. Essa prática de reaproveitamento de materiais é ainda quase insignificante diante do montante gerado, onde a maioria das instalações opera com unidades de beneficiamento fixas (BIDONE, 2015).

Lintz *et al.* (2012) realizaram uma avaliação das propriedades mecânicas de concretos com resíduos de borracha vulcanizada empregados na fabricação de pisos intertravados. Os autores produziram diferentes misturas de concreto com incorporações crescentes de borracha, em substituição parcial aos agregados naturais. Foram moldados corpos de prova e peças de pisos intertravados para a execução de ensaios de resistências à compressão e à tração, sendo também medida a taxa de absorção de água dos concretos. Verificou-se a viabilidade técnica do concreto a ser empregado na fabricação de pisos intertravados, com a substituição de até 2,5% da massa de agregado miúdo natural pelo agregado reciclado de borracha.

Pereira *et al.* (2011) avaliaram a possibilidade de incorporação da carepa de aço em concretos de cimento Portland, em substituição da areia natural quartzosa. Foram produzidos concretos com diferentes teores do resíduo (0%, 10%, 25% e 40%) e abatimento de 110 ± 10 mm, para determinação da resistência à compressão e absorção de água. Os autores concluíram que os concretos com relação a/c igual a 0,55 e 0,65, apresentaram uma redução média na resistência à compressão de 20% e 23%, respectivamente, em relação ao concreto de referência. A absorção de água para concretos com relações a/c 0,55 e 0,65 apresentou um aumento médio de 57% e 44%, respectivamente, em relação ao concreto de referência.

Moura *et al.* (2013) avaliou a viabilidade do uso de resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC) como substituição parcial do cimento na produção de concretos convencionais. Foram determinadas as características químicas e físicas do RSPC. A influência foi avaliada através das propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e diametral) e parâmetros de durabilidade (absorção por imersão e por sucção capilar). Foram produzidos 9 traços, variando a relação a/c (0,45; 0,55; 0,65) e os teores de substituição (0%, 10% e 20%) do cimento. Os resultados demonstram que a utilização de RSPC no

concreto proporcionou uma redução nas resistências à compressão e à tração por compressão diametral. Entretanto, em relação aos parâmetros de durabilidade, os concretos com RSPC apresentaram comportamento compatível com os concretos de referência.

Estudo realizado por Izquierdo (2015) avaliou o uso de pó de pedra em substituição da areia natural e de pó do resíduo de fibras de sisal em substituição ao cimento em concretos para fabricação de blocos para alvenaria. Para cada traço produzido foi realizada a substituição da areia natural por pó de pedra nos teores de 20%, 40%, 60% e 80% e a substituição do cimento por pó de resíduo de fibras de sisal nos teores de 5%, 10%, 15% e 20%. O estudo indicou que os blocos produzidos com substituição de 60% da areia pelo pó de pedra e substituição de 5% do cimento por pó de resíduo de fibras de sisal apresentaram resistência à compressão superior ao concreto de referência.

Srivastava *et al.* (2014) usaram resíduos de vidro em substituição ao agregado graúdo em concretos. Os autores concluíram que o vidro pode substituir até 50% do agregado graúdo sem que haja perda de resistência.

Souza (2011) analisou as influências que os resíduos de (acetato-vinilo de etileno) EVA têm sobre as propriedades físicas e mecânicas do concreto. Utilizou-se quatro tipos de traços: referência, 25%, 50% e 75% de EVA. Verificou-se que a utilização de EVA reduz a massa específica, a resistência mecânica do concreto e a trabalhabilidade do concreto. Os resultados indicaram que o concreto contendo EVA não pode ser utilizado como concreto leve estrutural.

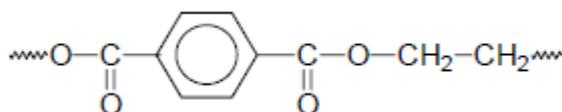
Jacinto *et al.* (2014) apresentaram os resultados de um estudo sobre a viabilidade do concreto com adição de fibras de borracha. Foram moldados corpos de prova de concreto com borracha nas proporções de 15% e 20%, em substituição ao agregado miúdo, além de corpos de prova com concreto convencional como referência. Observaram uma queda na ordem de 8% e 23% nos valores das resistências à tração na flexão dos concretos contendo 15% e 20% borracha, respectivamente, quando comparados com o concreto de referência.

2.2 POLITEREFTALATO DE ETILENO – PET

Os polímeros são materiais compostos por macromoléculas, cadeias compostas pela repetição de uma unidade básica, chamada mero (GORNÍ, 2013). Formalmente, os polímeros são definidos como materiais cujo elemento essencial é constituído por ligações moleculares orgânicas, que resultam de síntese artificial ou transformação de produtos naturais (BANNACH *et al.*, 2011).

No material conhecido popularmente como PET, tem-se o *Poli*: tereftalato de etileno e o *Mero*: ácido tereftálico ou tereftalato de dimetila e glicol etilênico (Figura 1). As macromoléculas do PET constituem-se de unidades repetitivas do tereftalato de etileno. Nos polímeros comerciais, 130 a 155 unidades desse mero constituem uma macromolécula típica de PET (WELLEN & RABELO, 2008).

Figura 1: Unidade química repetitiva do PET.



Fonte: Wellen & Rabelo (2008).

O PET apresenta inúmeras propriedades, tais como leveza, transparência, brilho e facilidade de moldagem; é um polímero inodoro, insípido, atóxico e inerte, possuindo elevada resistência mecânica, térmica e química, podendo se apresentar no estado amorfo (transparente), parcialmente cristalino e orientado (translúcido) e altamente cristalino (opaco), boas propriedades de barreira para gases e odores, alta resistência a gorduras, à tração e à abrasão. Sua densidade é igual a 1,38 g/cm³ (CANEVAROLO, 2007 apud FIGUEIREDO *et al.*, 2015).

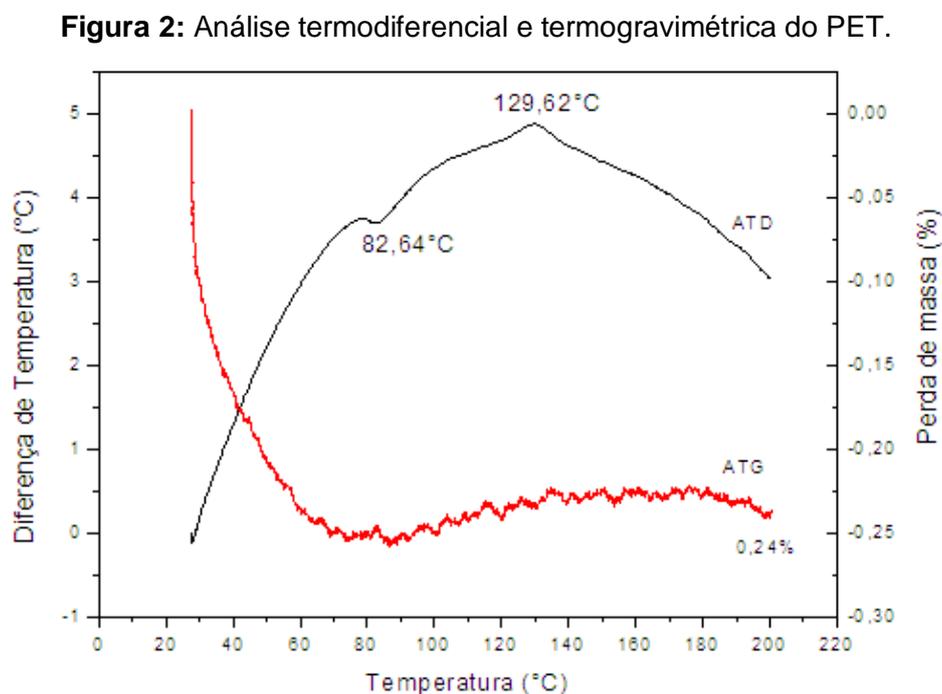
O PET é um material higroscópico que absorve água do meio ambiente durante seu armazenamento. A umidade dos grãos de PET pode atingir níveis

elevados de até 0,6% em peso se expostos sem nenhuma proteção às intempéries por longos períodos (ABIPET, 2014).

2.3 PET

O PET utilizado por Silva (2015) e nesta pesquisa foi submetido a um procedimento físico onde navalhas foram utilizadas em um equipamento com a finalidade de triturar as garrafas em pequenas partículas.

A Figura 2 ilustra os resultados obtidos para as análises termodiferencial e termogravimétrica.



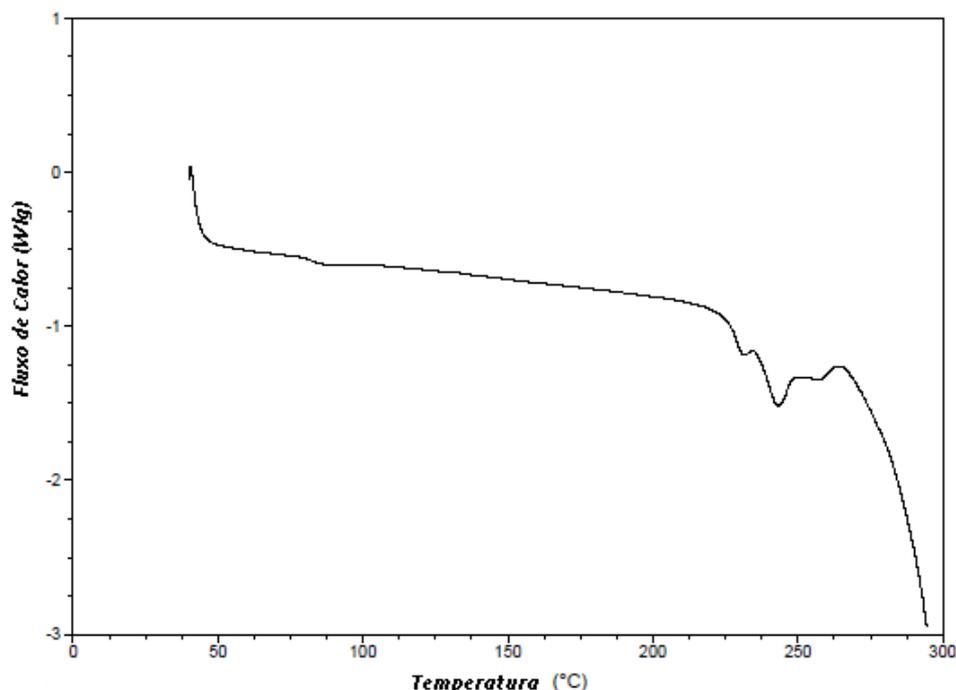
Fonte: Silva (2015).

Observa-se que a massa do PET diminui com o aumento da temperatura e que essa tendência se inicia, aproximadamente, a partir de 32 °C. Verifica-se que até aproximadamente 82,64 °C o material apresenta mudança do estado físico sólido-líquido, havendo uma perda significativa da massa do PET. A partir

desta temperatura observa-se ligeiramente um aumento da massa do PET, indicando uma nova mudança de estado físico (líquido-vapor) e essa perda ocorreu até temperaturas próximas aos 200 °C. De acordo com a curva termogravimétrica, obteve-se uma perda total de massa de 0,24%.

A Figura 3 ilustra as curvas de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para o PET.

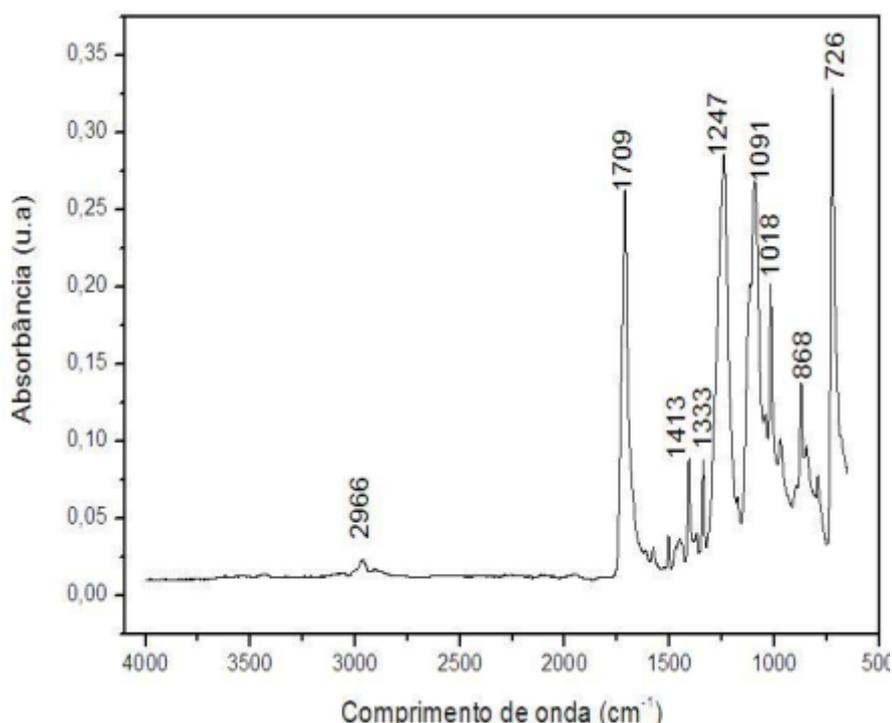
Figura 3: Calorimetria diferencial exploratória (DSC) para o PET.



Fonte: Silva (2015).

De acordo com a Figura 3 observa-se a ocorrência de picos endotérmicos a partir da temperatura de 200 °C, indicando a ocorrência de modificações físicas e químicas na composição do PET.

A Figura 4 ilustra a absorção no infravermelho (FTIR) do PET.

Figura 4: Espectrometria vibracional de absorção no infravermelho (FTIR) do PET.

Fonte: Aquino (2013).

O espectro de infravermelho do PET (Figura 4) indica a existência de várias estruturas funcionais típicas existentes na cadeia do PET, destacando-se as seguintes bandas características: em aproximadamente 3000 cm^{-1} , identificada pela vibração de deformação axial do grupo ($=\text{C}-\text{H}$), presentes em compostos aromáticos (benzeno); em 1709 cm^{-1} estiramento $\text{C}=\text{O}$ de ácido carboxílico, indicativo da banda; em 1247 cm^{-1} estiramento $\text{C}(\text{O})-\text{O}$ de grupos éster; em 1091 cm^{-1} e em 1018 cm^{-1} indicativo de estiramento da ligação $\text{C}-\text{O}$ e aproximadamente 726 cm^{-1} , deformação angular dos carbonos dis-substituídos no anel aromático (AQUINO, 2013).

Quando as garrafas são utilizadas para diversas finalidades, o PET pós consumo pode apresentar caracterização que difere da sua forma original (WELLEN & RABELO, 2008).

Os espectros de infravermelhos são conhecidos por conterem informações a nível molecular da microestrutura do material. O espectro ilustrado

na Figura 4 indica que a estrutura molecular do PET, usado por Aquino (2013) e nesta pesquisa, não sofreu mudanças em sua estrutura básica. Segundo Prasad *et al.* (2011), qualquer mudança na posição de pico em um espectro refere-se diretamente a uma mudança na resistência de união ou ângulo de ligação, enfraquecendo ou reforçando a ligação correspondente a um grupo funcional.

2.4 REUSOS DO PET

Por causa destas características o PET tem ocupado uma posição de destaque no que diz respeito a aplicações tecnológicas, principalmente na forma de fibras e filmes. Sua ampla faixa de cristalinidade permite diversas aplicações, por isso, o interesse por sua estrutura e propriedades tem aumentado, tanto nas áreas científicas quanto nas tecnológicas (ABIPET, 2014).

O PET um material largamente utilizado em todo o mundo para a fabricação de embalagens, principalmente em garrafas para bebidas tais como refrigerantes, águas com gás, cervejas etc. O PET apresenta várias outras utilidades, sendo encontrada em diversos segmentos de mercado (ABIPET, 2014).

As garrafas de PET são totalmente inertes. Isto significa que, mesmo indevidamente descartadas, não causam nenhum tipo de contaminação para o solo ou lençóis freáticos. Entretanto, o PET dura muitos anos para se decompor na natureza, provocando entupimentos de esgotos e armazenamento de água causando a proliferação de insetos e ratos, que podem causar doenças.

Devido à crescente utilização do PET em embalagens plásticas, a necessidade de sua reciclagem tornou-se imperativa e o estudo das propriedades do material reciclado vem sendo muito abordado, uma vez que sua produção tem crescido a uma taxa de 10% ao ano (SILVESTRE, 2013). Por isso, a reutilização desse material, é benéfica em todos os sentidos. Uma alternativa é a adoção de “práticas limpas”. Segundo Martins (2012) uma “prática limpa”

pode ser a introdução de um novo processo menos poluidor, ou a recuperação da matéria prima perdida e recirculada na fabricação, ou ainda a valorização de um resíduo que poderá dar origem a um subproduto. Novos usos para o PET vêm sendo estudados numa forma de atingir sua máxima utilização.

A reutilização desse material está em plena ascensão no Brasil e no mundo, proporcionando benefícios, dentre eles, a redução do volume de lixo coletado; economia de energia elétrica e de petróleo; geração de empregos (catadores, sucateiros, operários); produtos com menor preço, etc.

A partir da reutilização e da evolução do mercado bem como dos avanços tecnológicos, houve um incentivo às novas aplicações para o PET, dentre elas é possível citar: *Indústria automotiva e de transportes* - tecidos internos (estofamentos), carpetes, peças de barco; *Pisos* - carpetes, capachos para áreas de serviços e banheiros; *Artigos para residências* - enchimento para sofás e cadeiras, travesseiros, cobertores, tapetes, cortinas, lonas para toldos e barracas; *Artigos industriais* – rolos para pintura, cordas, filtros, ferramentas de mão, mantas de impermeabilização; *Embalagens* – garrafas, bandejas, fitas; *Vestuário* – têxteis, roupas esportivas, calçados, malas, mochilas, vestuário em geral; *Uso químico* – resinas alquídicas, adesivos (ABIPET, 2014).

Na construção civil o PET é utilizado em caixas d'água, tubos e conexões, torneiras, piscinas e telhas. Mármore sintético com PET reciclado é usado para produção de bancadas e pias.

Estudos realizados por Melo *et al.* (2015) constataram que as adições de 0,25% a 4,0% de resíduos de PET melhoraram as propriedades do solo (usado na construção de aterro na rodovia BR-101, trecho Paraíba), em especial na resistência mecânica, representada pelo índice de suporte Califórnia, o que indica que o uso de resíduos sólidos em obras rodoviárias pode ser viável tecnicamente.

Em estudo elaborado por Akcaozoglu (2010), grânulos de PET, obtidos pela trituração de garrafas, foram utilizados para produção de concreto na proporção de 50% da massa do ligante. Metade deste ligante era composto por

escória de alto forno e a outra metade de cimento Portland. Os resultados apontaram que o concreto pode ser usado com função estrutural.

Em estudo realizado por Prasad (2009) foram feitas misturas de resíduos de PET com solo típico local (*murrum*) e com cinza volante. Pode-se constatar que adições de resíduos desse plástico, da ordem de 0,30% e 0,40%, incrementam a resistência mecânica (em termos de índice suporte Califórnia) em misturas com *murrum* e cinza volante, respectivamente, para emprego de camadas de sub-base.

2.5 UTILIZAÇÃO DO PET NA PRODUÇÃO DE CONCRETO

Estudos realizado por Carvalho e Gomes (2015) com fibras provenientes de garrafas PET, nas dimensões aproximadas de 1,5 cm x 10 cm, com diferentes formatos, na proporção de 1000 g/m³ de concreto mostraram que a resistência à compressão do concreto composto foi reduzida em até 10%, em comparação com o concreto puro, indicando que não só a quantidade de fibras, mas o seu formato pode influenciar as propriedades do concreto. A resistência à compressão foi reduzida, porém as fibras fizeram com que o concreto composto tivesse uma deformação menor para o mesmo nível de tensão.

Em estudo realizado por Modro e Oliveira (2009) resíduos de PET foram utilizados como substitutos de parte dos agregados do concreto e, para cada um dos resíduos, foram preparados quatro traços (10%, 20%, 30% e 40%, em volume). Foram utilizados dois tipos de resíduos de PET pós consumo, ambos provenientes de empresas de reciclagem. O primeiro tipo de PET foi proveniente de embalagens pós-consumo de refrigerantes, com pequenas dimensões (material passante na peneira com malha 4,8 mm) e com presença de impurezas tais como: terra, areia, pedrisco, cola. O segundo tipo de resíduos de PET foi proveniente de fitas para fixar mercadorias em *pallets*, com formato de lâminas. Para todos os traços obtidos as amostras ensaiadas, apresentaram tendência de redução da resistência mecânica com o aumento da fração volumétrica de

substituição de agregados. Enquanto o concreto de referência apresentou valor de resistência à compressão axial de 15,38 MPa, os concretos com 10%, 20%, 30% e 40%, apresentaram os valores de 13,44 MPa, 9,32 MPa e 6,01 MPa e 1,94 MPa, respectivamente.

