



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



**JOSÉ LOURENÇO SANTOS AQUINO**

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA UTILIZANDO  
RESÍDUOS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET) E DE AREIA DE  
BRITAGEM NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS**

Campina Grande - PB  
2013

**JOSÉ LOURENÇO SANTOS AQUINO**

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA UTILIZANDO  
RESÍDUOS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET) E DE AREIA DE  
BRITAGEM NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS**

Tese de Doutorado em Engenharia de Processos ao Curso apresentada a Universidade Federal de Campina Grande, como exigência para obtenção do grau de Doutor.

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos.

Linha de pesquisa: Desenvolvimento e Tecnologia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Crislene Rodrigues da Silva Morais

Campina Grande - PB

2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A657d 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 / José Lourenço Santos Aquino. – Campina Grande, 2013.  
133 f. : il. Color.

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

"Orientação: Profª. Drª. Crislene Rodrigues da Silva Morais".  
Referências.

1. Areia de Britagem. 2. PET. 3. Concreto. 4. Propriedades Mecânicas.  
5. Aplicações do Compósito. I. Morais, Crislene Rodrigues da Silva.  
II. Título.

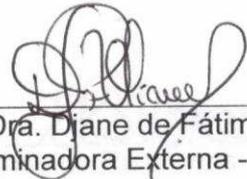
CDU 678.7(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE JOSÉ LOURENÇO SANTOS AQUINO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado **aprovada** em 17 de dezembro de 2013.

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Crislene Rodrigues da Silva Moraes  
(Orientadora - UFCG)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira  
(Examinador Externo - UFCG)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Djane de Fátima Oliveira  
(Examinadora Externa - UEPB)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Divanira Ferreira Maia  
(Examinadora Externa - IFPB)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Maria do Socorro Lopes Cavalcanti  
(Examinadora Externa - UFPB)

Campina Grande, dezembro de 2013.  
PB, Brasil

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por José Lourenço Santos Aquino e aprovada pela banca em 17 de dezembro de 2013.



---

Profa. Dra. Crislene Rodrigues da Silva Moraes  
UFCG/CCT/UAEMA

Aos meus pais José Brasil de Aquino e a  
Maria Zélia Santos Aquino, in memoriam.  
**DEDICO**

O único lugar em que o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário, por força da ordem alfabética!

Albert Einstein

# DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA UTILIZANDO RESÍDUOS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET) E DA AREIA DE BRITAGEM NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

## RESUMO

Uma alternativa para diminuir o déficit habitacional seria utilizar alguns resíduos domésticos acumulados em lixões, beneficiá-los e empregá-los em habitações populares. Desta forma, a política habitacional estaria atrelada a uma política ambiental. A prática da sustentabilidade na construção civil ocupa um lugar de destaque devido à constante preocupação com a preservação do meio ambiente. Considerando os impactos ambientais provocados pela geração de resíduos, propõe-se o uso de resíduos de garrafas de Politereftalato de etileno (PET) e areia de britagem em substituição parcial à areia convencionalmente usada em concretos. Este trabalho teve como objetivo formular diversas composições de compósitos com traços 1:3 e 1:4, com fatores água/cimento padrão e teores de substituição com 5, 10, 15 e 20% de resíduos de PET. As matérias-primas foram caracterizadas utilizando-se ensaios de: análise química (AQ), espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDX), espectrometria vibracional de absorção no infravermelho (FT-IR) e termogravimetria (TG). Os traços foram submetidos a ensaios de abatimento e mesa de Graff. No estudo do fator água/cimento, os corpos de prova foram moldados com cura úmida em 7 (sete) dias. Os corpos de prova do compósito com areia de britagem foram moldados e submetidos à cura úmida com duração de 7 (sete), 28 (vinte e oito) e 91 (noventa e um) dias, e posteriormente submetidos a ensaio de resistência à compressão simples, conforme normatização vigente no país. Os compósitos endurecidos em areia de britagem foram realizados ensaios de: absorção, índice de vazios, massa específica. Quanto à aplicação dos concretos, os traços 1:3 e 1:4, podem ser utilizados em pavimentos de elementos de fundações e elementos pré-moldados ou pré-fabricados (S50). O traço 1:3, os concretos podem ser utilizados em elementos estruturais correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, pisos, com lançamento convencional do concreto (S100); e o traço 1:4 os concretos podem ser utilizados em extrusão, vibro prensado ou centrifugado (S10) e em estruturas correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, pisos, paredes diafragma, com concreto lançado por bombeamento, estacas escavadas lançadas utilizando caçambas (S160). Por fim, os compósitos de matriz cimentícia, formado por brita 0, areia de britagem e PET. Os compósitos atendem às exigências estabelecidas pela Norma quanto às aplicações estruturais do grupo I para classe C25 e C20.

**Palavras chave:** areia de britagem, PET, concreto, propriedades mecânicas, aplicações do compósito.

# DEVELOPMENT OF CEMENT MATRIX COMPOSITES USING POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) WASTES AND CRUSHING SAND IN THE PRODUCTION OF CONSTRUCTION MATERIALS

## ABSTRACT

An alternative for decreasing the housing deficit would be the use of some household wastes accumulated in dumps by beneficiating and employing them in popular housing. Thus, housing policy would be linked to an environmental policy. The practice of sustainability in building occupies a prominent place due to the constant concern with the environmental preservation. Considering the environmental impacts caused by waste generation, we propose the use of polyethylene terephthalate (PET) bottle wastes and crushed sand in partial replacement of the conventional sand used in concretes. The aim of this work was to formulate various composites compositions containing 1:3 and 1:4 traits with standard water/cement ratios and 5, 10, 15 and 20% of PET waste. The raw materials were characterized by Chemical analysis (AQ), Energy dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) and Thermogravimetry (TG). The traits were subjected to slump and Graf flow table tests. In the study of the water / cement ratio, the specimens were molded with moist cure in seven (7) days. The composite specimens containing crushed sand were molded and subjected to moist curing for a period of 7 (seven), 28 (twenty-eight) and 91 (ninety-one) days, and subsequently subjected to a simple compressive strength test according to the standards prevailing in the country. For the crushing sand hardened composite, water absorption, voids index and specific weight tests were carried out. As for the concrete application, 1:3 and 1:4 traits can be used in flooring of foundation elements and pre-molded or pre-fabricated elements (S50). The 1:3 ratio, the concrete can be used in current structural elements such as slabs, beams, columns , rods , floors with conventional concrete casting (S100), and the 1:4 trace, concrete can be used in extrusion, vibro-pressed or centrifuged (S10) and in current structures such as slabs, beams, columns, rods, flooring, diaphragm walls , with concrete poured by pumping , bored cast-in-place piles (S160). Finally, the cement matrix composites formed by gravel, crushed sand and PET. The composites meet the requirements established by the standard on structural applications of Group I for C25 and C20 classes.

**Keywords:** crushed sand, PET, concrete, mechanical properties, composite application.

## PUBLICAÇÕES SOBRE O TEMA DA TESE

AQUINO, J. L. S.; MORAIS, C. R. S. **Evaluation of the physic-mechanical properties of concretes containing pet and crushed sand.** Journal. Materials Science Forum. Ref. 217-243, Título aprovado e aguardando publicação.

AQUINO, J. L. S.; MORAIS, C. R. S.; **Avaliação das propriedades físico-mecânicas de concretos com pet e areia de britagem.** In: 20º CBECIMAT Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Joinville - SC, 2012. p. 5650-5656.

PEREIRA, V. S.; MORAIS, C. R. S.; AQUINO, J.L.S.; RODRIGUES, P.A.; FILHO, F. F. D. **Composites of cement matrix containing residue of pet bottles and stone dust replacing the conventional materials - physical chemistry and mechanics evaluations.** Materials Science Forum JCR, v. 727, p. 587-591, 2012.

PEREIRA, V.S.; MORAIS, C. R. S.; RODRIGUES, P. A.; AQUINO, J. L. S. **Desenvolvimento de compósitos de matriz cimentícia utilizando resíduos de pet e pó de pedra na produção de materiais de construção.** In: 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2011, Porto de Galinhas. 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Porto de Galinhas - PE, 2011. v. 1. p. 2845-2855.

PEREIRA, V.S.; MORAIS, C.R.S.; AQUINO, J.L.S.; RODRIGUES, P.A.; FILHO, F. F. D. **Composites of cement matrix containing residue of pet bottles and stone dust replacing the conventional materials physical chemistry and mechanics evaluations.** In: PTECH 2011 - Eighth International Latin American Conference on Powder Technology, 2011, Florianopolis - SC. Anais do PTECH 2011 - Eighth International Latin American Conference on Powder Technology, 2011.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fórmula estrutural do PET .....	30
Figura 2.2 Reação entre o polímero com grupo carboxílico com cimento Portland e agregados .....	32
Figura 2.3 - Modelo simplificado do processo de formação de filme polimérico no cimento hidratado .....	32
Figura 2.4 - Demanda Europeia de plástico por segmento em 2010 .....	34
Figura 2.5 - Ciclo das rochas.....	40
Figura 2.6 - Fluxograma do método de dosagem ABCP .....	51
Figura 2.7 - Critérios para avaliação da absorção de água por concretos .....	54
Figura 3.1 - Secagem - (a) areia de britagem, (b) brita 0 e (c) estocagem.....	59
Figura 3.2 - Fluxograma do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa .....	60
Figura 3.3 - Massa unitária no estado solto da areia de britagem.....	63
Figura 3.4 - Massa unitária no estado compactado da areia de britagem. Enchimento e adensamento, (a) 1/3 do recipiente, (b) 2/3 do recipiente e (c) 2/3 do recipiente. ....	64
Figura 3.5 - Molde utilizado na massa unitária da mistura .....	65
Figura 3.6 - Máquina <i>Los Angeles</i> .....	66
Figura 3.7 – (a) Carga abrasiva e oito bolas, (b) Peneiramento após quinhentas (500) rotações e (d) lavagem do material.....	67
Figura 3.8 - Espectrofotômetro PerkinElmer, modelo Spectrum 400 .....	68
Figura 3.9 – Equipamento TG / DTG-60H.....	69
Figura 3.10 – Equipamento EDX 720.....	70
Figura 3.11 - Traços em cura, moldes 5 x 10 cm, porcentuais de PET e fatores a/c separados em bandejas individuais.....	73
Figura 3.12 – (a) Balança, massa de areia de britagem e (b) Sacos contendo material do traço 1:3 padrão e com substituição com 5, 10 e 15% de PET, do fator a/c 0,58. ....	74
Figura 3.13 - Acondicionamento em prateleira de corpos de prova moldados com moldes 10 x 20 cm usados para obtenção de compósitos, a) parte intermediária da prateleira e b) parte superior da prateleira.....	75
Figura 3.14 - Disposição das caixas de cura no Laboratório de Resíduos.....	75
Figura 3.15 - a) Tronco de Cone, b) Mesa de Graff e acessórios .....	76
Figura 3.16 - Banho Maria.....	77
Figura 3.17 - Corpos de prova, com 5 cm de diâmetro x 10 cm de altura.....	77
Figura 3.18 - Prensas utilizadas: a) hidráulica e b) eletrônica .....	78
Figura 4.1- Distribuição granulometria do Politereftalato de Etileno (PET) .....	80
Figura 4.2 - Distribuição granulometria da areia de britagem.....	81
Figura 4.3 - Distribuição granulometria da areia normal.....	82
Figura 4.4 - Distribuição granulometria da brita 0.....	83
Figura 4.5 - Difratograma da areia de britagem.....	86
Figura 4.6 - Difratograma de Raios-X do cimento CP II F-32.....	87
Figura 4.7 - Espectrometria vibracional de absorção no infravermelho (FT-IR) do PET .....	88

Figura 4.8 - Curvas TG/DTG do PET, obtida na razão de aquecimento de 10°C/min, em atmosfera de Nitrogênio.....	89
Figura 4.9 - Curva TG/DTG da Areia de britagem, obtida a razão de aquecimento de 10°C.min <sup>-1</sup> , em atmosfera de Nitrogênio.....	90
Figura 4.10 - Curva TG/DTG do cimento CP II F-32, obtida à razão de aquecimento de 10°C/min, em atmosfera de Nitrogênio .....	91
Figura 4.11 - Resistência à compressão simples do Traço 1:3, cura com 7 dias com areia de britagem.....	102
Figura 4.12 - Resistência à compressão simples do Traço 1:3, cura com 28 dias com areia de britagem.....	103
Figura 4.13 - Resistência à compressão simples do Traço 1:3, cura com 91 dias com areia de britagem.....	104
Figura 4.14 - Resistência à compressão simples do Traço 1:4, cura de 7 dias com areia de britagem.....	106
Figura 4.15 - Resistência à compressão simples do Traço 1:4, cura de 28 dias com areia de britagem.....	107
Figura 4.16 - Resistência à compressão simples do Traço 1:4, cura com 91 dias com areia de britagem.....	108
Figura 4.17 - Resistência à compressão simples do traço 1:3, cura com idades de 7 e 28 dias com areia normal .....	110
Figura 4.18 - Resistência à compressão simples do traço 1:4, cura com idades de 7 e 28 dias com areia normal .....	111

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1 - Números de empresas recicladoras existentes nos estados Brasileiros - aplicadores de PET .....	28
Tabela 2.2 - Recuperação de PET de 1994-2002 .....	28
Tabela 2.3 - Recuperação de PET de 2003-2011 .....	29
Tabela 2.4 - Dados comparativos das propriedades mecânicas do PET .....	30
Tabela 2.5 - Aplicações de fibras de PET .....	39
Tabela 2.6 - Quantidade e valor da produção mineral comercializada - 2009 .....	42
Tabela 2.7 - Limites dos índices de trabalhabilidade.....	52
Tabela 3.1- Designação dos traços do estudo do fator água / cimento.....	71
Tabela 3.2 - Águas utilizadas na moldagem da primeira etapa.....	72
Tabela 4.1 - Apresenta as normas, ensaios, unidades e resultados dos agregados .....	84
Tabela 4.2 - Caracterização da Mistura (Brita 0 / Areia de britagem) dos agregados no estado solto e compactado.....	84
Tabela 4.3 - Composição química da areia de britagem, por análise química e por EDX.....	85
Tabela 4.4 - Decomposição térmica do PET, obtidos em razão de aquecimento de 10°C/min.....	89
Tabela 4.5 - Decomposição térmica da areia de britagem, obtidos em razão de aquecimento de 10°C/min. ....	91
Tabela 4.6 - Decomposição térmica do CP F-32, obtidos em razão de aquecimento de 10°C/min. ....	92
Tabela 4.7 - Traço 1:4 Designação dos traços unitários do composto .....	93
Tabela 4.8 - Consistência pelo abatimento do tronco de cone com areia de britagem dos Traços 1:3 e 1:4, fator a/c.....	93
Tabela 4.9 - Consistência do concreto pelo espalhamento em Mesa de Graff com areia de britagem, traços 1:3 e 1:4 e fator a/c .....	94
Tabela 4.10 - Fluidez do concreto com areia de britagem dos traços 1:3 e 1:4 e fator a/c .....	95
Tabela 4.11 - Consistência pelo abatimento do tronco de cone com areia normal e fator a/c .....	96
Tabela 4.12 - Consistência do concreto pelo espalhamento em Mesa de Graff com areia normal dos traços 1:3 e 1:4 e fator a/c .....	97
Tabela 4.13 - Fluidez do concreto dos traços 1:3 e 1:4 e fator a/c com areia normal .....	97
Tabela 4.14 - Absorção de água com areia de britagem, traços 1:3 e 1:4 e fator a/c .....	98
Tabela 4.15 - Índice de vazios, traços 1:3 e 1:4 e fator a/c .....	99
Tabela 4.16 - Massa específica da amostra seca com areia de britagem dos Traços 1:3 e 1:4 e fator a/c.....	100
Tabela 4.17 - Estudo do fator a/c e resistência à compressão simples dos Traços 1:3 e 1:4, com areia de britagem.....	101

Tabela 4.18 - Classes de resistência de concretos estruturais, consistência e massas específicas dos concretos com traços 1:3 com areia de britagem .....	105
Tabela 4.19 - Classes de resistência de concretos estruturais, consistência e massas específicas dos concretos com traços 1:4 com areia normal..	109
Tabela 4.20 - Classes de resistência e consistência dos traços 1:3 e 1:4 com areia normal .....	111

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	graus Celsius
%	Percentual
$\rho_r$	Massa específica real
$\rho_s$	Massa específica da amostra seca
$\rho_{sat}$	Massa específica da amostra saturada
A	Absorção
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ATECEL	ATECEL - Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior.
ABIPET	Associação Brasileira das Indústrias de PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AG	Análise granulométrica
AQ	Análise Química
BRITEX	Britagem e Extração de Granito
CAGEPA	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CP	Cimento Portland
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DR-X	Difração de Raios-X
DTG	Derivada da Termogravimetria
EDX	Microanálise por energia dispersiva de raios-x
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INDUSPLAST	INDUPLAST Utensílios de <i>Plásticos Ltda.</i>
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ITERS	Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul
IV	Infravermelho
JCPDS-ICDD	Joint Committee on Powder Diffraction-International Centre for Diffraction Data
kN	Quilo Newton
kt	Quilo tonelada

kgf	Quilograma força
lv	Índice de vazios
LAP	Laboratório de Engenharia de Pavimentação da UFCG
mA	mili Ámper
mg	Miligramma
mi	Massa da amostra saturada imersa em água após fervura
MPa	Mega Pascal
MPa/s	Mega Pascal por segundo
ms	Massa da amostra seca em estufa
msat	Massa da amostra saturada
Mt.p.ano	Milhões de toneladas por ano
NBR	Norma brasileira
NM	Norma do MERCOSUL
PET	Poli tereftalato de etileno
Tf	Temperatura final
TG	Termogravimetria
Ti	Temperatura inicial
Tp	Temperatura de pico
UAEMa	Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>22</b>
1.1.1 Objetivo Geral .....	22
1.1.2 Objetivos específicos.....	23
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1 Origem e evolução dos materiais de construção</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2 Evolução dos plásticos</b> .....	<b>25</b>
2.2.1 O Politereftalato de Etileno (PET) .....	27
2.2.2 Propriedades do PET .....	29
2.2.2.1 A matriz cimento - polímero.....	30
2.2.3 Panorama de uso de plásticos no mundo .....	33
2.2.4 Aplicações de resíduos de PET na construção civil .....	34
<b>2.3 As rochas</b> .....	<b>40</b>
2.3.1 Areia de britagem .....	41
2.3.1 O cimento CP II F-32.....	50
<b>2.4 O método de dosagem ABCP</b> .....	<b>50</b>
2.4.1 Trabalhabilidade do concreto no estado fresco .....	51
2.4.2 Influência da absorção de água no concreto .....	52
<b>2.5 A sustentabilidade</b> .....	<b>54</b>
2.5.1 A sustentabilidade na construção civil.....	55
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>58</b>
<b>3.1 Matérias primas</b> .....	<b>58</b>
3.1.1 Agregado miúdo .....	58
3.1.1.1 <i>Politereftalato de etileno (PET)</i> .....	58
3.1.1.2 <i>Areia de britagem</i> .....	58
3.1.1.3 <i>Areia natural</i> .....	59
3.1.2 Agregado graúdo.....	59
3.1.2.1 <i>Brita "0"</i> .....	59
3.1.2.2 <i>Cimento CP II F-32</i> .....	59
3.1.3 Água.....	59
<b>3.2 Caracterização dos agregados</b> .....	<b>62</b>
3.2.1 Análise granulométrica (AG) .....	62
3.2.2 Massa unitária do agregado miúdo, graúdo e da mistura no estado solto e compactado .....	63
3.2.2.1 <i>Massa unitária do agregado miúdo no estado solto</i> .....	63
3.2.2.2 <i>Massa unitária do agregado miúdo no estado compactado</i> .....	63
3.2.2.3 <i>Massa unitária da mistura no estado solto</i> .....	64
3.2.2.4 <i>Absorção de água do PET</i> .....	65
3.2.2.5 <i>Material pulverulento</i> .....	65
3.3.3 Agregado miúdo .....	65
3.3.3.1 <i>Absorção de água da areia de britagem e areia normal</i> .....	65
3.3.3.2 <i>Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e massa específica</i> .....	66
3.3.4 Agregado graúdo.....	66
3.3.4.1 <i>Ensaio de abrasão "Los Angeles"</i> .....	66
3.3.4.2 <i>Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e massa específica</i> .....	67

<b>3.3 Análise química (AQ)</b> .....	<b>67</b>
<b>3.4 Caracterização espectrométrica</b> .....	<b>68</b>
3.4.1 Espectroscopia Vibracional de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR).....	68
<b>3.5 Caracterização térmica</b> .....	<b>68</b>
3.5.1 Termogravimetria (TG).....	68
<b>3.6 Caracterização estrutural</b> .....	<b>69</b>
3.6.1 Difração de raios-X (DR-X).....	69
3.6.2 Micro análise por energia dispersiva por raios X (EDX) .....	69
<b>3.7 Composição dos concretos</b> .....	<b>70</b>
<b>3.8 Caracterização do compósito</b> .....	<b>76</b>
3.8.1 Concreto no estado fresco - Abatimento (tronco de cone) e Consistência (mesa de Graff).....	76
3.8.2 Concretos endurecidos.....	76
<b>3.9 Caracterização mecânica</b> .....	<b>77</b>
3.9.1 Ensaio de resistência à compressão simples no estudo do fator a/c .....	77
3.9.2 Ensaio de resistência à compressão simples do compósito com areia de britagem e areia natural .....	78
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>80</b>
<b>4.1 Caracterização dos agregados</b> .....	<b>80</b>
4.1.1 Politereftalato de Etileno (PET) .....	80
4.1.1.2 Areia de britagem .....	81
4.1.1.4 Areia natural .....	82
4.1.1.3 Brita "0" .....	82
4.1.1.5 Mistura (Brita 0 / Areia de britagem).....	84
<b>4.2 Análise química (AQ)</b> .....	<b>85</b>
<b>4.3 Caracterização estrutural</b> .....	<b>86</b>
4.3.2 Difração de Raios-X .....	86
4.3.2.1 Areia de britagem .....	86
4.3.2.2 Cimento CP II F-32.....	87
<b>4.4 Caracterização espectrométrica</b> .....	<b>87</b>
4.4.1 Espectroscopia Vibracional de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR).....	87
<b>4.5 Caracterização térmica</b> .....	<b>88</b>
4.5.1 Termogravimetria (TG).....	88
4.5.1.1 Resíduo de PET .....	88
4.5.1.2 Areia de britagem .....	90
4.5.1.3 Cimento CP II F-32.....	91
<b>4.6 Caracterização do concreto fresco com areia de britagem</b> .....	<b>92</b>
4.6.1 Tronco de cone .....	93
4.6.2 Mesa de Graff.....	94
4.6.2.1 Consistência do concreto pelo espalhamento .....	94
4.6.2.2 Fluidez do Concreto .....	95
<b>4.7 Caracterização do concreto fresco com areia normal</b> .....	<b>95</b>
4.7.1 Tronco de cone .....	95
4.7.2 Mesa de Graff.....	96
4.7.2.1 Consistência do concreto pelo espalhamento .....	96
4.7.2.2 Fluidez do Concreto .....	97
<b>4.8 Caracterização do concreto endurecido com areia de britagem</b> .....	<b>98</b>
4.8.1 Absorção de água .....	98

4.8.2 Índice de vazios com areia de britagem .....	99
4.8.3 Massa específica.....	100
<b>4.9 Caracterização mecânica.....</b>	<b>101</b>
4.9.1 O fator água/cimento com areia de britagem .....	101
4.9.2 Resistência à compressão simples com areia de britagem dos traços 1:3 e 1:4.....	102
4.9.3 Resistência à compressão simples com areia normal dos traços 1:3 e 1:4 ...	110
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>114</b>
<b>6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>118</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>120</b>
<b>APÊNDICE A - PLANILHA COM TRAÇOS 1:6 E 1:5.....</b>	<b>130</b>
<b>APÊNDICE B - PLANILHA COM TRAÇOS 1:4 E 1:3.....</b>	<b>131</b>
<b>APÊNDICE C - CURVAS TG/DTG DO POLITEREFTALATO DE ETILENO .....</b>	<b>132</b>
<b>APÊNDICE D - CURVAS TG/DTG DA AREIA DE BRITAGEM .....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE E - CURVAS TG/DTG DO CP II F-32 .....</b>	<b>134</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil ocupa a sétima economia do mundo e apresenta desníveis sociais consideráveis, que resultam de fatores como: concentração de renda na mão de poucos, baixa escolarização da população menos favorecida, dentre outras. Essas desigualdades sociais são inúmeras, destacando-se o déficit habitacional brasileiro que está em torno de 5,546 milhões de habitações (BRASIL, 2011).

Os resíduos são materiais gerados a partir da atividade humana em vários setores e, na sua grande maioria, não degradam facilmente quando dispostos no solo, acumulando-se no meio ambiente e gerando impactos ambientais, exigindo assim tratamento adequado.

É necessária uma política de moradia voltada para a população de baixa renda para diminuir o déficit habitacional de brasileiros que não possuem condições de adquirir uma moradia digna, face ao rendimento médio familiar, situado em três salários mínimos (BRASIL, 2011).

Uma alternativa para diminuir o déficit habitacional seria utilizar alguns resíduos domésticos acumulados em lixões e beneficiar os mesmos, empregando-os em habitações populares. Desta forma, a política habitacional estaria atrelada a uma política ambiental.

É preciso urgentemente executar projetos integrados, que favoreçam a construção de moradias dignas, com o aproveitamento dos resíduos sólidos, que venham a favorecer as populações e ao meio ambiente.

A produção de resíduos sólidos nos centros urbanos tem se acentuado cada vez mais, preocupando a população, pesquisadores, órgãos governamentais e a sociedade civil como um todo. Nesse contexto, a demanda de material plástico é extremamente preocupante, em virtude da lenta degradação destes materiais e, conseqüentemente, de seu acúmulo prejudicial ao meio ambiente.

Por outro lado, o reaproveitamento de resíduos pela indústria da construção civil vem se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade, seja atenuando o impacto ambiental gerado pelo setor, seja reduzindo os custos. Em contrapartida, o uso dos resíduos industriais como materiais não convencionais aplicados na construção civil tende a se ampliar gradativamente devido ao alto

déficit habitacional e ao aumento dos indicadores de produção, registrado em vários segmentos produtivos de bebidas e das mineradoras, que geram grandes quantidades de resíduos.

Paralelamente, a produção de britas e uso de mármore e granitos na construção civil proporcionam aumento na produção da areia de britagem e de pós de serragem, os quais, na maioria das vezes são descartados no meio ambiente. Observa-se que o reaproveitamento destes resíduos surge como a solução mais viável, ecológica e economicamente correta, de forma que se tem tornado alvo de investigações de muitos pesquisadores.

As indústrias de britagem produzem em todas as fases de beneficiamento de britas uma quantidade expressiva de areia de britagem que apresentam pós finos que degradam o meio ambiente.

Percebe-se também que os resíduos de PET vêm crescendo visivelmente, em todos os recantos do mundo, seja devido ao aumento do consumo e a substituição de embalagens tradicionais por embalagens de PET ou pela produção de resíduos descartados.

Diante do déficit de moradia nas cidades e nas regiões metropolitanas, do acúmulo de resíduos industriais, da quantidade de detritos gerados pelos habitantes faz-se necessário utilizar os materiais com potencialidade de reuso, no sentido de contribuir na busca de soluções de engenharia para melhorar as condições de vida da população.

Nesse contexto, este trabalho de pesquisa utilizou o PET descartado na natureza juntamente com a areia de britagem e brita, para obter materiais com características mecânicas e físico-químicas adequadas ao uso como materiais de construção, visando diminuir o déficit habitacional e a edificação de casas populares.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Desenvolver compósitos cimentícios formados por resíduos de areia de britagem e Politereftalato de Etileno (PET)

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as matérias primas PET, areia de britagem, areia normal, brita 0 e cimento; utilizando de análise granulométrica, análise química (AQ), espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDX), espectrometria vibracional de absorção no infravermelho (FT-IR) e termogravimetria (TG);
- Estudar a composição do compósito utilizando brita 0, areia de britagem e PET bem como brita 0, areia de areia normal e PET;
- Determinar as propriedades físico-mecânicas dos compósitos com areia de britagem utilizando o concreto endurecido para determinação da absorção de água, índice de vazios, massa específica e a resistência à compressão simples;
- Comparar o abatimento com tronco de cone, a consistência utilizando mesa de Graff, fluidez e a resistência à compressão simples do compósito com areia de britagem e com areia normal;
- Analisar a viabilidade técnica para aplicação desses compósitos cimentícios na construção civil.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Origem e evolução dos materiais de construção**

Os sumérios foram os primeiros povos a construir, com barro cozido, edificações, que, apesar de maleáveis, eram um tipo pouco resistentes; os egípcios foram os que, pela primeira vez, usaram o cimento de tipo não hidráulico: a cal e a gipsita. Os romanos misturaram a cinza vulcânica do Vesúvio com a cal hidratada, numa proporção que variava de 25 a 45% e obtiveram uma cal que endurece sob a água (cal pozolânica) a qual possibilitou as seguintes construções romanas: Via Ápia dos banhos romanos, do Coliseu, do Panteão e dos aquedutos (PEDROSO, 2009).

Em 1755 foram realizados estudos experimentais sistemáticos acerca do cimento romano, pelo construtor John Smeaton, encarregado da reconstrução do Farol de Eddystone, situado a 9 km do Porto de Plymouth. Smeaton descobriu que o uso da cal produzida a partir de uma queima imperfeita do calcário seria inútil, pois ela não resistia a água. Em 1796, James Parker, obteve sua patente sobre cimento na Inglaterra e fundou uma fábrica de cimento, onde os nódulos de calcário impuro contendo argila eram despedaçados e queimados em fornos em forma de garrafa com capacidade para até 30 toneladas. A empresa prosperou até 1810, quando a patente expirou.

De acordo com Pedroso (2009), o construtor francês Louis Vicat desenvolveu a teoria explicativa para o comportamento e as propriedades físicas do cimento. Sua principal descoberta foi de que as propriedades cimentícias dependiam da proporção das misturas, que poderiam resultar em tipos diferentes de cimentos, inclusive mais resistentes do que os naturalmente encontrados. Em 1824, o inglês Joseph Aspdin, queimou o calcário e argila, finamente moídos e misturados, sob altas temperaturas. Em 1825 estabeleceu uma fábrica de cimento em Leeds (Inglaterra) denominou seu cimento de Portland, que é o material de construção muito conhecido e utilizado até dias atuais.

### **2.2 Evolução dos plásticos**

No Século XIX, em 1839, Charles Goodyear desenvolveu o sistema de vulcanização, adicionando enxofre à borracha bruta, o que a tornou mais resistente ao calor: O acontecimento levou à descoberta dos plásticos. A designação de

"plástico" origina-se do grego "plassein" que exprime a característica dos materiais quanto à moldabilidade por intermédio de alterações de condições de pressão e calor, ou por reações químicas (FREUDENRICH, 2012).

Em 1846, Christian Schönbein, criou a nitro celuloide que passou a ser utilizado como alternativa à pólvora. Posteriormente, foi desenvolvido o celuloide com a adição da cânfora. Esse novo produto tornou-se matéria-prima utilizada na fabricação de filmes fotográficos, bolas de sinuca, placas dentárias e bolas de pingue-pongue.

Em 1909, Leo Baekeland criou a baquelite, primeiro polímero realmente sintético, sendo considerado o primeiro plástico, que se tornou útil pela sua dureza, resistência ao calor e à eletricidade.

No Século XX, na década de 30, foi desenvolvida a poliamida, ou comercialmente chamada de Nylon. Após a Segunda Guerra Mundial foram desenvolvidos outros materiais, como o isopor, o poliestireno, o polietileno e o vinil. O tereftalato de polietileno (PET) foi inventado por John Rex Whinfield e John Dickson em 1940, ao condensar etileno glicol com ácido tereftálico, originando a fibra sintética. Em 1950, a empresa inglesa Imperial Indústria Química lançou comercialmente a fibra com a marca Terilene, seguida nos Estados Unidos pela Du Pont com a fibra Dacron. A garrafa PET foi patenteada em 1973 por Nathaniel Wyeth (UNIFEI, 2010).

