



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ILZENETE ANDRADE MENESES

**AVALIAÇÃO DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE PET
SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS**

Natal/RN
2011

Ilzenete Andrade Meneses

**AVALIAÇÃO DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE PET
SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a Maria das Vitórias
V. Almeida de Sá

Natal/RN
2011

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias V. Almeida de Sá

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Meneses, Ilzenete Andrade.

Avaliação de concreto com adição de fibras de pet submetido a altas temperaturas / Ilzenete Andrade Meneses. – Natal, RN, 2011.
89 f. : il.

Orientador: Prof.^a Dra. Maria das Vitórias V. Almeida de Sá.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Concreto – Construção civil - Dissertação. 2. Concreto – Altas temperaturas – Construção civil - Dissertação. 3. Politereftalato de etileno (PET) – Polímero termoplástico - Dissertação. I. Sá, Maria das Vitórias V. Almeida de. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM
691.3

CDU

Ilzenete Andrade Meneses

**AVALIAÇÃO DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE PET
SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Orientadora

Prof^a. Dr^a. Andreza Kelly Costa Nóbrega – Examinadora Interno (UFRN)

Prof^a. Dr^a. Ana Cecília Vieira da Nóbrega – Examinadora Externo (UFPE)

Natal, 28 de dezembro de 2011.

AVALIAÇÃO DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE PET SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS

RESUMO

O concreto ao longo dos séculos constituiu-se num elemento estrutural indispensável na construção civil, devido a sua relativa facilidade de moldagem, sua durabilidade diante das intempéries, seu baixo custo, sua menor necessidade de manutenção, se comparado a outros materiais, como o aço. No entanto, quando o concreto fica exposto a altas temperaturas tende a perder suas características mecânicas, podendo inclusive ocorrer perda de seção, que compromete a estabilidade e a resistência mecânica dos elementos estruturais. As patologias decorrentes da exposição á elevadas temperaturas vão desde as fissuras, estalos até lascamentos explosivos. Nos últimos tempos, a tecnologia do concreto está intimamente ligada ao estudo de sua microestrutura. O uso de fibras adicionadas ao concreto tem se revelado como solução para o incremento de resistência mecânica do concreto, pois atua diretamente na distribuição dos esforços que atuam na peça no âmbito da microestrutura. Neste trabalho foram usadas fibras de PET proveniente da reciclagem de garrafas de refrigerante, para fabricação de vassouras. As fibra utilizadas tinham 2mm de largura por 15mm de comprimento, incorporadas ao concreto dosado para $f_{ck} = 30\text{MPa}$, relação água/cimento 0.46, confeccionado em um canteiro obra, para verificação de resistência mecânica dessa mistura submetida á elevadas temperaturas. Os corpos de prova dos concretos com e sem adição de fibras de PET foram ensaiados após exposição às temperaturas: ambiente (30°C), 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 600°C e 900°C. Verificou-se que o concreto perde de forma significativa resistência mecânica quando exposto a temperaturas maiores que 300°C. No entanto o uso da fibra de PET pode retardar o risco de colapso de estruturas pela formação de uma rede de canais que facilitam a fuga do vapor d'água, reduzindo a poropressão no interior do elemento estrutural.

Palavras chave: Concreto com PET. Concreto com fibras. Altas temperaturas.

ASSESSMENT OF CONCRETE MADE WITH DE PET FIBER EXPOSEDO TO HIGH TEMPERATURES

ABSTRACT

The concrete for centuries constituted an essential structural element in the construction industry due to its relative ease of forming, before the weather durability, low cost, its lower maintenance compared to other materials such as steel. However, when the concrete is exposed to high temperatures tends to lose its mechanical characteristics, and may even result in loss of section, which undermines the stability and mechanical strength of structural elements. The pathologies resulting from exposure to elevated temperatures ranging from cracks, pops up chipping explosives (*spalling*). Recently, the technology of concrete is closely related to the study of its microstructure. The use of fibers added to concrete has been revealed as a solution to increase the mechanical strength of the concrete, it acts directly on the distribution of efforts to act in the play within the microstructure. In this work we used recycled PET fibers embedded in concrete with 15x2mm fck = 30MPa, water/cement ratio of 0.46, in works made for verification of mechanical strength of this mixture submitted to high temperature. The specimens of concrete with addition of PET fibers were tested after exposure to temperatures: ambient (30°C), 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 600°C and 900°C. It was found that the concrete loses significant strength when exposed to temperatures above 300°C, however the use of fiber PET may delay the risk of collapse of structures for the formation of a network of channels that facilitate the escape of vapor 'water, reducing the pore pressure inside the structural element.

Keywords: PET reinforced concrete. Fiber reinforced concrete. High temperatures.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua indiscutível presença imanente e por todas as bênçãos que graciosamente me tem concedido ao longo de toda a minha vida.

A minha família pelo apoio constante, por entender minha ausência e pela torcida por minha vitória nesse projeto de vida.

Aos meus amigos Leonete, Mateus, Josimar, Lane e Aline Dantas sempre presentes me incentivando a continuar essa jornada.

As amigas Veruska e Larissa, que começaram a dura carreira do mestrado e juntas vencemos os primeiros desafios que nos foram propostos.

A engenheira Aline Patrícia, pela contribuição dada na execução dos corpos de prova no canteiro da obra.

A todos que formam a Superintendência de Infraestrutura da UFRN, representados pelos engenheiros Gustavo Coêlho e Fred Guedes pela confiança no meu trabalho.

Aos funcionários e colegas de trabalho que contribuíram direta ou indiretamente para o meu sucesso.

À Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil que acreditou na ideia da capacitação do funcionário da instituição, possibilitando a realização de meu sonho em particular.

Aos funcionários do laboratório de Materiais de Construção da UFRN, Sr. Francisco Braz e Sandro Ricardo, pela ajuda indispensável no exercício dos ensaios.

A Bruna e Pedro, bolsistas do Prof. Emerson, do Laboratório de Nutrição Animal, pela ajuda nos ensaios de aquecimento dos corpos de prova.

A Adla e Roniberto, bolsistas da Prof^a Vitória, que muito me ajudaram nos ensaios de caracterização dos materiais utilizados nessa pesquisa.

A todos, enfim, que contribuíram direta e indiretamente para realização desse trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– (a) Representação esquemática da exsudação no concreto fresco (b) falha de aderência por cisalhamento em um corpo de prova ensaiado a compressão uniaxial	24
Figura 2 - Micrografia eletrônica de varredura da fase pasta de cimento.....	26
Figura 3- Fibra de garrafa PET pronta para o uso.....	33
Figura 4 - Série Histórica do Censo da Reciclagem de garrafas PET no Brasil	37
Figura 5 - Uso final do PET reciclado no Brasil em 2010	38
Figura 6 - Distribuição Nacional das Recicladoras de PET - Adaptado da ABIPET, 2010	39
Figura 7 - Alteração na resistência e coloração do concreto	
Figura 8 – Esquema simplificado do Procedimento experimental	45
Figura 9 - Detalhe da fibra de PET: a) largura; b) espessura; b) comprimento.	52
Figura 10 - Preparação da fibra de PET: a) desfiadora artesanal; b) fibra embalada.	56
Figura 11 - Interior da betoneira após a adição das fibras de PET	
Figura 12 - Processo de moldagem dos corpos de prova: a) Colocação da primeira camada de concreto do corpo de prova; b) Socamento da camada.	57
Figura 13 - Corpos de prova produzidos para a pesquisa.....	57
Figura 14 - Processo do ensaio de abatimento do tronco de cone: enchimento do tronco de cone, b) preparação para o socamento da camada.	58
Figura 15 - Ensaio de abatimento do troco de cone: a) abatimento do concreto de referencia; b) abatimento do concreto com PET	
Figura 16 – Processo de cura dos corpos de prova.	60

Figura 17 – Equipamento utilizado para aquecimento dos corpos de prova: a) exterior e b) interior	61
Figura 18 - Corpo de prova capeado com enxofre para o ensaio de resistência a compressão.....	62
Figura 19 – Laboratório do CTGAS: a) Equipamento de metalização das amostras; b) o MEV c) interior do MEV	64
Figura 20 – Amostras metalizadas para o MEV: a) disposição das amostras identificadas pelas suas diferentes temperaturas; b) detalhe das amostras.	65
Figura 21 - Composição granulométrica do agregado miúdo.....	68
Figura 22 - Composição granulométrica do agregado graúdo	70
Figura 23 - Análise Termogramétrica PET	71
Figura 24 - Resistência média à compressão dos concretos aos 28 dias.....	74
Figura 25 – Corpos de Prova em suas várias temperaturas – mudança de coloração	76
Figura 26 - Corpos de prova com e em PET: a) temperatura ambiente, b) após o aquecimento a 300° C	43
Figura 27– Micrografia do concreto com fibra de PET a 30°C – detalhe da fibra de PET	78
Figura 28 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 200°C – detalhe da fibra de PET	78
Figura 29 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 400°C – detalhe da área do PET	79
Figura 30 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 400°C – detalhe das fases do concreto.....	80