Em estudo realizado por Meneses (2011) foi usado PET em forma de tiras proveniente da reciclagem de garrafas de refrigerante. As tiras utilizadas tinham 2 mm de largura por 15 mm de comprimento, incorporadas ao concreto dosado para $f_{ck} = 30$ MPa, relação água/cimento 0,46, confeccionado em um canteiro de obra, para verificação de resistência mecânica dessa mistura submetida a elevadas temperaturas. Os corpos de prova dos concretos com e sem adição das tiras de PET foram ensaiados após exposição às temperaturas: ambiente (30 °C), 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C e 900 °C. Verificou-se que o concreto perde de forma significativa resistência mecânica quando exposto a temperaturas maiores que 300 °C. Porém, a queda da resistência à compressão do concreto com PET foi menor que o concreto de referência. Além disso, o uso das tiras de PET retarda o risco de colapso das estruturas pela formação de uma rede de canais que facilitam a fuga do vapor d'água, reduzindo a pressão no interior do elemento estrutural. Os corpos de prova dos concretos com adição de tiras de PET apresentaram resistência à compressão, em média, 5% superior aos corpos de prova dos concretos sem adição de tiras de PET.

Em estudos realizados por Silva e Almeida (2010) foram realizados ensaios de resistência à compressão e à flexão com corpos de provas de concreto celular utilizando a concentração de 15% de PET triturado. Os resultados mostraram que a concentração de 15% de PET apresentou um valor de resistência à compressão superior ao obtido para o concreto de referência, entretanto, os valores de resistência à flexão foram inferiores ao valor obtido para o concreto de referência. Os corpos de prova do concreto de referência apresentaram resistência à compressão aos 7, 14 e 21 dias, respectivamente de 4,96 MPa, 5,02 MPa e 5,11 MPa, enquanto que os corpos de prova com 15% de PET apresentaram resistências de 5,26 MPa, 5,32 MPa e 5,37 MPa. Por outro lado, a resistência à flexão dos corpos de prova com 15% de PET foi de

1,55 MPa, 1,53 MPa e 1,68 MPa, enquanto que o concreto de referência apresentou 1,85 MPa, 2,11 MPa e 2,33 MPa, respectivamente. Além disso, verificou-se que para cada metro cúbico de concreto celular adicionado de garrafas PET trituradas com a concentração de 15% em volume, reduziram o lançamento nos aterros em cerca de 4000 garrafas PET de 2 litros.

Nibudey *et al.* (2013) usaram fibras de PET, oriundas de garrafas para embalagem de água, para produção de concreto, nos teores de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5% e 3,0% em volume, com fator água/cimento igual a 0,52. As fibras foram cortadas em forma de tiras depois de remover o gargalo e o fundo da garrafa. O comprimento das tiras era de 25 mm e a largura de 1 mm e de 2 mm. Foram moldados e rompidos corpos de prova em forma de cubo com aresta igual 150 mm. Os resultados obtidos experimentalmente para a resistência à compressão foram superiores aos esperados, quando calculados por análise de regressão. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Resistência à compressão, Nibudey *et al.* (2013).

Volume de PET (%)	Resistência Esperada (Calculada) (MPa)	Resistência Obtida (MPa)	Aumento da Resistência (%)
0,5	28,33	28,44	0,38
1,0	28,50	29,63	3,96
1,5	27,76	28,44	2,45
2,0	26,19	26,37	0,68
2,5	23,89	24,30	1,71
3,0	20,94	22,81	8,93

Em estudos realizados por Tapkire *et al.* (2014) foram usados resíduos de polipropileno (PP), oriundos de sacolas plásticas, e politereftalato de etileno (PET), oriundo de garrafas de refrigerante. Estes resíduos apresentavam dimensão máxima de 10 mm e foram usados para produção de peças de concreto para pavimentação intertravada, em substituição ao agregado graúdo, nos teores de 10%, 20% e 30%, em relação à massa. Os resultados apontaram

uma redução na resistência à compressão na ordem de 2,5%, 5,2% e 8,1%, respectivamente, em relação ao grupo de controle.

Saikia e Brito (2013) usaram pó, flocos e tiras de PET, em quantidades iguais, em substituição aos agregados, nos teores de 5%, 10% e 15%, relação ao volume, para produção de concreto. Os resultados dos ensaios mecânicos (Tabela 2) indicaram reduções substanciais nas propriedades mecânicas: resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão. Este fato foi observado para todos os padrões de substituição em que a percentagem de PET aumentou.

Tabela 2: Resultados dos ensaios mecânicos, Saikia e Brito (2013).

Teor de PET (%)	Tipo de agregado	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)	Absorção de água (%)
0,0	Normal	43,07	3,49	4,74	12,2
	Flocos	31,34	2,76	3,88	13,9
5,0	Pó	36,11	3,07	4,26	13,1
	Tiras	37,82	3,21	4,54	12,1
	Flocos	22,42	2,29	3,09	16,1
10,0	Pó	30,79	2,83	3,76	12,2
	Tiras	36,86	3,13	4,24	11,9
	Flocos	15,10	1,83	2,38	16,9
15,0	Pó	25,33	2,28	2,99	15,0
	Tiras	33,41	2,87	3,97	13,0

Córdoba *et al.* (2013) produziram corpos de prova cilíndricos de concreto usando flocos de PET obtidos a partir de garrafas de PET recicladas, em três tamanhos diferentes: 0,5 mm, 1,5 mm e 3 mm. Estes flocos foram utilizados nos teores de 1,0%, 2,5%, e 5,0% em volume, em substituição ao agregado miúdo. Observou-se uma redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto com o aumento do teor de PET e com o

aumento da granulometria do PET. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados dos ensaios mecânicos, Córdoba *et al.* (2013).

Tamanho da Partícula de PET (mm)	Teor de PET (%)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0,5	1,0	23,0	5,3
	2,5	22,5	5,2
	5,0	21,0	5,0
1,5	1,0	22,0	4,5
	2,5	21,3	4,4
	5,0	21,0	4,2
3,0	1,0	14,0	3,5
	2,5	12,5	2,7
	5,0	12,0	2,5

Taherkhani (2014) estudou os efeitos do uso de resíduos de PET em concreto. Foram utilizadas fibras de PET nos comprimentos de 1 cm, 2 cm e 3 cm, adicionando ao concreto nos teores de 0,5% e 1%, em volume da mistura total. Os resultados dos ensaios estão ilustrados nas Figuras 5, 6, 7, 8 e 9.

Figura 5: Resistência à compressão, Taherkhani (2014).

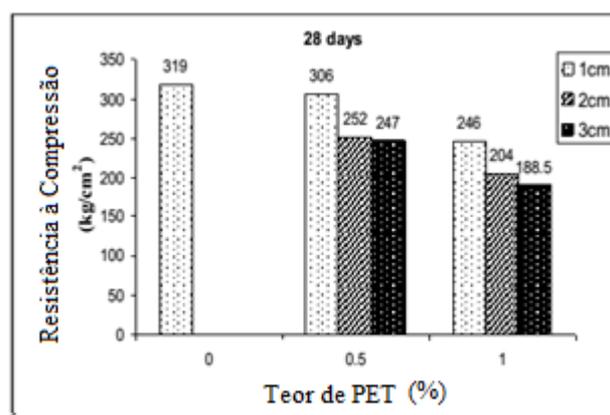


Figura 6: Resistência à flexão, Taherkhani (2014).

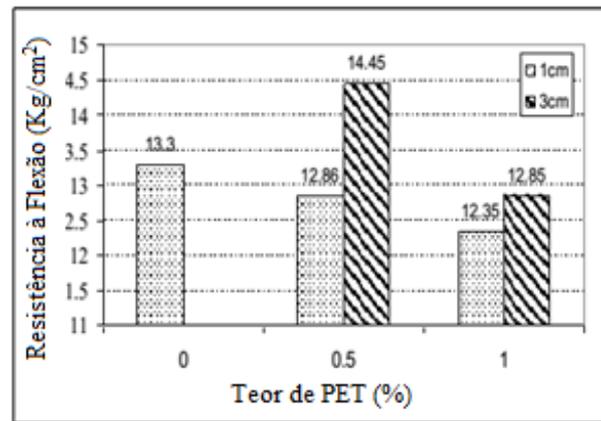


Figura 7: Resistência à tração indireta, Taherkhani (2014).

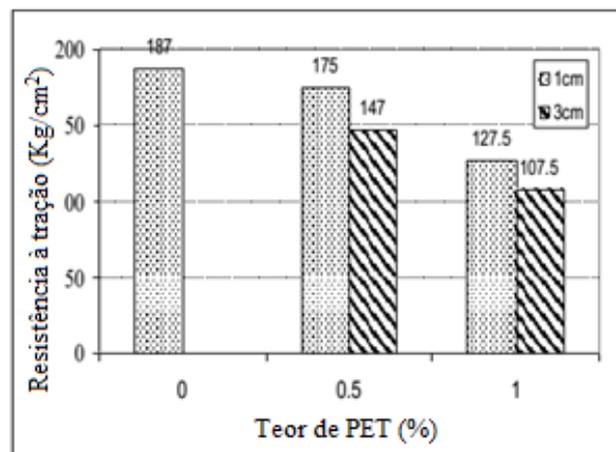


Figura 8: Módulo de elasticidade, Taherkhani (2014).

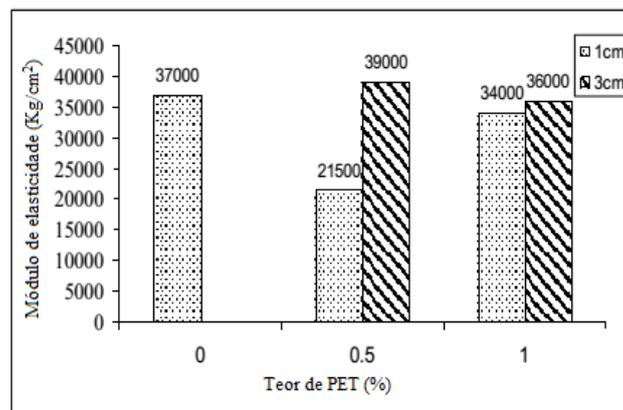
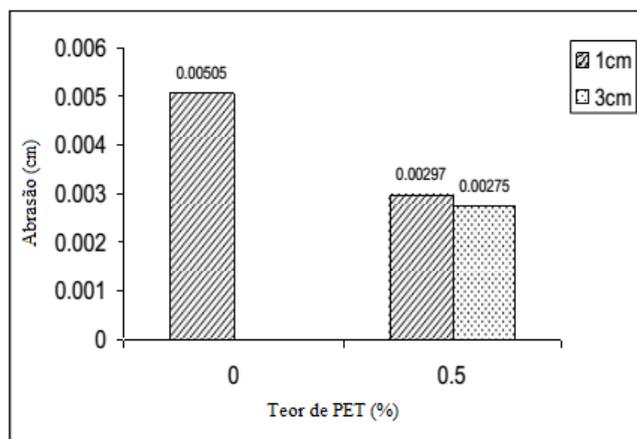


Figura 9: Desgaste por abrasão, Taherkhani (2014).

Os resultados obtidos por Taherkhani (2014) permitem concluir que a resistência à compressão das misturas diminuiu com o aumento do teor de fibras e com o aumento do comprimento, conforme observa-se na Figura 5. De acordo com a Figura 6, a resistência à flexão das misturas reforçadas com fibra aumentou com o aumento do comprimento da fibra. No entanto, ela diminuiu com o aumento do teor de fibras. A resistência à tração da mistura reforçada com fibra foi inferior à da mistura de controle. Para o teor de 0,5% de fibra, a resistência à flexão aumentou com o aumento do comprimento de fibra, enquanto que, para o teor de 1,0% de fibra, diminuiu com o aumento do comprimento da fibra. As misturas contendo fibras de PET foram mais resistentes à abrasão do que a mistura de controle. A resistência à abrasão aumentou com o aumento do comprimento da fibra. As misturas que continham fibras mais curtas apresentaram menor módulo de elasticidade do que a mistura de controle. A utilização de fibras longas proporcionou a obtenção do melhoramento do módulo de elasticidade. As misturas reforçadas com fibra foram capazes de manter a sua integridade após a ruptura, o que indicou que elas absorviam mais energia. Os resíduos de PET mostram-se viáveis para ser usados em concreto em aplicações onde for necessária mais resistência à abrasão e em elementos estruturais leves.

Estudos feitos por Magalhães e Fernandes (2015) mostraram que os concretos produzidos com fibras de PET, nos teores de 1,0%, 1,5% e 2,0% em volume, apresentaram menos rachaduras do que os concretos sem PET, no ensaio de tração. Os resultados indicaram que a incorporação de fibras de PET melhorou significativamente o comportamento pós-pico de argamassas com uma grande melhoria na tenacidade e na capacidade de deflexão.

Kumar (2014) submeteu amostras de viga de concreto produzido com tiras de garrafas PET ao ensaio de resistência à tração. Os resultados indicaram que parte da carga é transferida para as tiras de PET impedindo a fissura precoce da viga.

Sadeghifar e Sohrabi (2014) produziram concreto utilizando partículas de PET nos tamanhos de 0-5 mm, em substituição ao agregado miúdo, e nos tamanhos de 5-20 mm, em substituição ao agregado graúdo, nos teores de 5%, 10% e 20%, em volume. Os autores também variaram o fator água/cimento nos valores de 0,45, 0,50 e 0,55. Os resultados dos ensaios mostraram que os valores de resistência à compressão (Figura 10) são significativamente reduzidos com o aumento dos percentuais de PET e com o aumento do fator água/cimento, seja em substituição ao agregado miúdo, seja em substituição ao agregado graúdo. Entretanto, os valores da resistência à tração (Figura 11) dos concretos contendo PET foram superiores aos do concreto de referência.

Figura 10: Resistência à compressão, Sadeghifar e Sohrabi (2014).

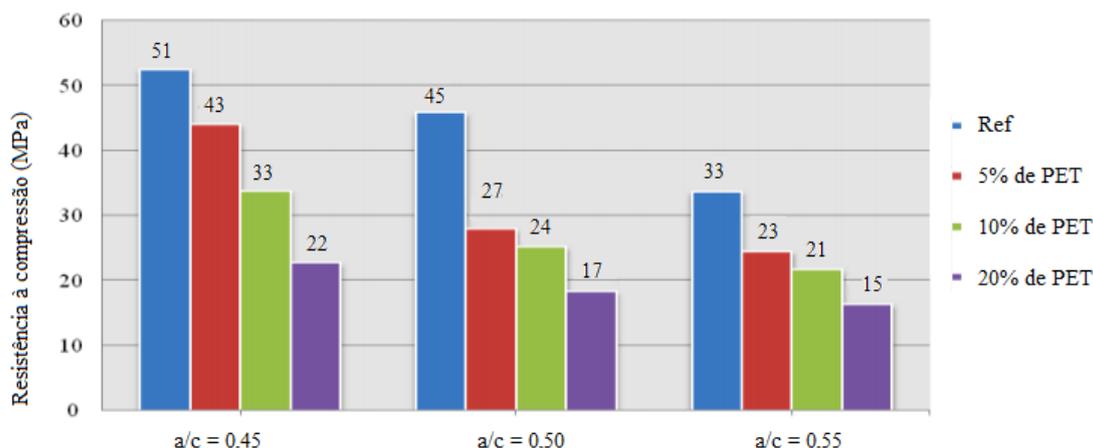
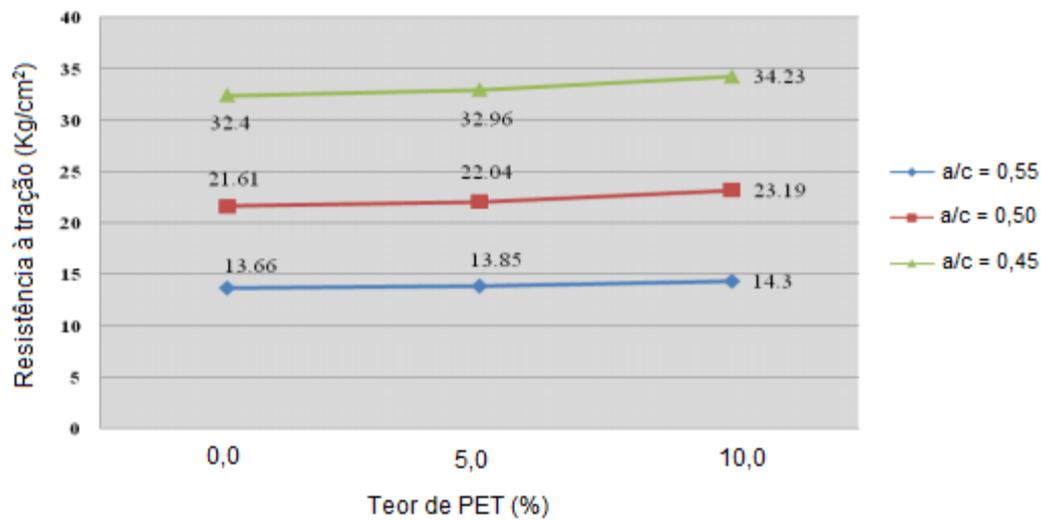


Figura 11: Resistência à tração, Sadeghifar e Sohrabi (2014).

Dora (2011) concluiu que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto diminuem quando o volume de PET é aumentado. No entanto, observou-se que a fissuração ocorrida devido à secagem foi reduzida quando as fibras de PET foram usadas, em comparação com o concreto convencional. Também foi registrada a melhoria da ductilidade do concreto produzido com PET.

Irwan *et al.* (2013) usaram resíduos de garrafa PET com formas irregulares em concreto autoadensáveis. Foram determinadas a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade. Os resultados obtidos estão apresentados no Tabela 4.

Tabela 4: Resultados dos ensaios mecânicos, Irwan *et al.* (2013).

Teor de PET (%)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (MPa)
0,0	22,0	24	2,97
0,5	24,0	26	3,24
1,0	21,9	22	3,43
1,5	20,9	19	3,67

Verificou-se que os resultados da resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade aumentaram para o teor de 0,5% de PET na mistura de concreto em comparação ao concreto de referência. Os valores diminuem para os concretos contendo 1,0% e 1,5% de fibras PET. Por conseguinte, concluiu-se que, o teor de fibra afetou a resistência do concreto. O estudo indicou que teores iguais ou maiores a 1,0% podem levar à perda de segregação, ao aumento da porosidade, e à redução global na resistência do concreto. Além disso, teores elevados da fibra de PET irão causar problemas de trabalhabilidade por causa da sua área superficial ser relativamente grande. Teores menores do que 1,0% de adição da fibra de PET podem ser uma opção para a indústria de construção.

Ramadevi e Manju (2012) utilizaram amostras com teores de 0,5%, 1%, 2%, 4% e 6% de resíduos de PET em misturas de concreto. Observou-se que a resistência à compressão aumentou até o teor de substituição atingir 2%, em comparação ao concreto de referência. Entretanto, a resistência diminuiu para os teores de 4% e 6%.

Fadhil e Yaseen (2015) estudaram o efeito da adição de resíduos de PET, resultante do corte manual das garrafas de plástico, na produção de painéis de concreto pré-moldado. Realizou-se ensaios para investigar a força de ruptura e a resistência ao impacto de painéis de concreto pré-moldado com diferentes espessuras. Foram produzidos concretos com adição de 0,5%, 1,0% e 1,5% de PET em volume. Os resultados mostraram que o volume máximo de fibras PET para uma ruptura e resistência ao impacto desejadas foi de 1,0%. A adição de resíduos de PET em concreto pré-moldado simples apresentou vantagens econômicas, pois, ele tende a diminuir a espessura dos painéis em 1 cm, devido ao aumento da resistência à ruptura na ordem de 34,27% e ao aumento da resistência ao impacto de 157,14%, em comparação com painéis simples, produzidos sem PET. Após o ensaio de resistência ao impacto, observou-se que os painéis de concreto pré-moldado reforçados com PET mantiveram os pedaços juntos quando a peça foi quebrada, enquanto as amostras de concreto simples exibiram uma desintegração total dos pedaços.

Guendouz *et al.* (2016) investigaram a utilização de dois tipos de resíduos de plástico como agregados miúdos para produção de concreto: o politereftalato de etileno (PET), em forma de tiras e polietileno de baixa densidade (LDPE), em forma de pó. Os autores substituíram frações de volume de areia (10%, 20%, 30% e 40%) pelo mesmo volume de agregados de plástico. Os resultados mostraram que o uso de resíduos de plástico (PET e LDPE) diminui de 10-15% a densidade do concreto; a trabalhabilidade da areia aumenta cerca de 40% com pó de LDPE, no entanto, diminui cerca de 60% com as tiras de PET; as propriedades mecânicas do concreto parecem ser positivamente influenciadas pelo tipo de resíduo plástico utilizado; o aumento da resistência à compressão aos 28 dias de idade foi de cerca de 30% quando se utilizou 20% de pó de LDPE e 25% quando se utilizou 1,5% de tiras de PET; o aumento na resistência à flexão aos 28 dias de idade foi cerca de 30% quando se utilizou 40% do pó de LDPE e, 25% quando se utilizou de 1% de tiras de PET.