O poli tereftalato de etileno, comercialmente conhecido por PET, é um poliéster insaturado, classificado como polímero termoplástico, formado pela incorporação sucessiva de moléculas de ( $C_{10}H_8O_4$ ).

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de PET (ABIPET) (2007/2008), o PET é o melhor e mais resistente plástico para fabricação de: embalagens de produtos de limpeza e de alimentos; cabides; edredons, travesseiros, mantas, tapetes, carpetes e bichos de pelúcia; vaso de jardim; régua, relógios, porta lápis e canetas; construção civil - caixas d'água, tubos e conexões, torneiras, piscinas, telhas; mármore sintético (com PET reciclado), bancadas e pias; tintas e vernizes usam PET reciclado na sua fabricação; na indústria de automóveis e caminhões - Todos os carros nacionais têm seus revestimentos de carpete produzidos com 100% de PET reciclado. Os elementos termo-acústicos aumentam o conforto ao dirigir, forração do teto, tampas de bagageiro, para-choques, partes da cabine e elementos aerodinâmicos, que ajudam a reduzir o consumo; Têm uso na

sinalização: viária, internas e externas - placas indicativas de direção, luminosas, sinalização horizontal, displays e indicadores; transporte Coletivo - banco de ônibus, trens e metrô têm PET reciclado, carenagem interna do metrô; material Esportivo - bolas, chuteiras, bancos dos estádios, uniforme dos jogadores, as redes do gol, gramado de sistemas para drenagem da água da chuva que usa uma manta 100% PET reciclado; nas indústrias e no varejo e no uso geral - fitas de arquear e cordas.

Em virtude de ser um material que proporciona alta resistência mecânica (impacto) e química, possuindo excelente capacidade de contenção para gases e odores e, além disso, por ser um material menos denso que os materiais utilizados nas embalagens tradicionais. Assim, o PET é um material ideal para uso em recipiente, reduzindo custos de transporte e produção.

### 2.2.1 O Politereftalato de Etileno (PET)

No Brasil o PET é utilizado para fabricação de garrafas e embalagens para refrigerantes, águas, sucos, óleos comestíveis, medicamentos, cosméticos, produtos de higiene e limpeza, destilados, isotônicos, cervejas, entre vários outros, como embalagens termo formados, chapas e cabos para escova de dente (ABIPET, 2007/2008). Em virtude de todas as vantagens do uso de PET como material para embalagens o seu consumo tem aumentado acentuadamente.

No panorama internacional, a produção de plástico cresceu de 1,5 milhão de toneladas em 1950 para 265 milhões de toneladas em 2010, representando um crescimento de 9% ao ano. Nesse contexto, o maior produtor mundial de plástico era a União Europeia até 2009, sendo ultrapassado pela China em 2010 com uma produção anual de 62,2 milhões de toneladas por ano (PLASTICS EUROPA, 2010/2011). Por outro lado, o aumento do consumo de PET tem gerado grandes quantidades de material de descarte que associado ao seu longo período de decomposição torna necessária a busca por meios de reutilização deste material, a fim de minimizar a poluição e os impactos ambientais que o seu descarte na natureza pode provocar.

De acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011) a produção de tereftalato de polietileno foi de 519.290 toneladas e a produção de pré-formas (esboços) de garrafas plásticas, inclusive de garrafas PET foi de 3.726.204 toneladas.

Para a ABIPET (2007/2008), o PET é um material de alta resistência mecânica (impacto) e química e apresenta peso específico muito menor do que as embalagens tradicionais e as peças feitas desse material são 100% recicláveis. Além disso, sua composição química não libera nenhum produto tóxico e a seu reaproveitamento poderá proporcionar melhor uso da matéria-prima.

Segundo Lazareric et al., (2010), do ponto de vista técnico o reuso do PET apresenta mais vantagens, pois se consome menos energia e recursos. Atualmente a produção de plástico utiliza de 4 a 8% da produção mundial de petróleo e produz emissões de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>. O reuso é mais natural que a reciclagem, uma vez que não requer qualquer investimento, sendo considerado por vários autores como tendo um impacto ambiental positivo. Os resíduos de PET representam o plástico mais comum, dos sólidos urbanos (MELLO; PEZZIN, AMICO, 2009).

O oitavo Censo sobre Reciclagem de PET da Associação Brasileira de Indústrias de PET (ABIPET) entrevistou quatrocentos e nove (409) empresas que atuam com segmentos de recicladores e aplicadores de PET. A maioria das empresas recicladoras situa-se na região Sudeste e Sul do país (ABIPET, 2011). A Tabela 2.1 apresenta o número de empresas recicladoras por estado, no Brasil.

Tabela 2.1 - Números de empresas recicladoras existentes nos estados Brasileiros - aplicadores de PET

Estado	Número de contatos	Estado	Número de contatos	Estado	Número de contatos
AM	4	MS	1	RJ	32
BA	8	MT	3	RN	3
CE	8	PA	1	RO	1
DF	1	PB	2	RS	39
ES	12	PE	10	SC	45
GO	13	PI	2	SE	3
MG	21	PR	22	SP	178

Fonte: ABIPET, 2011.

As Tabelas 2.2 e 2.3 apresentam a evolução da recuperação do resíduo de PET no Brasil de 1994-2002 e de 2003-2011, em quilo toneladas e percentual (%).

Tabela 2.2 - Recuperação de PET de 1994-2002

Ano	Evolução da recuperação dos resíduos de PET								
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Quilo toneladas	13	18	22	30	40	50	67	89	105
% recuperação	18,8	25,4	21	16,2	17,9	20,4	26,3	32,9	35

Fonte: ABIPET (2011).

Tabela 2.3 - Recuperação de PET de 2003-2011

Ano	Evolução da recuperação dos resíduos de PET								
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Quilo toneladas	142	167	174	194	231	253	262	282	294
% recuperação	43	47	47	51,3	53,5	54,8	55,6	55,8	57,1

Fonte: ABIPET (2011).

Em 1994 a recuperação de PET foi de 13 kt., com percentual de 18,8 (%) e no ano de 2011 a recuperação chegou a 294 kt (quilo tonelada) com 57,1% , observa-se que a cada ano há aumento da massa recuperada de PET.

Os dados colocam o Brasil em 2º lugar no ranking mundial. O estado de São Paulo ocupa a 1ª (primeira) posição no ranking de estados brasileiros que recuperam o PET, contando com 178 (cento setenta e oito) empresas pesquisadas, conforme a Tabela 2.1. Assim, pesquisas sobre reciclagem e reaproveitamento de PET são muito promissoras, objetivando diminuir os impactos ambientais e explorar produtos de valor agregado maior.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011) a quantidade produzido de tereftalato de polietileno (PET) informada por 12 (doze) empresas foi de 519.290 t (toneladas) no ano de 2011. Com isso, observa-se que há uma quantidade expressiva de PET a ser recuperado, ao confrontar dados da ABIPET; IBGE, (2011).

### 2.2.2 Propriedades do PET

A empresa alemã NETZSCH-Gerätebau GmbH (2012) realizou estudos sobre as propriedades térmicas de 70 (setenta) tipos de polímeros, que foram distribuídos em seis categorias de termoplásticos: comerciais, de engenharia, termoplásticos resistentes a altas temperaturas, elastômeros termoplásticos, elastômeros e termo fixos. A pesquisa relaciona nove propriedades térmicas do PET, a saber:

- temperatura de transição vítrea, de: 70 a 80°C;
- temperatura de fusão, de: 250 a 260°C;
- entalpia de fusão: 140 J/g;
- temperatura de decomposição: 425 a 440°C;
- módulo de young: 2100 a 3100 MPa;
- coeficiente de expansão térmica linear: 80 a 100 x 10<sup>6</sup>/K
- densidade: 1,38 a 1,40 g/cm<sup>3</sup>;
- condutividade térmica: 0,24 W/(m.K)

- capacidade de calor específico: 1,04 a 1,17 J / (g.K).

Em seus estudos sobre garrafas PET, Melo (2004) obteve a densidade do fundo de garrafas que apresentam valor de 1,71 g/cm<sup>3</sup> e a do bico ficou com 1,21 g/cm<sup>3</sup>.

Na avaliação de um poliéster PET virgem e de um reciclado, não há diferença significativa entre os dois materiais processados, em relação às suas propriedades mecânicas, conforme apresenta a Tabela 2.4 de acordo com Demaio (1991) *apud* Peters (1998).

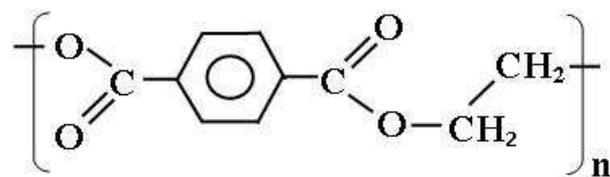
Tabela 2.4 - Dados comparativos das propriedades mecânicas do PET

Propriedade de medida	PET	
	Reciclado	Virgem
Resistência à flexão, MPa	117,9	121,4
Resistência à tração, MPa	3586	3586
Ensaio de dureza Barcol	49	47
Ensaio de impacto Izold, kj/m	0,16	0,18
Absorção de água %	2,0	1,8

Fonte: Peters (1998, p. 892).

Observa-se pelos dados da Tabela 2.4 que não há uma considerável perda das propriedades mecânicas do PET reciclado em relação ao PET virgem. A norma ASTM D570/2010 relata que o tempo de saturação da água por plásticos é fortemente dependente da espessura da amostra. A fórmula estrutural do PET é apresentada na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Fórmula estrutural do PET



Fonte: Elaborado pelo Autor.

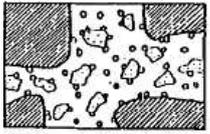
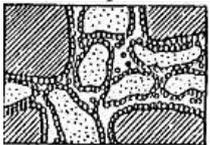
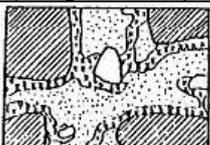
### 2.2.2.1 A matriz cimento - polímero

Na literatura são encontrados diversos trabalhos que reportam o uso de polímeros adicionados em argamassas e concretos (GEIST; AMAGNA; MELLOR, 1953; RAMAKRISHNAN, 1992; STEELE; JUDY, 1977; OHAMA et al., 1964; OHAMA, 1987; AFRIDI et al., 2003). O polímero adicionado atua como um modificador estrutural ocasionando alterações nas propriedades físicas e mecânicas

de argamassas e concretos (AGGARWAL, THAPLIYAL; KARADE, 2007; WANG, R.; WANG, P.; LI; 2005).

As misturas de argamassas ou concretos frescos com polímeros ou monômeros se apresentam na forma de uma dispersão, podendo ser em pó ou líquido. É importante observar as fases de hidratação do cimento e formação do polímero (coalescência das partículas de polímero e a polimerização do monômero) como responsável pela formação de uma matriz monolítica, apresentando uma estrutura de rede em que o cimento hidratado e o polímero interpenetram um no outro (OHAMA, 1995). O Quadro 2.1 apresenta o mecanismo de formação da matriz composta pela ligação formada entre o cimento e os filmes poliméricos.

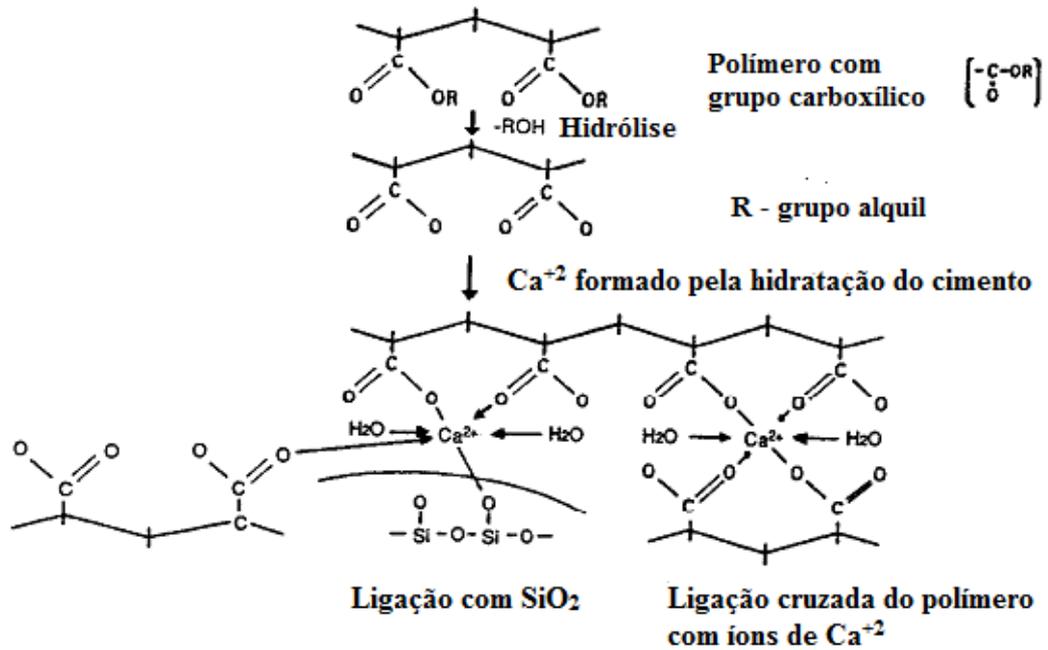
Quadro 2.1 - Modelo simplificado da formação da matriz cimento-polímero

 <p>a) Imediatamente após a mistura</p>	 <p>Partícula de cimento não hidratada Partícula de polímeros Agregados</p> <p>Os espaços intersticiais são constituídos por água</p>
 <p>b) Primeira etapa</p>	 <p>Partículas de cimento não hidratado e cimento gel (nesta etapa ocorre a deposição parcial de partículas de polímeros)</p>
 <p>c) Segunda etapa</p>	 <p>Mistura de gel de cimento e partículas de cimento não hidratado envolvidos numa camada preenchida por partículas de polímeros.</p>
 <p>d) Terceira etapa</p>	 <p>Cimento hidratado recoberto por filmes de polímeros ou membranas. Ar aprisionado</p>

Fonte: Ohama (1995).

O modelo simplificado da formação da matriz cimento-polímero é constituído por três etapas. Na primeira etapa, as partículas de polímeros são dispersas uniformemente na pasta de cimento. Na segunda etapa, a formação da estrutura do gel de cimento propicia que às partículas de polímeros serem gradualmente confinadas nos poros capilares. Segundo Ohama (1987), na segunda etapa ocorrem à interação do polímero e o grupo carboxílico do polímero com o cimento, de acordo com a Figura 2.2.

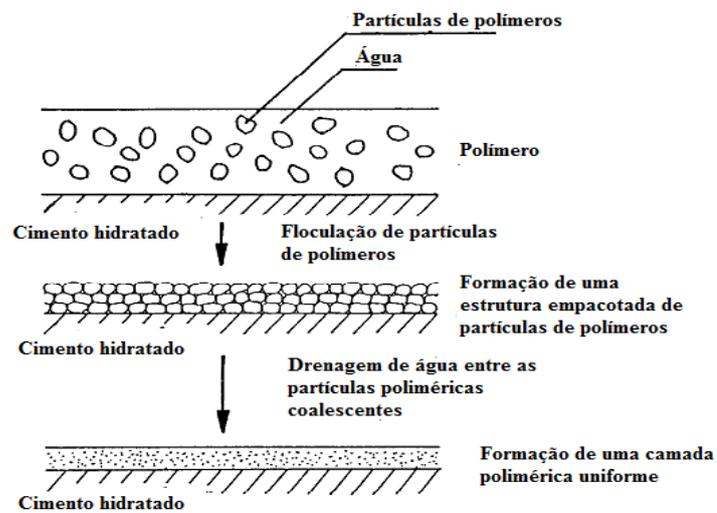
Figura 2.2 Reação entre o polímero com grupo carboxílico com cimento Portland e agregados



Fonte: Ohama (1995).

Na última etapa, com a hidratação do cimento, ocorre a formação de uma estrutura empacotada constituída por partículas de polímeros que em seguida se aglutinam em filmes contínuos ou membranas, conforme a Figura 2.3, sendo que estes se ligam ao cimento hidratado formando uma rede monolítica.

Figura 2.3 - Modelo simplificado do processo de formação de filme polimérico no cimento hidratado



Fonte: Ohama (1995).

Os filmes poliméricos ou membranas evitam a propagação de trincas, e simultaneamente desenvolvida, uma forte ligação entre o agregado e o cimento hidratado. Esta forte ligação formada implica em melhoria na resistência à tração, tenacidade à fratura dos concretos e argamassas contendo polímeros em sua composição (OHAMA, 1995).

### 2.2.3 Panorama de uso de plásticos no mundo

A indústria do plástico crescendo continuamente nos últimos 50 anos. Na década de 1950 a produção era de 1,5 Milhões de toneladas por ano (Mt.p.ano) passando para 265 milhões de toneladas em 2010, representando um aumento de 9% ao ano (PLASTICS EUROPE, 2011).

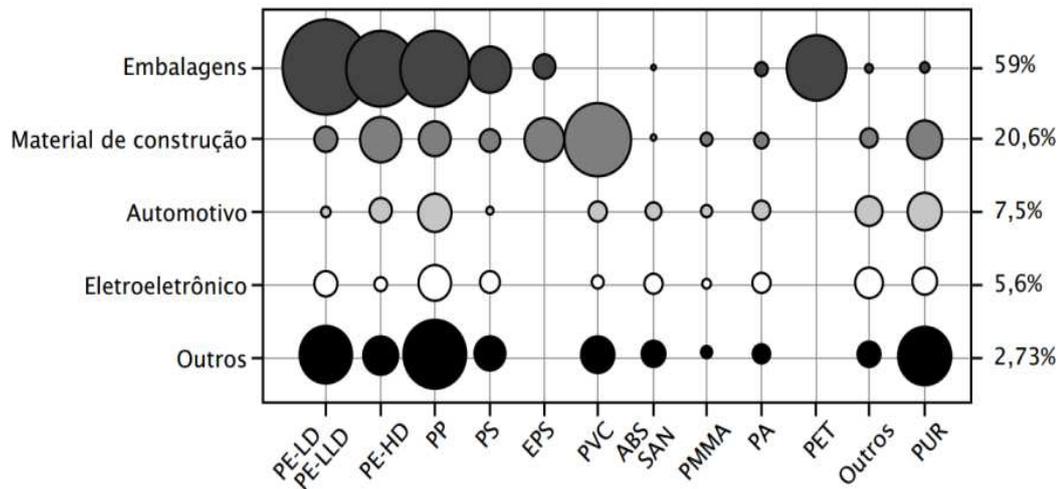
O maior produtor de plástico em 2009 era a União Europeia, com uma produção de 55 (cinquenta e cinco) Mt.p.ano, seguindo-se dos Estados Unidos (AMERICAN CHEMISTRY, 2009) e da China (PLASTICS EUROPE, 2009/2010), com produção de respectivamente 44 Mt.p.ano e 34,5 Mt.p.ano. Em 2010, a China passou a ser o maior produtor mundial de plástico com aproximadamente 62,2 Mt.p.ano e a União Europeia (57 Mt.p.ano) e a América do Norte (54,3 Mt.p.ano) de plásticos.

Em países europeus os plásticos mais utilizados são:

- Polietileno de baixa densidade (PEBD);
- Polietileno (PP);
- Poli (cloreto de vinila) (PVC);
- Poli (tereftalato de etileno) (PET);
- Poliestireno (PS).

Os maiores consumidores de plásticos, por setor, são: embalagem (39%); construção civil (20,6%); em menor proporção - transporte; agricultura; doméstico e eletroeletrônico. A Figura 2.4 apresenta a demanda europeia por segmento e tipo de resina em 2010.

Figura 2.4 - Demanda Europeia de plástico por segmento em 2010



Fonte: Plastics Europe (2010/2011).

A Figura 2.4 destaca que o PET é apenas utilizado como embalagem na União Europeia. Nesta, aproximadamente 60% de plástico produzido foram transformados em resíduos sólidos de plástico (PSW) e o restante foi imobilizado na forma estrutural ou de bens permanentes (AL-SALEM, et al., 2010). A União europeia reciclou 57,9%, sendo 6 (seis) Milhões de toneladas por ano (Mt.p.ano) feito mecanicamente que corresponde a 24,2%; e 8,3 Mt.p.ano foram destinados à recuperação energética, corresponde a 33,8% (PLASTICS EUROPE, 2010/2011).

#### 2.2.4 Aplicações de resíduos de PET na construção civil

Muitas pesquisas no sentido de reciclar ou reaproveitar o PET descartado têm sido feitas. Neste contexto, destacam-se os estudos de inúmeros pesquisadores que apresentam alternativas para o uso de PET como agregado em concreto. Dai; Lam; Ueda, (2012) estudaram o comportamento sísmico de concreto armado em coluna quadrada de ponte reforçada (RC) com polietileno tereftalato (PET) com fibra de polímero (FRP). Foram testadas seis amostras com PET FRP revestidas e comparadas em amostra de referência. Os autores chegaram às seguintes conclusões:

O PET FRP é uma alternativa promissora sobre concretos convencionais para modernização sísmica de colunas de ponte de RC, devido ao fato do mesmo apresentar excelente ductilidade e capacidade de deformação e não sofrer ruptura no estado limite final das colunas revestidas com PET FRP;

As estirpes máximas observadas nos revestimentos de PET FRP eram cerca de 3% no deslocamento final e foram 9-12% no final do ensaio, após a ruptura FRP. Uma grande margem da capacidade de deformação FRP no estado último limite permite uma falha progressiva das colunas revestidas, que é favorável no projeto sísmico.

A deformação de barras de aço longitudinais não conduza a uma degradação imediata da capacidade de carga de PET e PET AFRP da jaqueta. O pós-flambagem, capacidade de carga de uma coluna depende da rigidez do revestimento de FRP.

A deformação de cisalhamento na zona de articulação plástica responsável por cerca de 5-10% do deslocamento total do ponto de deslocamento máximo. O FRP levou a um deslocamento de menor cisalhamento para amostras com a mesma exigência de cisalhamento. O revestimento com PET FRP demonstra que a deformação de corte e rotação de deslizamento representou cerca de 5% e 28% do deslocamento total no ponto de deslocamento máximo.

Foti (2011) estudou a possibilidade de utilizar fibras de garrafas PET para conseguir uma melhoria da ductilidade do concreto. As fibras utilizadas foram obtidas através de corte simples das garrafas, sem qualquer processamento, reduzindo os custos de produção de concreto reforçado com fibras - FRC. A adição de uma pequena quantidade de fibras apresentou influência sobre o comportamento pós-fissuração de elementos de concreto simples. As fibras lamelares apresentam melhora significativa na dureza das amostras. O reforço da tenacidade é evidente para as fibras e parece que a sua forma especial ajuda a ligar o concreto em cada lado de uma secção fraturada. Os testes indicam que as fibras de PET em uma mistura de concreto são susceptíveis de aumentar a ductilidade do concreto.

Galvão et al. (2011), estudaram concretos com adição de materiais reciclados como materiais de reparo (MR) em superfície hidráulica. Nesta perspectiva, utilizaram polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno tereftalato (PET) e pneus inservíveis. A melhor proporção encontrada de cimento, pedra britada, areia e água, de acordo com designação da mistura 1:1,97:3,04:0,45, apresentou  $f_{c28} = 34,3$  MPa. A mistura forneceu o que foi considerado o concreto de referência (CR), a partir do qual foram adicionados os materiais poliméricos em substituição parcial da areia, utilizando os seguintes teores percentuais de teores (0,5; 1,0; 2,5; 5,0 e 7,5%) em massa.

Os autores constataram que o teor limite ideal na mistura ficou estabelecido em 2,5% em peso, tendo o concreto contendo PET o melhor desempenho neste teor, com  $(36,0 \pm 0,5)$  MPa, seguido pelos outros dois materiais (PEBD 2,5% e PNEU 2,5%), com valores muito próximos entre si, de  $(33,9 \pm 0,5)$  MPa e  $(33,7 \pm 0,5)$  MPa, respectivamente, aos 28 dias. Os autores chegaram à conclusão que os teores de 2,5% e 5,0% podem ser adotados para aplicação do material em campo, considerando-se a relação entre as resistências à compressão e à tração.

Dos concretos obtidos, o primeiro teor apresentou maior relação; entretanto, o segundo tem a vantagem da sua maior quantidade em massa na estrutura, trazendo um maior benefício ambiental. O teor de 2,5% de adição de resíduos poliméricos reciclados apresentou as maiores resistências à tração por compressão diametral para o PET e PEBD. Os valores verificados não impedem a sua utilização como material de reparos.

Albano et al. (2009), investigaram o comportamento mecânico do concreto com garrafas PET, variando-se a relação água / cimento (0,50 e 0,60), com teor de PET (10% e 20% de volume) e do tamanho da partícula. Verificou-se também a influência de degradação térmica do PET no concreto, quando as misturas foram expostas a diferentes temperaturas (200; 400 e 600°C). Os resultados indicam que o concreto com PET, quando a proporção em volume e tamanho de partícula de PET aumenta, mostrou uma diminuição na resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e a velocidade de impulsos de ultrassons, no entanto, a absorção de água aumentou. A resistência à flexão do cimento-PET, quando expostos a uma fonte de calor era fortemente dependente da relação temperatura, água/cimento, bem como no teor de PET e do tamanho de partícula. Devido ao aumento da absorção de água, uma possível aplicação pode ser em campos desportivos e pavimentos que necessitam de drenagem de água.

Ismail; Al-Hashmi, (2008), utilizaram os resíduos de plásticos para a produção de concreto. Os resíduos para substituição parcial de areia por 0%, 10%, 15% e 20% em volume. Chegaram às seguintes conclusões: os valores de resistência à compressão de todos os resíduos de misturas de concreto plástico tende a diminuir abaixo dos valores de referência para as misturas de concreto com o aumento da proporção de resíduos de plástico em todas as idades de cura. Isto pode ser atribuído à diminuição da força adesiva entre a superfície do plástico de resíduos e

pasta de cimento. A adição de resíduos de plástico, material hidrófobo, limita a hidratação do cimento.

Os valores de resistência à flexão das misturas de concreto plástico resíduos tendem a diminuir abaixo dos valores para as misturas de concreto de referência com o aumento da proporção de resíduos de plástico. A mistura de concreto feito com resíduos de plástico com 20% tem a menor resistência à flexão após 28 dias de cura, sendo 30,5% abaixo do valor de referência da mistura de concreto;

Os valores da densidade seca de resíduos de plástico nas misturas do concreto em cada idade de cura tendem a diminuir abaixo de valores para a mistura de material de referência, mas permanecem em média, à das misturas de concreto de referência. Aos 28 dias de idade a cura, a menor densidade seca ( $2223,7 \text{ kg/m}^3$ ) excede o intervalo da densidade seca de concreto leve estrutural;

Os valores de densidade de misturas frescas do concreto de resíduos plásticos tendem a diminuir em 5%, 7%, 8,7% para PL2, PL3 e PL4, respectivamente, abaixo PL1 da mistura do concreto de referência.

Choi et al., (2009), estudaram os efeitos de resíduos de garrafas de PET como agregados nas propriedades do concreto. O PET foi incorporado aos concretos depois de queimados em alto forno, sendo a escória utilizada em estruturas especiais de concreto em grandes arranha-céus.

O estudo pontua que a massa específica e a densidade das garrafas de agregados leve foi cerca de 50% inferior ao agregado natural, e sua absorção não foi medida. Com 28 (vinte e oito) dias de cura o concreto apresentam a resistência à compressão reduzida, a densidade das garrafas de agregado leves foi reduzida como a relação à substituição do agregado leve e da relação água-cimento.

Os resultados demonstraram que a melhora da trabalhabilidade de concretos com agregado leve, sendo capaz de reduzir o teor de água, que a zona de transição entre agregado leve e pasta de cimento foi expandida quando comparada com a dos agregados naturais. Apontam que a escória de granulados de alto forno aderido à superfície de garrafas de agregado leve seja capaz de fortalecer a superfície dos agregados, reduzindo a zona de transição em relação à superfície do agregado leve, sem escória granulada de alto forno por causa do consumo de hidróxido de cálcio (CHOI et al., 2009).

Modro et al., (2009), atestaram a influência da adição de resíduos de PET sobre a resistência mecânica em concreto com cimento Portland de Alta Resistência

Inicial (CP V-ARI), marca VOTORAN, de mesmo lote, e chegaram às seguintes conclusões: a análise micro estrutural confirmou a distribuição uniforme dos resíduos na matriz cimentícia, não tendo sido constatadas delaminações ou destacamentos dos resíduos da matriz ou qualquer indicação de interação química entre os materiais, ocorrendo então de outra maneira a diminuição da resistência à compressão dos traços obtidos com a substituição de agregados minerais por resíduos de PET, em relação ao padrão (sem adição de resíduo de polímero). Isto se explica devido à menor interação química entre o polímero e a matriz cimentícia e ainda devido à porosidade residual gerada.

Os referidos autores ainda destacam que com relação à resistência mecânica, os traços obtidos com a substituição de agregados minerais por resíduos de PET podem ser aplicados na indústria da construção civil para a fabricação de artefatos não estruturais, isto é, não limitados por normas específicas, sobretudo referentes à resistência mecânica. Neste caso, exemplos potenciais de utilização são: alvenaria interna de fechamento, capas para lajes nervuradas, capas para lajes pré-moldadas, material de enchimento em escadas, rebaixos de nível e base de enchimento para pisos térreos de edificações.

No Japão o PET vem sendo usado em pavimentação com concreto em áreas estreitas, passagens em túneis em construção, em estruturas subterrâneas, ruelas urbanas e estradas estreita, sinuosa e íngreme. A Tabela 2.5 apresenta a viabilidade técnica do uso do PET em substituição a materiais tradicionais na construção civil (OCHI; OKUBO, FUKUI, 2007).

Tabela 2.5 - Aplicações de fibras de PET

Data	Prefeitura	Local	Modo de aplicação	Água /cimento (%)	Fibra (mm)	Volume das fibras (%)	Observação
Jan 2004	Kagoshima	Portão mina	de Pulverizado	50	30	0,3	Substituição da fibra de aço. Primeiro teste para usar fibra de PET no Japão. É muito fácil de manusear.
Mar 2004	Kanazawa	Estrada rua	de Colocado	64	40	0,75	Substituição de tela de arame. Considerável economia de trabalho
Out 2004	Ibaragi	Estrada rua	de Colocado	64	40	1,0	Aplicado com sucesso a estrada com gradiente de 10%
Mar 2004	Ehime	Encosta	Pulverizado	50	30	0,3	Substituição da fibra de aço na frente do mar
Ago 2004	Fukuoka	Túnel	Colocado	52	40	0,3	Aplicada ao suporte de túnel pela primeira vez
Fev 2004	Tottori	Túnel	Colocado	52	40	0,3	Um analisador de conteúdo de fibra foi desenvolvido e utilizado
Set 2005	Kanazawa	Ponte de cais	Colocado	50	30	0,3	A extensão de trincas foi substancialmente diminuída
Out 2005	Shiga	Túnel	Colocado	52	40	0,3	Uma nova injetora de fibra foi desenvolvida e utilizada
Em planejamento	-	Armazém subterrâneo de gases	Pulverizado	50	30	0,75	Substituição de tela de arame para evitar oxidação.

Fonte: Ochi; Okubo; Fukui, (2007).

Rebeiz (1996) demonstrou que o concreto reforçado com PET reciclado é um material viável na fabricação de pré-moldados. Resinas com baixa viscosidade e boas propriedades de molhamento são importantes porque produzem concreto trabalhável com alta razão resina agregado. O material pode atingir mais de 80% de sua resistência em um dia, sendo uma vantagem importante em muitas aplicações estruturais, contudo apresenta significativa perda de resistência em altas temperaturas. No entanto, apesar dessa perda, o material permanece muito resistente em compressão e flexão, quando comparado ao concreto Portland regular.