Figura 31 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 900°C – detalhe da área do PET	81
Figura 32 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 900°C – detalhe da área ampliada.....	81
Figura 33 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 900°C – detalhe das fases do concreto.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Efeito da temperatura sobre o concreto, adaptado de Kanéma et al., 2011	41
Tabela 2 – Volume estimado de concreto para os corpos de prova em litros	46
Tabela 3 - Composição do concreto.....	47
Tabela 4 – Caracterização do Aditivo Polifuncional SIKAMENT PF 171.....	54
Tabela 5 – Distribuição dos corpos de prova confeccionados	57
Tabela 6 – Ensaio de início de pega do Cimento	66
Tabela 7– Ensaio de resistência do Cimento	67
Tabela 8 - Composição granulométrica do agregado miúdo	67
Tabela 9 - Massa específica e unitária, módulo de finura e diâmetro máximo do agregado miúdo.	68
Tabela 10 - Composição granulométrica do agregado graúdo.....	69
Tabela 11 - Massas específica e unitária, módulo de finura do agregado graúdo	70
Tabela 12 – Resultados do ensaio de consistência do concreto.....	72
Tabela 13 – Resultados dos ensaio de absorção e de porosidade do concreto	73

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

CTGÁS-RN – Centro de Treinamento de Petróleo e Gás do Rio Grande do Norte

CP030 – Concreto com PET em temperatura ambiente

CP100 – Concreto com fibra de PET submetido a temperatura de 100°

CP200 – Concreto com fibra de PET submetido a temperatura de 200°

CP300 – Concreto com fibra de PET submetido a temperatura de 300°

CP400 – Concreto com fibra de PET submetido a temperatura de 400°

CP600 – Concreto com fibra de PET submetido a temperatura de 600°

CP900 – Concreto com fibra de PET submetido a temperatura de 900°

SP030 – Concreto sem PET em temperatura ambiente

SP100 – Concreto sem fibra de PET submetido a temperatura de 100°

SP200 – Concreto sem fibra de PET submetido a temperatura de 200°

SP300 – Concreto sem fibra de PET submetido a temperatura de 300°

SP400 – Concreto sem fibra de PET submetido a temperatura de 400°

SP600 – Concreto sem fibra de PET submetido a temperatura de 600°

SP900 – Concreto sem fibra de PET submetido a temperatura de 900°

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

PET - Polietileno Tereftalato

SUMARIO

INTRODUÇÃO	16
1.1 Estrutura da Pesquisa	20
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 Concreto.....	21
2.1.1 Agregados	22
2.2 Concreto com Fibras	30
2.2.1 Aspectos Gerais	30
2.2.2 Concreto com Fibras Poliméricas	32
2.2.3 Concreto com fibra de PET	34
2.2.4 Sustentabilidade Ambiental	34
2.3 Concreto Submetido as Altas Temperaturas.....	39
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	44
3.1 Planejamento Experimental	45
3.1.1 Escolha do Traço.....	46
3.1.2 Cálculo dos Materiais	46
3.2 Caracterização dos materiais.....	47
3.2.1 Cimento	47
3.2.1.1 Ensaio de Finura.....	48
3.2.1.2 Determinação do Tempo de Pega do Cimento.....	48
3.2.1.3 Ensaio de Consistência do Cimento	49
3.2.1.4 Ensaio de Expansibilidade do Cimento	49
3.2.1.5 Determinação da Resistência à Compressão do Cimento	50
3.2.2 Agregado Miúdo	50
3.2.3 Agregado Graúdo	51
3.2.4 Fibra de PET.....	52
3.2.5 O aditivo	53
3.3 Produção do Concreto	55
3.3.1 Mistura, Moldagem e Cura do Concreto	55
3.3.1.1 Mistura do Concreto	55
3.3.1.2 Moldagem do Concreto	55

3.3.1.3	Ensaio de Abatimento – Slump test	58
3.3.1.4	Cura do Concreto	60
3.4	Aquecimento dos Corpos de Prova de concreto	60
3.5	Ensaio do Concreto	61
3.5.1	Resistência à compressão	62
3.5.2	Análise Visual das Amostras	62
3.5.3	Absorção e porosidade	63
3.5.4	Análise microestrutural dos concretos	64
	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1	Caracterização dos materiais	66
4.1.1	Cimento	66
4.1.2	Agregado Miúdo	67
4.1.3	Agregado graúdo	69
4.1.4	Fibra de PET.....	71
4.2	Caracterização do concreto	72
4.2.1	Ensaio de abatimento	72
4.2.2	Absorção e porosidade	72
4.2.3	Resistência a Compressão	73
4.2.4	Análise visual das amostras	75
4.2.5	Análise Microestrutural dos Concretos	77
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
5.1	Conclusões	83
5.2	Considerações gerais.....	84
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	85
	REFERÊNCIAS.....	86

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O concreto ao longo dos séculos constituiu-se num elemento indispensável na construção civil, devido a sua relativa facilidade de moldagem e sua durabilidade diante das intempéries e seu baixo custo associado a rápida disponibilidade para uma obra. Além dessas razões ainda podem ser mencionadas a menor necessidade de manutenção e a resistência ao fogo, quando comparadas as estruturas de aço (METHA e MONTEIRO, 2008).

Nesse cenário, o concreto é o material de construção mais empregado no mundo. Isto, por si só, é justificativa suficiente para a realização de pesquisas que visem fornecer subsídios para uma melhor utilização deste importante material. Boa parte da produção de concreto se destina as edificações que devem oferecer conforto e proteção aos seus usuários.

O concreto apresenta três razões para ser o material mais escolhido pelos engenheiros, para os elementos estruturais de uma construção. A primeira razão é sua resistência a ação da água, ideal para obras como túneis, barragens, canais entre outros. Peças como sapatas, pilares e vigas em concreto armado onde passa a haver a ação conjugada do concreto e o ferro para melhoria da resistência à tração e à compressão, e, além disso, o concreto protege a ferragem da exposição à água. A segunda razão reside na facilidade do concreto fresco em adaptar-se a forma e os tamanhos variados dos elementos estruturais, ou seja, a possibilidade de moldagem do concreto fresco devido à sua consistência plástica. E a terceira é o baixo custo e a rápida disponibilidade do concreto para uma obra. Os materiais básicos, cimento e agregado, são fáceis de serem encontrados em qualquer parte do mundo, com um custo menor que os demais materiais de construção (METHA e MONTEIRO, 2008).

Ao longo dos últimos anos o concreto vem sendo estudado no intuito de melhorar suas propriedades mecânicas e proporcionar economia e velocidade as

construções. As solicitações arquitetônicas exigem elementos estruturais cada vez mais esbeltos, leves e até coloridos.

A escolha criteriosa dos materiais e a observância as normas estabelecidas garantem não apenas a economia como também a segurança, e previnem ou adiam as intervenções de correção e de manutenção da edificação.

No entanto, a ocorrência de uma catástrofe natural, por ser imprevisível ou de difícil mensuração, tanto no momento da ocorrência, como em termos de intensidade, interfere na vida útil de uma edificação. Essa interferência, geralmente devido a brusca solicitação, pode ser em menor ou maior escala dependendo das condições iniciais da estrutura da edificação. Como exemplos dessas ocorrências podem ser citados os incêndios, as inundações, os sismos, a ação do vento, entre outros. No Brasil, os acidentes mais comuns e mais graves são devidos a ação do vento e aos incêndios (SOUZA e RIPPER, 1998).

No campo da proteção, desde sempre houve grande preocupação com os incêndios, haja vista serem lembradas até hoje as grandes tragédias ocorridas no Brasil. Exemplos clássicos são os incêndios nos edifícios Andraus e Joelma, nos anos setenta, que contabilizaram, inclusive, perdas de vidas humanas com 16 e 179 mortes, respectivamente. E, mais recentemente, o acidente com o avião da TAM no aeroporto de Congonhas em São Paulo, onde morreram 199 pessoas entre os que estavam no voo e os que estavam nas instalações do prédio da TAM.