Reddy e Kumar (2014) produziram concreto com resíduos de garrafas PET em forma de tiras, obtidas pelo recorte manual nos percentuais de 0,25%, 0,50% e 0,75%. Os resultados dos ensaios para aferir propriedades mecânicas de acordo com as proporções de PET estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados dos ensaios mecânicos, Reddy e Kumar (2014).

Teor de PET (%)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0,00	55,29	4,13	5,67	36,7
0,25	56,49	4,34	6,33	38,8
0,50	58,22	4,72	6,50	40,9
0,75	59,01	5,00	7,67	43,2

Verificou-se que a resistência à compressão, a resistência à tração, a resistência à flexão e o módulo de elasticidade do concreto produzido com 0,75%

de PET foram, respectivamente, 5%, 20%, 33% e 17% maior do que o concreto de referência.

A Tabela 6 apresenta resultados de pesquisas realizadas por diferentes autores sobre o uso de PET em concreto de cimento Portland.

Tabela 6: Resultados apresentados por diferentes pesquisas.

Autor	Fator a/c	Tamanho do PET (mm)	Teor (%)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
Rahmani <i>et al.</i> , 2013	0,50	7	0,5	31,58	2,91
1,0			35,36	3,11	
1,5			31,76	3,06	
Irwan <i>et al.</i> , 2013	0,55	15	0,5	36,23	3,72
			1,0	37,08	3,91
			1,5	33,73	4,02
Alavi <i>et al.</i> , 2012	1,94	12	0,2	40,4	3,16
			0,3	42,3	3,69
			0,5	43,8	3,81
Foti, 2012	0,50	3	0,50	36,91	3,65
			0,75	38,68	4,55
			0,0	51,01	3,24
Sadeghifar e Sohrabi (2014)	0,45	5	5,0	43,56	3,29
			10,0	33,02	3,42
			2,5	50,21	3,82

Percebe-se uma redução nos valores das propriedades mecânicas do concreto à medida em se aumenta o teor de PET. A razão é basicamente similar ao que é dado em quase todos os estudos relacionados à incorporação de agregado de plástico ao concreto: a fraca ligação interfacial entre o agregado de plástico e pasta de cimento.

2.6 PAVIMENTO INTERTRAVADO

Segundo a NBR 15953 (ABNT, 2011) pavimento é uma estrutura construída após terraplanagem destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos dos veículos, melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança, resistir aos esforços horizontais que nela atuam tornando mais durável a superfície de rolamento.

Ainda segundo a NBR 15953 (ABNT, 2011), pavimento intertravado é definido como um pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída de peças de concreto sobrepostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção.

A base é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos e sobre o qual se constrói um revestimento. Sub-base é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplanagem.

A pavimentação com peças pré-moldadas tem como principal característica o fato de ser simplesmente assentado, devidamente confinado, sobre uma camada de areia. O conceito básico desse tipo de pavimentação é o intertravamento, ou seja, a transmissão de parte da carga de uma peça para a peça vizinha pelo atrito lateral entre elas. Outra característica desse sistema é o fato de ser levemente permeável, pois permite a passagem de uma pequena parte da água da chuva para o solo, através das juntas. O fato de ser mais claro que o asfalto, proporciona uma menor absorção de calor proveniente dos raios solares, fato que se traduz em maior conforto térmico superficial. A propriedade diferencial para essa técnica construtiva de pavimentação é poder ser desmanchada e reconstruída com 100% de aproveitamento das peças. Por fim, a diversidade de formas, cores e modelos disponíveis permite à peça grande

competitividade como opção de pavimentação de áreas de trânsito de pedestres ou veículos de passeio ou carga (FERNANDES, 2008).

As peças de concreto são maciças e permitem pavimentar uma superfície. O intertravamento é a capacidade que as peças adquirem para resistir aos movimentos de deslocamento individual, seja ele vertical, horizontal, de rotação ou de giração em relação às suas peças vizinhas.

Na pavimentação intertravada com peças de concreto, o procedimento adotado para se executar reparos em redes subterrâneas de água e de esgoto é simples e fácil, bastando remover as peças de concreto da área afetada para que os problemas ou danos sejam corrigidos, seguidos da recolocação das peças. Todo esse procedimento é realizado sem a necessidade de equipamentos especiais.

Os pavimentos intertravados possuem a seção transversal típica (Figura 12), abstraídos eventuais abaulamentos ou caimentos e dispositivos de drenagem.

Figura 12: Estrutura típica de um pavimento intertravado.

(1 Contenção lateral. 2 Areia de rejuntamento. 3 Peças pré-moldadas de concreto. 4 Areia de assentamento. 5 Base. 6 Sub-base. 7 Subleito.)



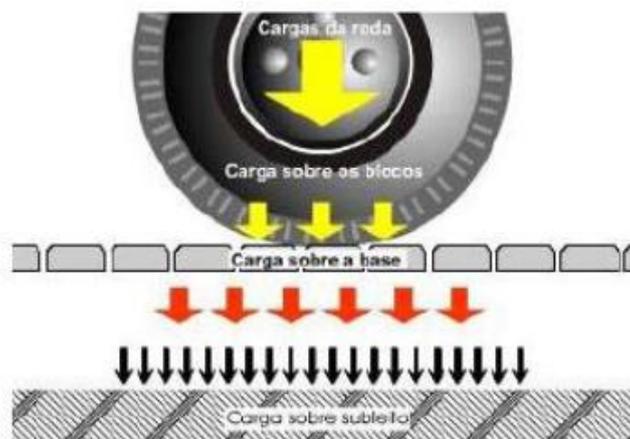
Fonte: <http://infraestruturaurbana.pini.com.br>

A camada de rolamento é formada por peças pré-moldadas de concreto que compõem um revestimento de durabilidade e resistência adequadas assentadas sobre uma camada delgada de areia. Este revestimento deve ser capaz de suportar as cargas e as tensões provocadas pelo tráfego protegendo a camada de base do desgaste por abrasão e a mantendo com baixos níveis de umidade permitindo melhor estabilidade do material constituinte (GODINHO, 2009).

Sob o ponto de vista estritamente técnico, pode-se dizer que a função básica e primeira de um pavimento é distribuir cargas concentradas, de maneira a proteger o subleito, fazendo com que sua capacidade de suporte não seja excedida, seja o subleito resultante de corte ou aterro (GODINHO, 2009).

Pode-se dizer que as camadas constituintes da estrutura de um pavimento intertravado possuem a função de distribuir a tensão normal vertical aplicada à superfície (Figura 13), de tal maneira que o subleito receba uma parcela muito inferior desta tensão, o que caracteriza um pavimento flexível.

Figura 13: Distribuição de carga normal vertical provocada pela roda, ao longo das camadas de um pavimento.



Fonte: Godinho (2009).

As espessuras das camadas constituintes do pavimento intertravado, como nos pavimentos asfálticos, irão depender das seguintes características (ABNT 15953, 2011): intensidade do tráfego que circulará sobre o pavimento; características do terreno de fundação; qualidade dos materiais constituintes das demais camadas.

As vantagens, as limitações e a simplicidade dos processos de construção e controle dos pavimentos intertravados já são conhecidos. Aliadas às qualidades estéticas e à versatilidade do material, estão suas facilidades de estocagem e homogeneidade, além de permitirem o imediato uso do pavimento (GODINHO, 2009).

No entanto, no que se refere à sua aplicação em áreas de menor solicitação (magnitude e frequência de cargas), algumas propriedades devem ser ressaltadas: impedem a transmissão e o aparecimento na superfície do pavimento de eventuais trincas das camadas de base; têm a capacidade de manter a continuidade do pavimento mesmo quando sujeitos a acomodações do subleito; permitem fácil reparo quando ocorre assentamento do subleito que comprometa a capacidade estrutural do pavimento; há facilidade de acesso às instalações de serviços subterrâneas e posterior reparo, sem marcas visíveis; permitem a reutilização das peças de concreto; são de fácil execução; as peças de concreto são de alta qualidade, o que lhes confere durabilidade e resistência à abrasão, indispensáveis aos pavimentos industriais e portuários; resistem ao ataque de óleos e ao derramamento de combustíveis; requerem pouca ou nenhuma manutenção; não é necessária a utilização de mão de obra especializada e equipamentos especiais, permitindo criar várias frentes de trabalho e economia de tempo de construção; os materiais utilizados na construção chegam à obra já prontos para aplicação, não sendo necessário o emprego de processos térmicos ou químicos; podem ter simultaneamente capacidade estrutural e valor paisagístico; facilitam a incorporação de sinalização horizontal pela utilização de peças coloridas; o controle de qualidade dos materiais empregados (peças de concreto, areias etc.) pode ser feito em seus próprios centros de produção (GODINHO, 2009).

Alguns problemas podem ocorrer na produção ou na execução das peças. Beaty & Raymond (2005) *apud* Mudiyono (2015) atribuem os defeitos nestes pavimentos a fontes potenciais que se relacionam a: arranjo geométrico inadequado para o assentamento das peças de concreto; uso de areia imprópria para a camada de assentamento; largura incorreta das juntas entre as peças, seja pela falta de espaçadores na própria peça, seja por procedimento construtivo inadequado; uso de areia imprópria para o preenchimento das juntas ou procedimento inadequado de preenchimento; contenção lateral ineficaz das peças, permitindo movimentos laterais e perda de intertravamento entre elas; utilização de peças com formatos e tamanhos diferentes; drenagem deficiente; existência de zonas de transição.

Fernandes (2008) acrescenta como limitações: não se deve usar estes pavimentos como canais coletores de águas que possam gerar correntes volumosas e rápidas ou submetidos a jatos de água sob pressão, sob pena de perda da selagem das juntas; geração de níveis de ruído maiores do que aqueles gerados por outros tipos de pavimentos; provoca maior vibração nos veículos; requerem processo construtivo acurado, ainda que de acordo com parâmetros simples, porém estritos (tolerâncias de nivelamento, largura de juntas, compactação, escolha de areias etc); devem ter estruturas de drenagem e contenção lateral bem projetadas e bem construídas.

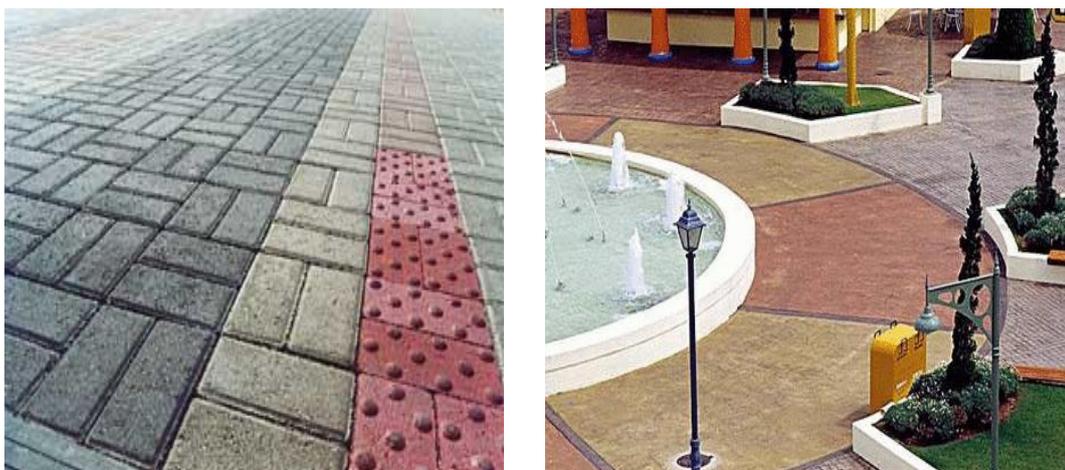
Fioriti (2007) descreve os tipos mais comuns de falhas observados e as atribui a projetos incorretos ou deficiências dos métodos de construção. Ressalta que, na maioria dos casos, as falhas podem ser evitadas caso houvesse uma melhor compreensão destes procedimentos e obediência às especificações existentes.

De fato, o principal defeito que estes pavimentos podem apresentar refere-se a desníveis entre as peças de concreto, normalmente causado por falhas das camadas subjacentes, seja por deficiência de projeto ou de construção. A solução, no entanto, é simples: retirada da camada de rolamento, reparo das camadas danificadas e recolocação das peças pré-moldadas de concreto.

Tais peças apresentam danos apenas quando de má qualidade; geralmente, são relacionados à quebra das bordas ou desgaste acentuado. Deve-se, portanto, obedecer aos requisitos da NBR 9781 (ABNT, 2013) “Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaios”, que estabelece procedimentos de ensaio e especificações capazes de garantir a qualidade do produto acabado. Além disso, a NBR 15953 (ABNT, 2011) “Pavimento intertravado com peças de concreto”, descreve o método de assentamento dessas peças. Entretanto, a durabilidade do pavimento é compatível com sua utilização.

Limita-se ainda a sua utilização, por motivos de conforto e segurança, em vias sujeitas apenas a velocidades baixas e moderadas, até aproximadamente 70-80 km/h, conforme Fernandes (2008). No Brasil, até 60 km/h tem sido a prática comum.

O emprego de peças pré-moldadas de concreto encontra na pavimentação um fértil campo de aplicações: de pátios de estacionamento de automóveis até áreas industriais ou portuárias submetidas a cargas elevadas, abrangendo: calçadas, parques, praças e jardins; ruas, avenidas, estacionamentos, paradas de ônibus, faixas demarcatórias e de sinalização, trechos-alerta (antecedendo curvas, cruzamentos, passagens de nível etc.), acostamentos e estradas, com tráfego composto desde veículos leves até um grande número de veículos comerciais; pavimentos sob os quais se instalarão ou haverá necessidade de obras de manutenção de redes de água, esgoto, telefone etc. Ou ainda, áreas de cargas (pátios, depósitos, galpões industriais, oficinas e plataformas); áreas de exposições e feiras; pisos rurais (currais, bebedouros etc.); pavimentos cujos subleitos não ofereçam boas condições de suporte ou estejam sujeitos a recalques acentuados; terminais de cargas ou de contêineres; pátios e vias de aeroportos (GODINHO, 2009).

Figura 14: Pavimento intertravado.

Fonte: Lintz *et al.* (2012).

Ahmed & Singhi (2013) fizeram uma análise aprofundada das vantagens e desvantagens que os pavimentos intertravados apresentam em relação aos outros tipos de pavimentos, comparando-os aos pavimentos com revestimento de material asfáltico, a saber:

Coloração: as peças de concreto oferecem visibilidade superior à das superfícies betuminosas, tanto à luz do dia quanto à luz artificial, independentemente de sua coloração;

Conforto de rolamento: com base em medidas objetivas, ou seja, com a utilização de equipamentos específicos os pavimentos intertravados apresentam padrões mais baixos de conforto do que os pavimentos asfálticos. Suas condições de conforto de rolamento, no entanto, tendem a melhorar sob a ação do tráfego. À velocidades menores do que 70 km/h, pesquisas com usuários indicaram que o pavimento intertravado são tidos como proporcionadores de conforto de rolamento equivalente aos pavimentos com outros tipos de revestimentos;

Resistência à derrapagem: ainda que diversos fatores influenciem na sua avaliação, os pavimentos intertravados têm mostrado ser capazes de manterem níveis satisfatórios de resistência à derrapagem durante sua utilização. A

resistência à derrapagem tende a ser equivalente àquela associada aos pavimentos de concreto e equivalente, ou melhor, àquela associada aos pavimentos asfálticos;

Geração de ruído: para velocidades acima de 60 km/h a geração de ruídos associada às peças de concreto é superior à dos demais tipos de revestimento, ao passo que para velocidades menores do que aquela, há uma similaridade ou vantagem (menor geração de ruídos) das peças de concreto principalmente em superfícies secas. Infiltração de água: há um senso comum de que os pavimentos intertravados tornam-se “impermeáveis” ao longo de sua utilização devido à “selagem” das juntas pela deposição de detritos, borracha e óleo. O problema maior verifica-se nos primeiros períodos após a construção. Dessa forma, recomendam-se cuidados redobrados na selagem das juntas com areia adequada, o confinamento da areia de assentamento, a utilização de peças chanfradas na face superior de modo a diminuir o efeito de sucção dos selantes das juntas pela passagem dos pneus, a construção de dispositivos de drenagem e prover ao pavimento caimento superior a 2%.

Uma variedade de métodos para dimensionamento das espessuras de pavimentos intertravados vem sendo apresentada nas últimas conferências internacionais sobre o assunto e em várias outras publicações através dos anos, entretanto, as características específicas das peças que compõem o revestimento desse tipo de pavimento têm sido motivo de discussão apenas no âmbito da durabilidade em face de aplicações sob tráfego de veículos comerciais de intensidade significativa (GODINHO, 2009).

A norma NBR 9781 (ABNT, 2013) estabelece os requisitos exigíveis para aceitação de peças de concreto para pavimentação intertravada sujeita ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos. Segundo essa norma, os ensaios que devem ser realizados com as peças de concreto são inspeção visual, avaliação dimensional, absorção de água, resistência à compressão e resistência à abrasão, sendo este último facultativo.

A norma C936/C936M (ASTM, 2015) determina que as peças de concreto para pavimento intertravado sejam submetidas aos ensaios de resistência à compressão, absorção de água, ciclos de gelo e degelo, resistência à abrasão e avaliação dimensional. É importante destacar que as normas NBR 9781 (ABNT, 2013) e C936/C936M (ASTM, 2015) não mencionam ensaios sobre carregamento repetido.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do que foi visto na literatura pesquisada pôde-se tomar como pontos de interesse a ser considerados na pesquisa os seguintes itens:

i. o uso de resíduos em concreto torna-se viável conforme os teores utilizados;

ii. as garrafas produzidas com PET possuem boa resistência mecânica e leveza. É possível que o uso do resíduo de PET em concretos possa proporcionar aumento de resistência com redução de peso específico;

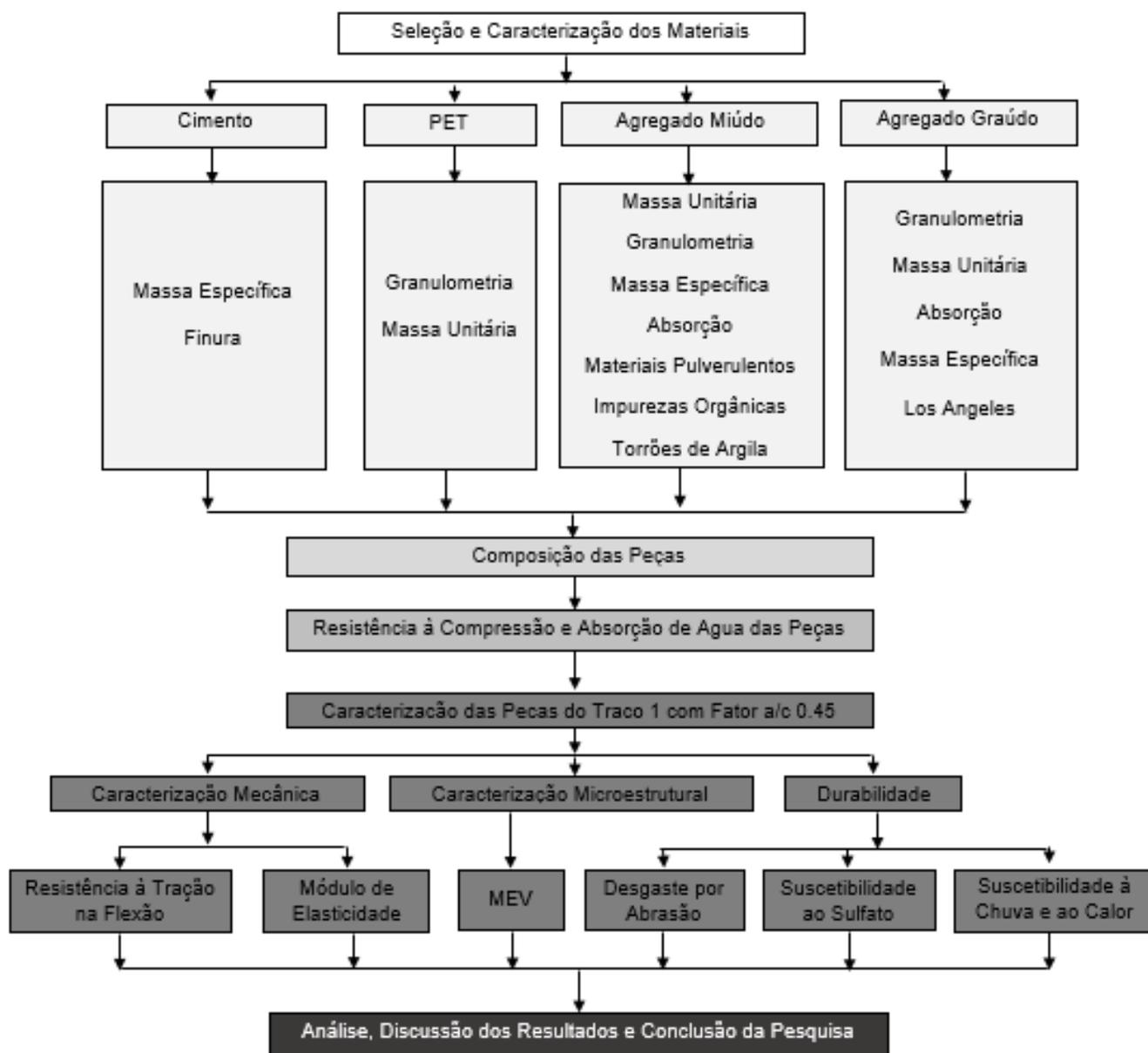
iii. a resistência à compressão dos concretos produzidos com PET parece estar relacionada com a quantidade e o formato do PET utilizado. Estudos publicados recentemente apontam que os concretos produzidos com percentuais de PET acima de 10% apresentaram resistência à compressão inferior ao traço de referência. Além disso, a resistência à compressão diminui à medida em que o PET utilizado tem sua granulometria maior.

iv. A prática de pavimento intertravado com peças pré-moldadas de concreto vem crescendo em todo o mundo, particularmente no Brasil. A possibilidade de desenvolver um produto que permite diversas possibilidades estéticas, facilidade de produção e execução, tendo a possibilidade de consumir resíduos ao invés de matéria prima, tem sido uma grande motivação para pesquisadores.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais, as especificações e os procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa. A Figura 15 ilustra o fluxograma com a sequência de atividades realizadas.