O autor destaca que o concreto reforçado poderá ser utilizado com muita eficiência na produção de componentes de utilidade, contêineres pré-fabricados para a eliminação de resíduos perigosos, isoladores de alta tensão, bases de máquinas e painéis de construção. O PET apresenta potencial de uso como agregado miúdo em concreto de uso não estrutural face não apresentar consideráveis diferenças entre o PET virgem e o reciclado em relação às propriedades de resistência a flexão e à tração, dureza e impacto.

Essas propriedades tornam seu uso viável em alvenaria interna de fechamento, capas para lajes nervuradas e lajes pré-moldadas, material de



Quadro 2.2 - Descrição das rochas na crosta da terra

Tipos	Descrição	Exemplo
Rochas ígneas	Formadas pelo resfriamento do magma (material rochoso em fusão).. O grau de cristalinidade e a granulação variam com a velocidade que o magma foi resfriado, quando da formação da rocha. Com base no teor de SiO <sub>2</sub> , as rochas são classificadas como ácidas, intermediárias e básicas, contendo respectivamente 65%, 55 a 65% e menos de 55% de SiO <sub>2</sub> .	Granito, Sienito, Diarito, Gabro, Diabásio ou Dolorito, Basalto. Granodiorito, Riólito, Andesito, Obsidiana
Rochas Sedimentares	São rochas estratificadas, usualmente depositadas debaixo de água, mas algumas vezes, são acumuladas mediante a ação do vento e do gelo.	Pedregulho, Areia, Siltito, Argila, Arenito, Grauvaca, Calcário, Conglomerado, Diamictito, Dolomita, Folhelho, Travertino, Tilito, Varvito
Rochas Metamórficas	São rochas ígneas ou sedimentares que tiveram alteradas a textura original, estrutura cristalina ou composição mineralógica, devido às condições químicas e físicas abaixo da superfície da terra.	Mármore, Ardósia, Quartzito, Gnaisse, Pedra sabão, Micaxisto, Xisto, Xisto Verde, Xistos Azuis, Filito, Itabirito

Fonte: Metha; Monteiro (1994).

### 2.3.1 Areia de britagem

A ABNT NBR NM 52/2009 define agregado miúdo que passa na peneira com abertura de malha de 9,5 mm, que passa quase totalmente na peneira 4,75 mm e fica retido, em sua maior parte na peneira 75 µm. Foi utilizado nesse trabalho areia de britagem oriunda de rochas ígneas do tipo granito. A cerca do granito, Luz e Lins (2008), mencionam que as rochas são constituídas, essencialmente, de quartzo, feldspato e mica. Os feldspatos são minerais formadores de rochas, principalmente rochas ígneas ácidas, como o granito. Embora este possa conter entre 50 e 70% de feldspatos alcalinos, sendo lavrado em função de seu conteúdo em feldspato. A Tabela 2.6 apresenta a quantidade o valor do material bruto e o valor do material comercializado (Rochas britadas e cascalho) por Unidade da Federação.

Tabela 2.6 - Quantidade e valor da produção mineral comercializada - 2009

Classe /substância / UF	Bruto		Beneficiada		Valor Total (R\$)
	Quantidade (t.)	Valor (R\$)	Quantidade (t.)	Valor (R\$)	
Rochas Britadas e Cascalho	5.215.281	39.724.361	223.572.947	5.129.275.033	5.168.999.394
AC	-	-	144.579	6.707.020	6.707.020
AL	-	-	1.782.122	53.024.071	53.024.071
AM	7.139	351.602	2.359.375	111.389.584	111.741.186
AP	3.837	68.030	440.158	19.535.818	19.603.848
BA	96.418	1.117.693	10.818.453	316.920.284	318.037.976
CE	1.750	26.250	5.632.804	141.158.119	141.184.369
DF	115.989	336.355	4.595.279	89.253.549	89.589.904
ES	11.395	113.950	5.022.537	87.776.044	87.889.994
GO	23.998	171.048	9.025.579	184.224.102	184.395.150
MA	9.000	120.000	4.142.684	102.163.593	102.283.593
MG	390.711	2.645.701	25.771.245	522.981.433	525.627.133
MS	544.440	3.091.490	3.158.003	47.252.838	50.344.327
MT	160.558	1.879.785	4.121.831	79.444.437	81.324.222
PA	23.634	85.574	5.108.871	228.221.575	228.307.148
PB	339.741	4.146.666	2.715.004	53.188.430	57.335.096
PE	135.303	2.706.133	6.961.457	132.501.136	135.207.269
PI	24.147	280.662	2.105.334	59.651.722	59.932.384
PR	477.203	1.151.518	11.965.626	215.614.928	216.766.446
RJ	656.131	3.822.591	17.421.050	361.151.540	364.974.131
RN	540.579	5.473.638	2.779.220	68.355.840	73.829.478
RO	7.562	113.442	2.213.183	88.576.917	88.690.359
RR	3.561	44.520	203.621	7.481.451	7.525.971
RS	224.043	1.817.522	12.373.638	162.599.426	164.416.948
SC	830.216	4.320.694	11.079.923	183.784.122	188.104.817
SE	278.064	1.408.066	1.613.981	50.309.039	51.717.105
SP	308.861	4.398.867	68.283.925	1.747.076.843	1.751.475.710
TO	1.001	32.566	1.733.465	8.931.175	8.963.740

Fonte: DNPM (2010).

A Tabela 2.6 indica que os estados de São Paulo e Minas Gerais possuem maior arrecadação de recursos com material beneficiado / britado.

A norma brasileira da ABNT NBR 9935/2011 menciona que a areia de britagem, material pétreo, cuja granulometria fica compreendida entre 4,75 mm e 0,150 mm, quando proveniente de processos de cominuição mecânica de rochas já britadas, gera fragmentos e pulverização do material.

Segundo Chaves (2005) *apud* KLEIN, (2008):

O acúmulo do pedrisco nos pátios de produção de agregados ocorre, pois este material é pouco utilizado na construção civil, de modo que este acúmulo vem se tornando um problema de logística de grande importância para as pedreiras, assim como um problema ambiental.

Klein (2008) defende que uma alternativa à utilização da areia natural em concreto, seria a substituição desse material pela areia de britagem.

A substituição da areia natural por areia de britagem no concreto, resulta em benefícios ao meio ambiente, devido à minimização do uso da areia natural, não sendo necessária sua extração. Da mesma forma, que o destino dado ao pedrisco é outro benefício, pois este deixa de ser um material depositado nos pátios das pedreiras, sujeito à ação do vento, e considerado um resíduo do processo de produção da brita.

No que concerne aos custos do agregado miúdo, a proximidade entre as pedreiras e os centros de consumo permite que a areia de britagem tenha um custo inferior ao da areia natural. Essa relação de custo favorece o uso da areia de britagem, pois esta não sofre restrições tão severas quanto às aplicadas da areia natural, por parte dos órgãos de fiscalização ambiental. Os resultados do estudo obtidos comparado com a referência (areia natural - AN), concluiu que aos 28 dias a areia de britagem utilizada é viável tecnicamente a substituição da AN, em concreto auto adensável (CAA), na proporção de 30% de areia de britagem, em relação ao agregado miúdo total (KLEIN, 2008).

Dentre os resíduos sólidos, a areia de britagem, gerado na britagem e na produção de granito e mármore descartados na natureza, é exemplo de resíduos que possuem potencialidade de reaproveitamento. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011), a quantidade gerada de grânulos, lascas ou pós de mármore, granitos ou placas foi de 2.152.791 m<sup>3</sup> e a produção de pedras britadas foi de 138.536.535 m<sup>3</sup>/por ano.

Segundo Fabro et al., (2011), avaliaram o formato dos grãos de agregados misturados utilizando de diferentes parâmetros, analisando as diferenças entre as formas dos agregados, suas propriedades em argamassas e concretos. Utilizou-se pó de pedra tipo cone - A, do vibrador de impacto - A (VSI), tipo martelo - B, tipo cone - C, do vibrador de impacto - C, areia artificial e areia natural. Observaram que o formato dos grãos artificiais depende do tipo de britador empregado pelas pedreiras no processo de britagem das rochas. Também observaram que o britador vertical de impacto apresentam grãos mais arredondados que a areia natural; e que a forma dos grãos dos agregados influencia fortemente a fluidez das argamassas: quando apresentam maior coeficiente de forma do agregado, é maior a fluidez da argamassa.

As areias constituídas de partículas esféricas e arredondadas possuem atrito sensivelmente menor do que areias constituídas de partículas lamelares, e por isso,

favorecem a fluidez. A forma dos agregados influencia o abatimento do concreto: quanto maior o coeficiente de forma maior o abatimento do concreto. Os agregados oriundos do britador VSI apresentam grãos arredondados proporcionando concretos de maior fluidez.

Fabro et al., (2011), também concluíram que a influência da forma dos grãos dos agregados sobre o abatimento do concreto foi mais significativa do que a influencia do teor de material pulverulento dos agregados, uma vez que concretos com agregados miúdos de maior teor de material pulverulento e com maiores coeficientes de forma apresentam abatimento superiores com areia natural qual apresentou baixíssimo teor de material pulverulento; há pouca influência da forma dos agregados na resistência das argamassas e concretos, no entanto, todas as argamassas e todos os concretos confeccionados com agregado artificial apresentam resistências ligeiramente superiores ao da argamassa e do concreto com areia natural. A superioridade das resistências com pó de pedra pode ser atribuída ao maior fechamento dos poros proporcionado pelo material pulverulento presente no pó de pedra.

Ishikawa (2010) investigou o uso de areia artificial no concreto de alto desempenho. Utilizou areia artificial de granito sem descarte de finos abaixo de 75  $\mu\text{m}$ , material proveniente da Região Metropolitana de São Paulo, cimento Portland CP V - Ari Plus, areia natural do Rio Paraíba - SP, brita 1, aditivo superplastificante e aditivo plastificante. Os traços foram feitos em massa e moldados quatro (4) traços com areia artificial e quatro (4) com areia normal. Os resultados de absorção (%) de água com areia artificial variou de 2,74 a 3,08; o índice de vazios (%) variou de 6,39 a 7,16; a massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) seca variou de 2,310 a 2,325; após saturação e fervura, variou de 2,380 a 2,429 e a massa real variou de 2,483 a 2,504.

Com areia natural, os resultados de absorção (%) de água variaram de 3,00 a 3,84; o índice de vazios (%) variou de 7,05 a 8,86; a massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) seca variou de 2,320 a 2,354; após saturação e fervura, variou de 2,395 a 2,416 e a massa real variou de 2,521 a 2,528. Quanto a análise dos resultados: os valores de massas específicas dos concretos de alto desempenho obtidos estão dentro dos parâmetros normais de concretos convencionais normalmente utilizados, apresentando valores entre 2,300 e 2,500  $\text{kg}/\text{dm}^3$ . A adição de sílica ativa não modificou os valores de massa específica dos concretos.

Quanto ao abatimento do concreto pode-se observar que com troca do agregado miúdo, de areia artificial por areia natural, e mantidos os demais materiais e traços, houve um aumento do abatimento do concreto com areia natural devido a uma menor porcentagem de materiais finos e, em consequência, fazendo com que a mistura mais água sobrando. Isso significa que a areia artificial apresenta uma superfície específica maior em relação à areia natural e assim, demanda uma quantidade maior de água para umedecer todos os grãos, para uma mesma quantidade de material (ISHIAKAWA, 2010).

Os concretos para fins estruturais apresentam resistência à compressão simples de acordo com a NBR 8953, possuem resistência maior que 60 MPa. Os resultados com 28 dias indicaram que os concretos dos traços 1 e 2 com areia artificial e traços 1A e 2A com areia natural (AN) apresentam resistência semelhante com 3, e 4 com areia artificial (AA) apresentam resistências ligeiramente maiores em relação aos traços 3A e 4A com AN, indicando a influência dos finos da areia artificial no adensamento do pacote granulométrico.

Os resultados obtidos pelo autor indicam que é viável a utilização da areia artificial na produção de concreto de alto desempenho. Entretanto, os concretos com areia natural a areia de britagem, visto que apresentam um abatimento maior em relação aos concretos com areia artificial, isto é, diminuindo-se a relação água/aglomerante. Para que a areia artificial tenha desempenho econômico é necessário diminuir o teor de finos na sua composição granulométrica. Isto pode encarecer o seu custo, tirando a vantagem econômica em relação à areia natural.

**5453 Weidmann; Oliveira, Prudêncio, (2009)**, estudaram um agregado obtido pela mistura de pó-de-pedra produzida por uma pedreira com areia natural. Os ensaios foram conduzidos em argamassa para encontrar a melhor proporção entre agregados e posteriormente em concretos para permitir a construção de curvas de dosagens. Os resultados foram comparados com concretos. Os autores observaram que a mistura com 30% de areia natural fina e 70% de pó-de-pedra conduziu melhor solução do ponto de vista técnico e econômico. Concluíram que o pó de pedra apresentou um grande potencial de emprego para a produção de concreto, desde que seja removida a fração superior de a 2,8 mm e seja feita uma composição com agregado natural de granulometria fina (MF = 0,74). Constataram, ainda, que o pó de pedra apresentou um desempenho significativo quando a dosagem for superior a 40 MPa, esses valores, mais solicitados comercialmente.

Drago; Verney; Pereira, (2009), investigaram a viabilidade da utilização da areia de britagem, proveniente de rochas basálticas da região do planalto médio do Estado do Rio Grande do Sul em substituição à areia natural quartzosa, em concretos de cimento Portland.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão e absorção de água em concretos produzidos com diferentes traços e diferentes porcentagens de areia de britagem (0, 30, 60 e 100%). Os autores chegaram às seguintes conclusões: as características físicas determinadas para a areia de britagem, com exceção do teor de materiais finos que passam na peneira 75 $\mu$ m, ficaram dentro dos parâmetros necessários para que possa ser utilizada como agregado miúdo em concreto;

Em relação à consistência dos concretos, avaliada pelo abatimento do tronco de cone, observaram que os concretos com areia de britagem, em função do elevado teor de finos (material pulverulento) e da forma dos grãos, demandam uma maior quantidade de água para que a trabalhabilidade seja mantida dentro da faixa estabelecida;

A resistência à compressão dos três traços de concreto analisados diminuiu com a substituição de areia natural por areia de britagem. No caso da substituição total, a redução ficou, em média, aproximadamente igual a 23%, em função do maior consumo de água exigido e da maior relação água/cimento. No traço C, a influência da substituição de areia natural por areia de britagem foi menor;

A análise de concretos com relações água/cimento fixa apresenta a viabilidade da utilização da AB, onde o teor de 60% de areia de britagem apresentou melhor resultado de resistência à compressão para as relações água/cimento 0,55 e 0,60 e a substituição total de areia natural por areia de britagem mostrou-se eficiente para concretos com relação água/cimento de 0,65.

Os resultados de absorção de água por imersão dos traços analisados apresentaram elevada variabilidade. Os autores observaram, ainda, que, quanto maior a quantidade de areia artificial adicionada à mistura, maior o índice de absorção de água, chegando-se a uma diferença, em média, 27% superior, em relação ao concreto de referência com areia natural. Em função do maior teor de finos da areia de britagem, e conseqüente da superfície específica, foi requerida maior quantidade de água para manutenção do abatimento estabelecido, ocasionando aumento na relação água/cimento das misturas e maior teor de absorção de água.

Urguim et al. (2008), obtiveram o concreto auto adensável com areia de britagem. Foram utilizadas três composições com areia natural (AN) e areia de britagem (AB), sendo 100% de areia natural; 75% de AN com 25% areia de britagem e 50% de areia natural com 50% de areia de britagem. Observaram a redução do custo por m<sup>3</sup> de concreto e a garantia de excelente acabamento em concreto aparente. Os concretos foram avaliados quanto à resistência à compressão. Com base nos resultados obtidos nos ensaios, concluíram que: aos 7 dias de idade, os melhores resultados de resistência foram obtidos para os concretos sem areia de britagem; aos 28 dias, os melhores resultados foram obtidos, em geral, nos concretos com 50% de areia natural e 50% de areia de britagem e nos concretos com 100% de areia natural. Em relação ao consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto, os melhores resultados foram dos concretos com 100% de areia natural e com 50% de areia natural com mais de 50% de areia de britagem, dependendo do nível de resistência analisado.

Almeida; Branco; Santos, (2007), propõem soluções para resolver o problema dos resíduos gerados pela indústria da pedra natural, considerando a incorporação desses resíduos em outras atividades industriais como subprodutos. Dentre as aplicações propostas para solucionar esses problemas referentes aos resíduos da indústria de britagem, cuja produção anual mundial é de aproximadamente 68 milhões de toneladas de produtos beneficiados, mencionaram a incorporação destes subprodutos industriais em materiais de construção, tais como: cimento, tijolos vermelhos e revestimentos cerâmicos, materiais à base de resinas, argamassas e concretos e mármore aglomerado entre outras soluções que vão desde a construção do pavimento para aterros e obras rodoviárias.

Segundo os autores, os resíduos em função de sua origem mineralogia, permitem outras aplicações em atividades na indústria de papel e cerâmica, na agricultura, em tratamento de água e aterros de vedação, entre outras.

Segundo Mendes et al., (2007), verificaram a viabilidade do uso de areia artificial em concretos para estruturas pré-fabricadas. A areia artificial foi proveniente de rocha da região de Rio do Sul-PR e a brita 1 proveniente de Campo Largo-PR, areia natural proveniente de rio, cimento V-ARI RS e aditivo. Concluíram que o traço com composição granulométrica com 50% de areia artificial e 50% com areia natural apresentou melhor desempenho com a/c igual a 0,55, menor consumo de cimento/m<sup>3</sup> de concreto. No traço com 100% de areia artificial, apresentam concreto

com aparência áspera (presença de grãos angulares e de arestas vivas) e susceptível à segregação por falta de estrutura interna de coesão, além de reduzir a trabalhabilidade do concreto no estado fresco e possuir elevado material pulverulento.

Sá (2006) desenvolveu estudo visando conhecer a influência da substituição da areia natural pelo pó de pedra, quando à resistência mecânica, a microestrutura e quanto à sua durabilidade. Quanto ao risco ambiental, o pó de pedra classificado como um material inerte, o mesmo pode ser utilizado em estruturas de concreto, sem risco à saúde e ao meio ambiente. Com relação à análise de resistência à compressão, conclui-se que:

Os concretos de categoria 20 MPa, contendo pó de pedra, apresentam melhores desempenhos de resistência à compressão aos 28 dias em relação ao concreto contendo areia natural. Para essa categoria de concreto, o pó de pedra deve ter reduzido a porosidade, por refinamento e colmatação dos poros;

O concreto de categoria 40 MPa, contendo areia natural, apresentam melhor desempenho de resistência à compressão aos 28 dias, em relação aos concretos contendo pó de pedra e adições;

A utilização do pó de pedra na microestrutura do concreto de categoria 40 MPa resultou em resistências mais baixas, possivelmente em razão da maior necessidade de água para recobrir as partículas, mesmo com a adição de superplastificante à mistura;

Em concretos de categoria 20 MPa, a substituição de 100% de areia natural por pó de pedra sem nenhum beneficiamento é bastante viável, pois é possível obter-se concretos mais resistentes e conseqüentemente mais duráveis;

Em relação à análise da microestrutura, verificaram através das micrografias, as diferentes fases existentes no concreto, a saber: a fase agregado, a zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, e ainda a matriz da pasta de cimento. Foi possível identificar na zona de transição a presença dos cristais de etringita, característico de uma zona de transição enfraquecida, e dos cristais de hidróxido de cálcio, além dos vazios existentes. Identificou-se a diferença entre a zona de transição e a matriz da pasta de cimento. Observou-se que concretos de categoria 20 MPa contendo pó de pedra, apresentam a interface agregado pasta de cimento mais fechada, com uma provável zona de transição menos porosa;

Com a análise espectroscópica realizada em alguns pontos na zona de transição e na matriz da pasta de cimento foi possível identificar os diferentes elementos constituintes do concreto;

Pandolfo et al., (2005) verificaram o comportamento dos concretos dosados com areia de britagem e areia natural frente à questão da absorvidade. As misturas avaliadas resultaram de cinco composições de agregados miúdos: a primeira com 100% de areia natural; a segunda com 80% de areia natural e 20% de areia de britagem; a terceira com 50% de areia natural e 50% de areia de britagem; a quarta com 20% de areia natural e 80% de areia de britagem e a quinta com 100% de areia de britagem. Observaram que o teor de argamassa ficou entre 51-52%. O fator água/cimento e a consistência foram bastante influenciados pelo acréscimo de areia de britagem, ficando as taxas de variação entre (0,45 e 0,60) e (60 e 80) mm, respectivamente. Observaram que, à medida que aumenta o teor de areia de britagem, aumenta a relação água/cimento e diminui o abatimento do concreto.

Magalhães et al., (2005), analisaram a influência dos teores de material pulverizados presentes em agregados miúdos artificiais sobre as propriedades do concreto fresco e endurecidos. Nesta perspectiva, utilizaram três tipos diferentes de areia misturadas com pó de pedra calcário. As areias foram: natural quartzosa, artificial seca de calcário e de britagem de rochas gnáissica. A mistura foi composta por cimento, areia, areia de pedra, brita 0 e brita 1. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão revelaram um melhor desempenho dos concretos fabricados com areia artificiais utilizados em relação aos concretos com areia natural. Os autores alertaram que a composição mineralógica dos finos da areia artificial, não apresentou substâncias deletérias ao concreto. Observaram que a areia artificial utilizada obtida por britagem a seco possuindo um valor mais elevado de materiais pulverizados, mostrou-se economicamente viável em relação ao aproveitamento.

Foi observado que a maioria dos estudos sobre a utilização da areia de britagem na produção de concretos foi gerada em sua maioria na região Sul, tendo em vista a preocupação diante da escassez de areia natural, da distância dos rios até as grandes cidades, custo com o transporte e a preocupação com danos ambientais causados com a retirada nos leitos fluviais.

### 2.3.1 O cimento CP II F-32

O Cimento CP II F-32 apresenta uma vasta utilização: argamassa de revestimento e assentamento de tijolos e blocos; argamassa de assentamento de azulejos e ladrilhos; concreto simples (sem armadura; concreto magro para passeios e enchimentos); concreto armado com função estrutural; concreto protendido com pré-tensão das barras antes do lançamento do concreto; concreto armado para desforma rápida, curado por aspersão de água ou produto químico; elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento curados por aspersão de água; elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento para desforma rápida, curados a vapor ou com outro tipo de cura térmica; pavimento de concreto simples ou armado; pisos industriais de concreto; solo-cimento e concreto com agregados reativos (ABCP, 2002).

### 2.4 O método de dosagem ABCP

O método ABCP foi proposto, inicialmente, por Ary Torres e Carlos Rosman em 1956, atualmente adota uma adaptação do método de dosagem americano da American Concrete Institute - (ACI), após oito anos de discussões (CORDON, 1974 *apud* TUTIKIAN; HELENE, 2011). A recomendação americana para dosagem foi alterada, em 1970, pela Prática recomendada para misturas de concreto (ACI 613-44) para a ACI-211.

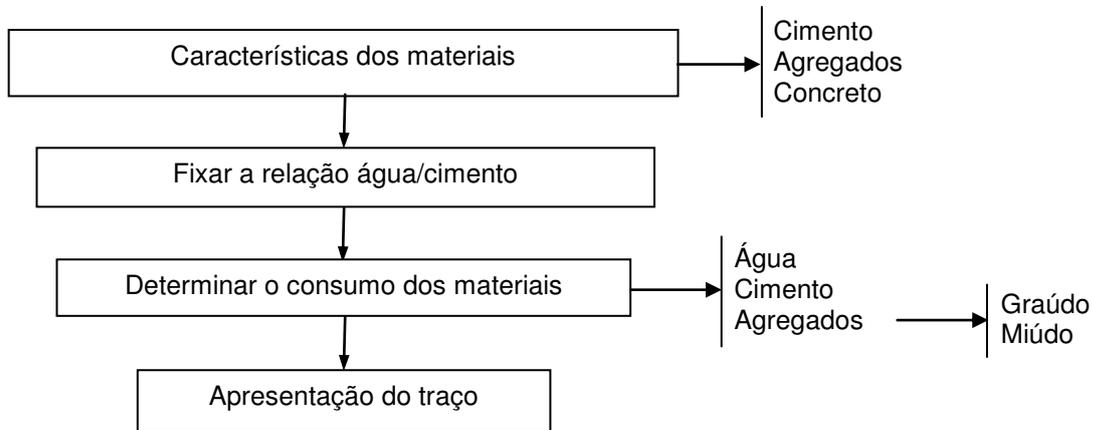
Tutikian e Helene (2011) afirmam que o método ACI teve aceitação entre os tecnologistas nacionais, sendo traduzido e divulgado pela ABCP nos dias atuais e largamente empregado também em toda a América Latina.

Em 1984, a ABCP publicou o estudo técnico de autoria de Publio Penna Firme Rodrigues, denominado de Parâmetros de Dosagem do Concreto, que representa uma versão adaptada, atualizada, moderna, simples e objetiva do método de dosagem americano, descrito no ACI-211 (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Curti (2005) definiu que a dosagem pelo método ABCP é proporcionalmente adequada. Aponta que os requisitos para a dosagem devem obedecer; a trabalhabilidade, resistência físico-mecânica, permeabilidade/porosidade, condições de exposição e custo.

O método da ABCP é empregado em concretos de consistência plástica a fluída. No emprego do método de dosagem ABCP. A Figura 2.6 apresenta o fluxograma do método de dosagem ABCP.

Figura 2.6 - Fluxograma do método de dosagem ABCP



Fonte: Curti (2005).

#### 2.4.1 Trabalhabilidade do concreto no estado fresco

De acordo com Metha e Monteiro (1994), a trabalhabilidade do concreto fresco determina a facilidade com a qual um concreto pode ser manipulado sem segregação nociva. Um concreto com dificuldade de lançar e adensar não só aumentará o custo de manipulação como também terá resistência, durabilidade e aparência. De forma análoga, misturas com elevada segregação (separação dos componentes do concreto fresco de tal forma que a sua distribuição não é mais uniforme) e exsudação (fenômeno cuja manifestação externa é o aparecimento de água na superfície após o concreto ter sido lançado e adensado). Porém antes de ocorrer a sua pega, ou seja, quando a sedimentação não pode mais ocorrer, proporciona concretos menos duráveis e que comprometem a qualidade do concreto. A Tabela 2.7 apresenta os limites dos índices de trabalhabilidade.

Tabela 2.7 - Limites dos índices de trabalhabilidade

Consistência	Abatimento (mm)	Espalhamento (mm)	Tipos de obras
Extremamente seco	-	-	Pré-fabricadas. Condições especiais de adensamento
Muito seca	-	-	Grandes massas. Pavimentação. Vibração muito enérgica.
Seca	0 - 20	<120	Estruturas de concreto armado ou protendido. Vibração normal.
Rija	20 - 50	350 - 400	Estruturas Correntes. Vibração normal
Plástica (média)	50 - 120	400 - 500	Estruturas Correntes. Adensamento manual
Úmida	120 - 200	500 - 600	Estruturas Correntes, paredes - diafragma, sem grande responsabilidade. Adensamento manual
Fluída	200 - 250	> 600	Concreto inadequado para qualquer uso

Fonte: Petrucci (1987).

A Tabela 2.7 indica a consistência que varia de extremamente seco a fluída, o abatimento em mm, o espalhamento que varia de <120 a >600 e os correspondentes tipos de obras que os diferentes concretos podem ser utilizados.

No trabalho experimental procurou-se obter concretos com consistência compreendida de rija com abatimento entre 20-50 e espalhamento <120 mm até consistência úmida com abatimento compreendido entre 120-200 e espalhamento entre 500-600 mm.

#### 2.4.2 Influência da absorção de água no concreto

Segundo Silva (2006) o concreto composto que apresenta alta absorção capilar em sua rede de poros de diferentes diâmetros, é vulnerável aos processos físicos e químicos de determinada associação à água. A determinação do percentual de absorção de água é considerada por diversos pesquisadores como um bom indicativo das condições de porosidade dos concretos, conseqüentemente de sua resistência frente à penetração de líquidos e gases agressivos.

Comumente se mede a absorção de água secando as amostras até atingir a constância de massa, imergindo em água, verificando o acréscimo de massa como porcentagem de massa seca. Diversos métodos podem ser utilizados com base nas normas ASTM C 642 (2006), ABNT NBR 9778 (2009) e por capilaridade em conformidade com a ABNT NBR 9779 (2012).

Silva (2006) argumenta ainda que os fatores que regulam a intensidade do fenômeno de absorção pelos concretos são: qualidade, distribuição entre poros,

diâmetro dos poros, características do líquido e as condições de saturação do concreto.

Para que um concreto apresente alto poder de absorção, será necessário primeiramente que o mesmo possua grande quantidade de poros, sendo estes de preferência bem distribuídos em sua massa, e principalmente que possuam intercomunicação entre si.

Dentro destas condições, o fenômeno poderá ser acentuado com a redução do diâmetro dos seus poros, pois a força de sucção do líquido pelo poro é função inversa de seu diâmetro (SILVA, 2006).

Barin (2008) indica que a absorção capilar será maior quanto menor for o diâmetro dos poros capilares, devido à tensão capilar ser aumentada em relação aos poros maiores, conseqüentemente, mais rápida é a absorção de água pelo concreto.

Metha e Monteiro (1994) defendem que mesmo a água pura pode agredir o concreto, através de lixiviação, com capilares de diâmetro entre 5 a 50nm, a qual exercendo pressão hidrostática. A sua remoção tende a induzir uma tensão sobre as paredes sólidas do poro capilar, causando, além disso, contração no sistema. A absorção igualmente depende significativamente das características intrínsecas do líquido, tais como viscosidade e tensão superficial.

Com relação ao nível de saturação, a absorção será tanto quanto maior for o nível de saturação do concreto, isto é, no caso de concretos com alto teor de umidade, o fenômeno da absorção não ocorre pelo fato de os poros já se encontrarem preenchidos por líquidos.

Silva (2006) argumenta que:

Em razão do grande número de fatores que controlam o fenômeno de absorção, existe uma grande dificuldade em se estabelecer equações matemáticas que representem fielmente a real evolução do processo, principalmente pelo fato de a rede de poros estar constantemente em modificação em função das reações de hidratação.

Neville (1997) chama a atenção para a absorção não poder ser usada com uma medida da qualidade do concreto, mas ressalta que os bons concretos apresentam absorção da água abaixo de 10% em massa, ao passo que, no ensaio de permeabilidade, esse valor é da ordem de um milhão de vezes inferior:  $10^{-12}$  m/s.

O Comité Euro-International du Béton - CEB 192 (2006) estabeleceu parâmetros de absorção (%) de água para determinar a qualidade do concreto. A Figura 2.7 apresenta os critérios para avaliação da absorção de água.

Figura 2.7 - Critérios para avaliação da absorção de água por concretos

Absorção (%)	Absorção do concreto	Quantidade do concreto
< 3,0	Baixa	Boa
3,0 a 5,0	Média	Média
> 5,0	Alta	Pobre

Fonte: CEB 192 (2006).

Observa-se na Figura 2.7 que a absorção de água é diretamente proporcional à qualidade do concreto.

O CEB 192 (2006) defende que um concreto é de boa qualidade quando a absorção de água for menor que 3,0%, enquanto Neville (1997) defende que a qualidade de bom concreto quando a absorção da água for abaixo de 10% em massa.

## 2.5 A sustentabilidade

É um conceito inteiramente compreendido quando ligado à atuação humana no meio ambiente. É a capacidade que empresas ou grupos de indivíduos têm de desenvolver as atividades em um determinado ambiente sem causar um impacto violento a este meio. Desse modo, as pessoas e as empresas devem desenvolver a capacidade de fazer uso de recursos naturais de maneira racional.