Estruturas em concreto suportam temperaturas da ordem de 700°C a 800°C conservando resistência suficiente em um tempo hábil para que os resgates sejam feitos sem o colapso da estrutura. Essa segurança já não pode ser considerada em estruturas de aço, por exemplo.

Nos últimos anos, tem havido uma crescente busca por concretos mais resistentes e duráveis, caracterizados por uma alta densidade e um baixo volume de vazios. A matriz densificada tende a contribuir para o aumento da sensibilidade do material as condições térmicas extremas bem como no processo de aquecimento rápido.

O concreto exposto a altas temperaturas tende a perder suas características mecânicas, podendo inclusive ocorrer perda de seção. As patologias decorrentes vão desde as fissuras, estalos até lascamentos explosivos (*spalling*) que, por vezes, degrada definitivamente o elemento estrutural levando a edificação a ruína. Estas patologias do concreto exposto a altas temperaturas são influenciadas por fatores internos: distribuição/tamanho dos poros, relação a/c, existência de partículas finas e ultrafinas, grau de hidratação e o de saturação entre outros, e os externos: taxa de aquecimento máxima, tempo de exposição, umidade do ambiente, tipo de resfriamento, dimensão, espessura e forma do elemento estrutural, concentração de tensão térmica desenvolvidas durante o aquecimento (NINCE, 2007).

Quando a taxa de aquecimento for alta e a permeabilidade da pasta de cimento for baixa, a presença de grande quantidade de água evaporável pode causar danos ao concreto. Estes danos aparecerão sob a forma de lascamentos superficiais, ocasionados pela pressão de vapor dentro do material (POGGIALI, 2009).

Segundo Neville (1997) e Metha e Monteiro (2008), a resistência a compressão do concreto é regida por uma série de fatores, que entre outros, são: natureza e dosagem do ligante do material cimentante, granulometria, máxima dimensão, forma, textura superficial, resistência e rigidez dos agregados, relação água cimento, porosidade, relação cimento/inertes, idade, grau de compactação, condições de cura e condições de realização do ensaio. A resistência do concreto é sempre menor que a resistência individual dos seus componentes. O comportamento diferencial dos componentes do concreto pode ser explicado com base na sua microestrutura (METHA e MONTEIRO, 2008).

O estudo da microestrutura do concreto é de suma importância para o seu desenvolvimento tecnológico. A velocidade de formação dos elementos que conferem ao concreto sua rigidez, bem como a quantidade de poros formados pela perda da água no processo de endurecimento da matriz são algumas das razões para explicar o comportamento do concreto endurecido. Num concreto exposto á altas temperaturas, as alterações podem surgir de efeitos físicos ou químicos, ou ainda, por ambos, e estes efeitos combinados podem causar perda da capacidade portante do elemento (LIMA et al, 2004).

A busca de materiais, que quando adicionados ao concreto, possam proporcionar melhoria em propriedades específicas do concreto, converge para compósitos onde alguma propriedade seja incrementada com esse fim. Dentre eles estão alguns polímeros (poliuretana não-iônica aquosa, látex estirenobutadieno, poliéster, epóxi, silicone, Polietileno Tereftalato (PET), polipropileno, entre outras), materiais refratários, rejeitos minerais e tintas intumescentes.

Nesse contexto, o uso das fibras para correção dos efeitos causados no concreto exposto as altas temperatura sendo pesquisada nas últimas décadas. A comunidade científica vem trabalhando com a teoria difundida por Rle (1997 apud NINCE, 2007) e endossada por outros pesquisadores como Sullivan (2004), Hertz (2003) e Kalifa, Chénè e Gallé (2001), todos citados por Nince (2007) que o uso de fibras de baixo ponto de fusão reduz o risco de lascamento do concreto por meio da formação de uma rede de pequenos vazios e canais que permitem a dissipação da pressão de vapor, diminuindo, conseqüentemente as tensões de tração internas.

O entendimento do comportamento das fases do concreto frente às condições de exposições e o estreitamento da zona de transição são os desafios impostos a manutenção da durabilidade do concreto.

Espera-se que a composição do concreto convencional associado a fibra de PET possa contribuir para a segurança das estruturas submetidas a altas temperaturas e ainda, colaborar para uma ação mitigatória dos impactos ambientais causados pelo descarte indevido do PET pós-consumo a medida que reintegra este resíduo ao meio produtivo. Com isso agrega valor a atividade de reciclagem.

Desta forma, este trabalho contribui para o desenvolvimento sustentável da indústria da construção civil, através da produção de materiais ecologicamente corretos e adaptados a realidade do mercado e às necessidades do meio ambiente.

Por conseguinte, o objetivo geral desse trabalho funda-se em avaliar a adição da fibra de PET no concreto submetido a altas temperaturas visando minimizar o risco de colapso de estruturas tendo como base comparativa o concreto convencional, ao passo que os objetivos específicos propõem:

- Caracterizar macro e microestruturalmente o concreto com adição das fibras de PET frente as altas temperaturas;
- Verificar o comportamento do concreto com adição das fibras de PET frente as altas temperaturas.

1.1 Estrutura da Pesquisa

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, os quais apresentam os seguintes conteúdos:

No Capítulo 1 apresenta-se uma introdução ao tema escolhido, a relevância da avaliação microestrutural do concreto, por ser a microestrutura significativamente alterada quando o concreto é submetido a altas temperaturas.

No Capítulo 2 é composto de uma revisão da literatura quanto aos aspectos relevantes sobre o concreto, os agregados e a pasta de cimento, o concreto com fibras, e ainda mais especificamente com fibras de PET, e a relevância no aspecto ambiental do aproveitamento do resíduo de PET. Por fim, a última parte deste capítulo traz algumas considerações sobre o concreto submetido a altas temperaturas.

No Capítulo 3 apresenta-se a pesquisa experimental, onde são abordados a escolha do traço, caracterização dos materiais para confecção dos corpos de prova, a mistura, processo de cura do concreto, e ainda, a metodologia dos ensaios.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos para os ensaios dos concretos.

No Capítulo 5 mostra-se as conclusões obtidas nessa pesquisa, além de sugestões para os trabalhos futuros com relação ao tema proposto nesse estudo.

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica

2.1 Concreto

O concreto é um compósito em que partículas de agregados ficam aglomeradas numa matriz de pasta de cimento, podendo esta ter ou não adições, que juntos formam um elemento com alta resistência mecânica. Cada uma dessas partes formadas, microscopicamente de outros tantos elementos de diferentes tipos e quantidades sólidas, poros e microfissuras, sujeitas a modificações com o tempo, ambiente e temperatura (METHA e MONTEIRO, 2008).

A resistência pode ser considerada a propriedade mais importante do concreto, embora, em muitos casos, outras características, como a durabilidade e a permeabilidade, sejam igualmente importantes. A resistência define uma ideia geral da qualidade do concreto, estando diretamente relacionada com a microestrutura da pasta de cimento Portland hidratada. Além disso, a resistência é um elemento essencial do projeto estrutural especificando a sua aceitação (NEVILLE, 1997).

A natureza polifásica do concreto (pasta com ou sem aditivos e agregados) leva a degradação diferenciada entre as fases do concreto, afetando suas propriedades mecânicas por meio da redução na resistência e no módulo de elasticidade dos materiais levando a perda de rigidez das peças podendo ocasionar a ruína das estruturas.

Em sua microestrutura, o concreto é bem mais complexo. Cada um de seus componentes, a pasta de cimento e o agregado, microscopicamente, possuem estruturas bem heterogenias. A parte da pasta de cimento que envolve o agregado tem características bem diferentes do restante da pasta e é conhecida por zona de transição. É a fase mais dinâmica da microestrutura do concreto e influencia fortemente as características do concreto endurecido (METHA e MONTEIRO, 2008).

A temperatura é um fenômeno que altera significativamente as características do concreto, desde sua fase de concreto fresco até a fase endurecido (COSTA et al., 2002a).

O concreto é um material incombustível, não exala gases tóxicos, é um mal condutor de calor (baixa condutividade térmica), e por apresentar massividade elevada possui uma boa resistência ao calor se comparados aos elementos metálicos. No entanto, a adição de fibras de PET ao concreto pode contribuir para minimizar os efeitos das altas temperaturas sobre as estruturas de concreto.

Com o intuito de prover a fundamentação teórica para os resultados deste trabalho, serão apresentadas, a seguir, considerações sobre os elementos que compõe o concreto, e que contribuem para entender o comportamento do mesmo. Primeiramente, serão apresentadas as fases do concreto – agregados e pasta de cimento e na sequência, a adição das fibras. Em seguida, o efeito das altas temperaturas sobre o concreto em cada uma das suas fases.