Figura 15: Fluxograma contendo as etapas da pesquisa.



3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na pesquisa foram:

- PET: proveniente da indústria DEPET Reciclagem, situada no município de Campina Grande – PB;
- Agregado miúdo: areia quartzosa, extraída do leito do rio Paraíba;
- Agregado graúdo: brita granítica 9,5 mm, também chamada de “cascalhinho” ou brita 0;
- Cimento: CP V ARI RS – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos, fabricado pela MIZU Cimentos Especiais;
- Água: destinada ao consumo humano, fornecida pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA);
- Aditivo: marca LIQUIPLAST 1700-S Super Plastificante.

3.1.1 PET

O PET utilizado nesta pesquisa apresenta-se na forma de pó, ou seja, cominuído em partículas cuja dimensão máxima é de 0,6 mm.

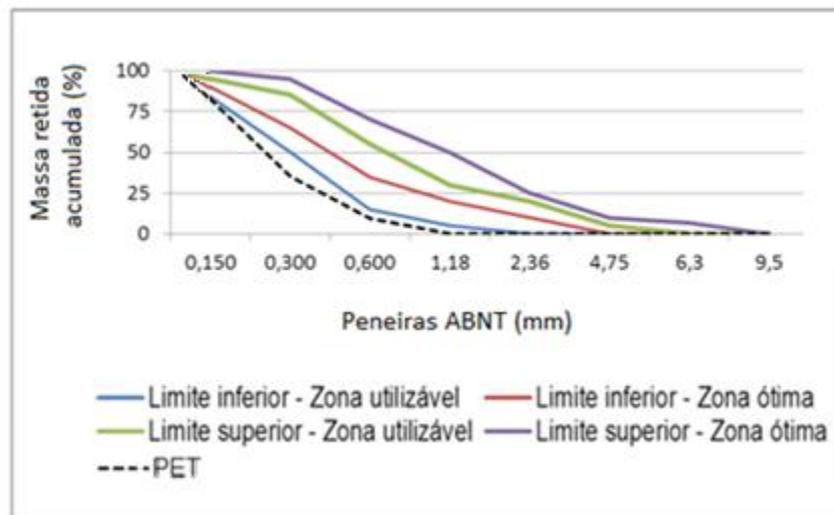
A Tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios da caracterização física do PET.

Tabela 7: Caracterização física do PET.

Ensaio		Unidades	PET
Granulometria	Módulo de Finura		1,29
	Dimensão Máxima	mm	0,60
Massa unitária – estado solto		Kg/m ³	629
Massa unitária – estado compactado		Kg/m ³	768

Conforme a Tabela 7 verifica-se que o resultado do módulo de finura obtido para o PET é de 1,29, este valor encontra-se abaixo do limite inferior prescrito pela NBR 7211 (ABNT, 2009), que é 1,5 para uso em concretos de cimento Portland. De acordo com o resultado da dimensão máxima, o material é classificado como muito fino. O gráfico da curva granulométrica do PET está ilustrado na Figura 16.

Figura 16: Distribuição granulométrica do PET e limites da NBR 7211.



A composição granulométrica do agregado miúdo desempenha papel fundamental na preparação de concretos e argamassas. As dimensões do agregado têm efeito direto sobre os vazios, no fator água/cimento e na trabalhabilidade das misturas de concreto.

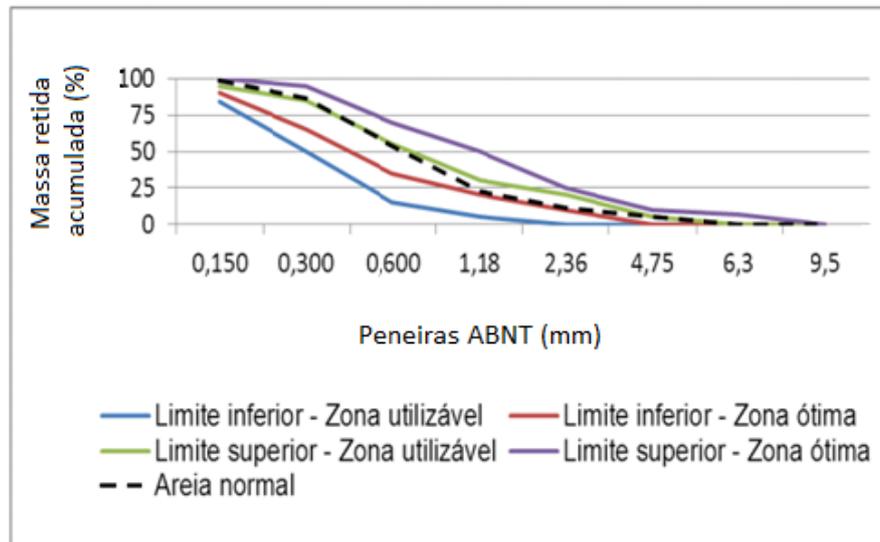
3.1.2 Agregado miúdo

A Tabela 8 apresenta a caracterização física do agregado miúdo utilizado nesta pesquisa.

Tabela 8: Caracterização física do agregado miúdo.

Normas	Ensaios	Unidades	Areia
NBR NM 248/2003	Granulometria	Módulo de Finura	2,80
		Dimensão Máxima	mm
NBR NM 45/2006	Massa unitária – estado solto	Kg/m ³	1463
	Massa unitária – est. compactado	Kg/m ³	1579
NBR NM 30/2001	Absorção de água	%	2,59
NBR NM 52/2009	Massa Específica	g/cm ³	2,60
NBR NM 46/2003	Material pulverulento	%	2,01
NBR NM 49/2001	Impurezas orgânicas	%	1,02
NBR NM 7218/2010	Torrões de argila	%	0,35

Os resultados obtidos para o diâmetro máximo e para o módulo de finura foram de 4,75 mm e 2,80, respectivamente. As areias são divididas, com relação a sua granulometria, em muito grossas, grossas, médias, finas e muito finas, conforme o valor do seu módulo de finura, que é determinado pela soma das porcentagens retidas acumuladas, nas peneiras de série normal dividida por 100. De acordo com o módulo de finura a areia utilizada é classificada como areia média que pertence à zona ótima, não apresentando uma grande deficiência ou excesso de qualquer tamanho de partícula, produzindo assim um concreto mais trabalhável e econômico. Com os resultados obtidos para granulometria do agregado miúdo, foi possível traçar a curva granulométrica ilustrada na Figura 17.

Figura 17: Distribuição granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR 7211.

O valor obtido para o teor de materiais pulverulentos na areia foi 2,01%. Isto indica que 97,99% da amostra do agregado miúdo é formado por grãos de areia. A presença de materiais pulverulentos é indesejável na constituição do concreto, já que um alto teor diminui a aderência do agregado à argamassa e dificulta a reação de hidratação do cimento com os agregados, prejudicando de forma direta a resistência do concreto, pois aceleram-se os processos de perdas por erosão. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), para um concreto que irá receber um grande desgaste devido ao tráfego constante é necessário que o teor de materiais pulverulento seja inferior a 3%, este teor pode chegar a 5% para concretos estruturais ou pisos de alta resistência.

O teor de argila em torrões obtidos para o agregado miúdo foi igual a 0,35%. Este satisfaz os parâmetros da NBR 7218 (ABNT, 2010) que estabelece um valor inferior a 1,5%.

3.1.3 Agregado graúdo

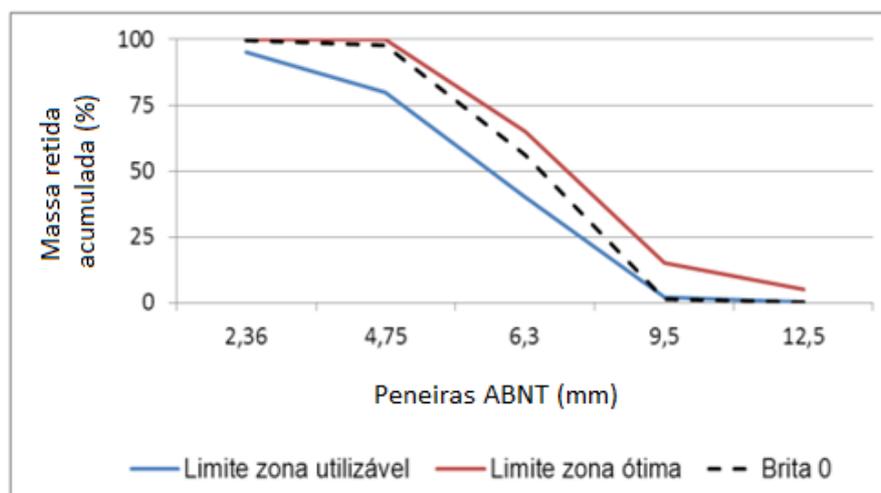
A Tabela 9 apresenta a caracterização física do agregado graúdo utilizado nesta pesquisa.

Tabela 9: Caracterização física do agregado graúdo.

Normas	Ensaio	Unidades	Brita
NBR NM 248/2003	Granulometria	Módulo de Finura	5,92
		Dimensão Máxima	mm
NBR NM 45/2006	Massa unitária – estado solto	Kg/m ³	1338
	Massa unitária – estado compactado	Kg/m ³	1436
NBR NM 53/2009	Absorção de água	%	0,47
	Massa Específica do agregado seco	g/cm ³	2,61
NBR NM 53/2009	Massa Específica SSS	g/cm ³	2,69
	Massa Específica	g/cm ³	2,72
NBR NM 51/2001	Abrasão Los Angeles	%	45,2

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 9, verifica-se que o agregado graúdo apresentou uma massa específica igual a 2,72 g/cm³ e absorção de água igual a 0,47%. De acordo com Bauer (1995) a massa específica para o agregado graúdo encontra-se na média de 2,7 g/cm³, portanto o valor encontrado se aproxima da média. Segundo Chagas Filho (2013) o valor da absorção de agregados de origem granítica é de aproximadamente 0,3%.

A Figura 18 ilustra a curva granulométrica do agregado graúdo.

Figura 18: Distribuição granulométrica do agregado graúdo e limites da NBR 7211.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 9 e os ilustrados na Figura 18, observa-se que a composição granulométrica do agregado graúdo, aponta o módulo de finura de 5,92 e a brita utilizada apresentou dimensão máxima característica de 9,5 mm, atendendo, portanto, a recomendação da NBR 7211 (ABNT, 2009) de que a dimensão do agregado graúdo não deve exceder a metade da menor dimensão da peça.

3.1.4 Cimento

A Tabela 10 apresenta a caracterização física do cimento utilizado nesta pesquisa.

Tabela 10: Caracterização física do cimento.

Ensaio	Valor obtido
Massa específica	3,13 g/cm ³
Módulo de Finura	1,40

Analisando os resultados apresentados na Tabela 10, verifica-se que a massa específica do cimento CP V é 3,13 g/cm³. Este valor satisfaz os requisitos exigidos pela NBR 11513 (ABNT, 1990) que especifica um valor menor ou igual a 6,0 g/cm³.

O módulo de finura obtido foi 1,40, este valor satisfaz o limite máximo estabelecido pela NBR 11579 (ABNT, 2012) que é igual a 12.

3.1.5 Água e aditivo

A água de abastecimento público é considerada dentro dos padrões exigidos pela NBR 15900 (ABNT, 2009) e pode ser utilizada sem restrição para a preparação do concreto. Por isso, a água do amassamento usada nesta pesquisa não foi ensaiada.

Foi utilizado o aditivo da marca LIQUIPLAST – 1700 que atende aos requisitos da NBR 11768 (ABNT, 2011).

3.2 MÉTODOS

Após a escolha e caracterização dos materiais, foi definida a composição dos traços do concreto, o fator água/cimento e os percentuais de PET a serem utilizados. Os corpos de prova foram moldados e, após 28 dias de cura imersa, foram submetidos a ensaios para determinação de suas propriedades.

3.2.1 Composição das peças

Para composição das peças utilizou-se o concreto plástico com os seguintes traços: Traço 1 (1:1,5:1,5), Traço 2 (1:2:2) e Traço 3 (1:2,5:2,5). Para cada um desses traços utilizou-se o fator água/cimento igual a 0,45, 0,50 e 0,55. Seguindo recomendação do fabricante, o aditivo foi utilizado na proporção 0,8% da massa do cimento. Foram produzidas peças com 0,0% de PET (concreto de referência) e peças com substituição parcial do agregado miúdo (areia) por PET nos teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% da massa total do agregado, totalizando 45 composições. A Figura 19 ilustra os fatores considerados na composição das peças.

Figura 19: Fatores considerados na composição das peças.



As composições foram numeradas de 1 a 45. As Tabelas 11, 12 e 13 apresentam o proporcionamento dos materiais utilizados.

Tabela 11: Proporcionamento dos materiais para o Traço 1.

0,0% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
1	0,45	600 g	900 g	900 g	000 g	270 g
2	0,50	600 g	900 g	900 g	000 g	300 g
3	0,55	600 g	900 g	900 g	000 g	330 g
2,5% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
4	0,45	600 g	900 g	855 g	45 g	270 g
5	0,50	600 g	900 g	855 g	45 g	300 g
6	0,55	600 g	900 g	855 g	45 g	330 g
5,0% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
7	0,45	600 g	900 g	810 g	90 g	270 g
8	0,50	600 g	900 g	810 g	90 g	300 g
9	0,55	600 g	900 g	810 g	90 g	330 g
7,5% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
10	0,45	600 g	900 g	765 g	135 g	270 g
11	0,50	600 g	900 g	765 g	135 g	300 g
12	0,55	600 g	900 g	765 g	135 g	330 g
10,0% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
13	0,45	600 g	900 g	720 g	180 g	270 g
14	0,50	600 g	900 g	720 g	180 g	300 g
15	0,55	600 g	900 g	720 g	180 g	330 g

Tabela 12: Proporcionamento dos materiais para o Traço 2.

0,0% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
16	0,45	480 g	960 g	960 g	000 g	216 g
17	0,50	480 g	960 g	960 g	000 g	240 g
18	0,55	480 g	960 g	960 g	000 g	264 g
2,5% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
19	0,45	480 g	960 g	912 g	48 g	216 g
20	0,50	480 g	960 g	912 g	48 g	240 g
21	0,55	480 g	960 g	912 g	48 g	264 g
5,0% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
22	0,45	480 g	960 g	864 g	96 g	216 g
23	0,50	480 g	960 g	864 g	96 g	240 g
24	0,55	480 g	960 g	864 g	96 g	264 g
7,5% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
25	0,45	480 g	960 g	816 g	144 g	216 g
26	0,50	480 g	960 g	816 g	144 g	240 g
27	0,55	480 g	960 g	816 g	144 g	264 g
10,0% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
28	0,45	480 g	960 g	768 g	192 g	216 g
29	0,50	480 g	960 g	768 g	192 g	240 g
30	0,55	480 g	960 g	768 g	192 g	264 g

Tabela 13: Proporcionamento dos materiais para o Traço 3.

0,0% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
31	0,45	400 g	1000 g	1000 g	000 g	180 g
32	0,50	400 g	1000 g	1000 g	000 g	200 g
33	0,55	400 g	1000 g	1000 g	000 g	220 g
2,5% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
34	0,45	400 g	1000 g	950 g	50 g	180 g
35	0,50	400 g	1000 g	950 g	50 g	200 g
36	0,55	400 g	1000 g	950 g	50 g	220 g
5,0% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
37	0,45	400 g	1000 g	900 g	100 g	180 g
38	0,50	400 g	1000 g	900 g	100 g	200 g
39	0,55	400 g	1000 g	900 g	100 g	220 g
7,5% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
40	0,45	400 g	1000 g	850 g	150 g	180 g
41	0,50	400 g	1000 g	850 g	150 g	200 g
42	0,55	400 g	1000 g	850 g	150 g	220 g
10,0% PET						
Nº	FATOR A/C	CIMENTO	BRITA	AREIA	PET	ÁGUA
43	0,45	400 g	1000 g	800 g	200 g	180 g
44	0,50	400 g	1000 g	800 g	200 g	200 g
45	0,55	400 g	1000 g	800 g	200 g	220 g

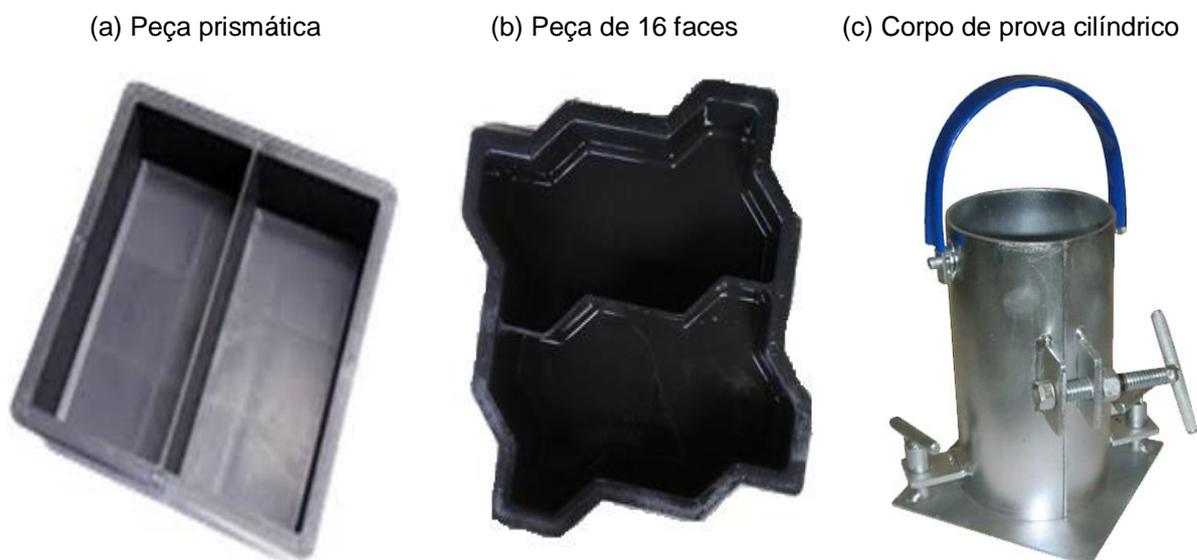
3.2.2 Moldagem dos corpos de prova

Para confecção dos corpos de prova foram utilizadas fôrmas de peças prismáticas, moldes cilíndricos e fôrmas de peças de 16 faces. As peças de 16 faces foram utilizadas porque apresentam bom intertravamento. As dimensões das peças de 16 faces são 24 cm x 10 cm x 4 cm e foram produzidas para determinação da resistência característica à compressão, absorção de água, tração na flexão, desgaste por abrasão, suscetibilidade ao ataque por sulfatos e suscetibilidade à ação do calor e da chuva. Por exigência da norma, foram utilizadas peças prismáticas, com dimensões 20 cm x 10 cm x 6 cm, para determinação da resistência à tração na flexão. Os corpos de prova cilíndricos, com dimensões 5 cm x 10 cm, foram utilizados para o ensaio de determinação do módulo de elasticidade.

O processo utilizado para produção dos corpos de prova é conhecido popularmente como “processo dormido”, no qual o concreto permanece no molde de um dia para outro, e como os moldes são de plástico, a peça fica com um acabamento

superficial extremamente liso. A Figura 20 apresenta os moldes utilizados para confecção dos corpos de prova para realização dos ensaios.

Figura 20: Moldes utilizados para confecção dos corpos de prova.



A Figura 21 ilustra os corpos de prova utilizados para determinação das propriedades do concreto produzido com substituição parcial do agregado miúdo por PET.

Figura 21: (a) Peças prismáticas. (b) Peças de 16 faces. (c) Corpos de prova cilíndricos.