Athayde (2012) defende que a sustentabilidade é a busca do equilíbrio dinâmico entre os complexos contextos da realidade - seja em uma casa, em uma empresa, em uma cidade, e num país ou no planeta.

Em 1992, nas conferências do Rio de Janeiro (Rio+20), empresas, ONGS, governos e outros órgãos passaram a analisar e discutir sobre o impacto que o aumento da capacidade produtiva poderia ou não causar ao meio ambiente, assim como prover soluções para os impactos já causados, e prevenir problemas. Com isso, esperava-se diminuir o impacto no meio ambiente. O Quadro 2.2 apresenta alguns conceitos de sustentabilidade.

Quadro 2.3 - Conceitos de sustentabilidade

Tipos	Almeja
Social	A vida mais equilibrada envolve de forma harmônica todas as camadas sociais existentes, proporcionando acesso à cultura, à educação e à renda a todos os cidadãos. Objetiva criar uma corrente que influenciará as futuras gerações.
Ambiental	Proporcionar condutas mais equilibradas no dia a dia, como degradar menos o ambiente, fazer o uso de pouco ou nenhum recurso que agrida diretamente a natureza.
Empresarial	Prevê um maior equilíbrio das atitudes da empresa com o meio ambiente. Com a profunda crise financeira, certos setores empresariais implantaram esse conceito em suas empresas, visando uma melhora financeira e estima no mercado. As empresas que adotam a sustentabilidade devem realizar práticas que sejam positivas para três fatores: o ambiental, o social e o econômico.
Cultural	Visa preservar o respeito dos valores e tradições de cada povo, a sustentabilidade espacial, que conceitua o equilíbrio entre o rural e o urbano e as migrações, a adoção de práticas mais ecologicamente corretas no meio agrícola e a desconcentração das metrópoles.

Fonte: Adaptado de Athayde (2012).

Faz-se necessária a difusão dos conceitos de sustentabilidade para que novas gerações usufruam desses conhecimentos, levando-os para a vida adulta. Desse modo, ter-se-ão os recursos naturais garantidos e conseqüentemente a garantia da manutenção da vida na terra, por longas gerações.

### 2.5.1 A sustentabilidade na construção civil

O termo sustentabilidade aplicado à causa ambiental surgiu como um conceito utilizado por Lester Brown (1980) *apud* UMA (2012) que foi o fundador do Wordwatch Institute. A definição que acabou se tornando um padrão seguido mundialmente com algumas pequenas variações representa o seguinte:

Diz-se que uma comunidade é sustentável quando satisfaz plenamente suas necessidades de forma a preservar as condições para que as gerações futuras também o façam. Da mesma forma, as atividades processadas por agrupamentos humanos não podem interferir prejudicialmente nos ciclos de renovação da natureza e nem destruir esses recursos de forma a privar as gerações futuras de sua assistência.

Deste modo, a questão é se é possível aplicar a sustentabilidade ambiental em empreendimentos, já que o empreendimento mais do que simplesmente favorável à natureza, tem que estar enquadrado no conceito de sustentabilidade. Além disso, é preciso que ele esteja enquadrado em alguns parâmetros básicos. Devem ser eles:

- Ecologicamente correto;
- Economicamente viável;
- Socialmente justo e

- Culturalmente aceito.

Assim, os empreendimentos devem ser capazes de impactar positivamente os grupos humanos por ele afetados, imediatamente e no futuro. Mediante a interligação entre esses empreendimentos e a qualidade de vida das pessoas afetadas por eles, podem ser observados o uso racional dos recursos ambientais e com o trato dos resíduos decorrentes da implantação do referido empreendimento sustentável.

Compete às agências reguladoras governamentais fiscalizar os empreendimentos dentro do conceito de sustentabilidade na busca de minimizar os resíduos gerados nas obras de construção civil. É benéfico para o meio ambiente quando a população escolhe empresas que seguem as práticas e aplicações de sustentabilidade, gerando assim, um envolvimento participativo em defesa do meio ambiente.

Moran (2010), *apud* Fernandes; Enríquez; Alamino (2011), comenta que a mineração sozinha não é sustentável, ela não é inovadora, mas afirma que uma forma possível de ser sustentável é agregar valor em sua comunidade. Com isso, observa-se que para o engajamento na sustentabilidade é necessário agregar pessoas com a finalidade de trazer benefícios sociais, ambientais e culturais.

Nesse contexto, os recursos econômicos trazidos à comunidade no local da atividade de extração mineral podem ser alocados na economia familiar, municipal, estadual e federal, melhorando assim os indicadores econômicos. Dessa forma, embora a atividade de mineração não possa ser diretamente relacionada aos conceitos de sustentabilidade os benefícios para a população devem ser evidenciados.



### 3 METODOLOGIA

Nesta etapa serão descritos os materiais e métodos utilizados neste trabalho de pesquisa como também a caracterização dos agregados, utilizando análise granulométrica; análise química (AQ), espectroscopia por energia dispersiva de raios-X (EDX), espectrometria vibracional de absorção no infravermelho (FT-IR) e termogravimetria (TG); o estudo da composição, obtenção da consistência do concreto fresco usando tronco de cone e mesa de Graff, ensaio de resistência à compressão simples, com concreto endurecido, absorção de água, índice de vazios, e massa específica.

#### 3.1 Matérias primas

##### 3.1.1 Agregado miúdo

###### 3.1.1.1 Politereftalato de etileno (PET)

O PET utilizado neste trabalho de pesquisa possui forma granular; foi doado pela *INDUPLAST Utensílios de Plásticos Ltda.* e posteriormente foi adquirido em uma indústria da Região Metropolitana de Campina Grande-PB. Essas empresas comercializam o PET de forma granular para empresas que fabricam colchões.

###### 3.1.1.2 Areia de britagem

A areia de britagem e a brita foram coletadas na BRITEX - Britagem e Extração de Granito, transportados por caminhão e estocados no pátio do Laboratório de Reciclagem da UFCG. Posteriormente os agregados foram secos, (Figura 3.1 (a)), à temperatura ambiente, dispostos sobre um encerado de polietileno e em uma placa de concreto. Em seguida foram acondicionados em sacos plásticos e fechados com abraçadeiras de nylon e dispostos sobre *pallets* de madeira, protegidos de umidade e de fontes de calor. O agregado miúdo foi proveniente de uma empresa de britagem localizada no município de Pocinhos - PB.

### 3.1.1.3 Areia natural

A areia foi adquirida no comércio local (depósito de material de construção), seca em estufa a 100°C, no Laboratório de Engenharia de Pavimentação da UFCG, sendo oriunda da região metropolitana de Campina Grande.

### 3.1.2 Agregado graúdo

#### 3.1.2.1 Brita "0"

O agregado graúdo foi adquirido, seco, conforme Figura 3.1 (b), sendo acondicionado e estocado nas mesmas condições que o agregado miúdo, conforme apresenta a Figura 3.1 (c).

Figura 3.1 - Secagem - (a) areia de britagem, (b) brita 0 e (c) estocagem



#### 3.1.2.2 Cimento CP II F-32

O cimento utilizado neste trabalho de pesquisa foi adquirido no comércio de Campina Grande e posteriormente foi acondicionado em sacos de polietileno.

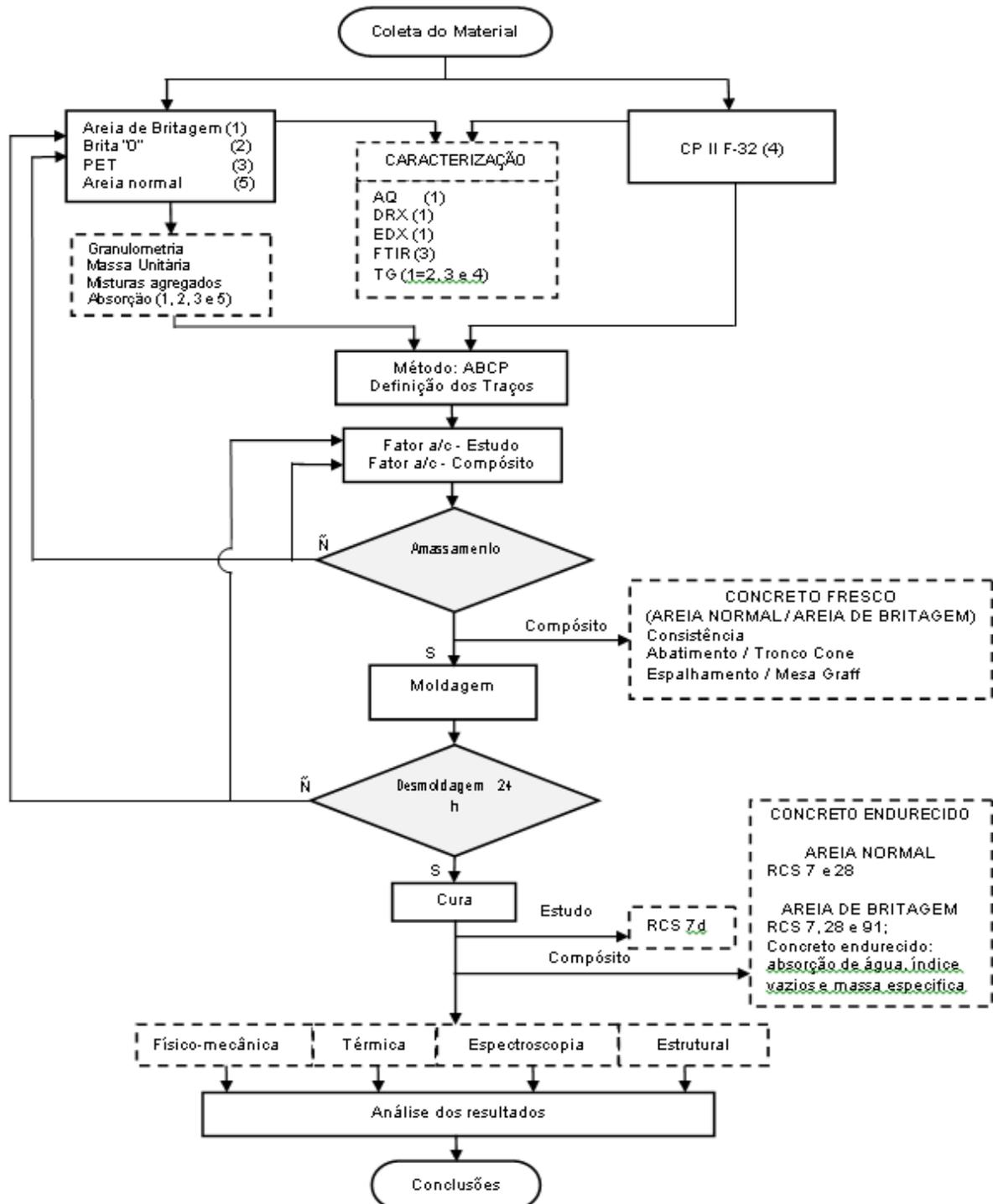
Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), o cimento CP II F-32 é usado para aplicações gerais, preparo de argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, concreto simples e massa, armado, protendido, projetado, rolado, magro, elementos pré-moldados e artefatos de concreto, pisos e pavimentos de concreto, solo-cimento, dentre outros.

### 3.1.3 Água

No experimento, foi utilizada água canalizada proveniente do açude Eptácio Pessoa, da cidade de Boqueirão no estado da Paraíba, fornecida pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA).

A Figura 3.2 apresenta o Fluxograma do experimento deste trabalho de pesquisa.

Figura 3.2 - Fluxograma do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa



Legenda: Ñ = não; S= sim.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2011).

O fluxograma da Figura 3.2 explica detalhadamente todas as etapas deste trabalho de pesquisa, conforme a descrição:

O planejamento do experimento explicita como foi coletado o material, caracterizado, a definição dos traços, obtenção do compósito e procedimentos de análise dos resultados, conforme as seis etapas:

- 1ª Etapa: Coleta de material de britagem (areia de britagem e brita 0), PET triturado e área normal;
- 2ª Etapa: Análise granulométrica dos agregados e caracterização: físico-mecânica, química, térmica, espectroscópica e estrutural;
- 3ª Etapa: Definição da composição dos traços e estudo do fator água/cimento (a/c), com substituição de areia de britagem por PET;
- Após ensaios de análise granulométrica, massa unitária da mistura de agregados, análise química (AQ), espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDX), espectrometria vibracional de absorção no infravermelho (FT-IR) e termogravimétrica (TG). Após os ensaios de análise granulométrica, massa unitária da mistura de agregados, foi realizado o amassamento manual, moldagem, com moldes cilíndricos com dimensão de 5 cm de diâmetro x 10 cm de altura, desmoldagem com 24 horas, cura úmida a cal com 7 dias e ensaio de resistência à compressão simples em prensa Shimadzu com capacidade de 100 kN (quilo Newton);
- 4ª Etapa: Amassamento do concreto obtido (compósito com areia de britagem) em betoneira. A colocação dos agregados, cimento e água obteve-se intervalos iguais em todos os traços com tempo de 10 minutos do início ao final do amassamento. Com o concreto fresco foi realizada a verificação do abatimento em tronco de cone e espalhamento com mesa de Graff.
- A moldagem foi realizada usando cilindros com dimensão 10 x 20 cm com utilização de haste de adensamento de 16 mm de diâmetro por 600 mm de comprimento com extremidade semiesférica. Com 18 horas os corpos de prova foram identificados e ao final de 24 h foram desmoldados e submetidos à cura úmida saturada a cal com duração de 7, 28 e 91 dias.
- Após a cura foi realizado o ensaio de resistência à compressão simples. Com o concreto endurecido foram realizados os ensaios de: índice de vazios,

massa específica e absorção de água. O compósito endurecido foi submetido a ensaios de resistência à compressão simples.

- 5ª Etapa: O compósito com areia natural passou por amassamento, sendo posteriormente submetido a ensaio de consistência por tronco de cone e mesa de Graff, após moldado permaneceram em cura de 7 e de 28 dias, conforme procedimento de acordo com a 4ª Etapa e submetido ao ensaio de resistência à compressão simples;
- 6ª Etapa: Análise dos resultados.

De acordo com Gil (1996) este trabalho de pesquisa pode ser classificado dentro da modalidade de estudo experimental, que permite investigar, aumentar a experiência em torno de um problema e aprofundar seus conhecimentos nos limites de uma realidade, com uma estratégia de pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

### **3.2 Caracterização dos agregados**

As matérias primas utilizadas: areia de britagem, brita “0”, PET e areia natural foram submetidas à análise granulométrica (dimensão máxima e módulo de finura). Às técnicas de caracterização estão relacionadas.

#### **3.2.1 Análise granulométrica (AG)**

A análise da composição granulométrica é fundamental para uma completa e precisa caracterização das matérias-primas, considerando que os materiais apresentam granulometrias diversas, que influenciam o processamento e nas propriedades finais do material obtido.

Foram caracterizados os resíduos: areia de britagem, brita 0 e PET os quais, após secos e prontos foram submetidos à análise da composição granulométrica, que seguiram os procedimentos da ABNT NBR NM 248/2003 Agregados - Determinação da composição granulométrica.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos do curso de Engenharia Civil e no Laboratório de Resíduos de Materiais do Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal Campina Grande - UFCG.

### 3.2.2 Massa unitária do agregado miúdo, gráudo e da mistura no estado solto e compactado

A norma da ABNT NM 45/2006 estabelece o método para a determinação da densidade a granel e do volume de vazios de agregados miúdos, gráudos ou da mistura dos dois, em estado compactado ou solto.

A massa unitária é a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente de acordo com o estabelecido na Norma e o volume deste recipiente.

O volume de vazios é o espaço entre os grãos de uma massa de agregados. Para este ensaio foi utilizado um recipiente de aço inoxidável com capacidade de 10 dm<sup>3</sup>, tendo em vista que a dimensão máxima característica dos agregados possuem  $d \leq 37,5\text{mm}$ .

#### 3.2.2.1 Massa unitária do agregado miúdo no estado solto

A Massa unitária no estado solto foi obtida com uso de um recipiente com 10 dm<sup>3</sup>. Usou-se um raspador para regularizar a superfície. Para este ensaio foram realizadas 3 (três) determinações da massa unitária e calculada a média aritmética. Foram seguidos os procedimentos da norma da ABNT NBR NM 45/2006. A Figura 3.4 apresenta o ensaio para obtenção da massa unitária no estado solto da areia de britagem.

Figura 3.3 - Massa unitária no estado solto da areia de britagem



Fonte: Arquivo do Autor (2011).

#### 3.2.2.2 Massa unitária do agregado miúdo no estado compactado

Para este ensaio utilizou-se um recipiente com 10 dm<sup>3</sup>, e um soquete com 600 mm de comprimento. Foram obtidas 3 (três) determinações da massa unitária

para obtenção da média aritmética, e utilizou-se um raspador para regularizar a superfície. A Figura 3.4 apresenta o ensaio para a determinação da massa unitária no estado compactado da areia de britagem, com enchimento do recipiente de 1/3 (Figura 3.5 (a)), 2/3 (Figura 3.5 (b)) e 3/3 (Figura 3.5 (c)), com os respectivos adensamentos. Foram seguidos os procedimentos da norma da ABNT NBR NM 45/2006.

Figura 3.4 - Massa unitária no estado compactado da areia de britagem. Enchimento e adensamento, (a) 1/3 do recipiente, (b) 2/3 do recipiente e (c) 2/3 do recipiente.



Fonte: Arquivo do Autor (2011).

### 3.2.2.3 Massa unitária da mistura no estado solto

Foi utilizado um recipiente com volume de  $1,570 \text{ dm}^3$ , e um molde de concreto com diâmetro de  $10 \times 20 \text{ cm}$  de altura. Utilizou-se 4 kg de massas com areia de britagem e brita 0 com composições variadas, em seguida, fez-se um tratamento estatístico da composição para se chegar à maior massa. Em cada verificação da massa, foram realizadas três determinações. Foram seguidos os procedimentos da ABNT NBR NM 45/2006. A Figura 3.6 apresenta o molde utilizado na determinação da massa unitária da mistura.

Figura 3.5 - Molde utilizado na massa unitária da mistura



Fonte: Arquivo do Autor (2011).

#### *3.2.2.4 Absorção de água do PET*

Para este ensaio utilizou-se um molde para concreto com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, de acordo com os procedimentos da norma da ASTM D570/2010.

#### *3.2.2.5 Material pulverulento*

A norma da ABNT NM 46/2003 estabelece o método para a determinação por lavagem, em agregados da quantidade de material mais fino que a abertura de malha da peneira 75  $\mu\text{m}$ .

#### *3.3.3 Agregado miúdo*

Os agregados miúdos (areia de britagem e areia normal) foram submetidos aos ensaios de absorção de água, material pulverulento, massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e massa específica.

##### *3.3.3.1 Absorção de água da areia de britagem e areia normal*

A absorção de água foi obtida de acordo com a norma da ABNT NM 30/2000. É definida como o processo pelo qual o líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. É também o incremento de massa de

um corpo sólido poroso devido à penetração da água em seus poros permeáveis, em relação a sua massa em estado seco (ABNT NM 30/2000).

### 3.3.3.2 Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e massa específica.

Os ensaios de Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e massa específica foram realizados conforme os ditames da norma da ABNR NM 52/2009.

### 3.3.4 Agregado graúdo

Para o agregados graúdo (brita 0) foram realizados os seguintes ensaios: de abrasão utilizando máquina “*Los Ángeles*”; massa específica do agregado seco, massa específica agregado saturado superfície seca e massa específica; massa específica do agregado seco.

#### 3.3.4.1 Ensaio de abrasão “*Los Ángeles*”

A realização deste ensaio está de acordo com a norma da ABNT NM 51/2001 que estabelece o método de ensaio de abrasão de agregados graúdos usando a máquina “*Los Ángeles*”. A Figura 3.7 apresenta a máquina *Los Ángeles*.

Figura 3.6 - Máquina *Los Ángeles*



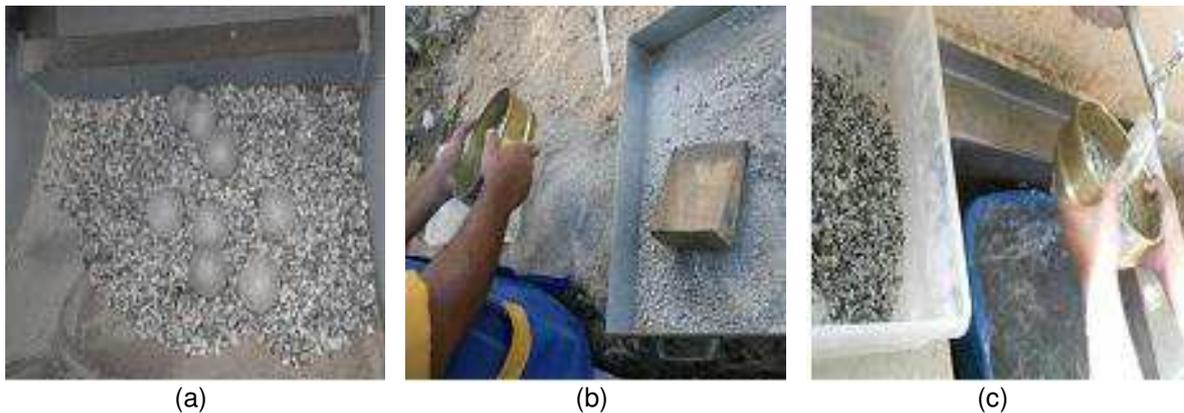
Fonte: Arquivo do Autor (2012).

O ensaio de abrasão constitui-se da adição de material na máquina *Los Ángeles*, (Figura 3.7) seguindo-se da adição de bolas abrasivas e rotações em

função da granulometria, descarte após peneiramento, lavagem do material em água corrente, secagem em estufa, pesagem do material e finalmente cálculos.

A Figura 3.8 apresenta o material e a carga abrasiva com oito bolas, peneiramento do material a ser descartado e posteriormente lavado.

Figura 3.7 – (a) Carga abrasiva e oito bolas, (b) Peneiramento após quinhentas (500) rotações e (d) lavagem do material



Fonte: Arquivo do Autor (2012).

#### 3.3.4.2 Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e massa específica.

A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. A massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis. A massa específica aparente relativa é a relação entre a massa da unidade de volume de um material, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis, a uma temperatura determinada, e a massa de um volume igual de água destilada, livre de ar, a uma temperatura estabelecida.

Para a determinação deste ensaio foi utilizada a norma da ABNT NM 53/2009 que estabelece o método de determinação da massa específica e da massa específica aparente dos agregados graúdos, destinados a serem usados em concretos.

### 3.3 Análise química (AQ)

As determinações usuais da Análise Química são: perda ao fogo (Perda ao Rubro),  $\text{SiO}_2$  (Dióxido de Silício),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Trióxido de Ferro),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Trióxido de

Alumínio), CaO (Óxido de Cálcio), MgO (Óxido de Magnésio), Na<sub>2</sub>O (Óxido de Sódio), K<sub>2</sub>O (Óxido de Potássio) e Resíduo Insolúvel.

A matéria-prima convencional de resíduo de rochas de britagem foi submetida à análise química, segundo técnicas clássicas e instrumentais, realizada no Laboratório de Análises Mineraias (LAM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), de acordo com o protocolo 8073 de 23 de novembro de 2011.

### **3.4 Caracterização espectrométrica**

#### **3.4.1 Espectroscopia Vibracional de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)**

A Figura 3.9 apresenta o Espectrofotômetro PerkinElmer.

Figura 3.8 - Espectrofotômetro PerkinElmer, modelo Spectrum 400



Fonte: Arquivo do Autor (2011).

O espectro foi obtido em um espectrofotômetro com transformada de Fourier Bruker (PerkinElmer), (Figura 3.9) modelo Spectrum 400 na região compreendida entre 4000 e 400cm<sup>-1</sup>, com resolução de 2 cm<sup>-1</sup>. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG.

### **3.5 Caracterização térmica**

#### **3.5.1 Termogravimetria (TG)**

A TG é a técnica na qual a mudança da massa de uma substância é medida em função da temperatura ou tempo enquanto esta é submetida a uma programação

controlada de temperatura. As curvas TG/DTG foram obtidas utilizando equipamento de análise térmica marca Shimadzu, modelo DTG-60, serial nº C30574700282TK, em atmosfera de Nitrogênio (gás) com cadinho de alumina, fluxo de  $50 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  e razão de aquecimento de  $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , numa faixa de temperatura ambiente até  $800^\circ\text{C}$  para o PET (massa de 2,646 mg.) e  $1.000^\circ\text{C}$  para o CP II F-32 (massa de 2,926mg) e areia de britagem (massa de 3,040mg). Estas análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização da UFCG. A Figura 3.10 apresenta o TG-60H.

Figura 3.9 – Equipamento TG / DTG-60H



Fonte: Arquivo do Autor (2011).

### 3.6 Caracterização estrutural

#### 3.6.1 Difração de raios-X (DR-X)

Para a determinação e a quantificação das fases presentes, a cristalinidade e o tamanho do cristalito das matérias-primas foram utilizados o difratômetro de Raios-X da Shimadzu, modelo XRD-6000 com radiação utilizada de  $K\alpha$  de Cu ( $40 \text{ kV} / 30 \text{ mA}$ ); a velocidade do goniômetro de  $2^\circ/\text{min}$  e passo de  $0,02^\circ$ . Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG.

#### 3.6.2 Micro análise por energia dispersiva por raios X (EDX)

Esta análise foi conduzida com detector de espalhamento, sistema de baixo vácuo com micro análise por energia dispersiva (EDX) em um microscópico

eletrônico de marca Shimadzu, modelo EDX-720 do Laboratório de Caracterização da UFCG. A Figura 3.11 apresenta o EDX-720.

Figura 3.10 – Equipamento EDX 720



Fonte: Arquivo do Autor (2011).

### 3.7 Composição dos concretos

De acordo com Tutikian e Helene (2011), o estudo da composição dos concretos de cimento Portland se caracteriza pelos procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, também conhecido por traço. Essa proporção ideal pode ser expressa em massa ou em volume, sendo preferível e sempre mais rigorosa a proporção expressa em massa seca de materiais.

O estudo de composição deste trabalho de pesquisa foi realizado com a elaboração de uma planilha (apêndice A e B) que permitiu inserir o traço desejado, a quantidade e a massa dos corpos de prova e o percentual da brita zero. Ao definir os diferentes percentuais de PET a planilha fornece os valores de massa de: brita 0; areia de britagem, PET e cimento, bem como a quantidade de água em ml dos respectivos fatores a/c pré-estabelecidos. Trabalhou-se com agregados seco em temperatura ambiente, constituindo de três (3) etapas:

- Primeira etapa: Esta etapa foi realizada com o objetivo de encontrar o fator água/cimento do traço padrão, composto por: cimento, areia de britagem e brita 0. Os traços contendo o PET foram compostos por 5%, 10% e 15%, respectivamente em substituição à areia de britagem.

Foi fixado para cada traço a “brita 0” constante na designação do traço unitário, conforme prescrito por ABCP (1977) e Curti (2005). Foram moldados traços

para a obtenção de concreto na seguinte ordem: 1:6; 1:5; 1:4 e 1:3, verificou-se a consistência, coesão e moldabilidade e o menor consumo de cimento/m<sup>3</sup>.

Na determinação dos traços de estudo, do fator água/cimento definiu-se a relação 1:m, onde o algarismo “1” (um) representa o cimento e o “m” representa a massa dos agregados: areia de britagem (a), brita 0 (b) e PET (c). A Tabela 3.1 apresenta os traços, PET (%) e designação dos traços 1:6, 1:5, 1:4 e 1:3.

Tabela 3.1- Designação dos traços do estudo do fator água / cimento

Traço 1:m	PET (%)	Designação do traço unitário						
		(1)	:	(a)	:	(b)	:	(c)
1:6	Padrão	1	:	3,48	:		:	-
	5	1	:	3,30	:	2,520	:	0,17
	10	1	:	3,13	:		:	0,34
	15	1	:	2,95	:		:	0,52
1:5	Padrão	1	:	2,90	:		:	-
	5	1	:	2,75	:	2,100	:	0,14
	10	1	:	2,61	:		:	0,29
	15	1	:	2,46	:		:	0,43
1:4	Padrão	1	:	2,32	:		:	-
	5	1	:	2,20	:	1,680	:	0,11
	10	1	:	2,08	:		:	0,23
	15	1	:	1,97	:		:	0,34
1:3	Padrão	1	:	1,74	:		:	-
	5	1	:	1,65	:	1,260	:	0,08
	10	1	:	1,56	:		:	0,17
	15	1	:	1,47	:		:	0,26

Legenda: cimento (1): areia de britagem (a) : brita 0 (b) : PET (c) : fator água/cimento (a/c)  
Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

A Tabela 3.1 em (b) apresenta valores constante de britas 0 para o traço padrão e com os valores de substituição com 5%, 10% e 15% de PET.

A Tabela 3.2 apresenta aos traços, fator a/c, concreto padrão e percentuais de substituição de PET.

Tabela 3.2 - Águas utilizadas na moldagem da primeira etapa

Traço 1:m	Fator água / cimento (a/c)	Padrão	Substituição		
			5%	10%	15%
1:6	0,76	não	-	-	não
	0,79	não	-	-	não
	0,82	não	-	-	não
1:5	0,76	não	-	-	não
	0,79	não	-	-	não
	0,82	não	-	-	Não
1:4	0,52	sim	sim	sim	sim
	0,55	sim	sim	sim	sim
	0,58	sim	sim	sim	sim
	0,61	sim	sim	sim	sim
	0,64	sim	sim	sim	sim
	0,67	(**)	sim	sim	sim
	0,70	(**)	sim	sim	sim
	0,73	(**)	sim	sim	sim
	0,76	(**)	sim	sim	sim
	0,79	(**)	(**)	sim	sim
1:3	0,46	sim	sim	(*)	(*)
	0,52	sim	sim	sim	sim
	0,58	sim	sim	sim	sim
	0,61	sim	sim	sim	sim
	0,64	sim	sim	sim	sim
	0,67	sim	sim	sim	sim
	0,70	(**)	(**)	sim	sim

Legenda: Moldados = sim, Consistência Extremamente Seco = (\*) e Fluída (\*\*)  
 Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

A Tabela 3.2 em (b) apresenta valores constante de britas 0 para o traço padrão e com os valores de substituição com 5%, 10% e 15% de PET. Observou-se que os traços 1:6 e 1:5 apresentaram consistência muito seca, não sendo moldados e nos traços 1:4 e 1:3, aqueles que apresentaram consistência fluída foram descartados.

O amassamento foi realizado manualmente para todos os traços. Em seguida foram moldados com corpos de prova com dimensão 5 cm de diâmetro x 10 cm de altura.

Qualquer estudo de dosagem dos concretos tem fundamentos científicos e tecnológicos fortes, com parte experimental em laboratório e/ou em campo, levando alguns pesquisadores e profissionais da área consideravam a dosagem do concreto mais como uma arte do que uma ciência. O domínio dessas duas características é conferido aos grandes benefícios econômicos e técnicos de um concreto bem dosado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A cura úmida foi realizada com duração de 7 (sete) dias, com solução saturada de hidróxido de cálcio, segundo recomendação da norma da ABNT NBR 5738/2003. De acordo com Oliveira; Barbosa (2006), em compostos à base de

cimento Portland, o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos, reage com a pozolana, utilizada como substituição parcial do cimento, resultando em uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados, para produzir produtos mais estáveis do cimento hidratado.

Utilizou-se uma caixa de isopor com capacidade de 135 (cento e trinta e cinco) litros. Os corpos de provas com diferentes traços foram identificados e acondicionados em bandejas para facilitar o manuseio. A Figura 3.12 apresenta a caixa de isopor contendo os corpos de provas com traços padrão e com percentuais de substituição de PET em diferentes bandejas.

Figura 3.11 - Traços em cura, moldes 5 x 10 cm, percentuais de PET e fatores a/c separados em bandejas individuais



Fonte: Arquivo do Autor (2011).

Em seguida os corpos de provas foram submetidos aos ensaios mecânico de resistência à compressão simples.