2.1.1 Agregados

O agregado é responsável por cerca de 60 a 80% do volume do concreto sendo grande a sua importância técnica e econômica na mistura. A definição mais aceita para agregado é, segundo Sbrighi Neto (2005):

“Material granular, sem forma ou volumes definidos, de dimensões e propriedades adequadas às obras de engenharia, em particular ao fabrico de concreto e argamassas de cimento Portland.”

A microestrutura do agregado pode ser resumida como sendo constituída de vários minerais, microfissuras e vazios. Estes minerais dependem da característica de formação da rocha matriz (METHA e MONTEIRO, 2008).

O agregado gráúdo utilizado na pesquisa é granítico. O granito é uma rocha ígnea, maciça, possui características físicas e mecânicas homogêneas, de material

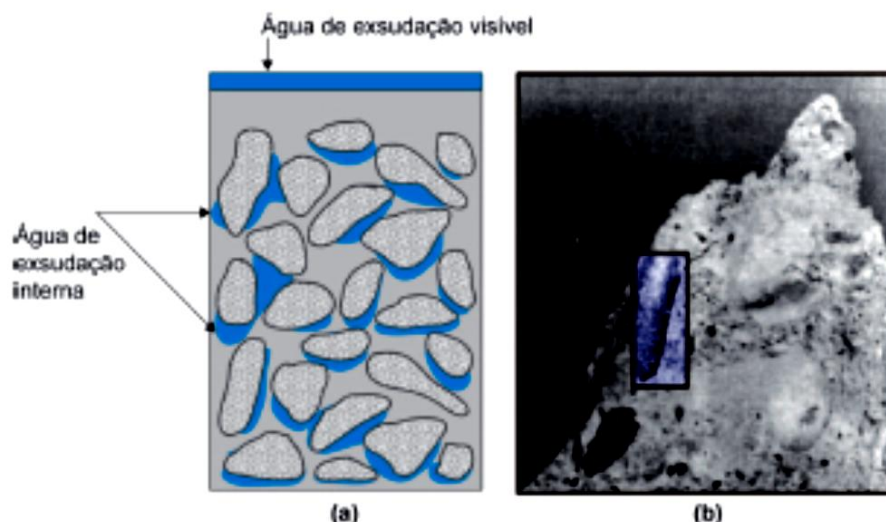
cristalino de granulação grossa, composto de feldspato, quartzo, piroxênios, anfibólios e feldspatóides que conferem a característica de semiduros (riscam o vidro) na Escala de Mohs. Podem ser fragmentados mecanicamente (FRASCÁ, 2007).

Muitas das propriedades mecânicas do concreto no estado fresco e endurecido sofrem influências das características do agregado, entre elas a porosidade, densidade, estabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, etc. A densidade e resistência do agregado, que por sua vez depende mais das características físicas (como volume, tamanho e distribuição dos poros) que químicas (composição química e mineralogia) do agregado (METHA e MONTEIRO, 2008).

Os agregados para uso em concreto devem ter algumas características, tais como composição granulométrica, forma e textura superficial, resistência mecânica, absorção e umidade superficial e isenção de substâncias nocivas. Para essa caracterização existe uma série de Normas Técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A forma e a dimensão do agregado podem afetar a resistência do concreto por acúmulo de água junto à superfície do agregado, que enfraquece a zona de transição pasta-agregado, pelo fenômeno da exsudação. A água da exsudação interna tende a se acumular em torno das partículas alongadas, achatadas e grandes como pode ser visto na Figura 2.1 esquematicamente em (a) e por meio de micrografia em (b) (METHA e MONTEIRO, 2008).

Figura 1 – (a) Representação esquemática da exsudação no concreto fresco (b) falha de aderência por cisalhamento em um corpo de prova ensaiado a compressão uniaxial



Fonte: METHA e MONTEIRO (2008)

Quando o concreto é submetido a temperaturas elevadas, as tensões térmicas dentro do concreto são geradas na interface do agregado graúdo pela diferença de dilatações térmicas entre a argamassa e o próprio agregado graúdo. A intensidade das tensões térmicas é influenciada pela forma geométrica e combinação dos agregados. A forma como as microfissuras aparecem e se propagam é influenciada pela intensidade dessas tensões e, por conseguinte, o enfraquecimento do concreto (COSTA, et al. 2002 b)

Do ponto de vista microestrutural, a diferença entre os coeficientes de expansão térmica da argamassa e dos agregados graúdos gera tensões térmicas microscópicas criando diferentes estados de fissuras microscópicas. As fissuras podem ser controladas pelo uso de agregados de menor coeficiente de expansão térmica (COSTA, et al. 2002a).

Segundo Nince (2007), o agregado inicia sua dilatação em torno de 300° C até degradar quimicamente. Parte do fissuramento do concreto surge após essa temperatura, devido à incompatibilidade térmica nas deformações entre a pasta e agregado. Esse fenômeno pode ser agravado quanto mais instável termicamente seja o agregado. O granito, por exemplo, é termicamente estável até patamares de temperatura de 600°C ou mais (LIMA, 2005).

No concreto submetido a altas temperaturas a mineralogia do agregado determina as expansões térmicas diferenciais entre o agregado e a pasta de cimento, bem como a resistência última da zona de transição na interface. Os agregados silicosos que contêm quartzo (granito ou arenito) podem danificar o concreto a uma temperatura de 573°C, pois, nesta temperatura, a transformação do quartzo de α para β resulta em uma expansão da ordem de 0,85% (METHA e MONTEIRO, 2008).

2.1.2 Pasta de Cimento

A pasta de cimento é a mistura entre aglomerante do cimento hidráulico e água, sendo responsável pelo envolvimento dos agregados.

Entende-se por cimento hidráulico os cimentos que não só endurecem pela reação com a água, mas também formam um produto resistente a água, produzido pela moagem de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio (METHA e MONTEIRO, 2008).

Kihara e Centurione (2008) resumem o processo de hidratação do cimento, como a estabilização dos minerais do clínquer pela água. O clínquer Portland, que produz a maioria dos cimentos utilizados na construção civil, tem em sua composição básica o CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , SO_3 e Fe_2O_3 , respectivamente, associados a siglas representativas C, S, A, S e F. Esses óxidos combinados com a água produzem fases de baixa cristalinidade como o C-S-H, estringtonita ($\text{C}_6\text{A}\underline{\text{S}}_3\text{H}_{32}$) e portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

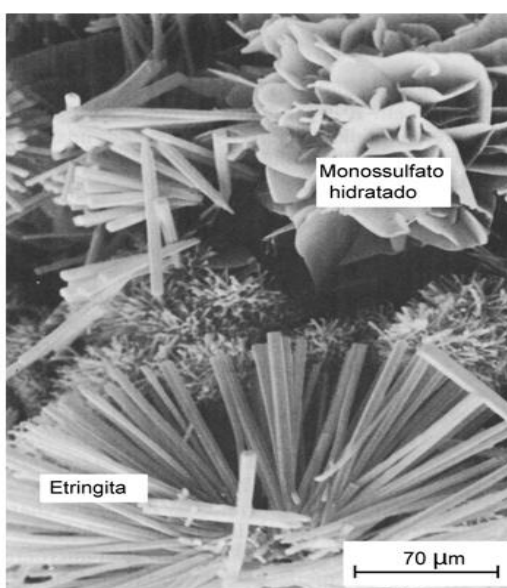
Na macroestrutura do concreto, a pasta de cimento, é quase tão densa quanto o agregado, no entanto, em sua microestrutura é possível perceber áreas mais porosa do que outras. Isso se deve, principalmente, a velocidade de reação de hidratação do cimento, e está diretamente ligada a relação água/cimento ou a idade de hidratação (METHA e MONTEIRO, 2008).

Em termos microestruturais, a pasta de cimento é a fase mais complexa da microestrutura do concreto. As fases no interior da pasta não são nem tão pouco uniformemente distribuídas, nem uniformes no tamanho e na morfologia. Esse

arranjo, ou seja, o tipo, a quantidade e a distribuição entre sólidos e vazios influenciam nas características do concreto endurecido.

Segundo Metha e Monteiro (2008), a fase pasta de cimento, pode ainda ser dividida em outras fases visíveis em microscópio eletrônico de varredura (MEV), a saber: fases sólida, vazios e água. A estrutura microscópica da pasta de cimento poder ser visualizado na Figura 2.2.

Figura 2 - Micrografia eletrônica de varredura da fase pasta de cimento.