3.2.3 Caracterização física e comportamento mecânico dos corpos de prova

A NBR 9781 (ABNT, 2013) – Peças de Concreto para Pavimentação – estabelece os requisitos e métodos de ensaios exigíveis para aceitação de peças para pavimentação intertravada sujeita ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos. Esta norma exige que peças com resistência inferior a 35 MPa e/ou absorção de água superior a 7% não sejam admitidas. Por este motivo, todas as peças produzidas foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão e absorção de água.

3.2.3.1 Caracterização física: absorção de água

A absorção de água, expressa em porcentagem, representa o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação a sua massa em estado seco. O valor da absorção de água de cada corpo de prova foi calculado utilizando a Equação 1:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

A é a absorção de cada corpo de prova, expressa em porcentagem (%);

m_1 é a massa do corpo de prova seco, expressa em gramas (g);

m_2 é a massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

3.2.3.2 Comportamento mecânico: resistência característica à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi utilizado para comprovar as características mecânicas de uma peça indicando a que tensão ela sofreu a ruptura. Para realização deste ensaio utilizou-se uma prensa da marca Cyber-Tronic, modelo YIMC109, com capacidade de 150 toneladas. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG. Para este ensaio foram usadas peças de 16 faces, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22: Ensaio de resistência à compressão.



Admite-se que a resistência à compressão obedece à distribuição normal, sendo o valor característico estimado pela Equação 2:

$$f_{pk,est} = f_p - t \times s \quad \text{sendo} \quad s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n-1}} \quad (\text{Equação 2})$$

onde

f_p – resistência média das peças, expressa em MPa;
 f_{pi} – resistência individual das peças, expressa em MPa;
 $f_{pk,est}$ – resistência característica estimada à compressão, expressa em MPa;
 n – número de peças da amostra;
 s – desvio-padrão da amostra, expresso em MPa;
 t – coeficiente de Student, em função do tamanho da amostra.

Neste ensaio usou-se $n = 6$, logo $t = 0,920$.

3.2.4 Ensaio realizados com as peças do traço 1 com fator a/c igual a 0,45

Objetivando otimizar o trabalho, selecionou-se as peças do Traço 1 com fator água/cimento igual a 0,45 (melhores resultados nos ensaios de resistência característica à compressão e absorção de água), para realização dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura, módulo de elasticidade estático e resistência à tração na flexão, suscetibilidade à ação do calor e da chuva, desgaste por abrasão e suscetibilidade ao ataque por sulfatos.

3.2.4.1 Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada para entender as correlações de sua microestrutura (defeitos e propriedades) e predizer as propriedades do material quando estas correlações são estabelecidas.

Para realização deste ensaio, foram retiradas amostras de 1 cm x 1 cm do concreto de referência e dos concretos com teores de PET de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0%. Essas amostras não foram trabalhadas com o auxílio de serras para não criar planos preferenciais. As amostras foram fixadas em um porta amostra de alumínio utilizando fita adesiva apropriada e colocadas em um aparelho metalizador para recobri-las com ouro durante 120s. As microfotografias das amostras foram obtidas

pelo microscópio eletrônico de varredura marca Tescan, modelo Vega 3. O ensaio foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica (LMEV) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande. A Figura 23 ilustra o equipamento utilizado para a realização do ensaio.

Figura 23: Microscópio eletrônico de varredura.

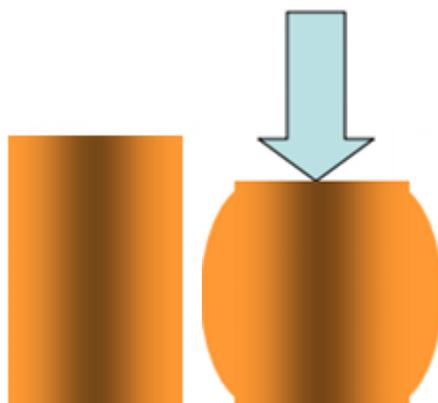


3.2.4.2 Módulo de elasticidade estático

Quando o material é submetido a tensões crescentes de tração ou de compressão, verifica-se que, até determinado limite, as tensões (σ) são proporcionais às deformações específicas correspondentes (ϵ). Esta deformação específica é entendida como sendo o quociente entre o alongamento ou encurtamento do corpo de prova e o comprimento inicial deste. Este fenômeno é conhecido como Lei de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$). A constante de proporcionalidade (E) é uma propriedade característica do material em ensaio, denominada de módulo de elasticidade, ela é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido. Neste ensaio foram utilizados corpos de prova cilíndricos com dimensões 5 cm x 10 cm. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 8522 (ABNT,

2008). A Figura 24 ilustra o corpo de prova recebendo carga axialmente.

Figura 24: Corpo de prova cilíndrico recebendo carga axialmente.



Para este ensaio foi utilizada uma prensa da marca Shimadzu, modelo Serve Pulser Controller 4890, com capacidade de 10 toneladas, conforme ilustra a Figura 25.

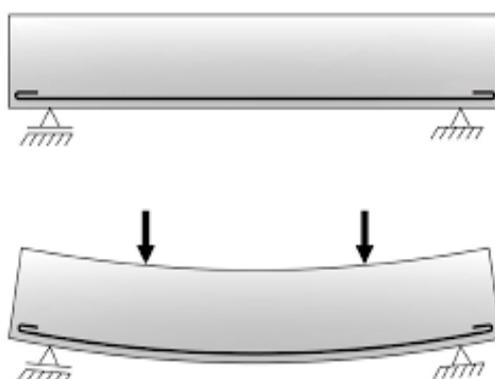
Figura 25: Ensaio para determinação do módulo de elasticidade.



3.2.4.3 Resistência à tração na flexão

A NBR 12142 (ABNT, 2010) determina o procedimento de ensaio de tração na flexão. Este consiste em aplicar duas cargas linearmente distribuídas nos terços médios de um prisma, de modo a provocar tração na face inferior do corpo de prova. Essa face terá suas fibras tracionadas até a ruptura do concreto. Devido à forma de aplicação da carga de ruptura do elemento de concreto, o terço central da peça fica sob a ação de flexão pura, não havendo efeitos de esforços cortantes, como pode ser observado através de diagrama de esforços solicitantes na Figura 26.

Figura 26: Peça submetida ao ensaio de tração na flexão.



Inicialmente, este ensaio foi realizado com as peças de 16 faces, como a ruptura não ocorreu no terço médio da distância entre os elementos de apoio, o ensaio foi refeito com as peças prismáticas. O ensaio foi realizado numa prensa da marca Shimadzu, modelo Serve Pulser Controller 4890, com capacidade de 10 toneladas. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, conforme ilustram as Figuras 27 e 28.

Figura 27: Ensaio de resistência à tração na flexão com peça de 16 faces.**Figura 28:** Ensaio de resistência à tração na flexão com peça prismática.

3.2.4.4 Desgaste por Abrasão

O dispositivo de abrasão consiste de um disco rotativo de aço, com 200 mm de diâmetro e 70 mm de espessura, que em contato com a superfície da peça de concreto

produz uma cavidade. Para determinação do desgaste por abrasão, cada peça foi fixada em um suporte que, por sua vez, era puxado por um contrapeso. A peça foi pressionada durante 60 segundos contra um disco de aço em uma rotação de 75 RPM, de modo que o atrito entre eles gerasse uma cavidade na superfície da amostra. Entre o disco em rotação e a amostra, foi derramado, a partir de um funil de escoamento, um material abrasivo (óxido de alumínio fundido branco grana F80) a uma vazão de $(100 \pm 0,05)$ g a cada (100 ± 5) rotações do disco. O desgaste por abrasão é determinado pela largura desta cavidade. A NBR 9781 (ABNT, 2013) estabelece os seguintes critérios de aceitação, apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Critérios para aceitação do ensaio de desgaste por abrasão

Solicitação	Largura Máxima (mm)
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	≤ 23
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	≤ 20

A Figura 29 ilustra a realização do ensaio de desgaste por abrasão.

Figura 29: (a) Ensaio de desgaste por abrasão. (b) Peça desgastada pelo ensaio de abrasão. LCC/UFPE.



Este ensaio foi realizado no Laboratório de Construção Civil da Universidade Federal de Pernambuco, campus de Caruaru.

3.2.4.5 Suscetibilidade ao Ataque por Sulfatos

A agressividade do meio onde as estruturas de concreto estão inseridas pode reduzir a vida útil das mesmas significativamente, como ambientes urbanos, marinhos, industriais, esgotos, entre outros, que apresentam em comum o íon sulfato. Este reage quimicamente com os compostos do cimento e forma produtos expansivos, provocando a fissuração e desagregação do concreto. Por este motivo, foi realizado o ensaio de resistência a sulfatos. Este ensaio foi realizado baseando-se na NBR 13583 (ABNT, 2014), conforme ilustra a Figura 30.

Figura 30: Ensaio de resistência ao ataque por sulfato.



A resistência ao ataque por sulfatos foi mensurada pela variação de massa sofrida pelo concreto.

O cimento utilizado nesta pesquisa apresenta a propriedade de ser resistente a sulfatos (CP V ARI – RS). Este ensaio foi realizado objetivando verificar se a presença do PET provocaria alteração desta característica.

3.2.4.6 Suscetibilidade à ação do calor e da chuva

Este ensaio tem por objetivo simular o envelhecimento das peças para piso intertravado pela ação da chuva e do sol. O equipamento utilizado para simulação do calor do sol foi uma estufa. O equipamento utilizado para simulação da chuva é o BHS (Basic Hydrology System), fabricado pela Armfield Corporation, o qual é composto por um conjunto de oito aspersores pelos quais é distribuído um fluxo de água regulável. A área útil disponível para exposição é de 2 m² (1 m x 2 m) e o abastecimento de água feito por meio de um reservatório e uma bomba de circulação. A água aspergida e não absorvida pelas peças retorna por meio de tubulações para o reservatório, reiniciando o processo. A água utilizada foi proveniente do reservatório de águas pluviais existente no laboratório de Hidráulica da UFCG.

A fim de submeter as peças intertravadas a condições extremas, os quantitativos de vazão e tempo de exposição à chuva foram determinados com base nos dados de precipitação máxima registrada na Paraíba. O banco de dados da Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESPA), até o ano de 2014, registrou que a maior precipitação registrada no estado foi de 12 litros/hora/m².

Estudos realizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT (2014) indicam que a temperatura de um pavimento de concreto pode chegar a 65 °C nas regiões mais quente do Brasil.

Para realização deste ensaio foi colocada uma peça sob cada aspersor. Com a finalidade de padronizar os tempos, optou-se por adotar 120 minutos de exposição à chuva, com vazão de 15 litros/hora/m², e, 21 horas e 30 minutos em estufa, à temperatura de 70 °C. As peças foram submetidas a vinte ciclos de molhagem e secagem, tendo cada ciclo duração de 24 horas, conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31: Representação esquemática das etapas de cada ciclo de exposição.

Objetivando simular o choque térmico decorrente de precipitações de chuvas sobre alvenarias expostas ao sol durante longo tempo, as peças não passaram por resfriamento antes de iniciar o ciclo seguinte. A Figura 32 ilustra a simulação de chuva no BHS.

Figura 32: Ensaio de simulação de chuva.

A erosão é importante para as estruturas sujeitas ao desgaste pelo escoamento das águas, sendo necessário separar o desgaste provocado pelo carreamento de partículas finas pela água dos estragos causados pela cavitação. Enquanto a erosão é o desgaste causado pela passagem abrasiva dos fluidos contendo partículas finas suspensas, a cavitação é a degradação da superfície do concreto causada pela implosão de bolhas de vapor de água quando a velocidade ou direção do escoamento sofre uma mudança brusca (HELENE e ANDRADE, 2010). Para mensurar a erosão sofrida pelas peças, em cada ciclo realizou-se medidas da massa após a secagem.

Após os 20 ciclos de molhagem e secagem as peças foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão.

Para analisar a qualidade da água lixiviada e a possibilidade desta água representar risco de contaminação para o solo, foram coletadas amostras da água contida no reservatório do equipamento, antes e após a realização do ensaio para a análise química. A análise química da água foi realizada no Laboratório de Irrigação e Salinidade da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola da UFCG.

De acordo com a disponibilidade dos equipamentos do Laboratório de Hidráulica da UFCG só foi possível realizar o ensaio de suscetibilidade à ação do calor e da chuva para uma das composições em estudo. Optou-se pelas peças do Traço 1, com fator água/cimento igual a 0,45 e com teor de 7,5% de PET (peça de número 10, constante na Tabela 11).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados para caracterização física, mecânica e microestrutural das peças de concreto para pavimento intertravado.

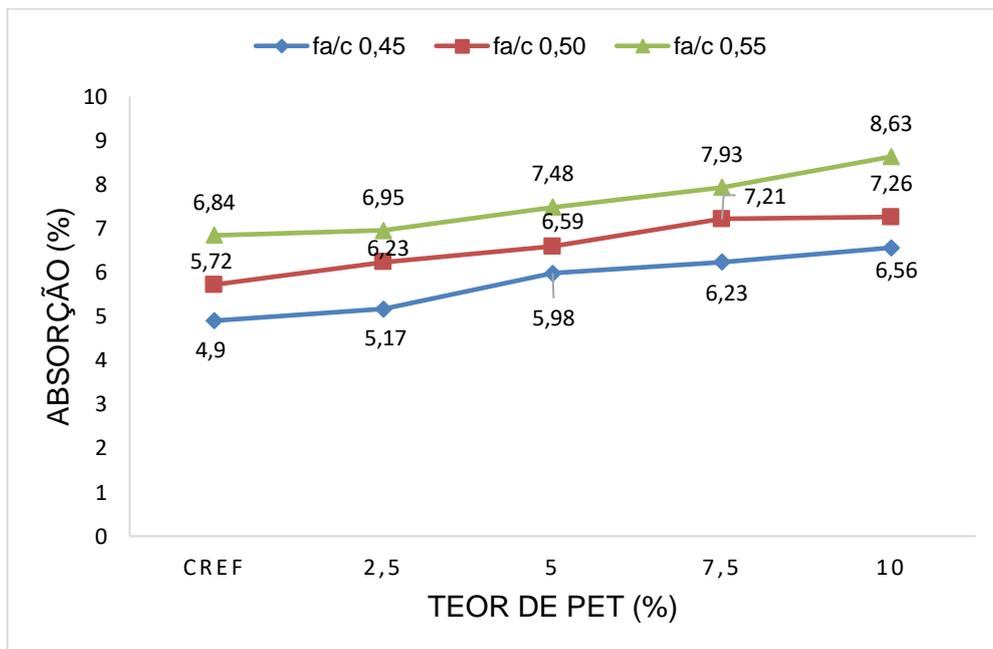
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS CORPOS DE PROVA

Neste item são apresentadas as análises dos resultados dos ensaios de absorção de água e resistência característica à compressão realizados para as peças de concretos dos Traços 1, 2 e 3, após 28 dias de cura.

4.1.1 Caracterização física: absorção de água

Foram destinadas três amostras de cada peça de concreto para a investigação da absorção. Suas massas foram aferidas nos estados seco e saturado. Os traços produzidos variaram no teor de PET, desde a ausência total (CREF) até a concentração de 10,0%, e no fator água/cimento 0,45, 0,50 e 0,55.

A Figura 33 ilustra os resultados de absorção de água das peças intertravadas para o Traço 1 (1:1,5:1,5) para o concreto de referência (CREF) e para os concretos com os teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% de PET.

Figura 33: Absorção de água dos concretos para o Traço 1.

De acordo com os valores apresentados na Figura 33, observa-se que a incorporação de PET provocou o aumento da absorção de água nos concretos em todos os casos analisados. Este fenômeno ocorreu devido à ausência de interação química entre o polímero e a matriz cimentícia, gerando aumento da porosidade do concreto e, por conseguinte, o aumento da absorção de água.

A porosidade é uma característica importante do concreto, pois, interfere diretamente na durabilidade do material. Concretos com baixa porosidade são mais duráveis porque dificultam o ingresso de substâncias deletérias. A permeabilidade do concreto é uma propriedade que depende da porosidade, ou seja, indica a capacidade de penetração e absorção de líquidos e gases no concreto. Neville (2013) salienta que a influência do agregado na resistência do concreto é proveniente da resistência mecânica do agregado, e, também, da sua absorção e da sua aderência.

De uma forma ampla, a resistência está intimamente relacionada à porosidade dos materiais. Quanto mais porosos estes se apresentam, menor

tende a ser sua resistência. No concreto, além da porosidade da matriz de cimento e do agregado graúdo, deve ser considerada a porosidade da zona de transição entre a matriz e o agregado. No estudo da resistência do concreto com agregados naturais, geralmente o uso de agregados densos e resistentes fazem com que esta propriedade seja influenciada basicamente pela porosidade da matriz e da zona de transição. Contudo, quando se estuda a resistência de concretos com material reciclado, a porosidade do agregado passa a ter um papel importante na determinação da resistência do concreto.

Os resultados apresentados na Figura 33 também mostraram que a absorção de água está relacionada ao fator água/cimento. Os concretos contendo 10,0% de PET, com fatores água/cimento 0,45, 0,50 e 0,55, apresentaram aumentos da absorção de água na ordem de 34%, 27% e 26%, respectivamente, quando comparados com o concreto de referência.

As peças produzidas com fator água/cimento de 0,55 não satisfazem aos parâmetros normativos da NBR 9781 (ABNT, 2013) que prescreve que as peças de concretos devem apresentar valor médio de absorção de água menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior que 7%.

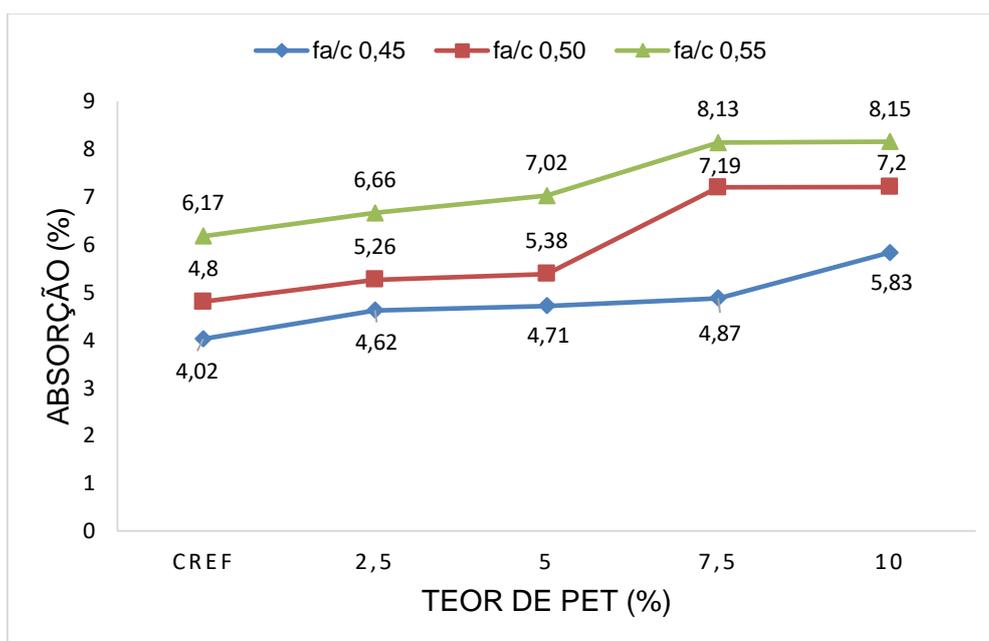
Do ponto de vista da resistência, a relação água/cimento-porosidade é indiscutivelmente o fator mais importante porque, independentemente de outros fatores, ela afeta a porosidade tanto da matriz pasta de cimento como da zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo (METHA & MONTEIRO, 2005). Concretos mais porosos e permeáveis tendem a ser menos duráveis por proporcionarem, no caso de aplicações estruturais, menor proteção à armadura contra agentes agressivos externos que podem adentrar no compósito.

O CEB-192 relaciona a absorção de água do concreto com a sua qualidade: menor que 3,0%, baixa absorção e boa qualidade; de 3,0% a 5,0%, absorção e qualidade média; maior que 5,0%, alta absorção e qualidade pobre. Praticamente todos os concretos analisados apresentaram absorção alta.

De acordo com o proposto por Helene e Andrade (2010), os concretos podem ser classificados segundo a absorção de água em duráveis, quando o percentual é menor do que 4,2%; normais, quando a absorção está entre 4,2% e 6,3% e, para valores maiores que 6,3%, os concretos são considerados deficientes. Por esta classificação, todos os concretos com fator água/cimento 0,45 são considerados normais e os concretos com fator água/cimento 0,55 são considerados deficientes.

A Figura 34 ilustra as curvas de absorção de água das peças intertravadas para o Traço 2 (1:2:2) para o concreto de referência (CREF) e para os concretos com os teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% de PET.

Figura 34: Absorção de água dos concretos para o Traço 2.



De acordo com os resultados apresentados na Figura 34, observa-se um comportamento semelhante ao verificado para o Traço 1, ou seja, há um

aumento da absorção de água de acordo com o aumento do teor de PET incorporado.