- Segunda etapa: Esta etapa foi realizada com o objetivo de encontrar o fator água/cimento ótimo, para obtenção do concreto plástico de acordo com índices de trabalhabilidade propostos por Petrucci (1987).

Os fatores a/c utilizados na segunda fase foram obtidos a partir do estudo da primeira etapa para obtenção da dosagem ótima do concreto deste trabalho de pesquisa. Para o amassamento do compósito utilizou-se betoneira com eixo inclinado de acordo com os métodos proposto pelo Portal do Concreto (2011) e de Sá (2006). Utilizou-se vários fatores a/c para verificar o abatimento com tronco de cone e o espalhamento com mesa de Graff.

As massas de areia normal e de areia de britagem foram secas e pesados. Utilizou-se uma balança eletrônica marca Filizola Pluris. Em seguida, o material foi

acondicionado separadamente em sacos plásticos e etiquetados, conforme apresentada na Figura 3.13, que apresenta: (a) pesagem e (b) material com diferentes traços.

Figura 3.12 – (a) Balança, massa de areia de britagem e (b) Sacos contendo material do traço 1:3 padrão e com substituição com 5, 10 e 15% de PET, do fator a/c 0,58.



Fonte: Arquivo do Autor (2012).

Para a moldagem dos corpos de provas foram utilizados moldes de 10 x 20 cm no traço 1:3 com teores de fatores a/c 0,55; 0,58 e 0,61 e no traço 1:4 com teores de a/c 0,61; 0,64 e 0,67. Os percentuais de substituição de PET variaram de: 5%, 10%, 15% e 20%, moldou-se um total de nove (9) corpos de prova; com três idades de cura com 7 (sete); 28 (vinte e oito) e 91 (noventa e um) dias; sendo confeccionados 3 (três) corpos de prova por cada idade, perfazendo um total 270 (duzentos e setenta) corpos de prova. Utilizou-se haste de adensamento com 600 (seiscentos) mm e moldes com dimensões de 10 (dez) cm de diâmetro por 20 (vinte) cm de altura, de acordo com a norma da ABNT NBR 5738/2008.

Foram moldados corpos de prova para o concreto endurecido para a determinação da absorção de água, índice de vazios e a massa específica. Em cada traço foram confeccionados dois corpos de prova de 5 cm x 10 cm, perfazendo um total de 180 (cento e oitenta) corpos de prova.

Transcorridas 20h (vinte) horas da moldagem os corpos de prova foram identificados na parte superior. Após 24 (vinte e quatro) horas, foram desmoldados e preparados para cura. A Figura 3.14 (a) e (b) apresenta a bancada utilizada para acondicionar moldes, com identificação prévia dos traços, no pátio externo do

Laboratório de Resíduos da UFCG. Após as moldagens os moldes foram cobertos para proteção de intempéries atmosféricas.

Figura 3.13 - Acondicionamento em prateleira de corpos de prova moldados com moldes 10 x 20 cm usados para obtenção de compósitos, a) parte intermediária da prateleira e b) parte superior da prateleira



Fonte: Arquivo do Autor (2011).

Os compósitos foram submetidos à cura úmida com hidróxido de cálcio pelo período de 7, 28 e 91 dias. A Figura 3.15 apresenta os corpos de prova sendo curados submetidos ao processo de cura no Laboratório de Reciclagem da UFCG.

Figura 3.14 - Disposição das caixas de cura no Laboratório de Resíduos



Fonte: Arquivo do Autor (2011).

- Terceira etapa: Nessa etapa foram amassados, em seguida obtidos os abatimentos (tronco de cone), a consistência (mesa de Graff), a moldagem de corpos de prova e curdos com 7 e 28 dias de acordo com a segunda fase. Foi utilizando o fator água/cimento intermediário do traço 1:4 e 1:3, com a substituição

da areia de britagem por areia natural. Comparou-se a resistência à compressão simples com cura com 7 (sete) e com 28 (vinte e oito) dias. Também se comparou o ensaio de tronco de cone e a consistência com mesa de Graff com o compósito moldado com areia de britagem, utilizando corpos de prova com dimensão 10 cm de diâmetro x 20 cm de altura.

Foram moldados corpos de prova com traços do compósito com areia normal, o traço 1:3 foi moldado com a/c 0,58 e no traço 1:4 com a/c 0,64 com percentual de substituição de: 5, 10, 15 e 20%, utilizando corpos de prova com dimensões de 10 cm de diâmetro x 20 cm de altura, de acordo com a norma da ABNT NBR 5738/2008.

### 3.8 Caracterização do compósito

#### 3.8.1 Concreto no estado fresco - Abatimento (tronco de cone) e Consistência (mesa de Graff)

Com o concreto fresco foi determinada a consistência utilizando o abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67/1998) e da mesa de Graff (ABNT NBR NM 68/1998). A Figura 3.16 (a) apresenta a consistência - tronco de cone, (b) mesa de Graff e acessórios.

Figura 3.15 - a) Tronco de Cone, b) Mesa de Graff e acessórios



Fonte: Arquivo do Autor (2011).

#### 3.8.2 Concretos endurecidos

A determinação da absorção de água, índice de vazios e a massa específica do concreto endurecido foram submetidos ao ensaio de acordo com a norma da ABNT NBR 9778/2009.

A Figura 3.17 apresenta o equipamento de ebulição da água contida no Banho Maria, marca SOLAB. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Resíduos da UFCG.

Figura 3.16 - Banho Maria



Fonte: Arquivo do Autor (2011).

### 3.9 Caracterização mecânica

#### 3.9.1 Ensaio de resistência à compressão simples no estudo do fator a/c

Os compósitos (corpos-de-prova) foram ensaiados após terem sido secos ao ar, de acordo com a norma da ABNT NBR 5739/2007.

Para este ensaio foi utilizada a máquina de compressão Shimadzu, modelo AG-IS 100 kN com velocidade de carregamento de 0,5 de MPa/s, pertencente ao Laboratório de Reciclagem da UFCG. A Figura 3.18 apresenta o corpo de prova carregado.

Figura 3.17 - Corpos de prova, com 5 cm de diâmetro x 10 cm de altura



Fonte: Arquivo do Autor (2011).

### 3.9.2 Ensaio de resistência à compressão simples do compósito com areia de britagem e areia natural

O compósito com areia de britagem foi ensaiado com utilização da prensa hidráulica manual (CONTENCO) com dois (2) manômetros, um com capacidade de 120.000 kgf-menor divisão 200 kgf; carga máx. útil: 100.000 kgf e outro com capacidade de 24.000 kgf, com menor divisão de 40kgf; carga máx. útil: 20.000 kgf. O equipamento foi acionado por bomba hidráulica manual, conforme a Figura 3.19a.

O compósito moldado com areia natural foi ensaiado utilizando prensa eletrônica microprocessada com mostrador digital, bomba eletro hidráulico, a qual permite controle manual da velocidade de avanço do ensaio, com capacidade para 150 toneladas força, com menor divisão do mostrador 0,01Tf (10kgf), fabricado pela SOLOTEST, conforme a Figura 3.19b. As prensas são de propriedade da ATECEL - Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior.

Figura 3.18 - Prensas utilizadas: a) hidráulica e b) eletrônica



Fonte: Arquivo do Autor (2012).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a realização deste trabalho de pesquisa, que compreende a caracterização dos agregados e do concreto fresco e endurecido, e a resistência à compressão simples dos compósitos.

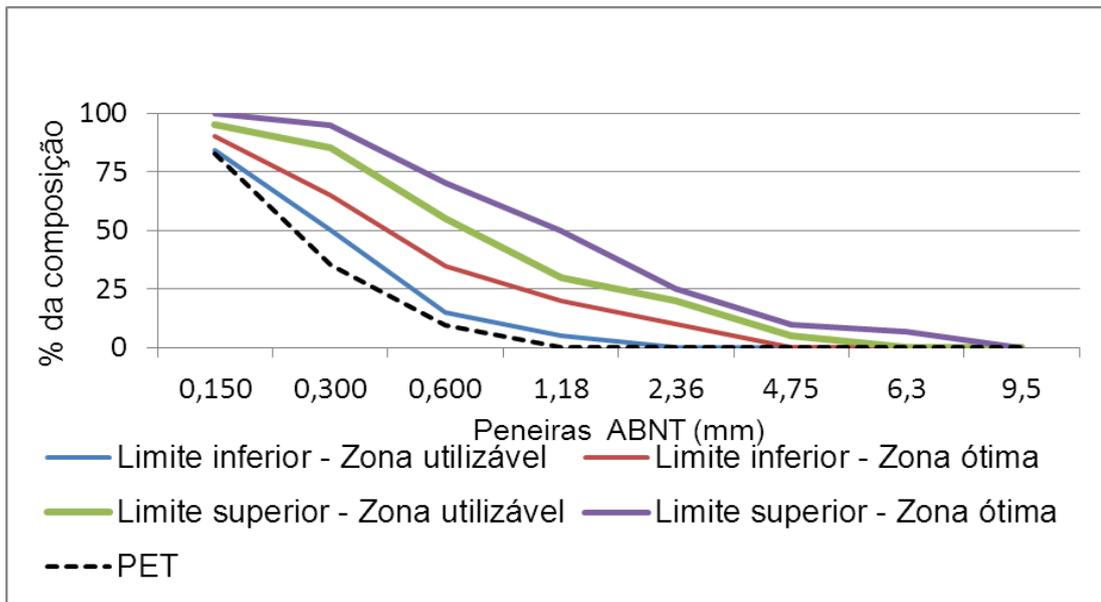
### 4.1 Caracterização dos agregados

A granulometria dos agregados foi determinada usando-se a serie normal de peneiras.

#### 4.1.1 Politereftalato de Etileno (PET)

O resultado deste ensaio pode ser visto na Figura 4.1 que relaciona composição (%) com aberturas das peneiras.

Figura 4.1- Distribuição granulometria do Politereftalato de Etileno (PET)



Fonte: Arquivo do Autor (2012).

Os resultados da granulometria da Figura 4.1 encontraram-se abaixo do limite inferior prescrito pela norma da ABNT NBR 7211/2009.

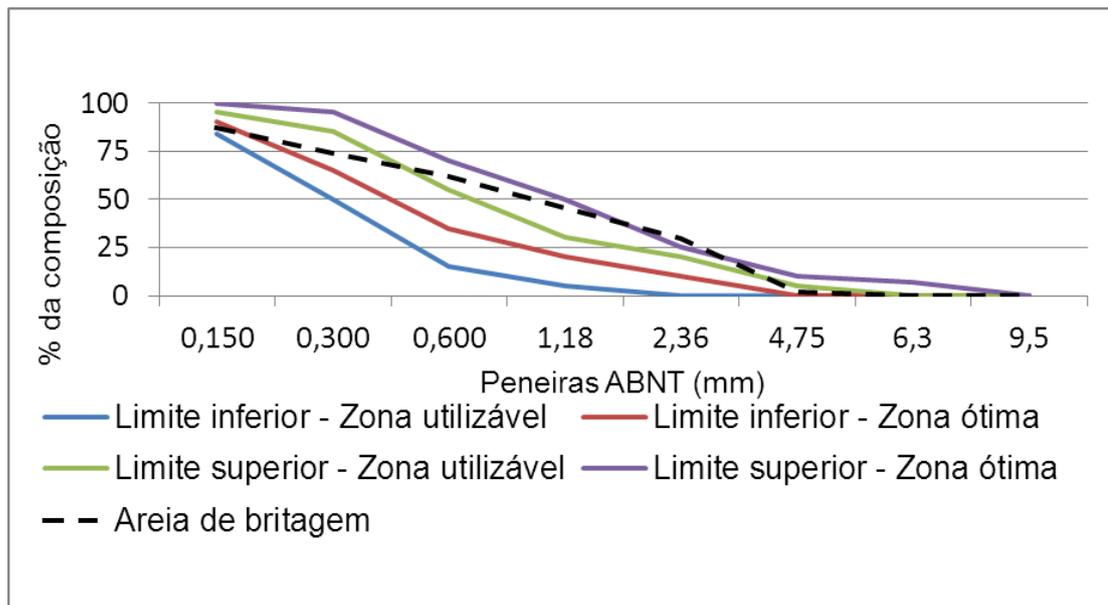
A Tabela 4.1 apresenta módulo de finura com 1,29 mm e a dimensão máxima (D. máx) de 0,60 mm. A massa unitária no estado solto e no estado compactado foram de 629 kg/m<sup>3</sup> e 768 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

A absorção de água do PET foi determinada tomando-se como parâmetro a norma da ASTM D570/2010, obtendo o percentual de 56,23%. O PET utilizado no ensaio tem a forma granular.

#### 4.1.1.2 Areia de britagem

O resultado deste ensaio pode ser visto na Figura 4.2, que relaciona composição (%) com aberturas das peneiras.

Figura 4.2 - Distribuição granulometria da areia de britagem



Fonte: Arquivo do Autor (2012).

De acordo com a Figura 4.2, os resultados da granulometria com a peneira 2,36 mm, o percentual da composição ficou acima do limite superior, descrito pela a norma da ABNT NBR 7211/2009.

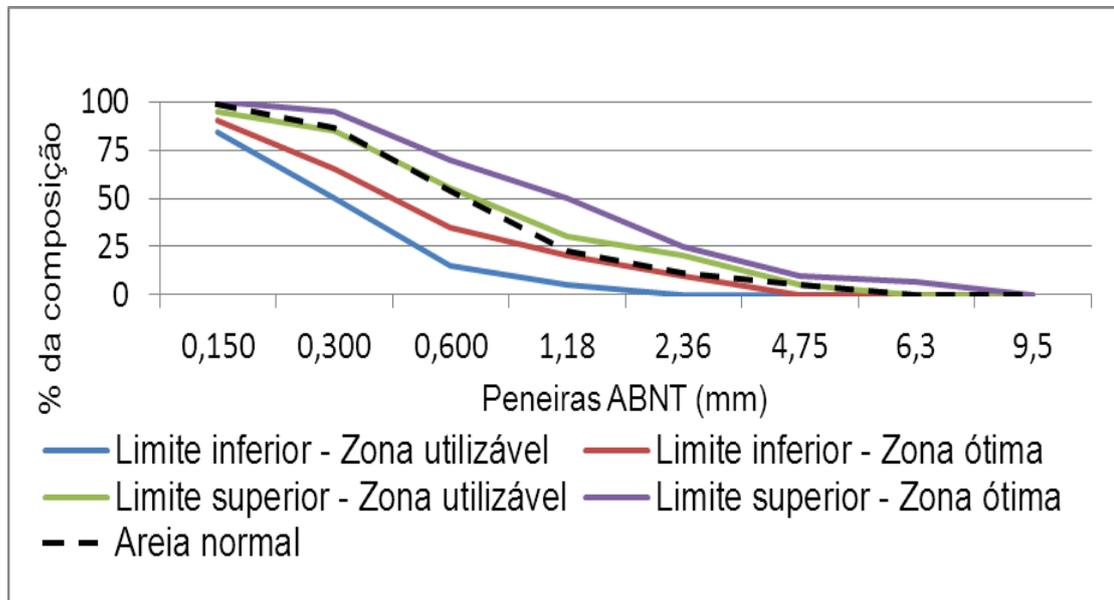
A Tabela 4.1 apresenta o módulo de finura com 2,61 mm e a dimensão máxima (D. máx) de 6,30 mm. A massa unitária no estado solto e compactado foi de 1548 kg/m<sup>3</sup> e 1707 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

A absorção de água apresentou percentual de 3,86%. A massa específica do agregado seco, a massa específica do agregado de superfície saturada seca e de massa específica foram de 2,48 g/cm<sup>3</sup>; 2,54 g/cm<sup>3</sup> e 2,65 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. O material pulverulento apresentou percentual de 11%, ficou inferior a 12%, estabelecido pela norma da ABNT NM 46.

#### 4.1.1.4 Areia natural

A Figura 4.3 apresenta a granulometria da areia natural.

Figura 4.3 - Distribuição granulometria da areia normal



Fonte: Arquivo do Autor (2012).

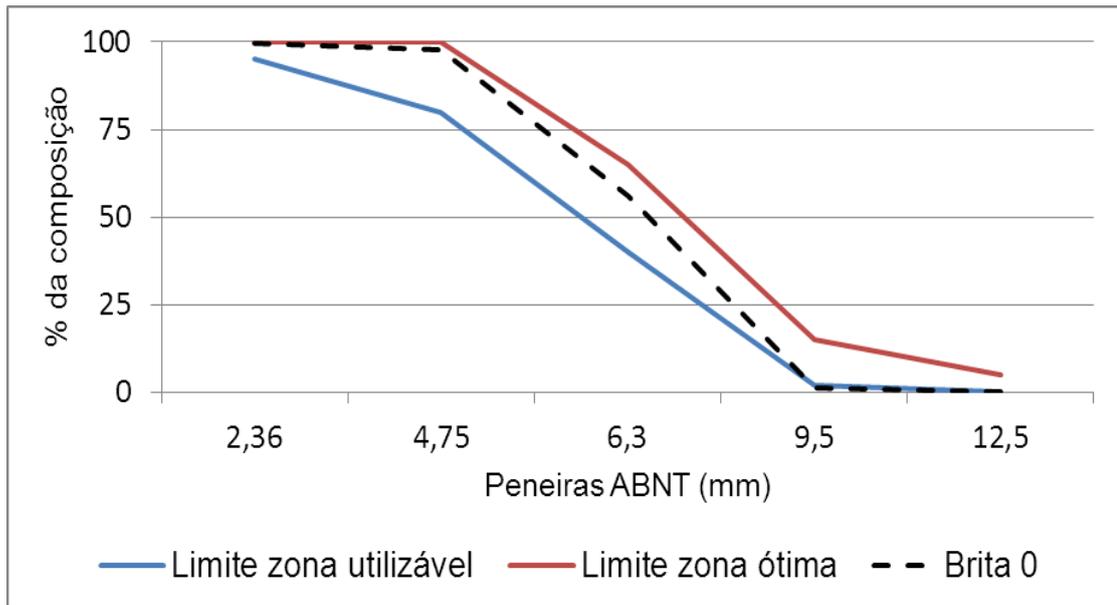
O agregado de areia normal permaneceu com valores um pouco acima da zona superior - zona ótima com peneiras (0,15; 0,30 e 0,60 mm); em seguida, mudou de direção com peneiras (1,18 e 2,36 mm), percorrendo paralela ao limite inferior - zona ótima, conforme prescrito pela norma da ABNT NBR 7211/2009.

A Tabela 4.1 apresenta o módulo de finura, que foi de 2,80 mm e a dimensão máxima (D. máx) de 4,75 mm. A massa unitária no estado solto e compactado foi de 1463 kg/m<sup>3</sup> e 1579 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. A absorção de água apresenta o percentual de 2,59%. A massa específica foi de 2,49 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.1.3 Brita "0"

A Figura 4.4 apresenta a granulometria da brita 0.

Figura 4.4 - Distribuição granulometria da brita 0



Fonte: Arquivo do Autor (2012).

A composição granulométrica encontra-se dentro dos limites superior e inferior, conforme prescrito pela norma da ABNT NBR 7211/2009.

A Tabela 4.1 apresenta o módulo de finura, que foi de 5,92 mm e a dimensão máxima (D. máx) de 9,50 mm. A massa unitária no estado solto e compactado foi de 1338 kg/m<sup>3</sup> e 1436 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. A absorção de água apresentou percentual de 0,47%.

A massa específica do agregado seco, a massa específica do agregado superfície saturada seca e massa específica foi de 2,61 g/cm<sup>3</sup>; 2,69 e 2,72 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. O ensaio Los Angeles que mede o desgaste sofrido por agregado graúdo apresentou 45,2, ficando abaixo de 50% estabelecido pela norma da ABNT NM 46.

A Tabela 4.1 apresenta uma síntese dos resultados referentes às caracterizações dos agregados utilizados neste trabalho de pesquisa, tais como análise granulométrica, massa unitária no estado solto e estado compactado, absorção de água; massa específica do agregado seco, superfície saturada seca, massa específica, Los Angeles e material pulverulento.

Tabela 4.1 - Apresenta as normas, ensaios, unidades e resultados dos agregados

NORMAS	ENSAIOS	Unidades	PET	Areia		Brita 0		
				Britagem	Normal			
NBR NM 248/2003	Granulometria	Módulo de finura (MF)	mm	1,29	2,61	2,80	5,92	
		Dimensão máxima (D. máx)	mm	0,600	6,30	4,75	9,50	
NBR NM 45/2006	Massa unitária - estado solto		kg/m <sup>3</sup>	629	1548	1463	1338	
		Massa unitária - estado compactado		kg/m <sup>3</sup>	768	1707	1579	1436
ASTM - D570/2010 ( <sup>o</sup> )	Absorção de água		%	56,23	3,86 ( <sup>o</sup> )	2,59 ( <sup>o</sup> )	0,47 ( <sup>o</sup> )	
NBR NM 30/2000 ( <sup>o</sup> )								
NBR NM 53/2009								
NBR NM 53/2009	Massa específica do agregado seco		g/cm <sup>3</sup>	-	2,48	-	2,61	
		Massa específica S.S.S.		g/cm <sup>3</sup>	-	2,54	-	2,69
		Massa específica		g/cm <sup>3</sup>	-	2,65	2,49	2,72
NBR NM 51/2001	Los Angeles		%	-	-	-	45,2	
NBR NM 46/2003	Material pulverulento		%	-	11	-	-	

Fonte: Arquivo do Autor (2012).

Os ensaios realizados neste trabalho de pesquisa seguiram os procedimentos das normas da ABNT e da ASTM.

#### 4.1.1.5 Mistura (Brita 0 / Areia de britagem)

Para a caracterização da mistura dos agregados Brita 0 (B0) e da Areia de britagem (AB) foram realizadas 7 (sete) proporções conforme apresenta a Tabela 4.2, obtendo-se a massa unitária no estado solto e compactado, de acordo com a norma da ABNT NBR NM 45/2006.

Tabela 4.2 - Caracterização da Mistura (Brita 0 / Areia de britagem) dos agregados no estado solto e compactado

Proporção B0/AB	Mistura dos agregados no estado	
	Solto (kg)	Compactado (kg)
60/40	1577,7	1685,4
50/50	1582,3	1698,4
48/52	1591,4	1707,0
46/54	1601,9	1738,2
44/56	1615,3	1752,8
42/58	1628,7	1781,5
40/60	1615,9	1772,6

Legenda: Brita 0 (B0) e Areia de britagem (AB)

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Com as proporções de mistura B0/AB (brita 0/areia de britagem) citadas na Tabela 4.2; observa-se aumento gradativo no valor da massa da mistura no estado

solto e compactado até atingir a proporção 42/58. Durante o incremento da proporção houve diminuição dos vazios da mistura. Com a proporção 40/60 verificou-se que houve diminuição no valor da massa unitária no estado solto e compactado. Isso ocorreu devido à substituição da massa específica de maior da B0 (2,72 g/cm<sup>3</sup>) pela massa específica da AB (2,65 g/cm<sup>3</sup>) com menor valor, conforme está apresentado na Tabela 4.1.

#### 4.2 Análise química (AQ)

A composição química da areia de britagem foi calculada por dois métodos conforme apresentado na Tabela 4.3 seguido dos métodos, composição, símbolos e do percentual atribuído.

Tabela 4.3 - Composição química da areia de britagem, por análise química e por EDX

Método	Composição (%)								
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	RI	PF
Análise química	64,90	2,71	17,08	0,56	0,60	0,60	0,80	12,48	0,17
EDX	59,52	6,99	16,88	5,18	0,10	1,56	4,05	-	-

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

A análise química apresentou dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) com valor de 64,90%, trióxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com 17,08%, óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) com 0,80%, óxido de magnésio (MgO) com 0,60%, óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) com 0,80%, óxido de cálcio (CaO) com 0,56%, resíduo insolúvel com 12,48% e perda ao fogo (PF) 0,17%.

A análise da composição por EDX apresentou: dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) com valor de 59,52%; trióxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com 6,99%; trióxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com 16,86%; óxido de cálcio (CaO) com 5,18%; óxido de magnésio (MgO) com 0,10%; óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) com 1,56% e óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) com 4,05; o equipamento não registrou a presença do Carbono.

Os dados obtidos da composição da areia de britagem por análise química e por EDX apresentam semelhanças e corroboram com os dados do autor (2012).

### 4.3 Caracterização estrutural

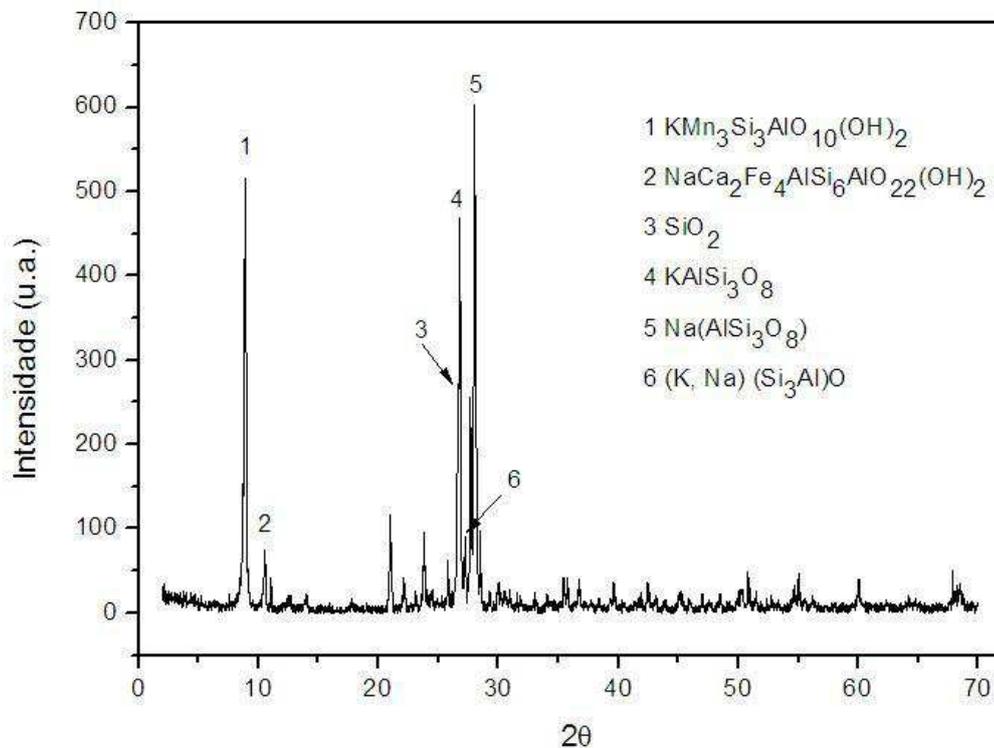
#### 4.3.2 Difração de Raios-X

Os difratogramas das Figuras 4.5 e 4.6 foram analisados utilizando o banco de cristalografia da *Joint Committee on Powder Diffraction - International Centre for Diffraction Data (JCPDS - ICDD)*.

##### 4.3.2.1 Areia de britagem

A Figura 4.5 apresenta o difratograma da areia de britagem.

Figura 4.5 - Difratograma da areia de britagem



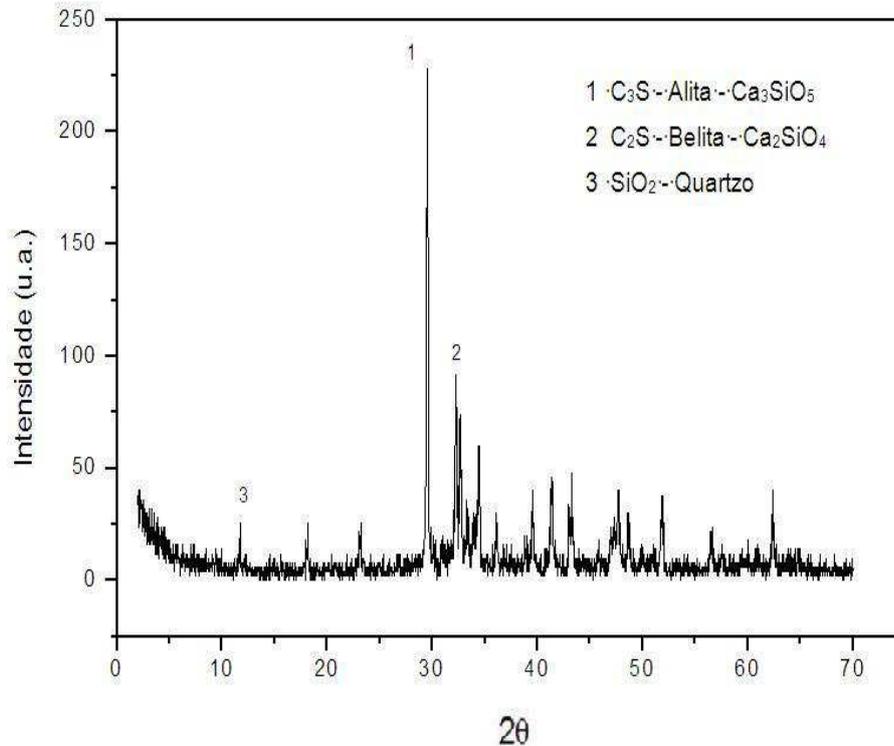
Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

A análise da areia de britagem identificou seis fases cristalográficas. Cada composto identificado está associado com o seu pico principal de difração. Os picos em  $26,8^\circ$  e  $27,2^\circ$  estão associados respectivamente nesta ordem às fases  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  e  $(\text{K, Na})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}$ . Estes dois constituintes minerais foram também encontrados nas britas estudadas por Souza (2007). O pico de maior intensidade em  $28,9^\circ$  coincide com a fase  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ .

#### 4.3.2.2 Cimento CP II F-32

A Figura 4.6 apresenta o difratograma do cimento CP II F-32.

Figura 4.6 - Difratograma de Raios-X do cimento CP II F-32



Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

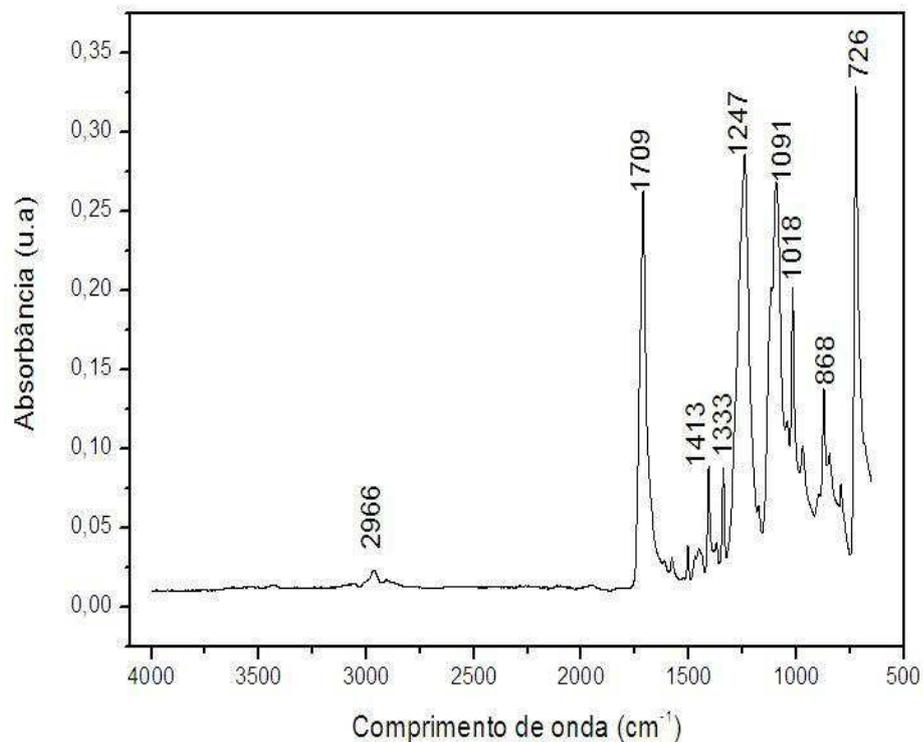
O difratograma do cimento CP II F-32 da Figura 4.6 contém a presença de Alita -  $C_3S$  (silicato tricálcico), Belita -  $C_2S$  (silicato dicálcico) e Quartzo -  $SiO_2$  (óxido de silício). As fases  $C_3S$  (silicato tricálcico) e  $C_2S$  que são os dois principais constituintes do cimento na forma de Clínquer (CINCOTTO, 2011). Foram identificadas simultaneamente nos picos situados em  $29,5^\circ$  e  $32,7^\circ$ . O constituinte comum na composição dos cimentos CPII F-32 também foi identificado como tendo seu pico principal coincidindo com fase  $C_3S$  em torno de  $29,5^\circ$  e em  $11,5^\circ$  de acordo com o banco de dados JCPDS coincide com a carta de identificação da fase  $SiO_2$ .