Fonte: METHA e MONTEIRO (2008)

A fase sólida é constituída de:

- Silicato de cálcio hidratado (C-S-H) compondo de 50 a 60% da pasta;
- Hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) com 20 a 25%;
- Sulfoaluminatos de cálcio ocupando de 15 a 20%;
- Grãos de clínquer não hidratados.

Os aluminatos reagem com água imediatamente, por isso são responsáveis pelo enrijecimento (perda da consistência) e pega (solidificação) da pasta. Já os

silicatos de são muito importantes para a determinação das características de endurecimento da pasta, conferindo resistência a pasta de cimento (METHA e MONTEIRO, 2008).

Vale salientar que a hidratação da pasta de cimento não ocorre de forma homogênea. As reações químicas variam de acordo com o composto, os aluminatos se hidratam mais rápido que os silicatos (PAULON, 2005).

A fase dos vazios na pasta de cimento se forma através dos espaços de água e do cimento não preenchidos pelos produtos de hidratação do mesmo. Metha e Monteiro (2008) dividem essa fase em: espaço interlaminar do C-S-H, que contribui para a retração por secagem; os vazios capilares, maiores que o anterior, e que influenciam na permeabilidade e na resistência do concreto endurecido; e, ainda o ar incorporado (aprisionado), que podem, por seu tamanho, contribuir para diminuição da resistência.

Além da fase sólida e dos vazios, a água também tem papel importante na caracterização microestrutural do concreto. Na fase pasta de cimento, a água pode ser dividida em água capilar, adsorvida, interlaminar e quimicamente combinada, dependendo do grau de facilidade com que esta água pode ser removida (METHA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Petrucci (1998) a agressão no concreto se dá devido a fissuração causada durante o endurecimento; a excessiva evaporação pode causar o gretamento superficial, desde que a água da superfície se evapore e não seja substituída naturalmente pela exsudação.

A água capilar pode ser chamada de livre, não sofre influência de atração da parte sólida, sua perda pode causar retração da pasta. A água livre no concreto endurecido é evaporada a aproximadamente 100°C. A água interlaminar é associada ao C-S-H e a quimicamente combinada não se perde na secagem, mas é proveniente da decomposição dos hidratos por aquecimento. Segundo Cuoghi e Figueredo (2007), a água interlaminar é liberada da matriz de concreto em temperaturas entre 100 e 200°C. Conferindo nessa fase uma perda de estabilidade da pasta.

O excesso de água livre contribui para a desagregação acelerada da pasta de cimento, devido à formação de gradientes de pressão na rede de poros do concreto durante a transferência de massas (evaporação da água e liberação de ar incorporado) (COSTA, et al. 2002 a).

A pasta de cimento submetida a altas temperaturas mostra-se bastante vulnerável devido ao comportamento de cada um dos seus elementos formadores. Em geral, estes componentes ficam sujeitos a transformações químicas, ocorre o aparecimento de fissuras, e movimentações térmicas diferenciais devido a falta de uniformidade do material. Pela distribuição espacial variável das fases, os poros podem estar preenchidos ou não por água, com diferentes graus de hidratação. Além disso, a presença de fibras e armadura ou ainda, a execução inadequada desse material (moldagem, lançamento ou adensamento), podem prejudicar o sistema, gerando um estado de desequilíbrio durante a exposição a altas temperaturas (LIMA, 2005).

Sob o ponto de vista microestrutural, as modificações químicas das fases cimentícias (C-S-H, etringita, portlandita e outros elementos) são intensas quando a pasta de cimento é submetida à elevação da temperatura, podendo haver variação de massa durante o processo. (METHA e MONTEIRO, 2008).

Em Lima (2005) verifica-se que até 400°C há uma pequena perda de massa atribuída a progressiva desidratação do C-S-H e de outras fases hidratadas. Em torno dos 400°C ocorre uma perda abrupta de massa referente a desidratação da portlandita. E por volta dos 670°C, outra perda devido a descarbonatação da calcita. Após 800°C, a pasta sofre uma modificação das ligações químicas, com substituição da estrutura hidráulica por uma estrutura cerâmica.

A pasta de cimento se expande durante a o processo de hidratação até a perda da água interlaminar. Em torno de 300°C, a pasta de cimento inicia a contração, enquanto o agregado, no caso do granítico silicoso, dilata em torno de 573°C. Ocorrendo um gradiente de deformação entre a pasta e o agregado (NINCE, 2007).

Para Cuoghi e Figueredo (2007), acima dos 200°C a água evaporada reduz as forças de Van Der Waals entre as camadas de C-S-H, ocasionando o aparecimento de fissuras e uma ligeira perda de resistência.

Entre 400°C e 600°C, ocorre uma série de reações na pasta endurecida: dessecação dos poros seguida da decomposição dos produtos de hidratação e destruição do gel de C-S-H, esta última considerada crítica em termos de perda da resistência (de CASTRO, et al. 2011). Essas reações químicas são acompanhadas de redução de volume, contribuindo para o aumento de fissuras (COSTA, et al. 2002 a).

A parte da pasta de cimento mais complexa é chamada de zona de transição. No concreto endurecido, é responsável pelo melhor ou pior desempenho do elemento estrutural. Ela é a interface agregado grão/pasta e tem características peculiares. Sua espessura é da ordem de 10 a 50µm e determina a resistência do concreto (METHA e MONTEIRO, 2008).

Ao longo dos últimos anos, devido ao crescente interesse de melhorar as características do concreto, inúmeras pesquisas vem sendo desenvolvidas para essa fase da pasta. Já é de conhecimento da engenharia do concreto que quanto menor a espessura de zona de transição, mais compacto tende a ser o concreto (METHA e MONTEIRO, 2008).

A densidade da microestrutura influencia diretamente na resistência final do concreto. Esse aumento de densidade está ligado a diminuição da fase de vazios. Por vezes, o comportamento dos concretos que empregam adições minerais (sílica, metacaulim, cinza volante e outras), em temperaturas menores que 400°C, possuem resistência maior que os concretos convencionais (HERTZ, 2003 apud NINCE, 2007).

Na zona de transição, a formação dos cristais de hidróxido de cálcio, perpendiculares ao agregado, favorecem o aparecimento de fissuras, devido à criação do plano preferencial de ruptura. Além disso, o volume de vazios capilares são mais presentes na proximidade do grão do agregado. A relação água/cimento é maior nessa área. As propriedades da zona de transição variam com a umidade relativa do ar e com o grau de hidratação do cimento (LIMA, 2005).

Devido a baixa condutividade térmica dos concretos em geral, pode-se dizer que a decomposição química dos produtos de hidratação da pasta ocorre da área externa em direção a área interna do elemento estrutural (LIMA, 2005).

Nince (2007) afirma que os fatores internos do concreto que mais contribuem para a degradação desse material frente a altas temperaturas são: relação água/cimento muito baixa e adição de partículas finas ou ultrafinas, pois deixam o concreto mais denso, menos permeável, o que dificulta a saída do vapor de água para a atmosfera, gerando altas pressões e aumentando o risco de lascamento explosivo.

Nince (2007), baseada nos trabalhos de Hertz e Sorensen (2005) entre outros, sugere que a quantidade de água livre no concreto, a forma do elemento estrutural e a taxa de elevação de temperatura são fatores externos que contribuem para a perda de resistência do concreto a altas temperaturas. Esses autores observaram que em temperaturas acima de 600°C todos os concretos apresentavam a mesma porcentagem de perda de resistência.

2.2 Concreto com Fibras

2.2.1 Aspectos Gerais

O conceito de reforço com fibras nos materiais de construção não é algo novo. As fibras tem sido aplicadas em construções desde os primórdios de nossa história; há evidências de que fibras de asbesto foram usadas para reforçar postes de argila há 5 mil anos, tijolos de adobe eram reforçados com fibras vegetais na Babilônia, pelos de animais utilizados como reforço em argamassa de enchimento de paredes há centenas de anos, tijolos de barro eram produzidos pelos egípcios com argila cozida e reforçados com palha. Entretanto, a adição de fibras para reforço do concreto é um material de construção relativamente novo.

O emprego de fibras descontínuas adicionadas aleatoriamente ao concreto desenvolveu-se a partir de 1960, quando surgiu no mercado novos produtos tais como fibras poliméricas, metálicas, vegetais e minerais. Os primeiros estudos e

pesquisas dirigidos à aplicação e utilização do concreto reforçado com fibras tiveram início a partir de 1971 nos Estados Unidos. Existem vários tipos de fibras envolvendo o estudo de reforços de materiais da construção (METHA e MONTEIRO, 2008).