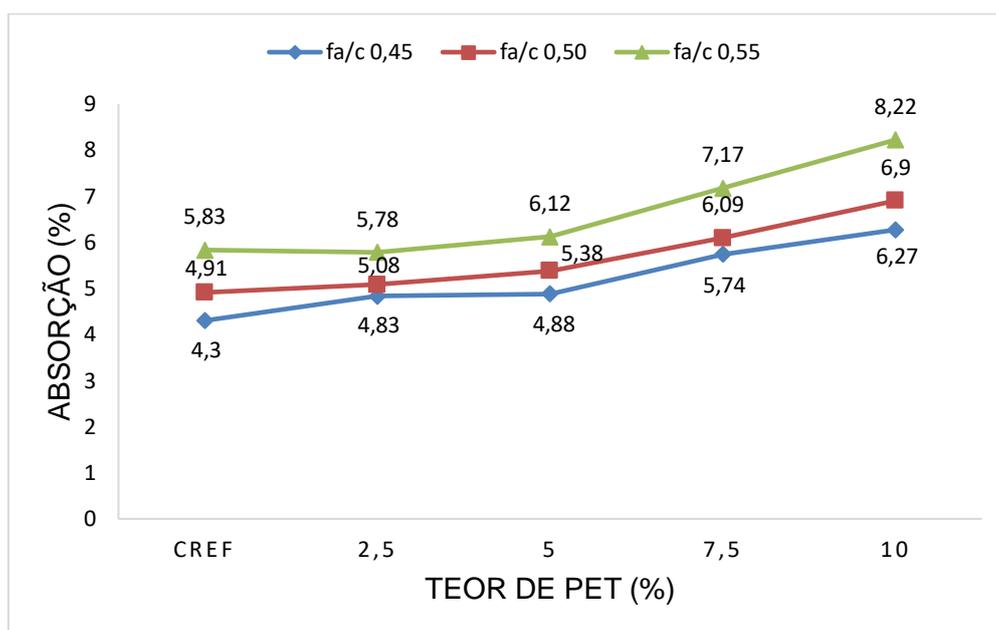
Observou-se que houve um aumento da absorção de água conforme o aumento do fator água/cimento. Este fato deve-se ao volume de vazios originários do excesso de água.

Com relação à substituição do agregado natural por PET, relacionando-se os valores obtidos, observa-se um aumento significativo da absorção, oriundo provavelmente, do preenchimento e da distribuição dos vazios no concreto com a adição do PET. Entretanto, o emprego do PET ocasionou um incremento bem maior de finos, causando um maior refinamento da estrutura de poros, formando caminhos preferenciais, favorecendo a absorção por capilaridade. Segundo Mehta & Monteiro (2005), uma elevada percentagem de finos, sem atividade química, favorece o aumento da absorção capilar.

Os concretos com teores de 2,5% e 5,0% de PET não apresentaram variação significativa na absorção de água em relação aos respectivos concretos de referência. Entretanto, os concretos com teores de 7,5% e 10,0% de PET, com fator água/cimento 0,50 e 0,55 apresentaram valores de absorção superior a 7%, não satisfazendo os requisitos prescritos pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

Estudos feitos por Saikia e Brito (2013) apontaram que os concretos contendo teores de PET, nos níveis de substituição de 5% e 10%, não apresentaram variação significativa na absorção de água. A capacidade de absorção de água dos concretos com teor de 15% foi superior ao obtido para o concreto de referência.

A Figura 35 ilustra as curvas de absorção de água das peças intertravadas para o Traço 3 (1:2,5:2,5) para o concreto de referência (CREF) e para os concretos com os teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% de PET.

Figura 35: Absorção de água dos concretos para o Traço 3.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 35, observa-se um pequeno aumento da absorção de água para os concretos produzidos com 2,5% e 5,0% de PET. Os concretos com teores de 7,5% e 10,0% de PET apresentaram uma capacidade média de absorção 40% maior do que os respectivos concretos de referência. De acordo com a ABIPET (2014) a absorção de água do PET virgem é 0,6% e o reciclado 0,8%. Contudo, esse baixo índice de absorção não ocorre com o PET, devido ao fato de o mesmo apresentar superfície com elevada rugosidade, o que acarreta maior poder de adsorção. Desse fato, decorre a elevada hidrofiliabilidade por parte desse material. Além do mais, materiais granulados possuem considerável capacidade de retenção de líquido decorrente da capilaridade.

Conforme pôde se verificar, os fatores água/cimento de 0,45 e de 0,55 apresentaram, respectivamente, os menores e maiores valores de absorção de água, independente do traço e do teor PET.

Se a quantidade de água utilizada for inferior à necessária não ocorrerá a hidratação completa do cimento. No entanto, se a quantidade de água for maior do que a necessária, após ocorrida toda a hidratação do cimento, a água excedente migra para a superfície do concreto, formando capilares em seu interior. As duas situações provocam perda da resistência mecânica.

O controle de absorção de água das peças de concreto é importante quando forem aplicadas em áreas úmidas, pois o processo de eflorescência pode ser acelerado. Segundo Lintz *et al.* (2012) a absorção de água fornece uma medida de durabilidade das peças porque indiretamente aponta o volume de vazios existentes e, com isso, sua permeabilidade. Diminuindo a permeabilidade da peça, conseqüentemente ocorrerá o aumento da sua resistência ao processo de eflorescência.

Os concretos contendo 10,0% de PET mostraram-se mais porosos e permeáveis que os concretos convencionais, o que pode ser um fator limitante para sua utilização, devendo-se evitar sua utilização em locais com grande incidência de umidade, tais como regiões com índice pluviométrico elevado, concretagens submersas, etc.

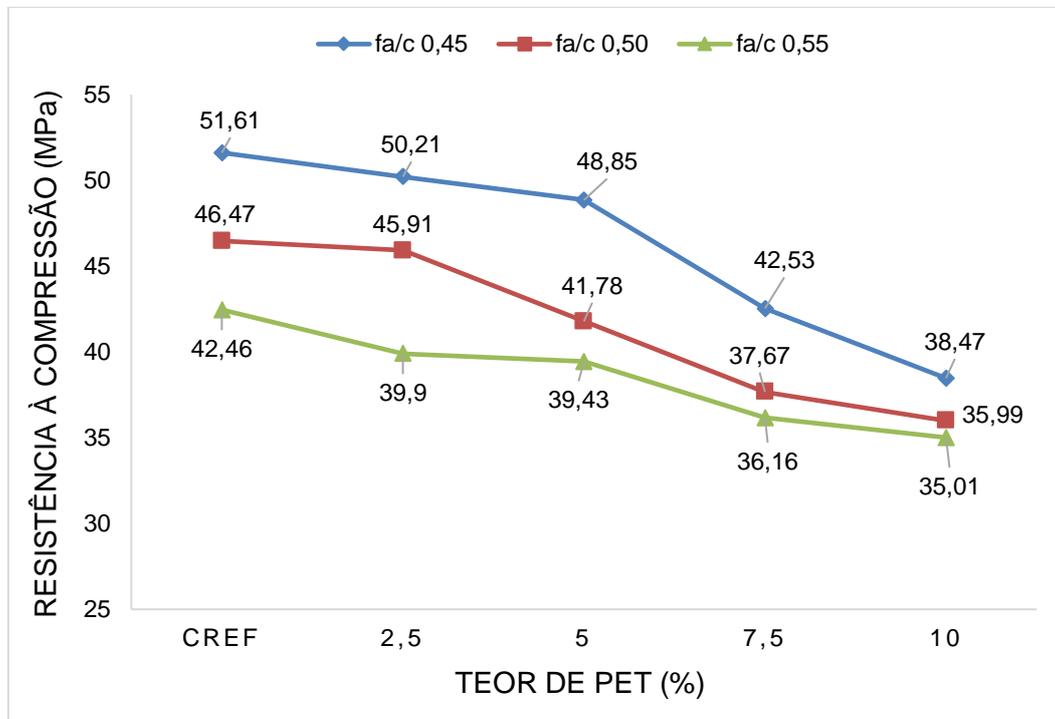
Em todos os traços utilizados pôde-se perceber que, ao promover-se o incremento do percentual de PET, houve um aumento no valor da absorção de água, devido ao módulo de finura do PET ser menor do que o da areia e, conseqüentemente, o PET apresentar maior área superficial, corroborando para o aumento da absorção de água.

4.1.2 Comportamento mecânico: resistência característica à compressão

A Figura 36 ilustra as curvas da resistência característica à compressão das peças intertravadas, Traço 1 (1:1,5:1,5), para o concreto de referência

(CREF) e para os concretos com os teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% de PET.

Figura 36: Resistência característica à compressão dos concretos para o Traço 1.



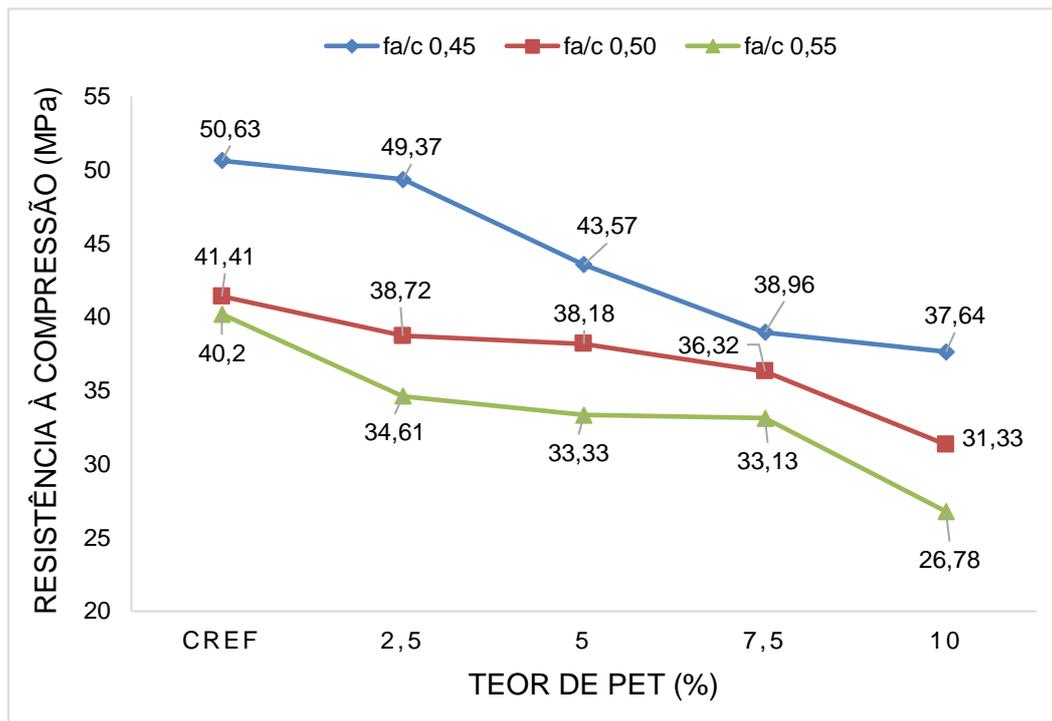
De acordo com os resultados ilustrados na Figura 36, observa-se que a substituição do agregado miúdo por PET promoveu a redução da resistência de até 25% quando comparado ao concreto de referência. Segundo Neville (2013), quanto maior a resistência e a massa específica dos agregados para produção de concretos convencionais, menor é a influência dos agregados sobre a resistência à compressão do concreto, uma vez que a resistência dos agregados supera a resistência da matriz. Por isso, ao se adicionar resíduos de PET no concreto das peças de concreto, observa-se uma queda da resistência à compressão.

Os melhores resultados foram observados para o teor de substituição do agregado miúdo por 2,5% de PET, quando o concreto apresentou um comportamento similar ao concreto de referência. Para os teores de 5,0% e 7,5% de PET, verificou-se uma redução da resistência, quando comparado ao concreto de referência. No entanto, para o teor de 10,0% de PET, obteve-se valores que limitam sua utilização, visto que a NBR 9781 (ABNT, 2013) estabelece o limite de resistência mínima de 35 MPa para que as peças possam ser utilizadas em solicitações para passagem de pedestres e veículos leves.

As peças produzidas com teor de 2,5% de PET e fator água/cimento de 0,45 apresentaram resistência característica à compressão superior à 50 MPa, sendo consideradas aptas à passagem de veículo especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados, de acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013). Estes resultados estão de acordo com Reddy e Kumar (2014) e Sadeghifar e Sohrabi (2014).

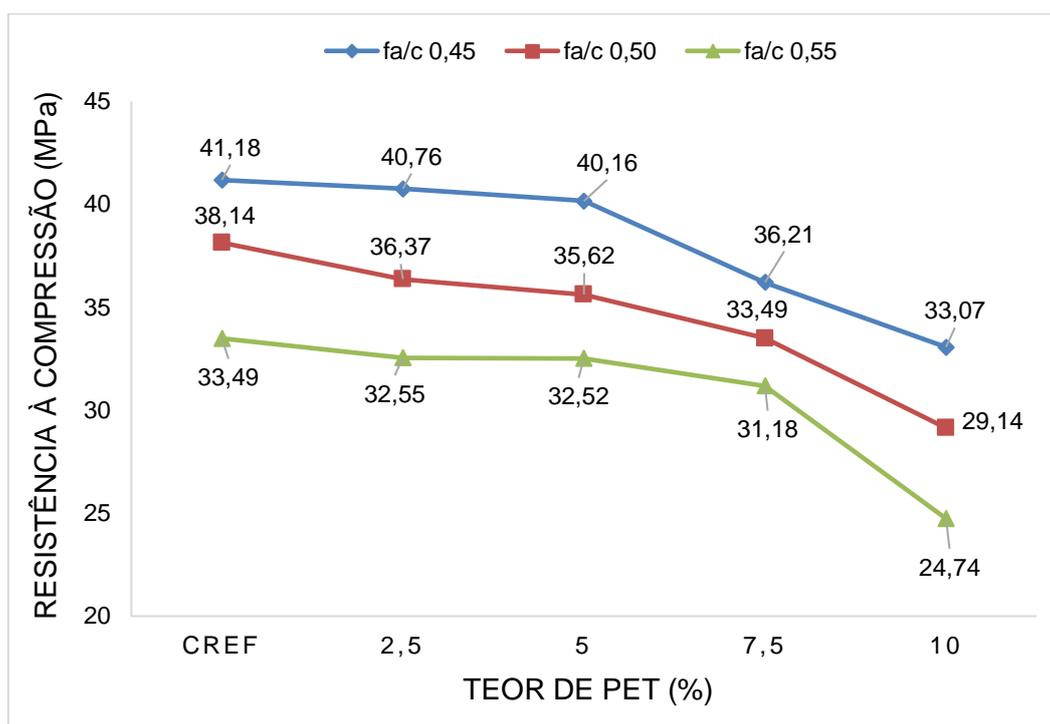
Comparando os resultados obtidos nesta pesquisa com os valores das normas da Austrália e da África do Sul, que estipula limite mínimo de 25 MPa para aplicações em ambientes com solicitações leves, pode-se afirmar que o uso de todas as peças analisadas é viável em situações que não envolvam sobrecargas elevadas, por exemplo, em praças, passeios, áreas de lazer e ciclovias.

A Figura 37 ilustra as curvas da resistência característica à compressão das peças intertravadas, Traço 2 (1:2:2), para o concreto de referência (CREF) e para os concretos com os teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% de PET.

Figura 37: Resistência característica à compressão dos concretos para o Traço 2.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 37, observam-se diferenças significativas do efeito do fator água/cimento na resistência das peças. Os concretos produzidos com fator água/cimento de 0,45 apresentaram resistência superior a 35 MPa independentemente dos teores de PET na mistura, enquanto que todos os concretos produzidos com fator água/cimento de 0,55 apresentaram resistência inferior a 35 MPa, com exceção o concreto de referência. Irwan *et al.*, 2013 e Foti, 2012 obtiveram resultados semelhantes.

A Figura 38 ilustra as curvas da resistência característica à compressão das peças intertravadas, Traço 3 (1:2,5:2,5), para o concreto de referência (CREF) e para os concretos com os teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% de PET.

Figura 38: Resistência característica à compressão dos concretos para o Traço 3.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 38, observa-se um acentuado declínio da resistência à compressão das peças produzidas com teor de 10,0% de PET. Houve uma redução média na ordem de 22% em relação aos respectivos concretos de referência.

Observando-se os resultados, dos Traços 1, 2 e 3, ilustrados nas Figuras 36, 37 e 38 percebe-se que, à medida em que se aumenta o teor de PET, há uma diminuição da resistência à compressão. Esse comportamento é típico de concretos com adição de materiais inertes cuja resistência é inferior à resistência dos agregados. Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos por Sadeghifar e Sohrabi (2014).

Nos estudos de Ramadevi e Manju (2012) a resistência à compressão dos concretos aumentaram quando se utilizou os teores de 0,5%, 1% e 2% de PET em substituição ao agregado miúdo, entretanto, a resistência à compressão

diminuiu para os teores de 4% e 6%. Nibudey *et al.* (2013) obtiveram resultados semelhantes. O aumento da resistência a compressão dos concretos ocorreu quando se utilizou os teores de 0,5% e 1,0% de PET em substituição ao agregado miúdo, e diminuiu quando se utilizou os teores de 1,5%, 2,0%, 2,5% e 3,0%.

Nos estudos de Vanu e Rao (2010) a resistência à compressão do concreto contendo 1% de fibra polipropileno de alta densidade (oriundos de resíduos de copos descartáveis) aumentou 4,2%. Todavia, a resistência à compressão do concreto contendo 1% de PET (oriundos de resíduos de garrafas de água mineral) aumentou 5,63%.

Os resultados obtidos neste trabalho para resistência à compressão estão de acordo com Neville (2013) que afirmou que os fatores que afetam a resistência do concreto são: o fator água/cimento, a qualidade do agregado (granulometria, textura superficial, forma, resistência e rigidez), a dimensão máxima do agregado e a zona de transição.

Com relação ao fator água/cimento os resultados obtidos nesta pesquisa para resistência à compressão obedeceram à Lei de Abrams: “Dentro do campo dos concretos plásticos, a resistência aos esforços mecânicos, bem como as demais propriedades do concreto endurecido variam na relação inversa ao fator água/cimento”.

Também foi observado que a resistência do concreto é proveniente da resistência mecânica do agregado, e, também, da sua absorção e da sua aderência. O agregado de PET tem resistência inferior ao agregado miúdo que era constituído de areia quartzosa. Outra fonte de enfraquecimento vem da presença do agregado, que pode conter falhas em sua estrutura, além de ser causador de microfissuração na interface com a pasta de cimento.

4.2 ENSAIOS REALIZADOS COM AS PEÇAS DO TRAÇO 1 COM FATOR A/C IGUAL A 0,45

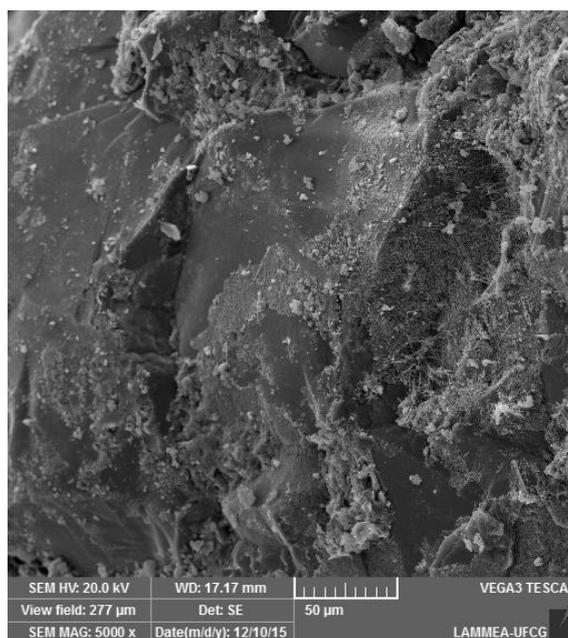
A Tabela 15 apresenta os resultados dos ensaios de resistência característica à compressão e absorção de água das peças do Traço 1 com fator água/cimento de 0,45.

Tabela 15: Resistência característica à compressão e absorção de água das peças do Traço 1 com fator água/cimento igual a 0,45.

Teor de PET (%)	Resistência à Compressão (MPa)	Absorção (%)
0,0	51,61	4,90
2,5	50,21	5,17
5,0	48,85	5,98
7,5	42,53	6,23
10,0	38,47	6,56

4.2.1 Microscopia eletrônica de varredura

As Figuras 39, 40, 41, 42 e 43 ilustram as micrografias obtidas para os concretos de referência e para os concretos com teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% de PET, respectivamente, para o Traço 1 com fator água/cimento igual a 0,45. As imagens estão ampliadas 5000 vezes.

Figura 39: Micrografia do concreto de referência.

Pela micrografia do concreto de referência é possível verificar uma boa aderência entre a matriz cimentícia e os agregados, não sendo visualizados grandes quantidades de poros. Percebeu-se a presença de poucos grãos de maior diâmetro envolvidos pela pasta hidratada e os agregados mais finos funcionando como fíler.