### 4.4 Caracterização espectrométrica

#### 4.4.1 Espectroscopia Vibracional de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)

A Figura 4.7 apresenta a absorção no infravermelho (FT-IR) do PET

Figura 4.7 - Espectrometria vibracional de absorção no infravermelho (FT-IR) do PET



Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

O espectro de infravermelho do PET (Figura 4.7) indica a existência de várias estruturas funcionais típicas existentes na cadeia do PET, destacando-se as seguintes bandas características: em aproximadamente  $3000\text{ cm}^{-1}$ , identificada pela vibração de deformação axial do grupo ( $=\text{C-H}$ ), presentes em compostos aromáticos (benzeno); em  $1709\text{ cm}^{-1}$  estiramento  $\text{C=O}$  de ácido carboxílico, indicativo da banda; em  $1247\text{ cm}^{-1}$  estiramento  $\text{C(O)-O}$  de grupos éster; em  $1091$  e em  $1018\text{ cm}^{-1}$  indicativo de estiramento da ligação  $\text{C-O}$  e aproximadamente  $726\text{ cm}^{-1}$  deformação angular dos carbonos dissubstituídos no anel aromático. Os dados encontrados neste trabalho corroboram com os encontrados por Benosman et al. (2012).

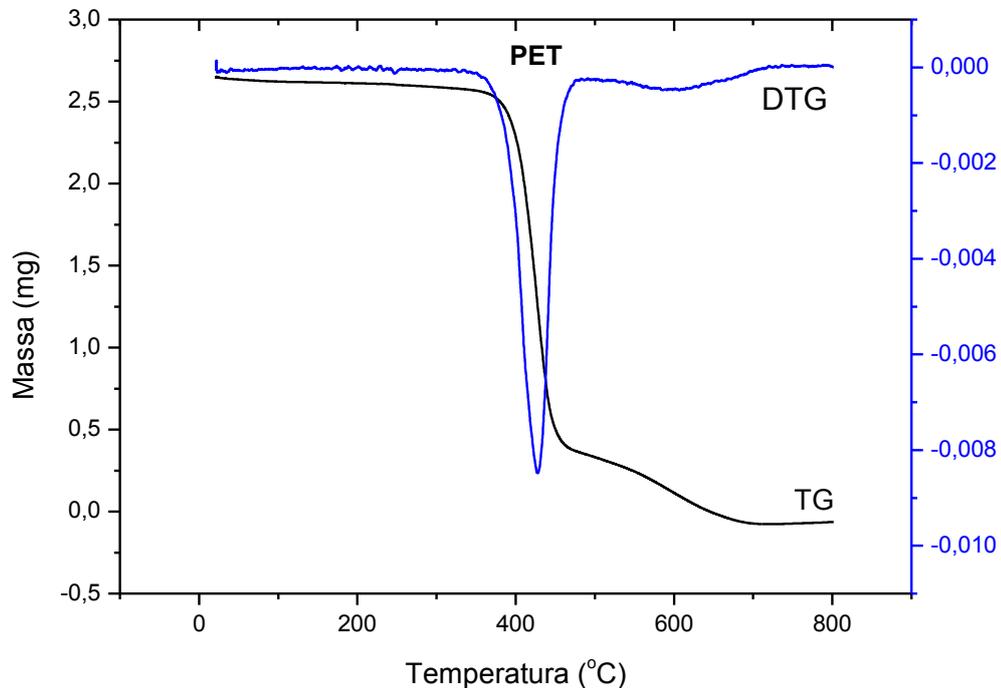
## 4.5 Caracterização térmica

### 4.5.1 Termogravimetria (TG)

#### 4.5.1.1 Resíduo de PET

A Figura 4.8 apresenta os perfis das curvas TG/DTG do PET.

Figura 4.8 - Curvas TG/DTG do PET, obtida na razão de aquecimento de 10°C/min, em atmosfera de Nitrogênio.



Fonte: Arquivo do Autor (2012).

Observa-se na Figura 4.8 que o PET apresentou três etapas de perda de massa, as quais foram analisadas pelo uso do software TA 60, encontram-se no Apêndice C.

A Tabela 4.4 apresenta as temperaturas e a perda de massa nas duas etapas de decomposição térmica do PET.

Tabela 4.4 - Decomposição térmica do PET, obtidos em razão de aquecimento de 10°C/min.

Etapas	Temperatura			Perda de massa	
	Inicial (Ti)	Pico (Tp)	Final (Tf)	(mg)	(%)
I	30	-	350	0,07	2,8
II	350	422	490	2,22	83
II	490	591	714	0,42	16

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se na Tabela 4.4 que a primeira etapa de decomposição teve início a 30°C e fim em 350°C, o que corresponde a uma perda de massa de 2,8 mg (2,8%), na segunda etapa a perda foi de 2,22 mg (83%), entre as temperaturas de 350°C até

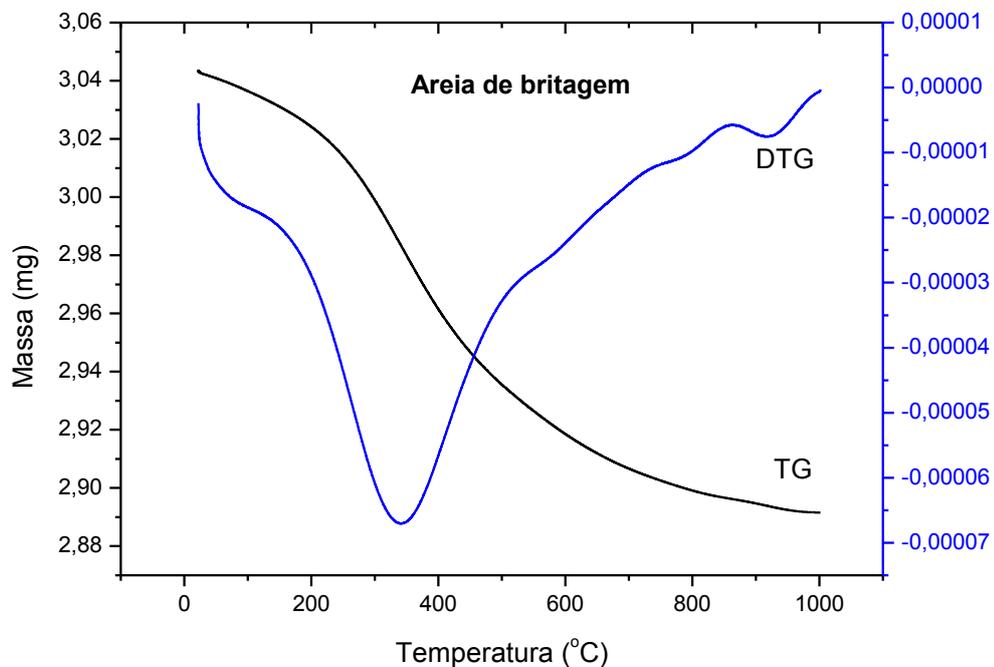
490°C com temperatura de pico em 422°C e na terceira etapa a perda foi de 0,42 mg (16%), entre as temperaturas de 490°C até 714°C com temperatura de pico em 591°C.

A perda de massa ocorreu prioritariamente devido à decomposição do PET. Este resultado está em consonância com os estudos realizados por *Netzsch-Gerätebau GmbH* (2012) e corroboram com Rosmaninho (2005).

#### 4.5.1.2 Areia de britagem

A Figura 4.9 apresenta os perfis das curvas TG/DTG da areia de britagem.

Figura 4.9 - Curva TG/DTG da Areia de britagem, obtida a razão de aquecimento de 10°C.min<sup>-1</sup>, em atmosfera de Nitrogênio.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se que a areia de britagem apresentou duas etapas de perda de massa, as quais foram analisadas pelo uso do software TA 60, que encontra-se no Apêndice D.

A Tabela 4.5 apresenta as temperaturas e perda de massa nas duas etapas de decomposição térmica da areia de britagem.

Tabela 4.5 - Decomposição térmica da areia de britagem, obtidos em razão de aquecimento de 10°C/min.

Etapas	Temperatura			Perda de massa	
	Inicial (Ti)	Pico (Tp)	Final (Tf)	(mg)	(%)
I	30	307	500	0,10	3,4
II	500	622	980	0,05	1,4

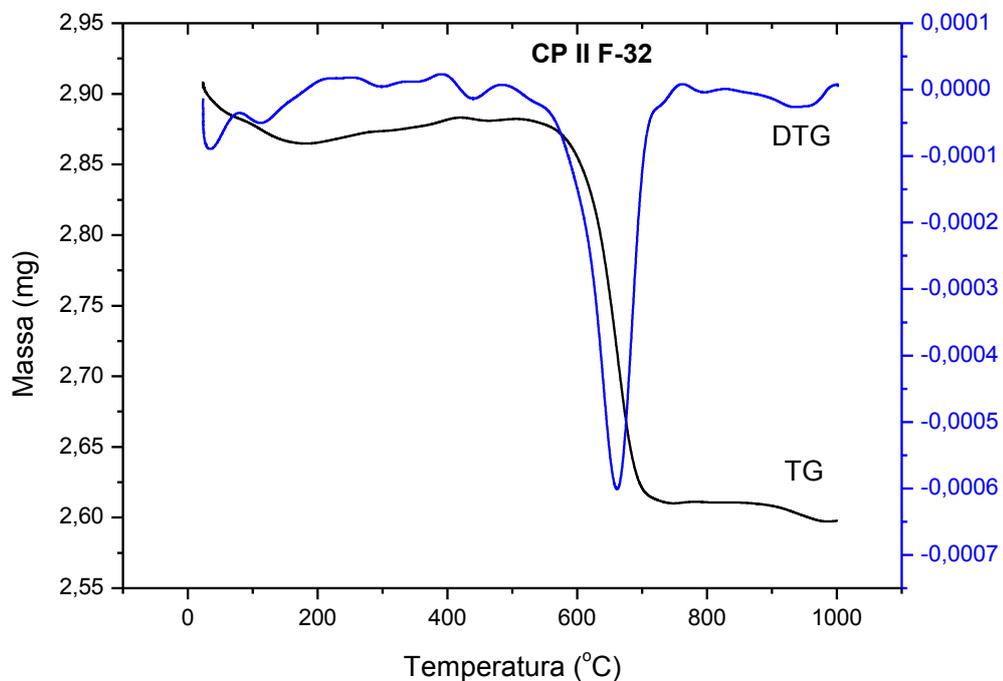
Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se na Tabela 4.5 que a primeira etapa de decomposição teve início a 30°C e fim em 500°C, com temperatura de pico em 307°C, o que corresponde a uma perda de massa de 0,10 mg (3,4%) e na segunda etapa a perda foi de 0,05 mg (1,4%), entre as temperaturas de 500°C até 980 °C com temperatura de pico em 622°C.

#### 4.5.1.3 Cimento CP II F-32

A Figura 4.10 apresenta os perfis das curvas TG/DTG do cimento CP II F-32.

Figura 4.10 - Curva TG/DTG do cimento CP II F-32, obtida à razão de aquecimento de 10°C/min, em atmosfera de Nitrogênio



Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se que o cimento CP II F-32 apresentou duas etapas de perda de massa, forma analisadas pelo uso do software TA 60 e encontram-se no Apêndice E.

A Tabela 4.6 apresenta as temperaturas e perda de massa nas três etapas de decomposição térmica do cimento CP II F-32.

Tabela 4.6 - Decomposição térmica do CP F-32, obtidos em razão de aquecimento de 10°C/min.

Etapas	Temperatura			Perda de massa	
	Inicial (Ti)	Pico (Tp)	Final (Tf)	(mg)	(%)
I	30	38	510	0,01	0,6
II	510	653	770	0,27	9,2
	770	930	980	0,01	0,4

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se na Tabela 4.6 que a primeira etapa de decomposição teve início a 30°C e fim em 510°C, com temperatura de pico em 38°C, o que corresponde a uma perda de massa de 0,01 mg (0,6%) e na seguida etapa a perda foi de 0,27 mg (9,2%), entre as temperaturas de 510°C até 770°C com temperatura de pico em 653°C. Na terceira etapa a perda foi de 0,01 mg (0,4%), entre as temperaturas de 770°C até 930°C com temperatura de pico em 930°C.

Gonçalves; Toledo Filho, Fairbairn (2008), realizaram um estudo sobre hidratação de pastas de cimento Portland e dentre as análises executadas na pesquisa, o resultado de TG apresentam perda de massa total do cimento de 5,42%, com temperatura compreendida entre 105°C a 1000°C. A perda de massa encontrada corrobora com a norma da ABNT NBR 11578/1997, que especifica o limite de perda ao fogo  $\leq 6,5\%$ .

#### 4.6 Caracterização do concreto fresco com areia de britagem

Com o compósito no estado fresco foram realizados ensaios de consistência pelo abatimento do tronco de cone e consistência pelo espalhamento na Mesa de Graff.

Os concretos frescos que não se encontravam dentro da zona plástica foram descartados.

Durante o experimento foi ampliado o percentual de PET para 20%, uma vez que a quantidade de água possibilitou a adição de substituição. Os traços foram definidos conforme apresentado na primeira etapa de composição dos concretos.

A Tabela 4.7 apresenta a designação dos traços unitários moldados na segunda fase.

Tabela 4.7 - Traço 1:4 Designação dos traços unitários do compósito

		Designação do traço unitário						
Traço 1:m	PET %	(1)	:	(a)	:	(b)	:	(c)
1:4	Padrão	1	:	2,32	:		:	-
	5	1	:	2,20	:		:	0,11
	10	1	:	2,08	:	1,68	:	0,23
	15	1	:	1,97	:		:	0,34
	20	1	:	1,85	:		:	0,46
1:3	Padrão	1	:	1,74	:		:	-
	5	1	:	1,65	:		:	0,08
	10	1	:	1,56	:	1,26	:	0,17
	15	1	:	1,47	:		:	0,26
	20	1	:	1,69	:		:	0,04

Legenda: cimento (1) : areia de britagem (a) : brita 0 (b) : PET (c) : fator água/cimento (a/c)

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

#### 4.6.1 Tronco de cone

A Tabela 4.8 apresenta os valores da consistência pelo abatimento do tronco de cone dos traços 1:3 e 1:4, conforme procedimento da norma da ABNT NBR NM 67/1998.

Tabela 4.8 - Consistência pelo abatimento do tronco de cone com areia de britagem dos Traços 1:3 e 1:4, fator a/c

Traço 1:m	Fator água / cimento (a/c)	%PET				
		Padrão	5	10	15	20
1:3	0,55	100	160	110	100	40
	0,58	130	150	130	120	70
	0,61	180	200	190	140	120
1:4	0,61	85	40	20	15	10
	0,64	100	75	50	40	35
	0,67	170	95	90	70	60

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Na consistência pelo abatimento com tronco de cone do traço 1:4 com o fator a/c 0,61; 0,64 e 0,67 do compósito padrão com 0% de PET observa-se consistência com 85, 100 e 170 mm, respectivamente e com 5%, 10%, 15 e 20% de substituição

de PET; com acréscimo do fator a/c houve alteração da consistência. Possivelmente o acréscimo de PET influenciou na consistência devido a sua área específica.

Em relação a consistência pelo abatimento com tronco de cone do traço 1:3 com o fator a/c 0,55; 0,58 e 0,61 do compósito padrão com 0% de PET, observa-se consistência com 100, 130 e 180 mm, respectivamente; com 5%, 10%, 15 e 20% de substituição de PET e com acréscimo do fator a/c houve alteração da consistência. Possivelmente o acréscimo de PET influenciou na consistência devido a sua área específica. Estes resultados estão de acordo com os estudos obtidos por Petrucci (1997).

#### 4.6.2 Mesa de Graff

##### 4.6.2.1 Consistência do concreto pelo espalhamento

A Tabela 4.9 apresenta os valores da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff, traços 1:3 e 1:4, conforme procedimento da norma da ABNT NBR NM 68/1998.

Tabela 4.9 - Consistência do concreto pelo espalhamento em Mesa de Graff com areia de britagem, traços 1:3 e 1:4 e fator a/c

Traço 1:m	Fator água / cimento (a/c)	%PET				
		Padrão	5	10	15	20
		Consistência (mm)				
1:3	0,55	495	475	405	375	325
	0,58	505	495	470	425	420
	0,61	530	525	495	445	435
1:4	0,61	360	320	310	300	290
	0,64	415	405	330	315	310
	0,67	480	440	410	405	385

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

No traço 1:3 com fator a/c 0,55; 0,58 e 0,61 os valores do espalhamento foram decrescentes à medida que foi acrescentado o PET. No traço 1:4 com fator a/c 0,61; 0,64 e 0,67 os valores do espalhamento foram decrescentes. À medida que se acrescentou PET o espalhamento diminuiu, provavelmente reteve partículas de água, proporcionando o não espalhamento.

Com o traço 1:4 o espalhamento foi menor que os valores do traço 1:3, isso devido à influência da massa da mistura. Estes resultados estão de acordo com os estudos obtidos por Petrucci (1997).

#### 4.6.2.2 Fluidez do Concreto

A Fluidez do concreto dos traços 1:3 e 1:4 obtidos pela mesa de Graff, encontra-se apresentada nas Tabelas 4.10, conforme procedimento realizado de acordo com a norma ABNT NBR NM 68/1998.

Tabela 4.10 - Fluidez do concreto com areia de britagem dos traços 1:3 e 1:4 e fator a/c

Traço 1:m	Fator água / cimento (a/c)	%PET				
		Padrão	5	10	15	20
		Fluidez do concreto				
1:3	0,55	2,48	2,38	2,03	1,88	1,63
	0,58	2,53	2,48	2,35	2,13	2,10
	0,61	2,65	2,63	2,48	2,23	2,18
1:4	0,61	1,80	1,60	1,55	1,50	1,45
	0,64	2,08	2,03	1,65	1,58	1,55
	0,67	2,40	2,20	2,05	2,03	1,93

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se no traço 1:3 com fator a/c 0,55, 0,58 e 0,61 e no traço 1:4 com fator a/c 0,61; 0,64 e 0,67 que os valores de fluidez foram decrescendo, e, à medida que houve acréscimo no percentual do PET e ao acrescentar o fator a/c a fluidez aumentou.

### 4.7 Caracterização do concreto fresco com areia normal

Com o compósito no estado fresco foram realizados ensaios de consistência pelo abatimento do tronco de cone e consistência pelo espalhamento na Mesa de Graff.

#### 4.7.1 Tronco de cone

A Tabela 4.11 apresenta os valores da consistência pelo abatimento do tronco de cone, dos traços 1:3 e 1:4, conforme procedimento de acordo com a norma da ABNT NBR NM 67/1998.

Tabela 4.11 - Consistência pelo abatimento do tronco de cone com areia normal e fator a/c

Traço 1:m	Fator água / cimento (a/c)	%PET				
		Padrão	5	10	15	20
		Consistência (mm)				
1:3	0,58	140	150	130	80	40
1:4	0,64	150	90	70	20	0

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

De acordo com a Tabela 4.11, a consistência pelo abatimento com tronco de cone do traço 1:3 com o fator a/c 0,58 do compósito padrão com 0% de PET ficou com consistência com 140 mm. Com 5% de substituição de PET houve diminuição de consistência (ficando baixa) e a cada incremento de substituição do percentual de PET observou-se que a consistência diminuiu. Com o acréscimo do fator a/c a consistência diminuiu. Possivelmente o acréscimo de PET influenciou na consistência devido à sua área específica.

Observando-se a Tabela 4.11, pode-se perceber que a consistência pelo abatimento com tronco de cone do traço 1:4 com o fator a/c 0,64 do compósito padrão com 0% de PET ficou em 150 mm. A cada incremento de substituição do percentual de PET observou-se que a consistência diminuiu. Como em 20% de substituição a consistência foi “0” sendo considerada seca de acordo com a Tabela 2.7, entende-se que possivelmente o acréscimo de PET influenciou na consistência devido à sua área específica e à capacidade do PET absorver água.

#### 4.7.2 Mesa de Graff

##### 4.7.2.1 Consistência do concreto pelo espalhamento

A Tabela 4.12 apresenta os valores da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff dos traços 1:3 e 1:4 conforme procedimento de acordo com a norma da ABNT NBR NM 68/1998.

Tabela 4.12 - Consistência do concreto pelo espalhamento em Mesa de Graff com areia normal dos traços 1:3 e 1:4 e fator a/c

Traço 1:m	Fator água / cimento (a/c)	% PET				
		Padrão	5	10	15	20
		Espalhamento (mm)				
1:3	0,58	480	465	455	440	395
1:4	0,64	535	455	350	305	-

Legenda: “-” não ensaiado devido o ensaio abatimento de tronco de cone ter sido “zero”.  
Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

No traço 1:3 com fator a/c 0,58 o valor do espalhamento foi decrescente, à medida que foi sendo acrescentado PET, o espalhamento diminuiu. Provavelmente o PET reteve partículas de água, evitando o espalhamento.

No traço 1:4 com fator a/c 0,64, o valor do espalhamento foi decrescente. À medida que se foi acrescentando PET, o espalhamento diminuiu. Provavelmente o PET reteve partículas de água, evitando o espalhamento.

#### 4.7.2.2 *Fluidez do Concreto*

A Tabela 4.13 apresenta os valores da fluidez do concreto obtidos pela mesa de Graff dos traços 1:3 e 1:4 conforme procedimento de acordo com a norma da ABNT NBR NM 68/1998.

Tabela 4.13 - Fluidez do concreto dos traços 1:3 e 1:4 e fator a/c com areia normal

Traço 1:m	Fator água / cimento (a/c)	% PET				
		Padrão	5	10	15	20
		Fluidez do concreto				
1:3	0,58	2,40	2,33	2,28	2,20	1,98
1:4	0,64	2,68	2,28	1,75	1,53	-

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

De acordo com a Tabela 4.13, observa-se no traço 1:3 com fator a/c 0,58 e no traço 1:4 com fator a/c 0,64 que os valores de fluidez foram decrescendo, e, à medida que houve acréscimo no percentual do PET, provavelmente o PET reteve partículas de água, evitando a fluidez.

## 4.8 Caracterização do concreto endurecido com areia de britagem

### 4.8.1 Absorção de água

A Tabela 4.14 apresenta a absorção de água do concreto endurecido com as idades de 7, 28 e 91 dias, da composição padrão e com substituição de 5, 10, 15 e 20% de PET. Os ensaios estão de acordo com procedimentos da norma da ABNT NBR 9778/2009.

Tabela 4.14 - Absorção de água com areia de britagem, traços 1:3 e 1:4 e fator a/c

Traço 1:m	Dias	Fator água / cimento (a/c)	% PET				
			Padrão	5	10	15	20
			Absorção de água (%)				
1:3	7	0,55	7,57	7,88	8,43	8,65	9,93
	28		6,91	6,91	7,82	8,35	8,64
	91		8,19	7,99	9,05	9,18	9,98
	7	0,58	8,11	8,84	9,04	9,19	9,97
	28		7,60	8,64	8,43	8,82	9,32
	91		9,00	8,45	8,93	9,63	10,31
	7	0,61	8,94	8,93	8,96	8,97	10,44
	28		7,23	8,33	8,76	9,39	10,00
	91		8,54	9,39	9,47	10,02	10,05
1:4	7	0,61	9,45	7,84	8,34	9,37	9,55
	28		7,56	7,55	8,03	7,87	8,96
	91		8,90	8,23	8,67	9,18	10,49
	7	0,64	7,86	8,95	8,64	9,34	10,14
	28		8,05	7,62	7,56	7,93	8,75
	91		7,67	8,30	8,85	9,56	11,45
	7	0,67	9,99	8,54	9,48	8,40	10,03
	28		9,36	7,93	8,32	8,93	8,85
	91		9,90	8,62	10,02	10,43	11,21

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Na Tabela 4.14 observa-se, nos traços 1:3 e 1:4, com 7 (sete) dias, que a absorção de água foi superior para os três fatores a/c em comparação aos traços correspondentes à idade de 28 (vinte e oito) dias. Com a idade de 91 (noventa e um) dias a absorção de água aumentou nos três fatores de água/cimento.

De acordo com Demaio (1991) *apud* Peters (1998) a absorção de água do PET virgem chega a 1,8% e com o reciclado 2,0%. Isso ocorre devido à sua natureza química. Contudo, esse baixo índice de absorção não se dá no caso de PET micronizado, devido ao fato de o mesmo apresentar superfície com elevada rugosidade, o que acarreta conseqüentemente alto poder de adsorção. Desse fato, decorre a elevada hidrofiliidade por parte desse material. Além do mais, materiais

granulados possuem considerável capacidade de retenção de líquido decorrente da capilaridade.

Ao promover-se o incremento do percentual de PET houve um ganho no valor da absorção de água, devido o módulo de finura de PET ser menor do que o da areia de britagem e conseqüentemente o PET apresentar maior área superficial, concorrendo para a absorção de água.

No traço 1:4 verificou-se que, com o aumento da substituição do percentual de PET houve maior absorção de água, isso devido a diversos fatores interligados, tais como: a quantidade de cimento ser menor e de agregados maior. Isso se deve ao fato de as relações do fator água/cimento e água/aglomerado serem maiores. Esse maior índice de absorção de água é justificado pelo acréscimo de PET, o que proporciona incremento de área superficial.

#### 4.8.2 Índice de vazios com areia de britagem

Na Tabela 4.15 observaram-se os índices de vazios dos traços 1:3 e 1:4 com concretos endurecidos com as idades de 7, 28 e 91 dias, com o concreto padrão e de substituição com 5, 10, 15 e 20% de PET, conforme procedimento de acordo com a norma da NBR NM 9778/2009.

Tabela 4.15 - Índice de vazios, traços 1:3 e 1:4 e fator a/c

Traço 1:m	Dias	Fator água/cimento (a/c)	% PET				
			Padrão	5	10	15	20
			Índice de vazios (%)				
1:3	7	0,55	16,99	16,95	17,80	17,87	20,48
	28		15,43	15,38	16,71	17,34	17,89
	91		18,19	17,62	19,23	19,09	20,57
	7	0,58	18,18	19,21	19,01	19,13	20,46
	28		15,80	15,85	15,61	16,07	19,05
	91		18,16	18,41	19,03	19,68	21,21
	7	0,61	19,29	18,79	18,82	18,52	21,24
	28		14,78	18,08	18,42	19,47	20,18
	91		17,42	20,15	19,77	20,64	20,49
1:4	7	0,61	16,52	16,98	17,86	19,24	19,90
	28		15,41	16,45	17,16	15,94	19,45
	91		19,52	17,81	18,56	19,19	21,89
	7	0,64	18,11	19,54	17,59	19,32	20,68
	28		18,06	16,52	16,18	16,20	19,15
	91		17,30	17,71	18,98	19,80	23,77
	7	0,67	19,83	18,71	19,78	17,59	20,37
	28		20,27	17,29	17,64	18,75	18,21
	91		21,54	18,93	20,88	21,69	22,26

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Com base na Tabela 4.15, nos traços 1:3 e 1:4, observou-se que de um modo geral, ocorre o aumento do índice de vazios com o incremento do percentual de PET e com a idade de cura. Isso é decorrente da inter-relação entre os índices de vazios e a absorção de água. Esse fato pode ser explicado pelo procedimento do ensaio de índice de vazios que leva o concreto ao estado de saturação que em seguida é seco em estufa. Desse modo, tanto o índice de vazios como a absorção de água são decorrentes desse processo.

#### 4.8.3 Massa específica

A Tabela 4.16 apresenta a massa específica da amostra seca do concreto endurecido com as idades de 7, 28 e 91 dias, do concreto padrão e os de substituição com 5, 10, 15 e 20% de PET, conforme traços 1:3 e 1:4.

Tabela 4.16 - Massa específica da amostra seca com areia de britagem dos Traços 1:3 e 1:4 e fator a/c

Traço 1:m	Dias	Fator água/cimento (a/c)	% PET				
			Padrão	5	10	15	20
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )							
1:3	7	0,55	2,15	2,07	2,02	1,96	1,96
	28		2,15	2,15	2,06	1,99	1,97
	91		2,13	2,12	2,03	1,99	1,96
	7	0,58	2,15	2,07	2,05	1,99	1,96
	28		2,06	2,08	2,07	1,97	1,95
	91		2,10	2,10	2,04	1,96	1,95
	7	0,61	2,08	2,02	2,00	1,97	1,94
	28		2,06	2,08	2,01	1,97	1,92
	91		2,06	2,05	2,00	1,95	1,94
1:4	7	0,61	2,04	2,08	2,06	1,96	1,94
	28		2,11	2,09	2,06	1,93	1,97
	91		2,07	2,08	2,05	1,98	1,98
	7	0,64	2,21	2,08	1,96	1,98	1,95
	28		2,18	2,08	2,07	1,97	1,94
	91		2,18	2,00	2,05	1,98	1,92
	7	0,67	2,08	2,10	2,00	1,98	1,95
	28		2,08	2,10	2,04	1,98	1,97
	91		2,07	2,10	1,99	1,98	1,90

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se, na Tabela 4.16, com os traços 1:3 e 1:4, com 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias, que a massa específica diminui com o acréscimo do percentual de PET. Por outro lado, em relação à idade de 91 (noventa e um), dias ocorreu uma leve flutuação de massa específica com acréscimo de PET. Isso provém do fato de o PET possuir menor massa específica do que a areia de britagem.

Os concretos padrões com substituição de PET com 5% e 10% dos traços 1:3 e 1:4 apresentam massa específica normal, e os concretos com 15% e 20% com PET, apresentam consistência leve, de acordo com a norma da ABNT NBR 8953/2009.

#### 4.9 Caracterização mecânica

##### 4.9.1 O fator água/cimento com areia de britagem

O fator água/cimento (a/c) foi realizado neste trabalho de pesquisa sendo determinado nos traços 1:3 e 1:4, conforme apresentado na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Estudo do fator a/c e resistência à compressão simples dos Traços 1:3 e 1:4, com areia de britagem

Traço 1:m	Fator água / cimento (a/c)	% PET			
		Padrão	5	10	15
		MPa			
1:3	0,48	21,10	20,09	(*)	(*)
	0,52	18,45	18,24	17,24	(*)
	0,58	17,94	16,31	16,06	15,90
	0,61	17,40	16,65	16,51	14,72
	0,65	12,62	11,84	10,48	10,21
	0,67	12,40	11,54	10,16	9,52
	0,70	(**)	(**)	9,92	9,40
1:4	0,52	21,80	21,64	17,26	14,55
	0,55	20,78	20,40	17,51	16,50
	0,58	19,61	19,06	16,01	15,12
	0,61	16,22	16,06	15,44	14,80
	0,64	16,13	15,81	14,60	14,38
	0,67	(**)	15,64	13,77	13,08
	0,70	(**)	13,43	12,23	12,44
	0,73	(**)	12,66	11,18	10,54
	0,76	(**)	(**)	11,13	10,26

Legenda: Consistência extremamente seca (\*) e Fluída (\*\*)

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se na Tabela 4.17, que para o traço 1:3 com o fator a/c 0,48 com 10% e 15 % de PET e para o fator a/c 0,52 com 15 % de PET, no amassamento o concreto ficou muito seco, não sendo possível moldar. Com fator a/c 0,70 para o concreto padrão e com 5% de PET, não foi possível moldar devido à fluidez da mesma.