No Brasil, o uso de fibras na mistura de concreto é ainda mais recente, sendo usada em escala comercial apenas a partir da década de 90. Atualmente tem sido usadas fibras de várias formas e tamanhos, produzidas em aço, plástico, vidro e materiais naturais; porém, as fibras de aço tem sido as mais utilizadas (MIDESS, 1994).

As fibras são elementos descontínuos onde seu comprimento é muito maior que a maior dimensão da sua seção transversal e podem ser de diversos materiais, desde a fibra natural, como o sisal até o aço, vidro, polímeros, como polietileno e PET. Além do material, as fibras podem ser classificadas por tamanho, em curtas ou longas, e pela apresentação, em soltas, coladas, monofilamentos e fibriladas (FIGUEIREDO, 2005).

A fibra pode ser classificada como curta ou longa. As fibras curtas atuam diretamente sobre a argamassa, diminuem o grande número de microfissura num compósito sobre carga, não aumentam muito a resistência, não alteram de forma significativa a trabalhabilidade e podem aumentar a ductibilidade. As fibras longas atuam na matriz do concreto para diminuir macrofissuras, no entanto diminuem a trabalhabilidade, confere ao concreto uma maior resistência à tração (METHA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Figueredo (2005), as fibras em uma matriz cimentada podem, em geral, ter dois efeitos importantes. Primeiro, elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é, tração indireta, flexão e cisalhamento e, secundariamente, elas melhoram a ductibilidade e a tenacidade de uma matriz com características frágeis.

As fibras têm um grande efeito na resistência a tração na flexão. Há relatos de aumento de mais que 100% na resistência, para elevados teores de fibras. São muito eficientes na melhoria das propriedades dinâmicas do concreto. A fibra atravessa as fissuras que se formam no concreto, seja por ação de cargas externas ou quando sujeito a mudanças de temperatura (SALOMÃO e PANDOLFELLI, 2003).

Aumentam a resistência a fadiga do concreto, entre outras. No entanto, a resistência a compressão é pouco alterada com a adição da fibra, principalmente em teores baixo, entre 0,1 e 3% em relação à massa do cimento (MINDESS, 1994).

2.2.2 Concreto com Fibras Poliméricas

Gorniski e Kazmierczac (2007) definem as fibras poliméricas como sendo macromoléculas orientadas longitudinalmente, composta de moléculas lineares, capazes de serem estiradas, formando longos filamentos cujo fator de forma é elevado, de 100/1. O fator de forma é a relação entre o comprimento da fibra pelo diâmetro do círculo cuja área é igual a seção transversal da fibra (FIGUEIREDO, 2005).

Os polímeros podem ser divididos em: elastômeros, plásticos (rígidos e flexíveis) e fibras. No entanto, a divisão não é muito clara, visto que o plástico pode ser usado em forma de fibra, por exemplo. Os plásticos rígidos e as fibras, geralmente apresentam alta resistência à deformação e alto módulo de elasticidade (PEZZIN, 2007).

Ainda segundo Gorniski e Kazmierczac (2007) os plásticos de engenharia são todos termoplásticos, ou seja, não reticulados e sua fusibilidade permite um fácil processamento. Todos apresentam uma boa resistência mecânica, com módulo de elasticidade alto, quer dizer, são rígidos a temperaturas ambiente e sua estrutura permite ordenação interna, que se reflete na cristalinidade e conseqüentemente, no reforço das propriedades mecânicas e resistência a reagentes químicos e solventes.

O polímero utilizado nesse trabalho foi o polietileno tereftalato (PET), cujo aspecto pode ser observado na Figura 2.3. Classificado como polímero termoplástico, de moderada resistência mecânica, elevada cristalinidade, alta rigidez, dureza e resistência ao calor (PEZZIN, 2007).

Figura 3 - Fibra de garrafa PET pronta para o uso



Fonte: Foto do autor

O polietileno tereftalato (PET) é o polímero formado pela reação do ácido tereftálico e o etilenoglicol. Por sua vez, o ácido tereftálico é obtido pela oxidação do p-xileno, enquanto o etilenoglicol é sintetizado a partir do eteno, sendo ambos no Brasil produzidos na indústria petroquímica. (ABIPET, 2011).

Os polímeros termoplásticos ao serem aquecidos sofrem amolecimento e ao esfriarem retornam a sua rigidez inicial. Isso se deve as ligações químicas intermoleculares fracas, forças de Van der Waals, facilmente interrompidas pela introdução de energia, no caso, o aquecimento (GORNISKI e KAZMIERCZAK, 2007).

O polietileno tereftalato (PET), quando sob o efeito da temperatura e pressão, amolece e flui, podendo ser moldado nessas condições. Pode ser posteriormente remodelado por meio de exposição a aplicação de pressão e temperatura, tornando-se, assim, material reciclável (PEZZIN, 2007).

O PET é sensível à degradação térmica, especialmente na presença de água e/ou ar (oxigênio). Um produto comum na degradação térmica é o acetaldeído. A presença de oxigênio induz um processo de degradação oxidativa e a degradação térmica com umidade provoca a quebra das cadeias, reduzindo o peso molecular do polímero. (ABIPET, 2011).

2.2.3 Concreto com fibra de PET

Ao longo dos últimos anos, as fibras já vem sendo bastante usadas como reforço da pasta de cimento para minimizar as fissuras de retração plástica e aumentar a resistência a tração do material.

No presente trabalho, o material utilizado para reforço das propriedades do concreto convencional utilizado na construção civil foi a fibra de PET oriunda de reciclagem de garrafas de refrigerante que iriam somar volume em lixões e aterros.

A escolha da fibra PET como elemento de reforço da matriz concreto, com a possibilidade de melhorar as propriedades da mesma torna-se bastante atraente, além de tratar-se de um material 100% reciclável, de baixo custo, e abundante no meio. Assim, se alia um benefício ambiental a uma melhoria de um material importantíssimo nas obras de construção civil.

As fibras de PET possuem superfície hidrófuga, apresentam sinergia com matrizes cimentícias e podem apresentar-se em diversas geometrias (monofilamentos, fitas e filmes) (GORNISKI e KAZMIERCZAC, 2007).

2.2.4 Sustentabilidade Ambiental

O crescimento acelerado das cidades e ao mesmo tempo as mudanças de consumo das pessoas trouxeram fatores que vem gerando um lixo muito diferente daqueles que eram produzidos tempos atrás. O lixo atual é diferente em quantidade e qualidade, em volume e em composição. A industrialização traz consigo naturalmente materiais a serem descartados, assim como o aumento no consumo atrelado ao crescimento populacional gera cada vez mais lixo para ser descartado.

Considerando a crescente preocupação da sociedade com relação ao desenvolvimento sustentável e preservação do meio ambiente, a indústria da construção civil também engrossa as fileiras na busca de soluções que minimizem o impacto ambiental de suas atividades.

O lixo é todo e qualquer material inservível e não aproveitável resultante das atividades diárias do homem em sociedade

Segundo Grippi (2001) o lixo é matéria-prima fora do lugar. O tratamento do lixo doméstico, além de ser uma questão com implicações tecnológicas, é antes de tudo uma questão cultural.

A norma NBR 10004 (2004) classifica os resíduos sólidos quanto ao risco a saúde pública e ao meio ambiente. Os resíduos sólidos são classificados em dois grupos - perigosos e não perigosos, sendo ainda este último grupo subdividido em não inerte e inerte.

A política de gerenciamento dos resíduos, chamada política dos 3R, tão difundida nas últimas décadas, baseia-se em três atitudes: reduzir, reutilizar e reciclar. Reduzindo e reutilizando se evitará que maior quantidade de produtos se transforme em lixo. Reciclando se prolonga a utilidade de recursos naturais, além de reduzir o volume de lixo (LEI 12.305/2010).

Reduzir o lixo na construção civil implica em reduzir o consumo de materiais, evitar o reserviço que gera entulho, diminuir o uso de embalagens plásticas e isopor, preferindo as de papelão que são recicláveis, que não poluem o ambiente e desperdiçam menos energia.

Reutilizar significa usar um produto de várias maneiras. Essa atividade já vem sendo amplamente utilizada pela arquitetura moderna e profissionais da construção conscientes de seu papel na preservação de recursos naturais.

Reciclar é uma maneira de lidar com o lixo de forma a reduzir e reusar. Este processo consiste em fazer coisas novas a partir de coisas usadas. A reciclagem reduz o volume do lixo, o que contribui para diminuir a poluição e a contaminação, bem como na recuperação natural do meio ambiente, assim como economiza os materiais e a energia usada para fabricação de outros produtos.