Figura 40: Micrografia do concreto com 2,5% de PET.

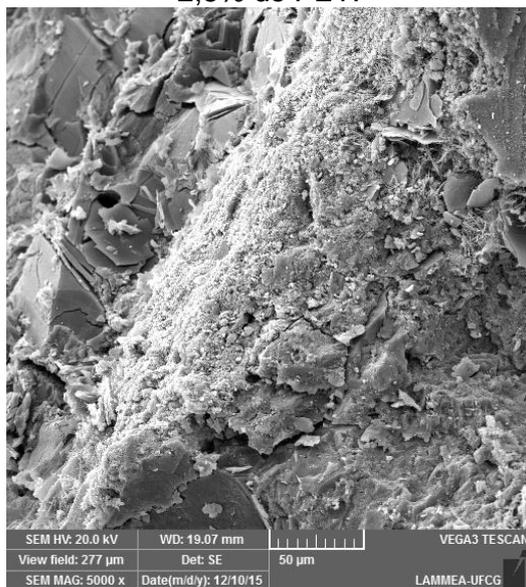


Figura 41: Micrografia do concreto com 5,0% de PET.

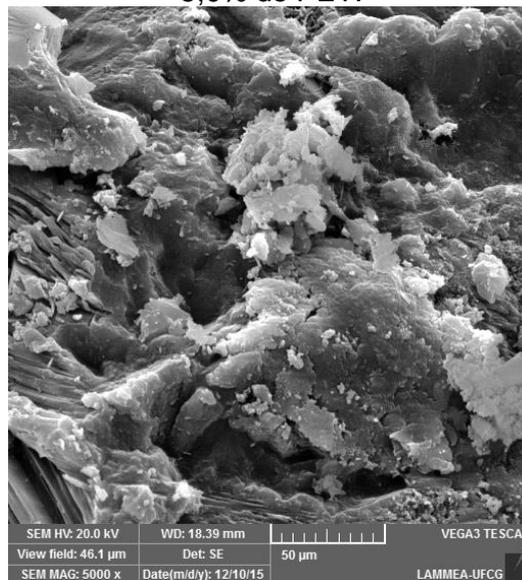


Figura 42: Micrografia do concreto com 7,5% de PET.

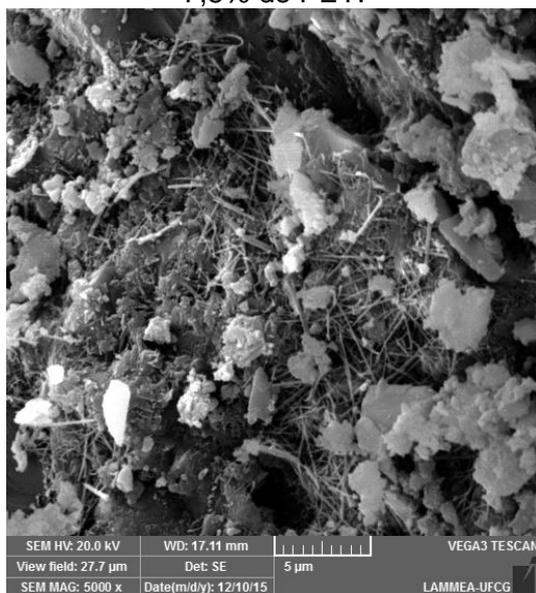
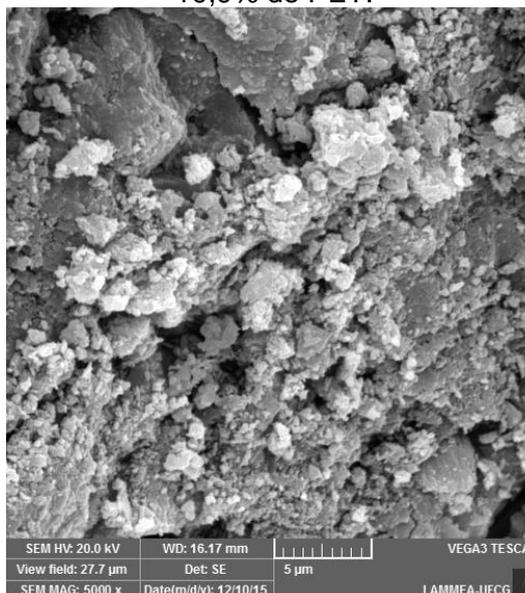


Figura 43: Micrografia do concreto com 10,0% de PET.



A micrografia ilustrada na Figura 40 apresenta uma matriz densa, com superfície rugosa com presença de poucos poros e pequeno volume de partículas dispersas.

A micrografia ilustrada na Figura 41 apresenta superfície heterogênea e irregular com presença de poros mais acentuados e partículas intrusas na matriz que não reagiram com o cimento.

A micrografia ilustrada na Figura 42 apresenta uma estrutura muito heterogênea e irregular com grande número de poros, presença de grãos que provavelmente não apresentaram boa aderência com a pasta de cimento, formação de cristais de etringita, cristais hexagonais típicos de monossulfato hidratado e, cristais aciculares e partículas inclusas na matriz que podem ser impurezas.

A micrografia ilustrada na Figura 43 apresenta uma estrutura totalmente heterogênea e irregular com grande número de poros e grãos de agregados e de PET que não apresentou boa aderência com a pasta de cimento funcionando com agente encapsulador, impedindo a completa hidratação do cimento.

Segundo Detomi (2012) componentes não hidratados no cimento têm altos coeficientes de retroespalhamento, por isso aparecem mais claros nas imagens. Os componentes hidratados têm coeficientes de retroespalhamento menores e aparecem mais acinzentados. E, por sua vez, os poros são representados pelas imagens mais escuras e/ou pretas. Os concretos produzidos com PET exibem mais regiões esbranquiçadas do que o concreto de referência, indicando a existência de produtos não hidratados. A performance final do concreto, principalmente nos aspectos de durabilidade e resistência mecânica, estão relacionados a essa microestrutura.

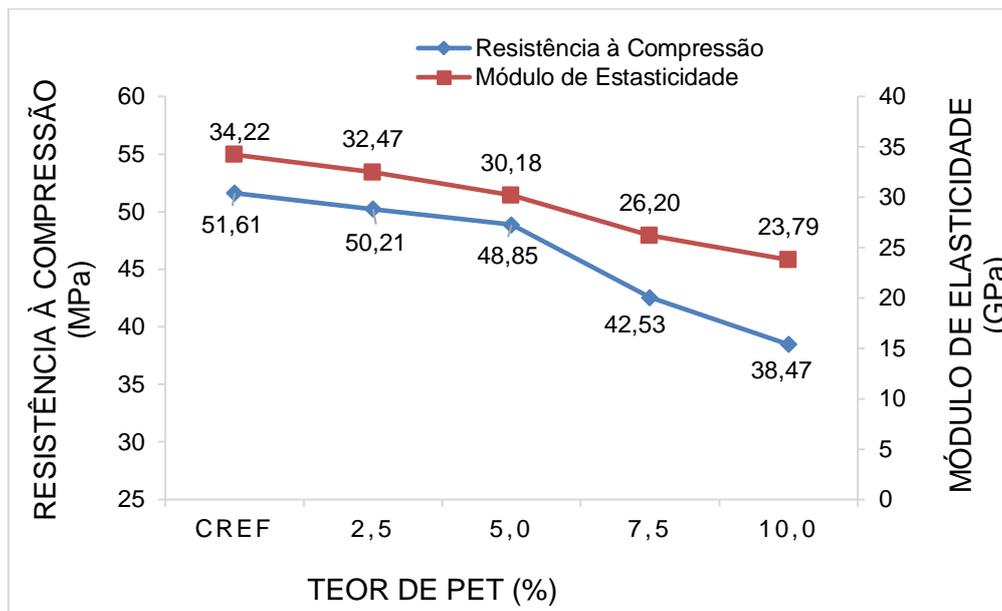
De acordo com Almeida (2012), nos estudos de microestrutura do concreto, a interface torna-se essencial por distinguir a aderência de natureza química concernente às ligações cristalinas entre a pasta e o agregado e a aderência mecânica devida à rugosidade superficial dos agregados, que procuram considerar tanto a natureza mineralógica dos materiais englobados,

como dos produtos de hidratação do cimento que se formam no contato de ambas, sem negligenciar a forma e o tipo da superfície dos grãos de agregados.

As micrografias dos concretos contendo PET mostram que a ligação entre a pasta de cimento e o agregado é resultado somente do entrelaçamento mecânico dos produtos de hidratação do cimento com o agregado, pois, não há reação química entre o PET e a pasta de cimento. Como a resistência da zona de transição é menor do que a resistência do agregado ou da pasta de cimento, a zona de transição se torna uma zona de fraqueza no desenvolvimento da resistência do concreto.

4.2.2 Módulo de elasticidade estático

A Figura 44 ilustra a tendência da resistência à compressão e módulo de elasticidade das peças intertravadas, Traço 1 com fator água/cimento igual a 0,45, para o concreto de referência (CREF) e para os concretos com os teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% de PET.

Figura 44: Resistência à compressão e do módulo de elasticidade.

É possível perceber uma relação direta de proporcionalidade entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão nos concretos analisados. O concreto de maior resistência (CREF) apresentou maior valor do módulo de elasticidade do que os concretos contendo PET. Este fenômeno ocorreu devido à maior porosidade dos concretos contendo PET.

As micrografias (Figuras 39, 40, 41, 42 e 43) exibiram as imagens de microscopia eletrônica das condições de referência (que correspondem aos concretos produzidos com partículas de quartzo) e concretos com partículas de PET. Nota-se que as partículas de quartzo exibem uma tonalidade de cinza mais escura que as partículas de PET, revelando a diferença da densidade destas partículas. O uso de partículas mais densas, como as partículas de quartzo, promoveu um aumento da resistência e da rigidez dos concretos em comparação às partículas poliméricas de resíduos de PET.

A dimensão, a forma, a textura superficial, a distribuição granulométrica e a composição mineralógica dos agregados influenciam a fissuração na zona de transição na interface, e assim, afeta o módulo de elasticidade. Agregados mais

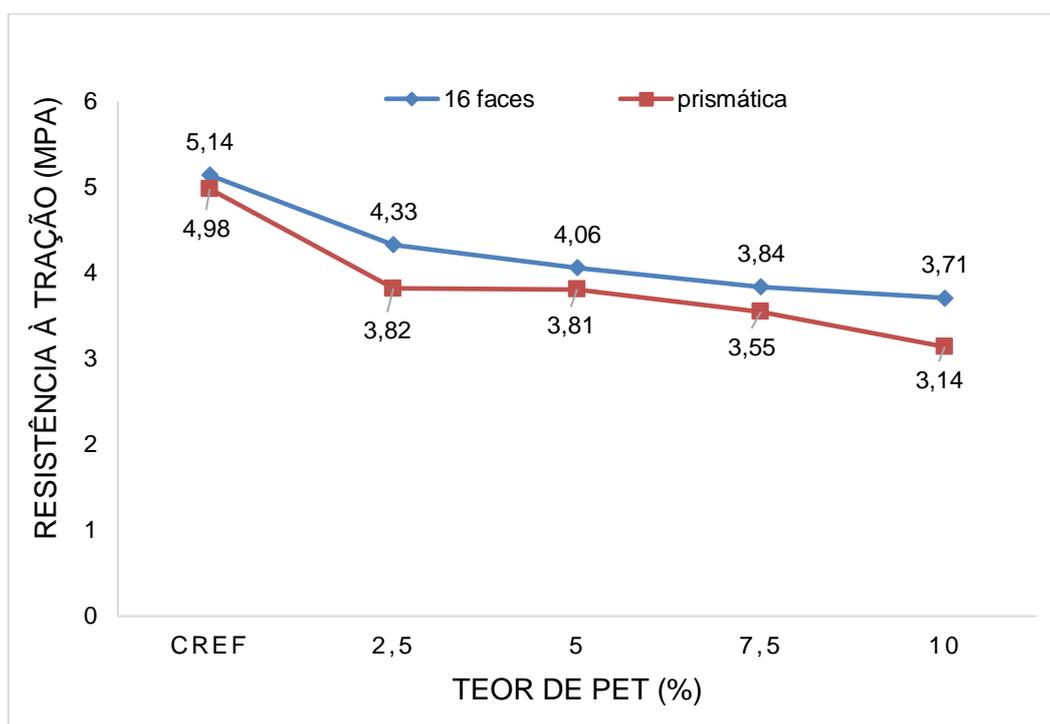
densos têm maiores valores de módulo de elasticidade, conseqüentemente, quanto menor a quantidade de agregados de quartzo e maior a quantidade de PET em cada composição, menor será o valor do módulo de elasticidade do concreto.

Nos estudos de Venu e Rao (2010) a capacidade de carga de concreto aumentou 4,62% nos concretos contendo 1% de fibra polipropileno de alta densidade (resíduo de corpos descartáveis) e, a capacidade de carga de concreto aumentou 9,11% nos concretos contendo 1% de fibra de PET (resíduo de garrafas de água mineral).

Taherkhani (2014) estudou os efeitos do uso de resíduos de PET em concreto. Foram utilizadas fibras de PET nos comprimentos de 1 cm, 2 cm e 3 cm, adicionando ao concreto nos teores de 0,5% e 1%, em volume da mistura total. As misturas que continham fibras mais curtas apresentaram menor módulo de elasticidade do que a mistura de controle. A utilização de fibras longas proporcionou a obtenção do melhoramento do módulo de elasticidade. As misturas reforçadas com fibra foram capazes de manter a sua integridade após a ruptura, o que indicou que elas absorviam mais energia.

4.2.3 Resistência à tração na flexão

A Figura 45 apresenta os resultados do ensaio de tração na flexão realizado para as peças de 16 faces e para as peças prismáticas, Traço 1 com fator água/cimento igual a 0,45, para o concreto de referência (CREF) e para os concretos com os teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% de PET.

Figura 45: Resistência à tração na flexão dos concretos.

Analisando os resultados ilustrados na Figura 45, percebe-se que a resistência à tração reduz com o aumento do teor de PET. Os fatores que influenciam a resistência à compressão, influenciam também a resistência à tração. Estes resultados foram registrados por diversos autores, contudo, contrariam os resultados obtidos por Sadeghifar e Sohrabi (2014), no qual a resistência à tração aumentou com o teor de PET.

Neville (2013) considera que, quando ocorre um aumento na resistência à compressão, também ocorre um aumento na resistência à tração, porém numa taxa menor. A relação entre a tração e resistência à compressão gira em torno de 7 a 11% (MEHTA & MONTEIRO, 2005). Para os concretos com 0,0%, 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% de PET avaliados neste trabalho, a relação entre resistência à tração e resistência à compressão variou de 8,31% a 9,95% para as peças de 16 faces e, variou de 7,61% a 9,64% para as peças prismáticas e, sendo o

concreto com 10,0% de PET com a maior relação, 9,64% para a peça de 16 faces e 8,16% para a peça prismática. A causa para a obtenção destes resultados pode ser entendida por meio da menor angulosidade do agregado miúdo natural, o que possibilita uma mobilidade relativa, afetando a microfissuração na interface entre a pasta hidratada e o agregado durante o ensaio. A mobilidade maior para o agregado miúdo natural se deve ao fato de serem mais arredondados, além de possuírem textura superficial mais lisa que os triturados.

A aderência entre o agregado e a pasta de cimento é uma propriedade significativa para a resistência do concreto, principalmente para a resistência à flexão. A aderência é devida ao intertravamento do agregado e a pasta de cimento hidratada, em virtude da aspereza da superfície das partículas de agregado (MEHTA & MONTEIRO, 2005). Normalmente, quando a aderência é satisfatória, um corpo de prova rompido deve ter algumas partículas de agregados rompidas, além de outras, mais numerosas, arrancadas de seus alojamentos na pasta (NEVILLE, 2013). Analisando-se a micrografia de um corpo de prova rompido que foi confeccionado com PET (Figura 46) observa-se esta situação, e pode-se deduzir que o PET apresenta boa aderência mecânica com a pasta de cimento, embora não haja interação química entre ambos.

Figura 46: Corpo de prova com 10,0% de PET.

Nos estudos de Ramadevi e Manju (2012), analogamente à resistência à compressão, a resistência à tração dos concretos aumentaram quando se utilizou os teores de 0,5%, 1% e 2% de PET em substituição ao agregado miúdo, entretanto, a resistência à tração diminuiu para os teores de 4% e 6%.

Os estudos de Vanu e Rao (2010) apontaram que a resistência à tração na flexão do concreto foi aumentada quando se usou 1% de polipropileno de alta densidade (resíduo de corpos descartáveis) e 2% de fibras de PET (resíduo de garrafas de água mineral).

Nos estudos de Taherkhani (2014) a resistência à flexão das misturas reforçadas com fibra aumentou com o aumento do comprimento da fibra, no entanto, ela diminuiu com o aumento do teor de fibras. A resistência à tração da mistura reforçada com fibra foi inferior à da mistura de controle. Para os menores teores de fibra, a resistência à flexão aumentou com o aumento do comprimento de fibra, enquanto que, a níveis mais elevados, diminuiu com o aumento do comprimento da fibra.

4.2.4 Desgaste por abrasão

A Tabela 16 apresenta os resultados do ensaio de desgaste por abrasão das peças intertravadas do Traço 1 com fator água/cimento igual a 0,45.

Tabela 16: Resultado do ensaio de desgaste por abrasão.

% de PET no concreto	Largura da cavidade (mm)
0,0	17,6
2,5	17,6
5,0	18,3
7,5	19,7
10,0	20,2

O desgaste por abrasão é uma variável de resposta do tipo “menor é melhor”, sendo expresso em mm. Quanto menor o desgaste, maior a resistência à abrasão da peça. Os resultados dos ensaios das cinco peças podem ser considerados satisfatórios. As peças com 0,0%, 2,5%, 5,0% e 7,5% de PET, de acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), podem ser usadas em situações com efeitos de abrasão acentuados, pois apresentaram resultados abaixo de 20 mm. A peça com 10,0% de PET também apresentou resultado satisfatório, pois está abaixo do valor máximo exigido pela NBR 9781 (ABNT, 2013) que é 23 mm, podendo ser usado no tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

Soroushian *et al.* (2013) observaram que a adição de plástico reciclado causou uma redução na resistência à abrasão do concreto. Os autores atribuíram este efeito ao fato de que as fibras próximas da superfície foram arrancadas sob efeitos de abrasão e a mudança nas características de desgaste

do concreto com a presença de fibras de plástico reciclado modificou as características da superfície do material.

Nos estudos de Taherkhani (2014) a resistência à abrasão das misturas contendo 0,5% de fibras de PET foi maior do que a da mistura de controle, e aumentou com o aumento do comprimento da fibra.

Mudiyono (2015) produziu peças de concreto para pavimento intertravado com consumo de cimento variando entre 270 Kg/m³ a 550 Kg/m³ para ensaio de abrasão. As medidas das cavidades produzidas nas peças foram semelhantes, indicando que o nível de desgaste não é uma função apenas do consumo de cimento.

4.2.5 Suscetibilidade ao ataque por sulfatos

Todos os concretos do Traço 1 com fator água/cimento igual a 0,45, com ou sem PET, se comportaram de forma análoga durante o ensaio de ataque por sulfatos. Houve um incremento médio de massa numericamente semelhante em todos os teores analisados. Os ganhos médios de massa foram de 1,17%, 1,00%, 0,78% e 0,73%. Verifica-se com isso que, com o passar do tempo, há um menor ganho de massa pois os poros vão sendo gradualmente preenchidos.

Segundo Veiga (2011) a degradação do concreto em consequência de reações químicas entre o concreto de cimento Portland e íons de sulfato de uma fonte externa pode se manifestar de duas formas distintas; pela expansão do concreto ou pela perda progressiva de resistência e perda de massa. Nesta pesquisa, não houve perda de massa, ao contrário, todos os corpos de prova imersos na solução de sulfato de sódio apresentaram um ganho de massa semanal. Isso deveu-se ao fato do sulfato, por ser um sal, ir, progressivamente, se incrustando nos poros do concreto.