Para o traço 1:4, os valores obtidos com o fator a/c 0,67; 0,70 e 0,73 do concreto padrão e para os fatores a/c 0,76 do concreto padrão e com substituição de

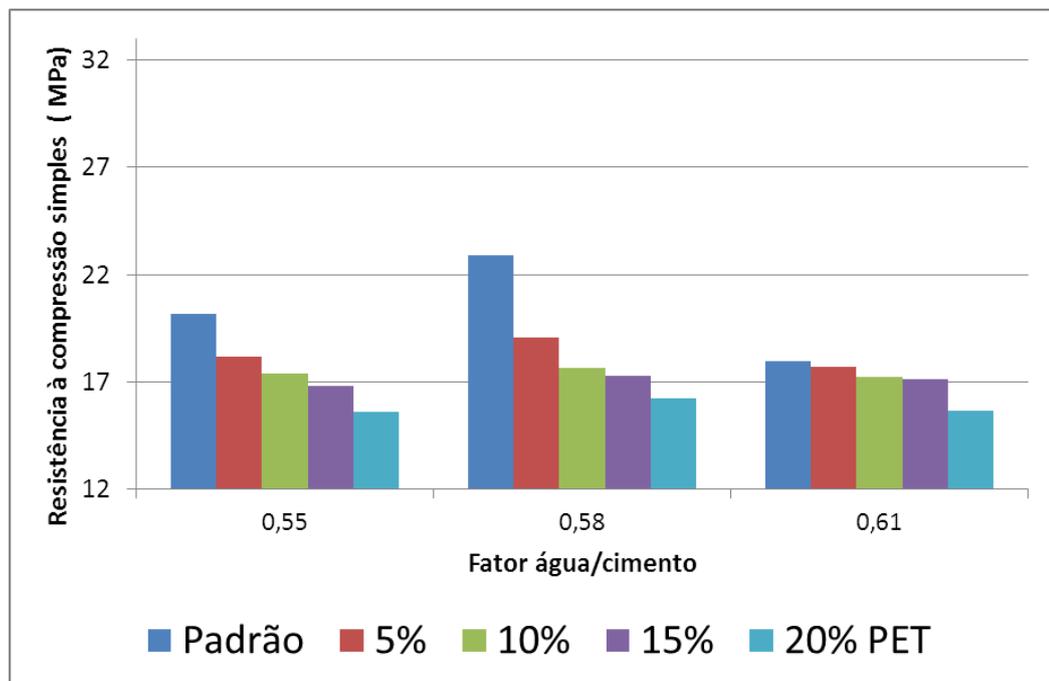
5% de PET, não foi possível moldar devido à fluidez das mesmas. A massa fluida de concreto é inadequada a qualquer uso, conforme estudos de Petrucci (1997),

#### 4.9.2 Resistência à compressão simples com areia de britagem dos traços 1:3 e 1:4

Na segunda etapa deste trabalho de pesquisa verificou-se a resistência à compressão simples dos traços moldados 1:3 apresentados nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 com a/c (0,55; 0,58 e 0,61) e traços moldados 1:4 apresentados nas Figuras 4.14; 4.15 e 4.16 com a/c (0,61; 0,64 e 0,67).

A Figura 4.11 apresenta a resistência à compressão simples do Traço 1:3, cura com 7 (sete) dias, do traço padrão e dos traços com substituição de 5%; 10%; 15% e 20% de PET de areia de britagem.

Figura 4.11 - Resistência à compressão simples do Traço 1:3, cura com 7 dias com areia de britagem

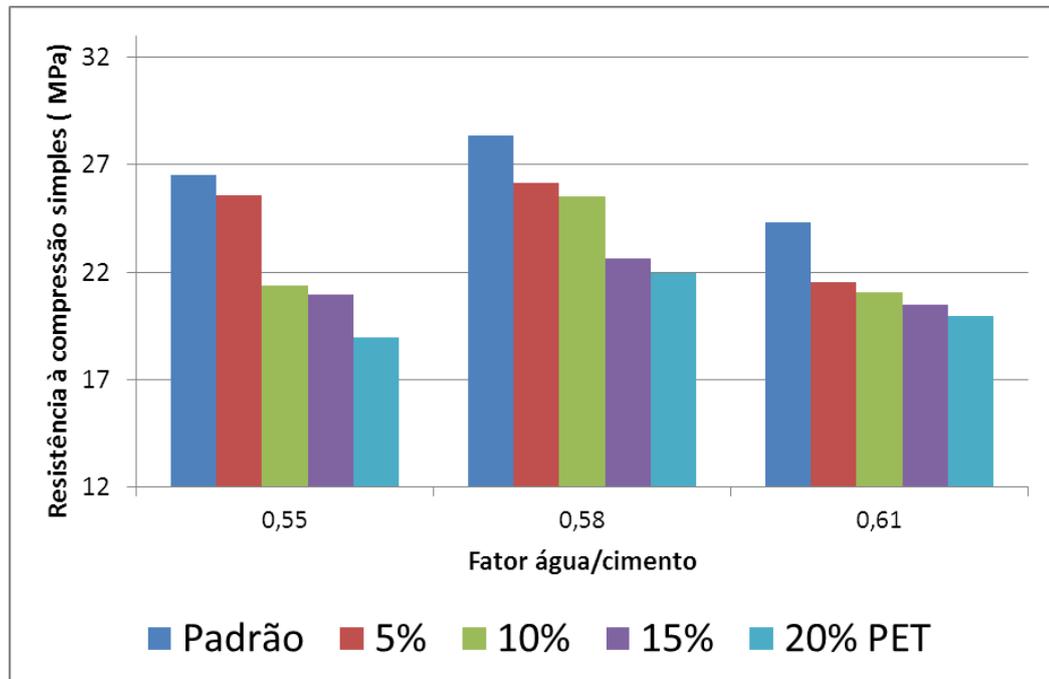


Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se, na Figura 4.11, que a resistência à compressão simples foi expressiva na seguinte ordem do traço padrão com fator a/c 0,58; 0,55 e 0,61. As resistências à compressão simples mais expressivas dos concretos com substituição de 5, 10, 15 e 20% de PET foram observadas com fator a/c 0,58 aos 7 (sete) dias.

A Figura 4.12 apresenta a resistência à compressão simples do Traço 1:3, cura com 28 dias, do traço padrão e dos traços com substituição de 5%; 10%; 15% e 20% de PET com areia de britagem.

Figura 4.12 - Resistência à compressão simples do Traço 1:3, cura com 28 dias com areia de britagem

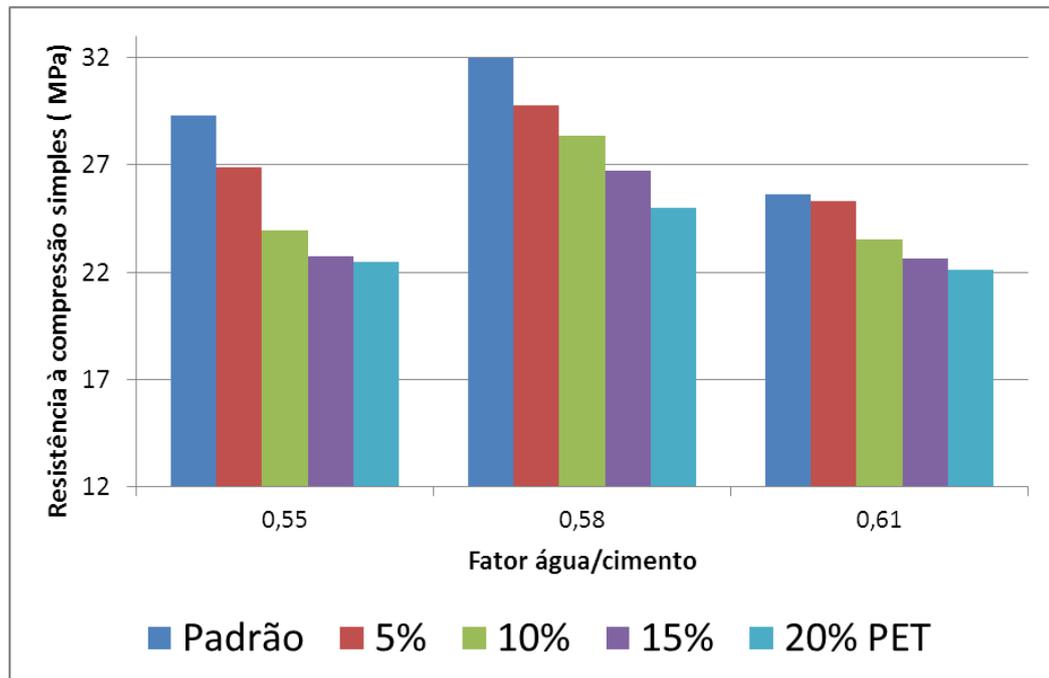


Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se, na Figura 4.12, a resistência à compressão simples foi expressiva na seguinte ordem do traço padrão com fator a/c 0,58; 0,55 e 0,61. As resistências à compressão simples mais expressivas dos concretos com substituição de 5, 10, 15 e 20% de PET, foram observadas com fator a/c 0,58 aos 28 (vinte e oito) dias.

A Figura 4.13 apresenta a resistência à compressão simples do Traço 1:3, cura com 91 dias, do traço padrão e dos traços com substituição de 5%; 10%; 15% e 20% de PET com areia de britagem.

Figura 4.13 - Resistência à compressão simples do Traço 1:3, cura com 91 dias com areia de britagem



Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se na Figura 4.13 que a resistência à compressão simples foi expressiva na seguinte ordem do traço padrão com fator a/c 0,58; 0,55 e 0,61. As resistências à compressão simples mais expressivas dos concretos com substituição (5, 10, 15 e 20%) de PET foram observadas com fator a/c 0,58 aos 91 (noventa e um) dias.

No tocante às classes de resistências de concretos estruturais de concretos do grupo I, os concretos obtidos foram classificados conforme a Tabela 4.18.

A Tabela 4.18 apresenta a classe de resistência e o grupo estrutural para os concretos para Traços 1:3 com fator a/c 0,58; 0,55 e 0,61 com areia de britagem, conforme a norma da ABNT NBR 8953/2009.

Tabela 4.18 - Classes de resistência de concretos estruturais, consistência e massas específicas dos concretos com traços 1:3 com areia de britagem

Traço 1:m	Fator a/c	PET (%)	Classes de resistência	Resistência característica à compressão MPa	Classes de Consistência	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
1:3	0,55	Padrão	C25	25	S50	Normal
		5			S100	
		10	C20	20	-	Leve
		15				
		20	Não estrutural	19	-	
		0,58	Padrão	C25	25	S100
	5					
	10		C20	20	S50	Leve
	15					
	20		Não estrutural	19	-	
	0,61		Padrão	C20	20	S50
		5				
10		C20	20	-	Leve	
15						
20		Não estrutural	19	-		

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se na Tabela 4.18 que houve predominância de concretos com a classe de resistência C20. A classe de resistência à compressão C25 foi verificada no Traço 1:3 com o fator a/c 0,55 do traço padrão e com 5% de PET, com o fator a/c 0,58 no traço padrão e com 5% e 10% de PET. A classe de resistência C20 foi verificada com o fator a/c 0,55 com 10% e 15%; com o fator a/c 15 e 20% de PET e com o fator a/c 0,61 do traço padrão, 5%, 10% e 15% de PET. Os concretos com C25 e C20 foram classificados como do tipo estrutural do grupo I, exceto os concretos com os fatores a/c com 0,55 e 0,61 com 20% de PET.

De acordo com a Tabela 4.18, os concretos que possuem classe de resistência do grupo I, podem ser aplicados em:

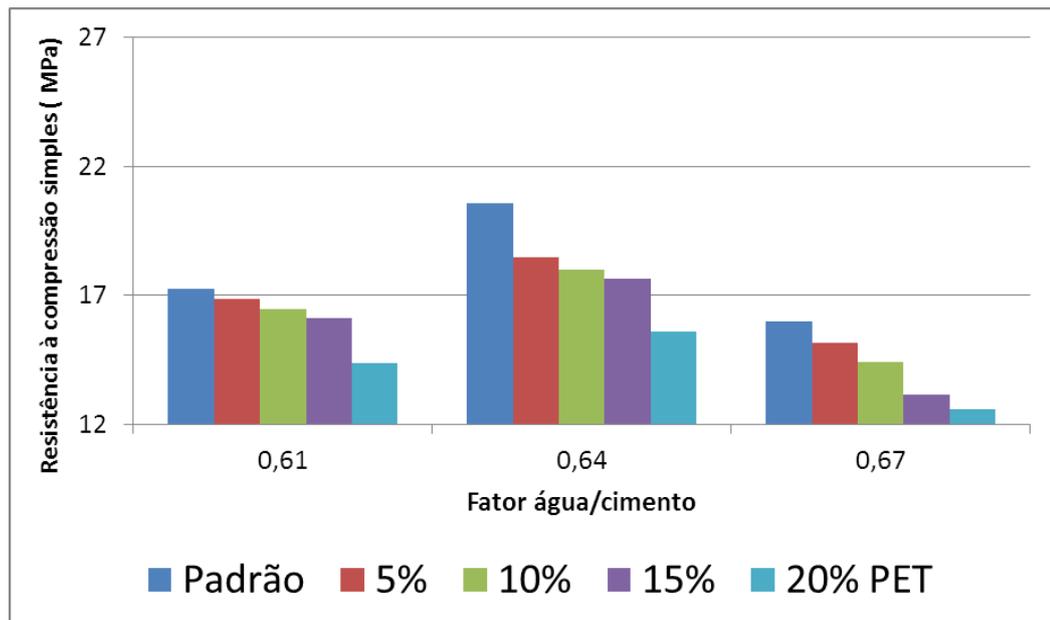
- alguns tipos de pavimentos, de elementos de fundações e de elementos pré-moldados ou pré-fabricados (S50);
- elementos estruturais correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, pisos, com lançamento convencional do concreto (S100).

Observou-se na Tabela 4.18 que as massas específicas normais ocorreram no concreto padrão e nos com substituição de 5% e 10% de PET; e nos concretos com 15% e 20% apresentou massa específica leve, de acordo com no item 4.8.3 e Tabela 4.16.

Com relação ao traço 1:4 da segunda etapa, apresenta o estudo a resistência à compressão simples dos traços moldados 1:4, apresentados nos traços moldados 1:4 apresentados nas Figuras 4.14; 4.15 e 4.16 com a/c 0,61; 0,64 e 0,67.

A Figura 4.14 apresenta a resistência à compressão simples do Traço 1:4, cura com 7 dias, do traço padrão e dos traços com substituição de 5%; 10%; 15% e 20% de PET com areia de britagem.

Figura 4.14 - Resistência à compressão simples do Traço 1:4, cura de 7 dias com areia de britagem

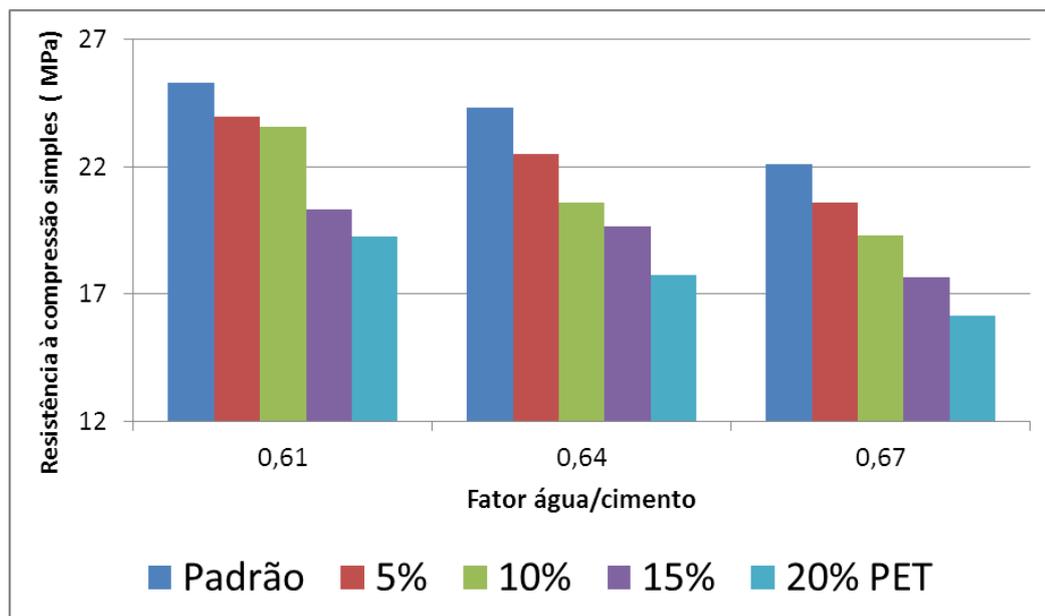


Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se na Figura 4.14 que a resistência à compressão simples foi expressiva na seguinte ordem do traço padrão com fator a/c 0,61; 0,64 e 0,67. As resistências à compressão simples mais expressivas dos concretos com substituição de 5, 10, 15 e 20% de PET, foram observadas com fator a/c 0,58 aos sete (7) dias.

A Figura 4.15 apresenta a resistência à compressão simples do Traço 1:4, cura com 28 dias, do traço padrão e dos traços com substituição de 5%; 10%; 15% e 20% de PET com areia de britagem.

Figura 4.15 - Resistência à compressão simples do Traço 1:4, cura de 28 dias com areia de britagem

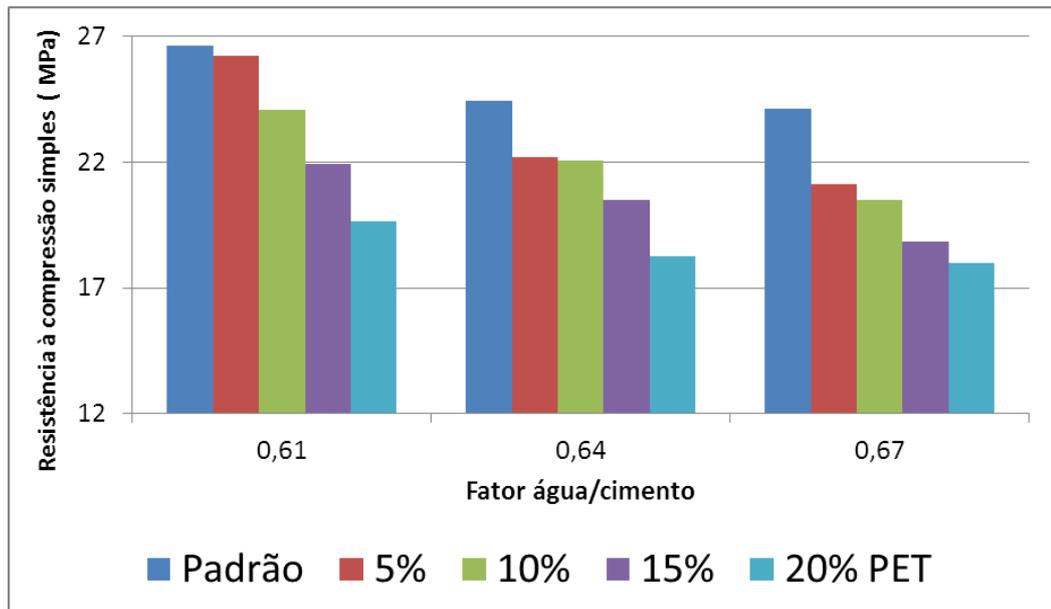


Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se na Figura 4.15 que a resistência à compressão simples foi expressiva na seguinte ordem do traço padrão com fator a/c 0,61; 0,64 e 0,67. As resistências à compressão simples mais expressivas dos concretos com substituição de 5, 10, 15 e 20% de PET, foram observadas com fator a/c 0,61 aos 7 (sete) dias.

A Figura 4.16 apresenta a resistência à compressão simples do Traço 1:4, cura com 91 dias, do traço padrão e dos traços com substituição de 5%; 10%; 15% e 20% de PET com areia de britagem.

Figura 4.16 - Resistência à compressão simples do Traço 1:4, cura com 91 dias com areia de britagem



Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se na Figura 4.16 a resistência à compressão simples foi expressiva na seguinte ordem do traço padrão com fator a/c 0,61; 0,64 e 0,67. As resistências à compressão simples mais expressivas dos concretos com substituição de 5, 10, 15 e 20%) de PET, foram observadas com fator a/c 0,61 aos 7 (sete) dias.

A Tabela 4.19 apresenta a classe de resistência e o grupo estrutural para os concretos para Traços 1:4 com fator a/c 0,61; 0,64 e 0,67 com areia de britagem, conforme a norma da ABNT 8953/2009.

Tabela 4.19 - Classes de resistência de concretos estruturais, consistência e massas específicas dos concretos com traços 1:4 com areia normal

Traço 1:m	Fator a/c	PET (%)	Classes de resistência	Resistência característica à compressão MPa	Classes de Consistência	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	
1:4	0,61	Padrão	C25	25	S50	Normal	
		5	C20	20	S100		
		10					
		15					
	20	Não estrutural	19		Leve		
	0,64	Padrão	5	C20	20	S50	Normal
			10	Não estrutural	19		Leve
		15	17				
		20					
	0,67	Padrão	5	C20	20	S160	Normal
			10	Não estrutural	19	-	
		15	17		-		
20		16	-		Leve		

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se na Tabela 4.19 que houve predominância de concretos com a classe de resistência C20. A classe de resistência à compressão C25 foi verificada no fator a/c 0,61 do traço padrão. A classe de resistência C20 foi verificada com o fator a/c 0,61 com substituição de 5%, 10% e 15% de PET, com o fator a/c 0,64 no traço padrão e com 5%, 10% e 15% de PET e com o fator a/c 0,67 do padrão e 5% de PET. Os concretos com C25 e C20 foram classificados como do tipo estrutural do grupo I, exceto os concretos com os fatores a/c com 0,61 com 20%, 0,64 com 15% e 20% e 0,67 com 10, 15% e 20% de PET, sendo classificados como resistências não estruturais, de acordo com a norma da ABNT 8953/2009.

De acordo com a Tabela 4.19, os concretos possuem classe de resistência do grupo I, e podem ser aplicados em:

- concreto extrusado, vibro prensado ou centrifugado (S10);
- alguns tipos de pavimentos, de elementos de fundações e de elementos pré-moldados ou pré-fabricados (S50);
- estruturas correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, pisos, paredes diafragma, com concreto lançado por bombeamento, estacas escavadas lançadas utilizando caçambas (S160).

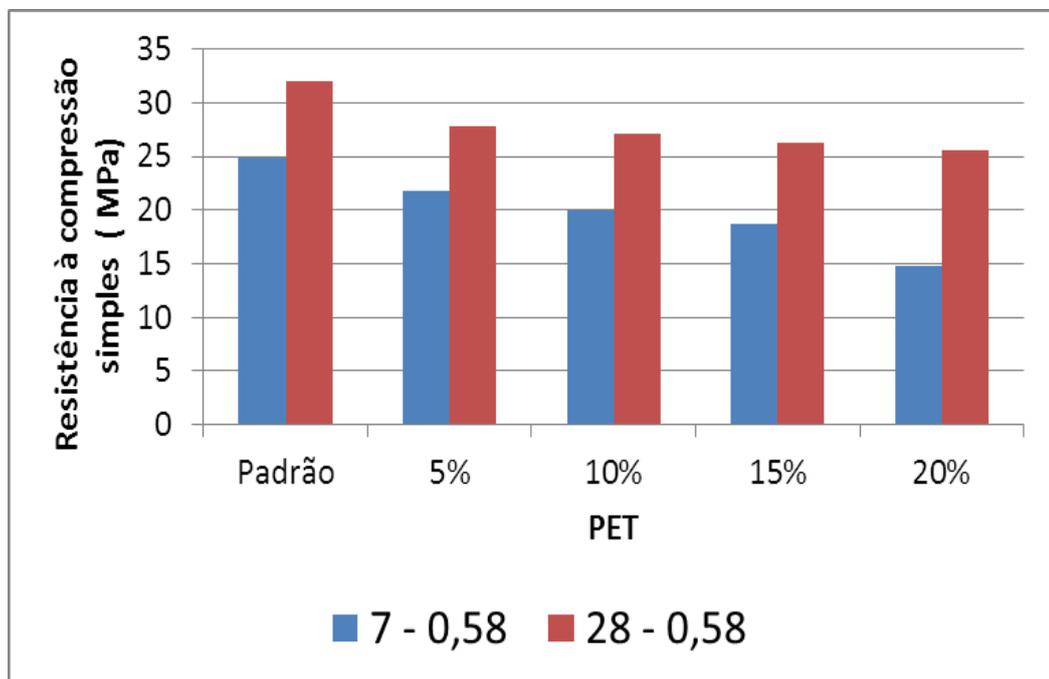
Observou-se na Tabela 4.19 que as massas específicas normais ocorreram no concreto padrão e nos com substituição de 5% e 10% de PET, e com 15% apresentaram massa específica leve, de acordo com o item 4.8.3 e Tabela 4.16.

#### 4.9.3 Resistência à compressão simples com areia normal dos traços 1:3 e 1:4

Na terceira etapa deste trabalho de pesquisa se moldou traços 1:3 e 1:4 para obter a resistência à compressão simples, conforme apresentado nas Figuras 4.17 e 4.18, que apresentam a resistência à compressão simples com idades de cura de 7 e 28 dias.

A Figura 4.17 apresenta a resistência à compressão simples do Traço 1:3, cura com 7 e 28 dias, do traço padrão e dos traços com substituição de 5%; 10%; 15% e 20% de PET com areia de britagem.

Figura 4.17 - Resistência à compressão simples do traço 1:3, cura com idades de 7 e 28 dias com areia normal

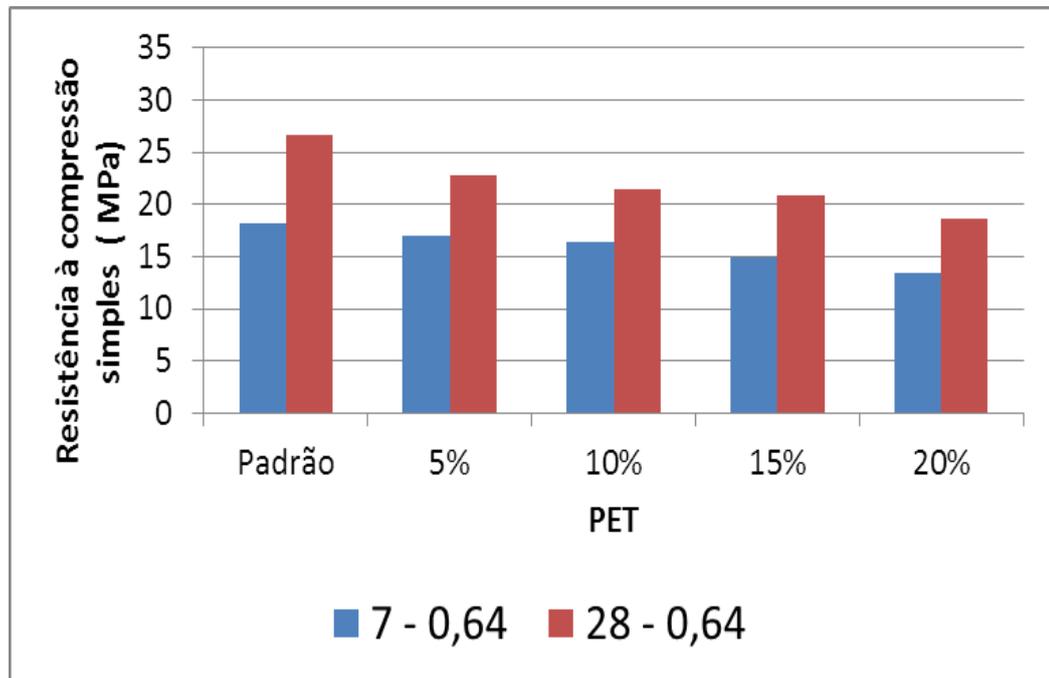


Fonte: Arquivo do Autor (2012).

Observa-se na Figura 4.18, traço 1:4 a resistência à compressão simples foi expressiva em todos os concretos com a idade de 7 e 28 dias. A resistência à compressão simples mais expressivas ocorreu com menores valores de substituição de PET.

A Figura 4.18 apresenta a resistência à compressão simples do Traço 1:4, cura com 7 e 28 dias, do traço padrão e dos traços com substituição de 5%; 10%; 15% e 20% de PET com areia de britagem.

Figura 4.18 - Resistência à compressão simples do traço 1:4, cura com idades de 7 e 28 dias com areia normal



Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se na Figura 4.18 a resistência à compressão simples foi expressiva no traço padrão aos 28 dias e com menores valores de PET foi expressiva com substituição de PET.

A Tabela 4.20 apresenta a classe de resistência e o grupo estrutural para os concretos para os Traços 1:3 e 1:4 com fator  $a/c$  0,58 e 0,64 com areia normal.

Tabela 4.20 - Classes de resistência e consistência dos traços 1:3 e 1:4 com areia normal

Traço 1:m	Fator $a/c$	PET (%)	Resistência à Compressão (MPa)	Classes de Consistência
1:3	0,58	Padrão	C30	S160
		5	C25	S100
		10		S50
		15		
		20		
1:4	0,64	Padrão	C25	S160
		5	C20	S50
		10		S10
		15		
		20		18

Fonte: Elaborado pelo Autor (2012).

Observa-se na Tabela 4.20 que houve predominância de concretos com as classes de resistência C20 e C25. A classe de resistência à compressão C30 foi verificada no fator  $a/c$  0,58 do traço padrão. Os concretos constantes da referida tabela foram classificados como do tipo estrutural do grupo I, exceto os concretos com  $a/c$  0,64 com 20%; sendo classificados da classe de resistência não estruturais, de acordo com a norma da ABNT 8953/2009.

De acordo com a Tabela 4.20, os concretos possuem classe de resistência do grupo I, podem ser aplicados em:

- concreto extrusados, vibro prensado ou centrifugado (S10);
- alguns tipos de pavimentos, de elementos de fundações e de elementos pré-moldados ou pré-fabricados (S50);
- elementos estruturais correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, pisos, com lançamento convencional do concreto (S100);
- estruturas correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, pisos, paredes diafragma, com concreto lançado por bombeamento, estacas escavadas lançadas utilizando caçambas (S160).



## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho de pesquisa foi realizado com o intuito de Desenvolver compósitos cimentícios formados por resíduos de areia de britagem e PET. As diretrizes seguidas foram fundamentadas no estudo da composição dos traços dos concretos no sentido de se estabelecer os melhores parâmetros para os diversos percentuais de substituição, neste contexto, pode-se concluir que:

- **Sobre a caracterização dos agregados:**

- A análise química e análise por emissão de raios-X apresentou em sua composição percentual expressivos de dióxido de silício e de trióxido de alumínio;
- Os espectros de infravermelho do PET evidenciaram bandas características de deformação de grupo (=C-H), presente em compostos aromáticos; o estiramento C=O de ácido carboxílico; o estiramento C(O)-O de grupos éster, o indicativo de estiramento de ligação C-O em aproximadamente  $726\text{ cm}^{-1}$  referente a deformação angular dos carbonos dissubstituídos no anel;
- O PET apresentou três etapas de decomposição, na segunda houve perda expressiva, devido sua estrutura orgânica. A areia de britagem apresentou duas etapas de decomposição com pequena perda de massa e no CP II F-32 apresentou três etapas de decomposição térmica, sendo que na segunda etapa foi superior que as demais;
- A análise estrutural por difração de raios-X da areia de britagem apresentou seis fases cristalográficas correspondendo a óxidos, enquanto o CP II F-32 encontrou três fases cristalográficas correspondendo a silicato tricálcico e do silicato dicálcico e óxido de silício;

- **Quanto à composição dos concretos:**

- A planilha elaborada permitiu inserir o traço desejado, a quantidade de massa dos corpos de prova, o percentual de cimento, brita zero, areia de britagem e os valores de substituição do PET. Nesta perspectiva, foi possível testar águas para obter o concreto com trabalhabilidade plástica.