A reciclagem é a alternativa economicamente atrativa e ambientalmente sustentável na medida em que preserva os recursos não-renováveis e possibilita a valorização de materiais nobres, destinando-os ao atendimento de demandas sociais urgentes (PINTO, 1999)

2.2.4.1 O PET

O PET é utilizado, principalmente, nas garrafas e embalagens para refrigerantes, tratando-se, assim, de um lixo urbano local que pode causar grandes problemas à natureza se não possuir um fim adequado. Assim, a utilização destas fibras na construção seria uma excelente solução para um resíduo urbano local.

Pela norma NBR 10004 (2004) o PET pode ser classificado como resíduo classe II B – Inerte conforme se pode ler:

“4.2.2.2 Resíduos classe II B - Inertes

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G.”

E no anexo G da mesma norma:

“A007 - Resíduos de plástico polimerizado, excluídos aqueles contaminados por substâncias constantes nos anexos C, D ou E e que apresentem características de periculosidade.”

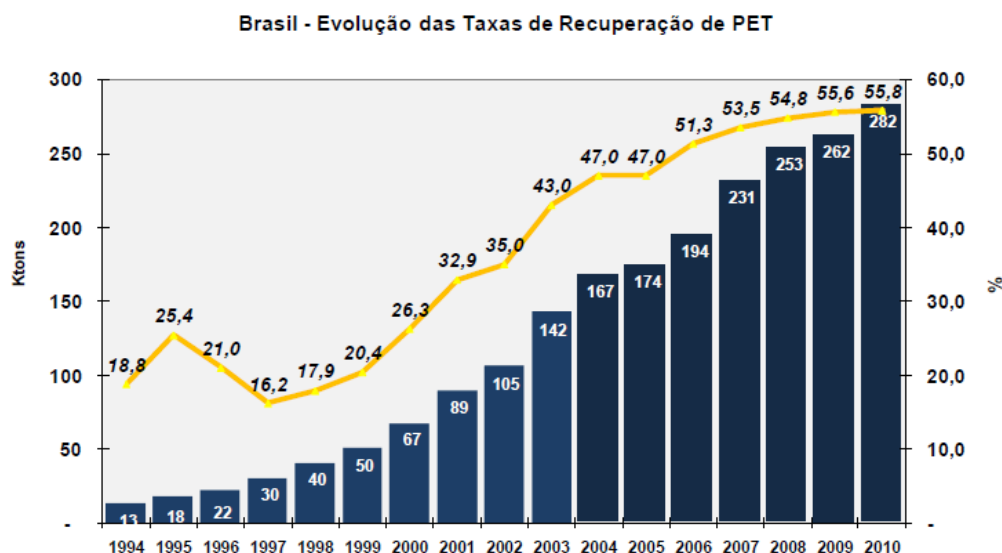
Quando depositado em aterros o PET pode levar aproximadamente 400 anos para degradar-se, reduzindo a capacidade física dos mesmos e provocando, durante este tempo, uma diminuição da capacidade de percolação de gases e líquidos, resultando em um aumento no tempo necessário para estabilização da matéria orgânica. O PET possui alta resistência a agentes biológicos e atmosféricos e seus produtos de degradação são inócuos ao corpo humano (PEZZIN, 2007).

2.2.4.2 Uso do PET reciclado

No ano de 2010, foram recicladas 262 mil toneladas de PET, segundo dados do 7º Censo da Reciclagem do PET no Brasil, divulgado pela ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET. Esse número corresponde a 55,8% das unidades consumidas no país. A totalidade desta quantidade teve a correta destinação, sendo totalmente recicladas e utilizadas em novos produtos.

A evolução histórica da reciclagem de garrafas PET levantada nos últimos 17 anos pela ABIPET é mostrada na Figura 4.

Figura 4 - Série Histórica do Censo da Reciclagem de garrafas PET no Brasil



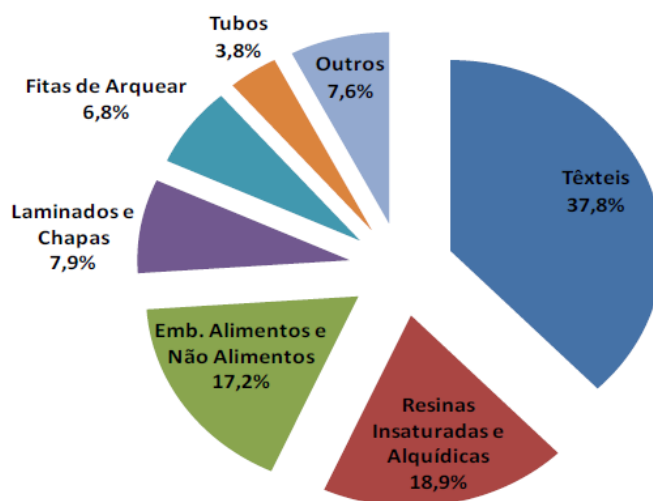
Fonte: ABIPET, 2011

As garrafas de PET, mesmo indevidamente descartadas, elas não causam nenhum tipo de contaminação para o solo ou lençóis freáticos (CANELLAS, 2005). Além disso, verificou-se que durante testes de combustão de fibras de PET, elas são quimicamente inertes. (GORNISKI e KAZMIERCZAC 2007).

Além disso, a fibra de PET é bastante comum na indústria de tecidos e malhas (confeção de roupas), fabricação de carpetes e tapetes, forros e enchimentos, etc. Na engenharia civil, sua utilização é conhecida na forma de TNT (tecido não tecido), que é utilizado como filtro solar, manta asfáltica e material para contenção de encostas (queda de barreira, erosão). (ABIPET, 2002).

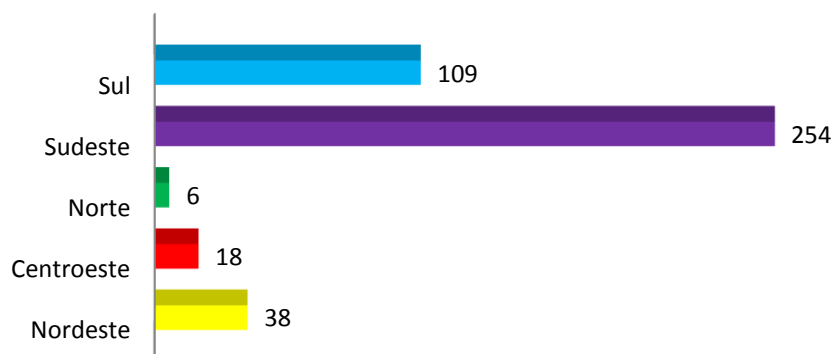
Atualmente, apenas 17,8% dos municípios fazem coleta seletiva, de acordo com a PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008-2010, do IBGE. Pode ser visto na Figura 5 o uso final do PET reciclado no Brasil, no ano de 2010, onde se pode ver que a maior parte, cerca de 38% se transforma em produtos têxteis; outros 19% em resinas insaturadas e alquídicas destinadas a base de tintas e para construção civil (revestimento de piscinas e banheiras, entre outras) e cerca de 17% em embalagens.

Figura 5 - Uso final do PET reciclado no Brasil em 2010



Fonte: ABIPET (2011)

A reciclagem das garrafas PET está concentrada nas regiões mais desenvolvidas economicamente do país, as regiões Sul e Sudeste, com cerca de 85% das 425 empresas recicladoras pesquisadas no Censo 2010 da ABIPET. A figura 2.6 ilustra a distribuição, por regiões brasileiras, das empresas recicladoras de PET em 2010.

Figura 6 - Distribuição Nacional das Recicladoras de PET - Adaptado da ABIPET, 2010

Fonte: ABIPET (2011)

2.3 Concreto Submetido as Altas Temperaturas

O comportamento real de um concreto exposto a altas temperaturas resulta de muitos fatores que interagem simultaneamente e que são de grande complexidade para uma análise exata. Sendo este comportamento, determinado pelas propriedades dos seus componentes: pasta, zona de transição e agregado. Durante a exposição a altas temperaturas o elemento estrutural absorve calor que se traduz em expansão térmica. Ocorre então uma expansão diferenciada entre os elementos do concreto (SOUZA, 1998).

Metha e Monteiro (2008) afirmam que a composição do concreto é muito importante porque tanto a pasta como o agregado se decompõem com o calor. A permeabilidade, o tamanho do elemento estrutural e a taxa de aumento da temperatura governam o desenvolvimento de pressões internas. A pasta perde seus diversos tipos de água com o aumento da temperatura. A composição mineralógica dos agregados governa a dilatação térmica diferencial entre a pasta e os agregados e por consequência na zona de transição.