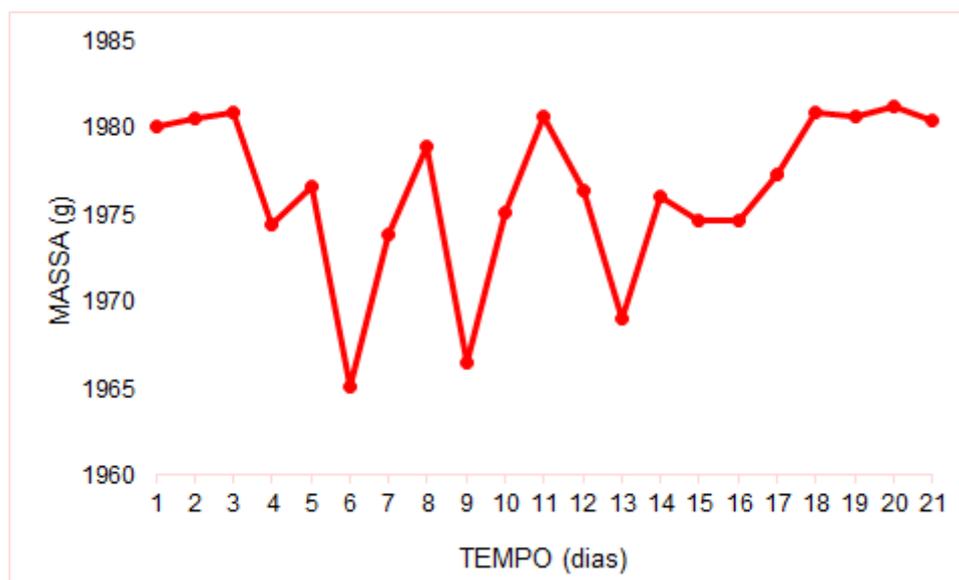
Os resultados deste ensaio também indicaram que os concretos produzidos com cimento resistente a sulfatos (CP V ARI – RS) não sofreram alteração desta característica pela presença do PET.

4.2.6 Suscetibilidade à ação da chuva e do sol

4.2.6.1 Erosão

A taxa de erosão foi medida pela variação de massa. A Figura 47 ilustra as variações médias sofridas pelas peças do Traço 1, com fator água/cimento de 0,45 e com teor de 7,5% de PET (peça de número 10, constante na Tabela 11), durante os vinte dias do ensaio.

Figura 47: Variação da massa durante o ensaio de erosão.



As peças utilizadas neste ensaio apresentaram uma variação de massa quando submetidas à ação do calor e da chuva, diferentemente do comportamento observado para o concreto convencional, no qual ocorre uma perda de massa gradual.

Estudos feitos por Rezende (2013) em placas de concreto com metacaulim, submetidos à ação da chuva e do calor, nas mesmas condições realizadas nesta pesquisa, apresentaram menor suscetibilidade à erosão causada pelos respingos de água dos aspersores do que as placas de referência, sem metacaulim, enquanto que a elevação do teor de substituição acarretou em aumento dos valores de perda de massa. As taxas de erosão, avaliadas pela perda de massa, tendiam a diminuir com o aumento do tempo de exposição.

Nesta pesquisa, as perdas de massa ocorreram pelo desgaste sofrido a cada ciclo. Os ganhos de massa ocorreram, possivelmente, devido aos sais presentes na água preencherem os poros do concreto.

4.2.6.2 Resistência à compressão após o ensaio de suscetibilidade à ação da chuva e do calor com peças as do Traço 1, com fator água/cimento igual a 0,45 e com teor de 7,5% de PET (peça de número 10, constante na Tabela 11)

As peças do Traço 1, com fator água/cimento igual a 0,45, com teor de 7,5% de PET, apresentavam inicialmente uma resistência característica à compressão igual a 42,53 MPa. Após as peças serem submetidas aos vinte ciclos de chuva e calor, as peças apresentaram uma resistência média de 36,29 MPa, o que corresponde a uma redução da ordem de 14,67%. No entanto, o valor desta resistência ainda satisfaz aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013), para ser usado em vias de tráfegos de veículos leves, que é 35 MPa.

4.2.6.3 Análise química da água lixiviada

A Tabela 17 apresenta os resultados da análise química da água lixiviada das peças do Traço 1, com fator água/cimento igual a 0,45, com teor de 7,5% de PET (peça de número 10, constante na Tabela 11), antes e após os ciclos de chuva e calor.

Tabela 17: Análise química da água lixiviada.

Parâmetros	Antes	Depois
pH	7,92	7,91
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	377	364
Cálcio (meq L^{-1})	2,52	2,66
Magnésio (meq L^{-1})	0,44	1,65
Sódio (meq L^{-1})	0,61	0,75
Potássio (meq L^{-1})	0,26	0,35
Carbonatos (meq L^{-1})	0,70	1,20
Bicarbonatos (meq L^{-1})	1,86	2,51
Cloretos (meq L^{-1})	1,45	1,15
Sulfatos (meq L^{-1})	Ausência	Ausência
Relação de Adsorção de Sódio (RAS)	0,50	0,51
Classe da Água	C ₂	C ₂

Com relação à salinidade para fins de irrigação, a água pode ser classificada no grupo de baixa (C1), média (C2) ou alta (C3) salinidade. A análise química da água lixiviada mostrou que, apesar de ter havido um aumento na concentração de alguns sais, a água manteve-se no grupo de média salinidade (C2), podendo ser usada na maioria das culturas e na maioria dos solos, ou seja,

a água lixiviada não apresenta riscos de contaminação para as plantas nem para o solo.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 17, os resíduos gerados pelas peças de concreto, após a ação do calor e da chuva, não apresentaram característica de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxividade ou patogenicidade, o que permitiu classificá-los, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), como resíduos classe II B – não perigosos e inerte.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, que teve por objetivo verificar o comportamento de peças de concreto para pavimento intertravado produzidas com a substituição do agregado miúdo por PET. Ao final do capítulo, apresenta-se ainda sugestões para futuras pesquisas.

5.1 CONCLUSÕES

As características pretendidas para concretos destinados à produção de peças para pavimento intertravado foram identificadas: absorção de água, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, avaliação microestrutural, avaliada pela resistência à abrasão, suscetibilidade ao ataque por sulfatos e suscetibilidade à ação do sol e da chuva. A partir dos resultados obtidos, pôde-se concluir que:

- As peças com adição de PET apresentaram, em sua maioria, índices de absorção de água abaixo do limite máximo estipulado pela norma brasileira 9781 (ABNT, 2013), que é igual a 7%. As peças que ultrapassaram esse valor tiveram absorção menor do que 10%, limite máximo prescrito na NBR 12118 (ABNT, 2013), que se refere a blocos de concreto vazados para alvenaria simples.
- A resistência à compressão das peças com incorporação de PET apresentou valores inferiores aos obtidos para o concreto de referência. Porém, todas as peças do Traço 1 atingiram valores maiores do que 35 MPa, que é o mínimo prescrito pela NBR 9781 (ABNT, 2013) para solicitações leves, podendo ser utilizadas até o teor de 10,0% de PET. Os Traços 2 e 3 também são recomendáveis desde que sejam observados o fator água/cimento e os teores de PET;

- O fator água/cimento igual a 0,45 mostrou-se o mais recomendável para confecção das peças de concreto. Recomenda-se também o teor de, no máximo, 2,5% de PET;
- Os valores obtidos nos ensaios de resistência à tração na flexão obtidos neste estudo foram semelhantes aos publicados por outros autores, que estima ser em torno de 10% da resistência à compressão. Este fato foi verificado tanto para o concreto de referência quanto para os concretos produzidos com PET.
- Os ensaios de desgaste por abrasão indicaram que os traços contendo PET suportam efeitos de abrasão acentuados, por isso, são indicados para áreas onde a circulação é intensa, como: pátios de carga; indústrias petroquímicas; indústrias metalúrgicas, especialmente nas áreas produtivas como os setores de usinagem, tratamento térmico, estamparia, forjaria e fundição; indústrias frigoríficas e alimentícias, onde a higiene é fundamental; entre outras.
- Os ensaios de suscetibilidade à ação do calor e da chuva, bem como os ensaios de suscetibilidade ao ataque por sulfatos, demonstraram que os concretos podem suportar ambientes agressivos.
- A análise química da água lixiviada comprovou que as peças contendo PET não apresentam risco de contaminação para o solo, logo é um material ambientalmente adequado.
- O resíduo de PET foi testado nesta pesquisa em busca da redução do consumo de matérias primas. Os resultados apontam um êxito parcial. Em geral, há uma perda na resistência, por outro lado, o benefício acumulado pela eliminação segura destes resíduos (que de outra forma teria ido para aterros sanitários ou lixões a céu aberto causando danos ao meio ambiente) não pode ser desconsiderado.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com base no desenvolvimento deste trabalho, sugere-se, como recomendações para pesquisas futuras:

- Estudar o efeito de aditivos plastificantes nos concretos com substituição do agregado natural por PET;
- Estudar o efeito de diferentes tipos de cura nas propriedades mecânicas, microestruturais e da durabilidade dos pisos intertravados;
- Realizar um estudo econômico relacionado ao PET, avaliando os custos com implantação de programas de reciclagem de garrafas PET, a produção do PET e a fabricação dos pisos intertravados contendo PET.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001) NBR 30. **Agregado miúdo – Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2006) NBR 45. **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003) NBR 46. **Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001) NBR 49. **Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001) NBR 51. **Agregado graúdo – Ensaio de abrasão "Los Angeles"**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009) NBR 52. **Agregados miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009) NBR 53. **Agregados graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003) NBR 248. **Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014) NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009) NBR 7211. **Agregado para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010) NBR 7218. **Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.** Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2008) NBR NM 8522. **Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013) NBR 9781. **Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004) NBR 10004. **Resíduos sólidos – classificação.** Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1990) NBR 11513. **Materiais granulares usados em fundição - Determinação da massa específica pelo uso do frasco volumétrico de “Le Chatelier”**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012) NBR 11579. **Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2011) NBR 11768. **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014) NBR 12118. **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010) NBR 12142. **Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014) NBR 13583. **Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009) NBR 15900. **Água para amassamento de concreto**. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2011) NBR 15953. **Pavimento Intertravado com peças de concreto – Execução**. Rio de Janeiro: ABNT.

AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DA ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. Campina Grande, PB. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento>>. Acesso em 02/12/2014.

ABIPET – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. São Paulo, SP. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br>>. Acesso em 27/02/2014.

AHMED, Mokaddes Ali. SINGHI Binod. **Overview on structural behaviour of concrete block pavement**. In: International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 4. Jul-2013.

AKCAOZOGLU, Semiha. **An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete**. In: Waste Management. Volume 30. Pág. 285–290. Fev-2010.

ALAVI, Nia A. HEDAYANTIAN, M. NILI, M. SABET, V. A. **An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fibre-reinforced concrete**. In: International Journal of Impact Engineering. Pág. 62-73. 2012.

ALMEIDA, Sílvio Martins de. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. Dissertação (mestrado). UFMG. 2012.

AMORIM, Enio Fernandes. **Viabilidade técnica econômica de misturas de solo-rcd em camadas de base de pavimentos urbanos. Estudo de caso: município de Campo Verde – MT.** Tese (doutorado). Universidade de Brasília. 2013.

AQUINO, José Lourenço Santos. **Desenvolvimento de compósitos de matriz cimentícia utilizando resíduos de politereftalato de etileno (PET) e de areia de britagem na produção de concretos.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

ASTM - American Society for Testing and Materials. C936/C936M. **Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units.** (2015)

BANNACH, Gilbert. PERPÉTUO, Glauco Lini. CAVALHEIRO, Éder Tadeu Gomes. CAVALHEIRO, Carla Cristina Schmitt. ROCHA, Rafael Rodrigo. **Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero PET: um experimento para ensino de análise térmica.** In International Year Chemistry. São Paulo, SP. 2011.

BAUER, L.A Falcao. **Materiais de construção.** Vol. 1. 5ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC. 1995.

BIDONE, Francisco Ricardo Andrade. **Disposição continental de sedimentos de dragagem em solos tropicais: avaliação do risco ecológico de metais baseada em bioensaios com organismos aquáticos e edáficos.** In: Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. Abr/Jun-2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – **Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Brasília, DF. 2010.

CARVALHO, Willian Cle. GOMES, Ricardo Adriano Martoni Pereira. **A aplicação de fibras de garrafa PET como agregado estrutural do concreto**. In: Revista Polímeros. 2015.

CEB – COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Diagnosis and Assessment of Concrete Structures – State of the Art Report**. Bulletin d'Information Nº 192. Janvier, 1998.

CHAGAS FILHO, M. B. **Estudo de agregados lateríticos para utilização em concretos estruturais**. Tese (doutorado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2013.

CÓRDOBA, Lilliana Ávila. BARRERA, Gonzalo Martínez. DÍAZ, Carlos Barrera. NUÑEZ, Fernando Ureña. YAÑEZ, Alejandro Loza. **Effects on mechanical properties of recycled PET in cement-based composites**. In: International Journal of Polymer Science. 2013.

DORA, Foti. **Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers**. In: Construction and building materials. Vol 25. Pág. 1906-1915. 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. Brasília, DF. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/pesquisa>>. Acesso em 07/08/2014.

DETOMI, Anine Cristina Santos. **Investigação do efeito da incorporação de resíduos de PET em compósitos cimentícios**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de São João del-Rei. São João del-Rei, MG, 2012.

FADHIL, Sarmed. YASEEN, Mohanad. **The production of economical precast concrete panels reinforced by waste plastic fibers**. In: American Journal of Civil Engineering and Architecture, 2015, Vol. 3, No. 3, 80-85.

FERNANDES, Idário Domingues. **Blocos & pavers – produção e controle de qualidade**. Ed. Treino Assessoria. Ribeirão Preto, SP. 2008.

FIGUEIREDO, Aneliése. ALVES, Ana Paula M. FERNANDES JUNIOR, Valter José. ARAUJO, Antonio S. **Reciclagem terciária do poli (etileno tereftalato) visando a obtenção de produtos químicos e combustível: uma revisão**. Revista Virtual Química. Jan-2015.

FIORITI, Cesar Fabiano. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativos**. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2007.

FOTI, D. **Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers**. In: Construction and Building Materials. Pág. 1906-1915. 2012.

FREIRE, MT. de A. REYES, F.G.R. **A importância do polietileno tereftalato (PET) na indústria de embalagens para alimentos**. Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de alimentos. 2009.

GODINHO, Dalter Pacheco. **Pavimento intertravado: uma reflexão sob a ótica da durabilidade e sustentabilidade**. Dissertação (mestrado). UFMG. Belo Horizonte, MG. 2009.

GORNI, Antonio Augusto. **Introdução aos plásticos**. Revista Eletrônica Plástico Industrial. 2013.

GUENDOUZ, M. DEBIEB, F. BOUKENDAKDJI, O. KADRI, E. H. BENTCHIKOU, M. SOUALHI, H. **Use of plastic waste in sand concrete**. In: Journal Materials. Environmental. Sci. 7 (2) (2016) 382-389. ISSN: 2028-2508.

HELENE, Paulo. ANDRADE, Tibério. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. In: Revista IBRACON. 2010.

INFRAESTRUTURA URBANA. São Paulo, SP. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br>>. Acesso em 27/02/2014.

IRWAN J.M, N. OTHMAN, H.B. KOH, R.M. ASYRAF, Faisal S.K, & M.M.K. Annas. **The mechanical properties of PET fiber reinforced concrete from recycled bottle wastes**. In: Advanced Materials Research. Vol. 795. Pág. 347-351. 2013.

IZQUIERDO, Indara Soto. **Utilização de pós residuais e fibras de sisal em blocos de concreto**. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2015.

JACINTHO, A. E. P. G. De Avila. PIMENTEL, L. L. BARBOSA M. P. FONTANINI P. S. P. **Aderência aço e concreto: uma contribuição ao estudo do método APULOT usando concreto com borracha.** In: Revista IBRACON. Vol.7. São Paulo, SP. Set/Out-2014

KUMAR, M. L. Anoop. **Experimental investigations on the flexural strength of PET reinforced concrete.** In: International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. Vol. 4. Fev-2014.

LINTZ, Rosa Cristina Cecche. BARBOSA, Luísa Andréia Gachet. SEYDELL, Maria Rachel Russo. JACINTHO, Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila. **Avaliação do comportamento de concreto contendo borracha de pneus inservíveis para utilização em pisos intertravados.** In: Revista IBRACON. 2012.

MAGALHÃES, Margareth da Silva. FERNANDES, Matheus Soares Viana. **Bending behaviour of recycled PET fiber reinforced cement based composite.** In: IACSIT International Journal of Engineering and Technology. Vol. 7. Ago-2015.

MARTINS, Geruza Beatriz Henriques. **Práticas limpas aplicadas às indústrias têxteis de Santa Catarina.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2012.

MELO, Ricardo de Almeida *et al.* **Estudo de viabilidade do uso de resíduo PET em obra Rodoviária.** In: Ambiente Construído. 2015.

MENESES, Ilzenete. **A Avaliação de concreto com adição de fibras de PET submetido a altas temperaturas.** Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials.** Third edition. United States of America, 2005.

MODRO, N.L.R.; OLIVEIRA, A.P.N. **Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET.** In: Revista Matéria. Vol. 14. Pág. 725 – 736. 2009.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B.; BASTOS, A. J. O. **Avaliação do uso de resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais.** In: Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 7-24, jan./mar. 2013.

MUDIYONO, Rachmat. **The effect of paver joint width on the construction of concrete block pavement on sloping road section.** In: Journal UNISSULA. Indonésia. Nov-2015.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** (Tradução: Salvador Giammusso). 2ª. edição. São Paulo: PINI, 2013.

NIBUDEY, R. N. NAGARNAIK, P. B. PARBAT, D. K. **A model for compressive strength of PET fiber reinforced concrete.** In: American Journal of Engineering Research. Vol. 2. Pág.367-372. 2013.

PEREIRA, Fernanda Macedo. VERNEY, José Carlos Krause de. LENZ, Denise Maria. **Avaliação do emprego de carepa de aço como agregado miúdo em concreto.** In: Revista Metalurgia e Materiais. 2011.

PRASAD, D. S. V.; Raju, G. V. R. P.; Kumar, M. A. **Utilization of industrial waste in flexible pavement construction.** Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol 14. 2009.

PRASAD, Shiv Govind. DE, Udavam. DE Abhijit. **Structural and optical investigations of radiation damage in transparent PET polymer films.** In: International Journal of Spectroscopy. Vol 2. 2011.

RAMADEVI K. MANJU, R. **Experimental investigation on the properties of concrete with plastic PET (bottle) fibre as fine aggregates.** In: International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. Pág 42-46. 2012.

RAHMANI, E. DEHESTANI, M. BEYGI, M.H.A. ALLAHYARHI, H. NIKBIN, I.M.. **On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles.** In: Construction and Building Materials. Pág. 1302-1308. 2013.

REDDY, Aditya Krishna. KUMAR, Arun. **Study of Mechanical Properties of Concrete using Waste PET Bottle Fibres for the Reinforcement.** In: International Journal of Engineering and Management Research. Volume-4, Issue-2, April-2014, ISSN No.: 2250-0758.

REZENDE, Maria Luiza De Souza. **Resíduo de caulim primário como material pozolânico em concreto seco: propriedades físico-mecânicas e durabilidade.** Tese (doutorado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2013.

SADEGHIFAR, Adel. SOHRABI, Mohammad Reza. **Investigating the properties of mechanical concrete containing waste plastic bottles replaced instead rock material.** In: Interdisciplinary Journal of Contemporary Research In Business. Vol 5. Fev-2014.

SAIKIA, Nabajyoti. BRITO, Jorge de. **Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete.** In: Materials Research. Vol.16. 2013.

SANTOS, Oswaldo Cruz. **Formulação de blocos intertravados cerâmicos com adição de resíduos Urbanos e Industriais.** Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Jul-2013.

SILVA, Fabiana Alves da. ALMEIDA, Luiz Paulo Argao. **Estudo da viabilidade técnica do uso de concreto celular adicionado de PET triturado na fabricação de residências e seu impacto ecológico.** In: XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. São Carlos, SP. 2010.

SILVA, José de Arimatéia Almeida e. **Utilização do politereftalato de etileno (PET) em misturas asfálticas.** Tese (doutorado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2015.

SILVESTRE, T. **Brasil descarta 53% de garrafas PET na natureza.** In: Revista Meio Ambiente. Ed. 103. Mai/Jun-2013.

SOROUSHIAN, P.; PLASENCIA, J.; RAVANBAKHS, S. **Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete.** In: ACI Materials Journal. v. 100, p. 203-207, 2013.

SOUZA, Leonardo S. Paula. **Utilização de resíduos de EVA como agregado graúdo em concretos**. In: Revista IBRACON. Set-2011.

SRIVASTAVA, Vikas. GAUTAM, S. P. AGARWAL, V. C. MEHTA, P. K. **Glass Wastes as Coarse Aggregate in Concrete**. In: Journal Environmental Nanotechnology. Volume 3, No.1 pp. 67-71. 2014.

TAPKIRE, Ganesh, PARIHAR, Satish. PATIL, Pramod. KUMAVAT, Hemraj R. **Recycled plastic used in concrete paver block**. In: International Journal of Research in Engineering and Technology. Vol 3. Jun-2014.

TAHERKHANI, Hasan. **An investigation on the properties of the concrete containing waste PET fibers**. In: International Journal of Science and Engineering Investigations. Vol. 3. Abr-2014.

VANU, Malagavelli. RAO, P. N. **Effect of non-degradable waste in concrete slabs**. In: International Journal of Civil and Structural Engineering, vol. 1, no. 3, pp. 449-457, 2010.

WELLEN, R. M. R. RABELO, Marcelo S. **Polímeros**. In: Revista Eletrônica de Materiais e Processos. 2008.

VEIGA, Karina Kozoroski. **Desempenho do cimento portland branco com escória de alto-forno e ativador químico frente ao ataque por sulfato de sódio**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2011.