- **Sobre os ensaios dos concretos frescos e endurecidos:**

- No estado fresco com areia de britagem com o traço 1:3 e fator a/c 0,58, observou-se os melhores valores de resistência à compressão simples, enquanto que para os traços 1:4 a melhor relação a/c correspondeu a 0,64;
- No estado endurecido com areia de britagem, a absorção de água aumentou os índices de vazios nos traços 1:3 com a/c 0,58 e no traço 1:4 com a/c 0,64, isso devido ao aumento da idade de cura e o incremento do percentual de PET. Observou-se na massa específica para os traços 1:3 e 1:4, uma diminuição com o aumento da idade de cura e com o incremento do percentual de PET.

- **Quanto a caracterização mecânica:**

- No estudo do fator a/c do concreto com areia de britagem, verificou-se diminuição da resistência à compressão simples com incremento do PET;
- Observou-se no traço 1:3 com areia de britagem predominância de concretos com a classe de resistência C20. A classe de resistências C25 foi verificada com fator a/c 0,55, traço padrão e 5% de PET, com fator a/c 0,58 no traço padrão, 5% e 10% de PET. Todos os concretos foram classificados como do tipo estrutural do grupo I, exceto os concretos com a/c com 0,55 (20% de PET; com a/c 0,61 com 20% de PET), sendo classificados como não estruturais de acordo com a norma da ABNT 8953/2009.
- Verificou-se no traço 1:4 com areia de britagem predominância de concretos com a classe de resistência C20. A classe de resistência à compressão C25 foi verificada no fator a/c 0,61 do traço padrão.
- Os concretos possuem classe de resistência estrutural do grupo I, exceto os concretos com a/c com 0,61 com 20% de PET; com a/c 0,64 com 15% e 20% e com fator a/c 0,67 com 15 e 20%, sendo classificados da classe de resistência não estruturais, de acordo com a norma da ABNT 8953/2009.
- A areia de britagem e a areia normal apresentaram resultados de tronco de cone semelhantes, porém a consistência por mesa de Graff e a fluidez com areia normal apresentou resultados menores que a areia de britagem, no entanto, a resistência à compressão com a areia normal foi maior.

- **Aplicação dos concretos:**

- Nos traços 1:3 e 1:4 os concretos pode ser utilizados em pavimentos, de elementos de fundações e de elementos pré-moldados ou pré-fabricados (S50);
- No traço 1:3 os concretos podem ser utilizados em elementos estruturais correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, pisos, com lançamento convencional do concreto (S100).
- No traço 1:4 os concretos podem ser utilizados em concretos extrusado, vibro prensado ou centrifugado (S10) e em estruturas correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, pisos, paredes diafragma, com concreto lançado por bombeamento, estacas escavadas lançadas utilizando caçambas (S160).

A adição do PET nos traços estudados ocasionou desequilíbrio na relação água/cimento, alterando a consistência do concreto no estado fresco, verificado através do abatimento de tronco de cone e da consistência com a mesa de Graff, provocando diminuição da fluidez. A adição do PET promoveu o aumento da absorção de água e do índice de vazios, bem como à diminuição da massa específica do concreto endurecido. Como consequência desses fatos, registrou-se à diminuição da resistência a compressão simples com o incremento do PET.

Por fim, o desenvolvimento de compósitos de matriz cimentícia, composto por brita 0, areia de britagem e PET, atendem as exigências estabelecidas por norma no tocante a aplicações de concreto estrutural do grupo I para classe C25 e C20.



## 6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa sugerem-se, como recomendações para trabalhos futuros, os temas seguintes:

- Realizar estudo térmico e estrutural dos compósitos com areia de britagem e areia normal;
- Utilizar resíduo de PET com granulometria normalizada para verificar a absorção da água, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão simples, e também verificar o comportamento do percentual a/c;
- Desenvolver estudo dos compósitos com utilização de PET empregando superplastificante;
- Realizar estudo do comportamento do compósito no tocante à fadiga e a durabilidade;
- Estudar compósitos com composição intermediária em relação aos estudados com granulometria na faixa ótima para verificar o comportamento do concreto no estado fresco (abatimento de tronco de cone), com Mesa de Graff (consistência e fluidez), no concreto endurecido (absorção de água, índice de vazios e massa específica) e a resistência à compressão simples.

## **REFERÊNCIAS**

---

## REFERÊNCIAS

ABCP. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7 ed. São Paulo, 2002. 28 p. (BT-106). Disponível em: <[http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2009/12/BT106\\_2003.pdf](http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2009/12/BT106_2003.pdf)>. Acesso em 2 set. 2012.

ABCP. **Misturas experimentais para fixar o traço do concreto**. 4 ed. São Paulo, 1977. 7 p.

ABIPET. **4º Censo da Reciclagem de PET no Brasil 2007/2008**. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/noticias/Quarto%20Censo%20ABIPET.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2009.

ABIPET. **8º Censo da Reciclagem de PET no Brasil 2011**. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>>. Acesso em 29 out. 2012.

ABNT. **NBR 5738**: Concreto, procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT. **NBR 5739**: Concreto, ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

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

ABNT. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT. **NBR 9935**. Agregados - Terminologia. 2011.

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

ABNT. **NBR 8953**: Concretos para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. **NBR 9979**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. **NBR 11578**. Cimento Portland Composto - Especificação. 1997

ABNT. **NBR NM 30**: Agregado miúdo: Determinação da absorção da absorção de água. Rio de Janeiro, 2000.

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

ABNT. **NBR NM 46**: Agregados, determinação de material fino que passa através de peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. **NBR NM 51**: Agregado graúdo, ensaio de abrasão “*Los Angeles*”. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

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

ABNT. **NBR NM 68**: Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento da mesa de Graff. Rio de Janeiro, 1998.

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

AFRIDI, M. et al. Development of polymer films by the coalescence of polymer particles in powdered and aqueous polymer-modified mortars. **Cement and concrete research**, v. 33, n. 11, p. 1715-1721, 2003. ISSN 0008-8846.

AGGARWAL, L.; THAPLIYAL, P.; KARADE, S. Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 2, p. 379-383, 2007. ISSN 0950-0618.

ALBANO, C. et al. Influence of content and particle size of waste PET bottles on concrete behavior at different w/c ratios. **Waste Management**, n. 29, p. 2707–2716, 2009.

ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; SANTOS, J. R. Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. **Building and Environment**. v. 42 p. 810-819, 2007.

AMERICAN CHEMISTRY. **ACC Resin Statistic Summary**, 2009 vs. 2008, 2009.

ASTM C642. **Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete**. 2006. 3f.

ASTM D570. **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**. 2010. 3f.

ATHAYDE, E. Rumo à Prosperidade Sustentável. In: Universidade Livre da Mata Atlântica (UMA). **Estado do mundo 2012: rumo à prosperidade sustentável /** Wordwatch Institute; ASSADOURIAN, Erik; RENNERT, Michael. (Org.), Tradução: Claudia Strauch. 1 ed. Salvador: UMA., 2012. 288 p.: color. ISBN 978-85-88046-43-6 (versão impressa). ISBN 978-85-88046-44-3 (versão digitalizada). Disponível em: <[http://www.worldwatch.org.br/estado\\_2012.pdf](http://www.worldwatch.org.br/estado_2012.pdf)>. Acesso em: 17 jan. 2013.

BARIN, D. S. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento portland branco com altos teores de adição de escoria de alto forno e ativador químico**. 2008. 171 f. Mestrado (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2008.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitações. **Déficit habitacional no Brasil 2008**. Brasília, 2011. 140 p. ISBN: 978-85-7958-019-2. Disponível em: <[http://www.habitatbrasil.org.br/media/5547/dificit\\_habitacional\\_no\\_brasil\\_2008.pdf](http://www.habitatbrasil.org.br/media/5547/dificit_habitacional_no_brasil_2008.pdf)>. Acesso em: 2 jan. 2012.

BENOSMAN, A. S. et al. Mineralogical Study of Polymer-Mortar Composites with PET Polymer by Means of Spectroscopic Analyses. **Materials Sciences and Applications**, 2012, 3, 139-150 doi:10.4236/msa.2012.33022 Published Online March 2012 (<http://www.SciRP.org/journal/msa>) 139

CAMPOS, H. **Ciclo das rochas: sua história, explicações atuais e implicações ambientais**. Universidade Estadual de Campinas - Instituto de Geociências - Departamento de Geociências Aplicada ao Ensino. Apostila. jun. 2008. p. 42. Disponível em: <<http://www.ige.unicamp.br/site/aulas/186/CicloRochas.pdf>>. Acesso em: 1 set. 2013.

CETEM. **Glossário 2011**. Disponível em: <<http://mineraldata.cetem.gov.br/mineraldata/app/docs/glossario.pdf>>. Acesso em 2 jan. 2013.

CHOI et al. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 35, p. 776-781, Apr. 2005.

CHOI, Y. W.; MOON, D. J.; KIM, Y. J.; LACHEMI, M. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles, **Construction and Building Materials**, n. 23, p. 2829-2835, 2009.

CINCOTTO, M. A. Relações de hidratação e pozolânicas. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo. IBRACON, v.1, cap. 11, 2011.

Comité Euro-International du Béton – CEB – 192 (2006). Diagnosis and Assessment of Concrete Structures. Bulletin d'information. Paris, 1989. n. 192.

CURTI, R. **Propriedades e dosagem do concreto**. ABCP. 2005. Disponível em <[http://www.abcp.org.br/comunidades/recife/download/pm\\_minicursos/11\\_curso\\_intensivo/Dosagem.pdf](http://www.abcp.org.br/comunidades/recife/download/pm_minicursos/11_curso_intensivo/Dosagem.pdf)>. Acesso em 3 jan. 2011

DAI; Jian-Guo; LAM; L.; UEDA, T. Seismic retrofit of square RC columns with polyethylene terephthalate (PET) fibre reinforced polymer composites. **Construction and Building Materials** n. 27, p. 206-217, 2012.

DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro. Brasília**. 35 v. 2010. 871p. Disponível em: <[http://www.dnpm.gov.br/relatorios/amb/Completo\\_2010.pdf](http://www.dnpm.gov.br/relatorios/amb/Completo_2010.pdf)>. Acesso em: 5 nov. 2011. ISSN 0100 9303 CDD 338.2098105.

DRAGO, C.; VERNEY, J. C. K. de.; PEREIRA, F. M. de. Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland. **Revista Escola de Minas, Ouro Preto - MG**, v. 62, n. 3, p. 399-408, jul. set. 2009. ISSN 0370-4467.

FABRO, F. Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **Revista Ibracon de estruturas e Materiais**. 2011. v. 4, n 2, p. 121-212. jun. 2011.

FERNANDES, F. R. C.; ENRÍQUEZ, M. A. R. da S.; ALAMINO, R. de C. J. **Recursos Minerais e Sustentabilidade Territorial: grandes minas**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2011.v.I 343 p.: II. ISBN 9788561121839. CDD 622.4. Disponível em: <[http://www.cetem.gov.br/publicacao/livros/Vol\\_1\\_GRANDES\\_MINAS\\_TOTAL.pdf](http://www.cetem.gov.br/publicacao/livros/Vol_1_GRANDES_MINAS_TOTAL.pdf)>. Acesso em 16 jan. 2013.

FOTI, D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. **Construction and Building Materials**. n. 25 p. 1906-1915, 2011.

FREUDENRICH, C. **Como funciona o plástico**. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/plastico1.htm>>. Acesso em: 1 nov. 2012.

GALVÃO, J. C. A. et al. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. **Construction and Building Materials**, n. 25, p. 1049-1055, 2011.

GEIST, J. M.; AMAGNA, S. V.; MELLOR, B. B. Improved portland cement mortars with polyvinyl acetate emulsions. **Industrial & Engineering Chemistry**. v. 45, n. 4, p. 759-767, 1953.

GIL, A. C. **Projetos de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Atlas. 1996. 159 p.

GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. D. M. R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente Construído**, v. 6, n. 4, p. 83-94, 2008. ISSN 1678-8621.

IBGE. **Pesquisa industrial – 2011**. v. 30, n. 2, 144 f. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Industrias\\_Extrativas\\_e\\_de\\_Transformacao/Pesquisa\\_Industrial\\_Anuual/Produto2011/piaproduto2011.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Industrias_Extrativas_e_de_Transformacao/Pesquisa_Industrial_Anuual/Produto2011/piaproduto2011.pdf)>. Acesso em 25 jul. 2013.

ISHIKAWA, P. H. Concreto de alto desempenho com areia artificial. **Boletim Técnico da FATEC-SP**. BT 28, p. 42 a 47, abr. 2010.

ISMAIL Z. Z.; AL-Hashmi, E. A. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. **Waste Management**, n. 28, p. 2041-2047, 2008.

KLEIN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto adensável**. 2008. 155f.: il. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, LONDRINA - Paraná.

LAZAREVIC, Davis; Aoustin, E.; BUCLET, N.; BRANDT, N. Plastic Waste Management in the Context of a European Recycling society: Comparing Results and Uncertainties in a Life Cycle Perspective. **Resources, Conservation and Recycling**., v. 55, p. 246-259, dec. 2010.

LUZ, A. B. de; LINS, F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais**. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p.:il. ISBN 978-85-61121-37-2. CDD 553-40972. Disponível em: <[www.cetem.gov.br/publicacao/series\\_srmi/srmi-14.pdf](http://www.cetem.gov.br/publicacao/series_srmi/srmi-14.pdf)>. Acesso em 29 jul. 2009.

MAGALHÃES, A. G. et al. Análise da influência de teores elevados de materiais pulverulentos presentes nos agregados artificiais sobre as propriedades do concreto. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto, Olinda - PE. **Anais...** Olinda: CBC, 2005. p. v110-124.

MELLO D.; PEZZIN S. H.; AMICO S. C. The effect of post consumer PET particles on the performance of flexible polyurethane foams. **Polym Test**, 2009; 28: 702-708.

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

MENDES, S. E. da S. et al. Viabilidade do uso de areia artificial em concretos para estruturas pré-fabricadas. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Bento Gonçalves - RS. **Anais...** Bento Gonçalves: CBC, 2007. p. 1-16.

METHA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. ISBN 85-7266-040-2.

MODRO, N. L. R. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. **Revista Matéria**, v. 14, n. 1, p. 725-736, 2009. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11045>>. Acesso de 5 nov. 2010. Florianópolis - Brasil.

NETZSCH-Gerätebau GmbH. **Thermal Properties of Polymers**. Disponível em: <[http://www.netzsch-thermal-analysis.com/data/uploads/Poster\\_TPfPolymers\\_version2\\_2-0312-mitLUPE.pdf](http://www.netzsch-thermal-analysis.com/data/uploads/Poster_TPfPolymers_version2_2-0312-mitLUPE.pdf)>. Acesso em: 2 de ago de 2012.

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

OCHI T.; OKUBO S.; FUKUI, K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. **Cement & Concrete Composites**. v. 29, p. 448-455, 2007.

OHAMA, Y. et al. Cement mortars modified by SB latexes with variable bound styrene. **Rubber Chemistry and Technology**, v. 37, n. 3, p. 758-769, 1964. ISSN 0035-9475.

OHAMA, Y. Principle of Latex Modification and Some Typical Properties of Latex-Modified Mortars and Concretes Adhesion; Binders (materials); Bond (paste to aggregate); Carbonation; Chlorides; curing; diffusion. **ACI Materials Journal**, v. 84, n. 6, 1987. ISSN 0889-325X.

ROSMANINHO, M. G. **Transformando dejetos de pet em materiais de importância tecnológica**. 20054. 156f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Minas Gerais – Minas Gerais.

OHAMA, Y. **Handbook of Polymer-modified mortars and concretes. Properties and Process Technology**: Noyes, Park Ridge, NJ: William Andrew Inc. 1995.

OHAMA, Y. Study on properties and mix proportioning of polymer-modified mortars for buildings. **Report of the Building research institute**, n. 65, p. 100-104, 1973.

OLIVEIRA, M. P. de, BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.10, n.2, *Versão On-line* ISSN 1807-1929, 2006. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662006000200034&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662006000200034&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em jan. 2010.

PANDOLFO, L. M. et al. **Absorvidade de concretos compostos com areia natural e areia de britagem**. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto, Olinda - PE. **Anais...** Olinda: CBC, 2005. p. v.41-50.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. In: **Revista Concreto & Construções**, São Paulo: Ipsis, ano 37, n. 53, jan. - mar. 2009, 14-19 p. ISSN 1809-7197p. Disponível em: <[http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas\\_ibracon/rev\\_construcao/pdf/Revista\\_Concreto\\_53.pdf](http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf)>. Acesso em: 3 abr. 2012.

PETERS, S. T. **Handbook of composites**. 2th. London: Chapman & Hall, p. 389-411, 1998.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 13 ed. rev. por Vladimir Antonio Paulon. São Paulo: Globo, 1987.

PLASTICS EUROPE. Plastic - the Facts 2010. An Analysis of European Plastics Production, **Demand and Recovery** for 2010, 2011.

PLASTICS EUROPE. Compelling Facts about Plastic. An Analysis of European Plastics Production, **Demand and Recovery** for 2009, 2010.

PORTAL DO CONCRETO. **Concreto**: Preparação de Concreto em Laboratório. Disponível em: <[http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/dosagem\\_6.html](http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/dosagem_6.html)>. Acesso em: 5 mai. 2011.

RAMAKRISHNAN, V. **Latex-modified concretes and mortars**. Transportation Research Board, 1992. ISBN 030905303X.

REBEIZ, K. S. Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste. **Construction and Building Materials**, vol. 10, n.º 3, p. 215-220, 1996.

SÁ, M. das V. V. A. de. **Influência da substituição de areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos.** 2006. 140 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SILVA, D. R. da., **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando a melhoria na sua curabilidade.** 2006. 195 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SOUZA, J. L. F. de. **Estudo de curabilidade de concretos e argamassas através de RAA em agregados convencionais da região de Campina Grande e alternativos em concreções lateríticas Sapé-PB e Jacumã-PB.** 2007. 117f. : II. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba.

STEELE, G.; JUDY, J. Polymer-modified concretes in bridge deck overlay systems. **Chloride Corrosion of Steel in Concrete, ASTM STP**, v. 629, p. 110-115, 1977.

TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Concreto Ciência e Tecnologia.** São Paulo. IBRACON, v.1, cap. 12, 2011.

UMA - Universidade Livre da Mata Atlântica. **Estado do mundo 2012:** rumo à prosperidade sustentável / Worldwatch Institute; ASSADOURIAN, Erik; RENNER, Michael. (Org.), Tradução: Claudia Strauch. 1 ed. Salvador: UMA., 2012. 288 p.: color. ISBN 978-85-88046-43-6 (versão impressa). ISBN 978-85-88046-44-3 (versão digitalizada). Disponível em: <[http://www.worldwatch.org.br/estado\\_2012.pdf](http://www.worldwatch.org.br/estado_2012.pdf)> Acesso em: 17 jan. 2013.

UNIFEI. **Poliéster.** Disponível em: <<http://www.fe.i.edu.br/textil/webdesign/webdesign/htm/poliester.htm>>. Acesso em: 12 abr. 2010.

URGUIM, S. et. al. Concreto auto-adensável com areia de britagem. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador - BA. **Anais...** Salvador: CBC, 2008. p. 1-11.

WANG, R.; WANG, P. M.; LI, X. G. Physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber emulsion modified cement mortars. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 5, p. 900-906, 2005. ISSN 0008-8846.

WEIDMANN, D. F.; OLIVEIRA, A. L.; PRUDÊNCIO JR., L. R. Emprego de pó-de-pedra na produção de agregado miúdo para concretos dosados em central. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto, Curitiba - PR. **Anais...** Curitiba: CBC, 2009. p. 1-14.



## APÊNDICE A - PLANILHA COM TRAÇOS 1:6 E 1:5

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )				Umidade		%	
Areia de britagem	2,650			Areia de britagem	0		
Brita 0	2,720			Brita 0	0		
PET	1,310						
Cimento CP II F	3,150						

Moldes	diametro	altura	volume
CP pequeno	5	10	196,25
CP grande	10	20	1.570,00

	Quantidade	M. CP	Total
<b>Total de material x traço</b>	<b>9</b>	<b>4500</b>	<b>40500</b>

	Mistura
<b>Brita 0</b>	<b>0,42</b>
<b>Areia britagem</b>	<b>0,58</b>
<b>Massa da Mistura - gramas</b>	<b>40500</b>

TRAÇO	1	6
<b>PET %</b>	<b>0</b>	<b>5</b>
<b>Material</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
Brita 0	14.580	14.580
Areia britagem	20.134	19.128
PET	0	1.007
Cimento	5.786	5.786

TRAÇO	1	6			
<b>PET %</b>	<b>cimento (f)</b>	<b>Areia de britagem (a)</b>	<b>Brita 0 (b)</b>	<b>PET (c)</b>	<b>água / cimento</b>
<b>0</b>	1	3,480	2,520	0,000	0,55
<b>5</b>	1	3,306	2,520	0,174	0,55
<b>10</b>	1	3,132	2,520	0,348	0,55
<b>15</b>	1	2,958	2,520	0,522	0,55
<b>20</b>	1	2,784	2,520	0,696	0,55

Fator a/c	água em ml
0,46	2.661
0,49	2.835
0,52	3.009
0,55	3.182
0,58	3.356
0,61	3.529
0,64	3.703
0,67	3.876
0,70	4.050
0,73	4.224
0,76	4.397
0,79	4.571
0,82	4.744

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )				Umidade		%	
Areia de britagem	2,650			Areia de britagem	0		
Brita 0	2,720			Brita 0	0		
PET	1,310						
Cimento CP II F	3,150						

Moldes	diametro	altura	volume
CP pequeno	5	10	196,25
CP grande	10	20	1.570,00

	Quantidade	M. CP	Total
<b>Total de material x traço</b>	<b>9</b>	<b>4500</b>	<b>40500</b>

	Mistura
<b>Brita 0</b>	<b>0,42</b>
<b>Areia britagem</b>	<b>0,58</b>
<b>Massa da Mistura - gramas</b>	<b>40500</b>

TRAÇO	1	5
<b>PET %</b>	<b>0</b>	<b>5</b>
<b>Material</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
Brita 0	14.175	14.175
Areia britagem	19.575	18.596
PET	0	979
Cimento	6.750	6.750

TRAÇO	1	5			
<b>PET %</b>	<b>cimento (f)</b>	<b>Areia de britagem (a)</b>	<b>Brita 0 (b)</b>	<b>PET (c)</b>	<b>água / cimento</b>
<b>0</b>	1	2,900	2,100	0,000	0,55
<b>5</b>	1	2,755	2,100	0,145	0,55
<b>10</b>	1	2,610	2,100	0,290	0,55
<b>15</b>	1	2,465	2,100	0,435	0,55
<b>20</b>	1	2,320	2,100	0,580	0,55

Fator a/c	água em ml
0,46	3.105
0,49	3.308
0,52	3.510
0,55	3.713
0,58	3.915
0,61	4.118
0,64	4.320
0,67	4.523
0,70	4.725
0,73	4.928
0,76	5.130
0,79	5.333
0,82	5.535

## APÊNDICE B - PLANILHA COM TRAÇOS 1:4 E 1:3

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )		Umidade		%	
Areia de britagem	2,650	Areia de britagem			0
Brita 0	2,720	Brita 0			0
PET	1,310				
Cimento CP II F	3,150				

Moldes	diametro	altura	volume
CP pequeno	5	10	196,25
CP grande	10	20	1.570,00

	Quantidade	M. CP	Total
<b>Total de material x traço</b>	<b>9</b>	<b>4500</b>	<b>40500</b>

	Mistura
<b>Brita 0</b>	<b>0,42</b>
<b>Areia britagem</b>	<b>0,58</b>

Massa da Mistura - gramas						40500
PET %	0	5	10	15	20	
<b>Traço</b>	Material	g	g	g	g	g
<b>1 : 4</b>	Brita 0	13.608	13.608	13.608	13.608	13.608
	Areia britagem	18.792	17.852	16.913	15.973	15.034
	PET	0	940	1.879	2.819	3.758
	Cimento	8.100	8.100	8.100	8.100	8.100

Traço	1	4				água / cimento
PET %	cimento (f)	Areia de britagem (a)	Brita 0 (b)	PET (c)		
<b>0</b>	1	2,320	1,680	0,000		0,55
<b>5</b>	1	2,204	1,680	0,116		0,55
<b>10</b>	1	2,088	1,680	0,232		0,55
<b>15</b>	1	1,972	1,680	0,348		0,55
<b>20</b>	1	1,856	1,680	0,464		0,55

Fator a/c		água em ml
0,46		3.726
0,49		3.969
0,52		4.212
0,55		4.455
0,58		4.698
0,61		4.941
0,64		5.184
0,67		5.427
0,70		5.670
0,73		5.913
0,76		6.156
0,79		6.399
0,82		6.642

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )		Umidade		%	
Areia de britagem	2,650	Areia de britagem			0
Brita 0	2,720	Brita 0			0
PET	1,310				
Cimento CP II F	3,150				

Moldes	diametro	altura	volume
CP pequeno	5	10	196,25
CP grande	10	20	1.570,00

	Quantidade	M. CP	Total
<b>Total de material x traço</b>	<b>9</b>	<b>4500</b>	<b>40500</b>

	Mistura
<b>Brita 0</b>	<b>0,42</b>
<b>Areia britagem</b>	<b>0,58</b>

Massa da Mistura - gramas						40500
PET %	0	5	10	15	20	
<b>Traço</b>	Material	g	g	g	g	g
<b>1 : 3</b>	Brita 0	12.758	12.758	12.758	12.758	12.758
	Areia britagem	17.618	16.737	15.856	14.975	14.094
	PET	0	881	1.762	2.643	3.524
	Cimento	10.125	10.125	10.125	10.125	10.125

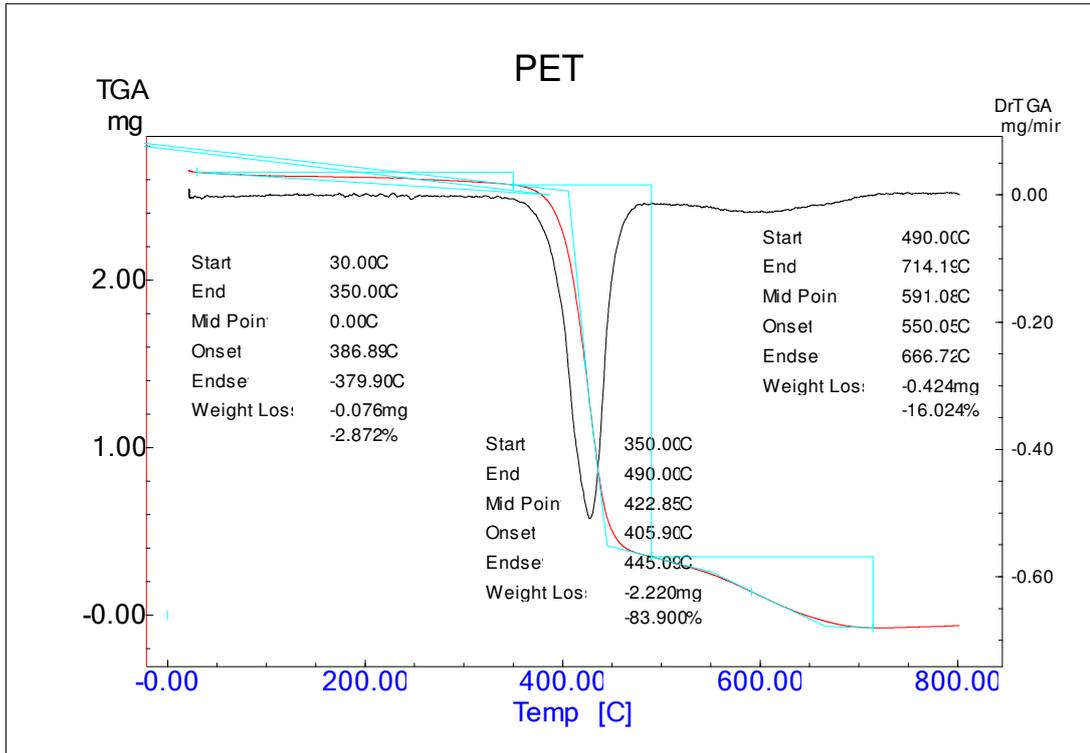
  

Traço	1	3				água / cimento
PET %	cimento (f)	Areia de britagem (a)	Brita 0 (b)	PET (c)		
<b>0</b>	1	1,740	1,260	0,000		0,55
<b>5</b>	1	1,653	1,260	0,087		0,55
<b>10</b>	1	1,566	1,260	0,174		0,55
<b>15</b>	1	1,479	1,260	0,261		0,55
<b>20</b>	1	1,392	1,260	0,348		0,55

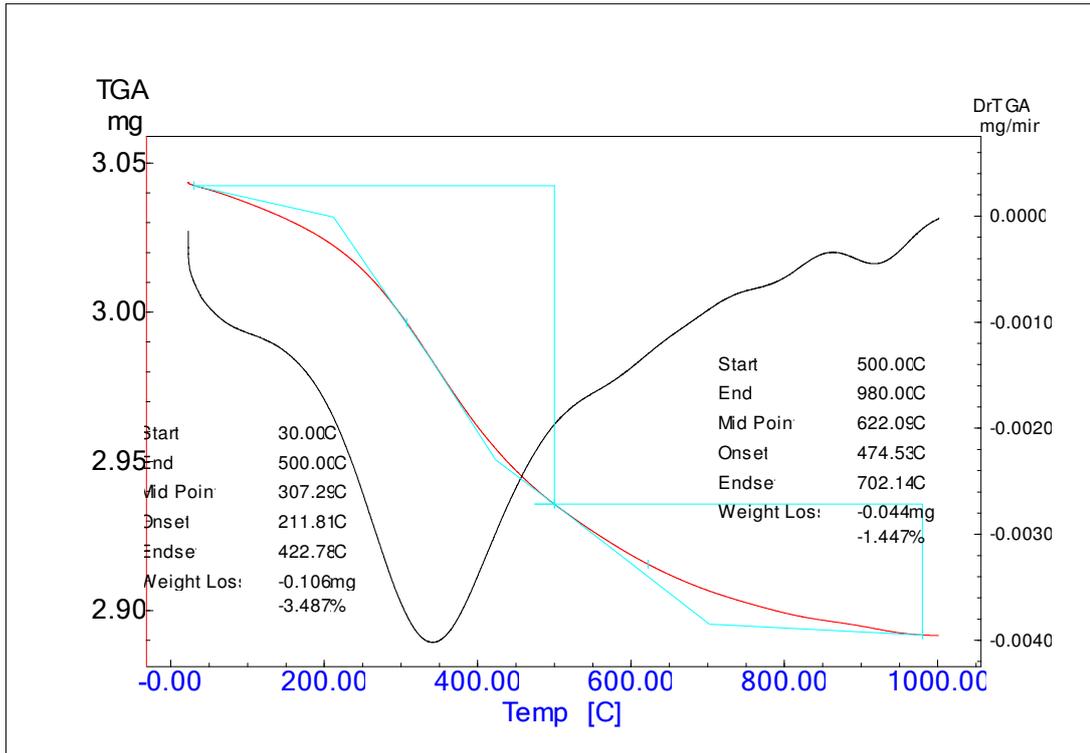
  

Fator a/c		água em ml
0,46		4.658
0,49		4.961
0,52		5.265
0,55		5.569
0,58		5.873
0,61		6.176
0,64		6.480
0,67		6.784
0,70		7.088
0,73		7.391
0,76		7.695
0,79		7.999
0,82		8.303

## APÊNDICE C - CURVAS TG/DTG DO POLITEREFTALATO DE ETILENO



## APÊNDICE D - CURVAS TG/DTG DA AREIA DE BRITAGEM



## APÊNDICE E - CURVAS TG/DTG DO CP II F-32

Curvas TG/DTG do CP II F-32, obtida a razão de aquecimento de 10°C/min, em atmosfera de Nitrogênio.