Assim, a durabilidade do concreto é substancialmente afetada em presença de altas temperaturas. Sendo esse processo agravado em função das dimensões das peças vêm sendo reduzidas com o avanço tecnológico da construção civil e o uso de um concreto de melhor desempenho. Peças com maiores dimensões oferecem menor propagação de calor do exterior para o núcleo da peça, preservando-a.

Além disso, a alta compacidade desses concretos impede a movimentação de água e ar no interior das peças durante a exposição as altas temperaturas e provocam os lascamentos e, conseqüentemente a ruptura do elemento estrutural (COSTA et al, 2002 b)

A taxa de aquecimento e o tempo de exposição são também variáveis significantes para a ocorrência de fissuras e lascamentos por influenciarem na formação de gradientes térmicos e de pressão no interior do elemento estrutural (NINCE, 2007).

A frente de calor ao penetrar no concreto provoca a desidratação das camadas mais externa. A maior parte do vapor formado migra em direção as partes mais frias do interior do concreto. Isso aumenta rapidamente a pressão de vapor, originando um esforço de tração no concreto. Se a resistência a tração do concreto não for suficiente para resistir a esse esforço, a camada mais externa será arremessada para fora do elemento (COSTA et al, 2002 a)

Como conseqüências as esfoliações sucessivas das camadas externas do concreto associadas as altas temperaturas atingidas pelo material reduzem a resistência das armaduras e do concreto, podendo, em casos extremos, levar a estrutura ao colapso (NINCE, 2007).

Em diversos trabalhos sobre o efeito da temperatura no concreto, os pesquisadores fazem referência ao concreto de alta resistência como o que mais rapidamente sofre o efeito de lascamento, ou *spalling*, e sugerem que esse comportamento está relacionado a uma microestrutura do concreto mais densa, menos porosa, mais susceptível a fissuração frágil (METHA e MONTEIRO, 2008). Hertz (2003) alerta que uma densa microestrutura não necessariamente significa alta resistência.

Kanéma et al. (2011) definem que os fatores que levam o concreto ao efeito *spalling* estão relacionados á: (1) baixa permeabilidade, (2) baixo fator água/cimento, e (3) um aumento do gradiente térmico. Para eles, o gradiente térmico, por si só, não pode explicar a fragmentação explosiva do concreto.

Hertz (2003) se refere a essa densa microestrutura e, faz referência exatamente aos concretos que empregam adições minerais (sílica, metacaulim, cinza volante e outras). Inclusive comenta que sem nenhuma adição, o concreto não apresenta o efeito de lascamento.

De Castro et al (2011) afirma que, quando expostos às altas temperaturas, a pasta de cimento retrai enquanto os agregados expandem, enfraquecendo a zona de interface e a ligação entre eles; como consequência, este processo aliado à decomposição química dos produtos hidratados promovem uma severa deterioração e perda de resistência no concreto submetido a tais condições.

Uma adaptação dos resultados dos concretos as diferentes temperaturas de exposição, conclusivo em Costa et al, (2002a) e endossada por Kanéma et al., (2011), pode ser visto na Tabela 1:

Tabela 1– Efeito da temperatura sobre o concreto

Temperatura	Efeitos
Até 100°	O concreto mantém sua característica estrutural
Entre 300 e 400°	Aparecem fissuras superficiais visíveis, o concreto apresenta redução acentuada na resistência a compressão entre 15 e 40% da resistência inicial.
Acima de 600°	Perda total da função estrutural perde de 55 a 70% da resistência inicial

Fonte: Kanéma et al., 2011

Peret et al (2003) concluíram que a adição das fibras poliméricas pode reduzir o dano durante a secagem dos concretos refratários, pelo aumento da permeabilidade, ou seja, redução da pressão interna. Esse resultado está associado aos avaliados por Salomão e Pandolfelli (2003) da Universidade Federal de São Carlos/SP, que estudaram o comportamento dos materiais refratários.

Para Costa et al (2002a), o volume dos vazios no concreto, seja por incorporação de ar, seja pela utilização das fibras que criam sulcos interligados que permitem a liberação do vapor d'água nos concretos, é o fator primordial para aumentar a resistência do concreto exposto a altas temperaturas.

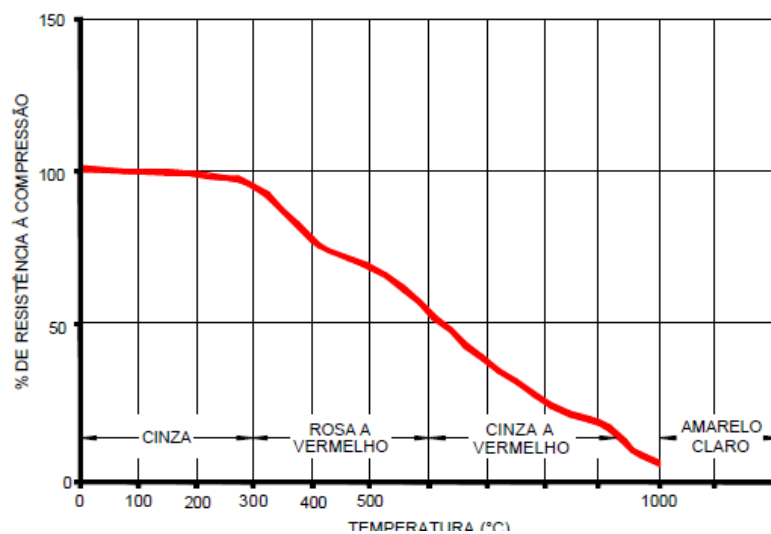
Como as fibras de baixo ponto de fusão, elas têm um efeito significativo sobre o comportamento hidráulico do concreto sob altas temperaturas, ou seja, quando o concreto é exposto a temperatura maior que a temperatura de fusão da fibra, inicia-se a formação de uma rede permeável que permite a migração dos gases para o exterior, reduzindo a pressão nos poros do material e, conseqüentemente, eliminando a possibilidade de ocorrência do lascamento explosivo nos concretos de alta resistência (De Castro et al (2011).

As fibras poliméricas expostas a altas temperaturas fundem ou se deterioram formando os canais que permitem a passagem dos fluidos. Esse processo, no entanto, deve ocorrer em temperaturas mais baixas, permitindo o alívio das pressões internas, aumentando o tempo de resistência ao colapso do concreto. Esse melhoramento na resistência do concreto sob altas temperaturas agrega mais uma função as fibras, que passam a contribuir na permeabilidade do concreto, além da função de reforço (PERET et al, 2003).

Wendt e Dal Molin (2008) observaram variação de coloração no concreto submetido a altas temperaturas e concluíram que este fenômeno está ligado à presença de compostos ferrosos, dentre eles o óxido de ferro, hidróxidos e óxidos de ferro hidratados. Estes compostos quando presentes no agregado do concreto exposto a altas temperaturas, geralmente, alteram a coloração do agregado. O efeito é mais presente em agregados ricos em sílica, e menos acentuados nos calcários.

Em Costa; Figueredo; Silva, 2002 (b), citando as experiências de Bauer (1994), relata que a natureza do agregado influencia na coloração dos concretos. Indica, ainda, que os concretos comumente usados na construção civil brasileira (agregados granítico - brita) ensaiados em fornos elétricos não apresentaram alteração de cor. Na Figura 7 está representada a relação entre a resistência e coloração e a temperatura de exposição (WENDT 2008).

Figura 7 - Alteração na resistência e coloração do concreto



Fonte: Cánova (1998 apud em WENDT, 2008)

O concreto após a exposição a altas temperaturas mantém a coloração mesmo depois do resfriamento. Essa propriedade é importante na avaliação preliminar da deterioração do concreto após um incêndio, pois podem fornecer informações relativas a temperaturas de exposição a que o concreto foi submetido.

CAPÍTULO 3

Procedimento Experimental

Neste capítulo são apresentados os materiais que fazem parte da composição do concreto deste estudo, além de suas caracterizações. É também apresentado o traço utilizado, os parâmetros adotados na mistura, o processo de cura do concreto, e ainda, a metodologia dos ensaios realizados. Por fim, são feitas as considerações preliminares dos resultados dos ensaios.

Os procedimentos experimentais foram desenvolvidos baseados nas normas técnicas da ABNT.

Os corpos de prova foram moldados tendo como base um concreto convencional para vigas, utilizado no canteiro de obras de uma empreiteira em uma obra em execução na UFRN.

A caracterização dos materiais e os ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da UFRN.

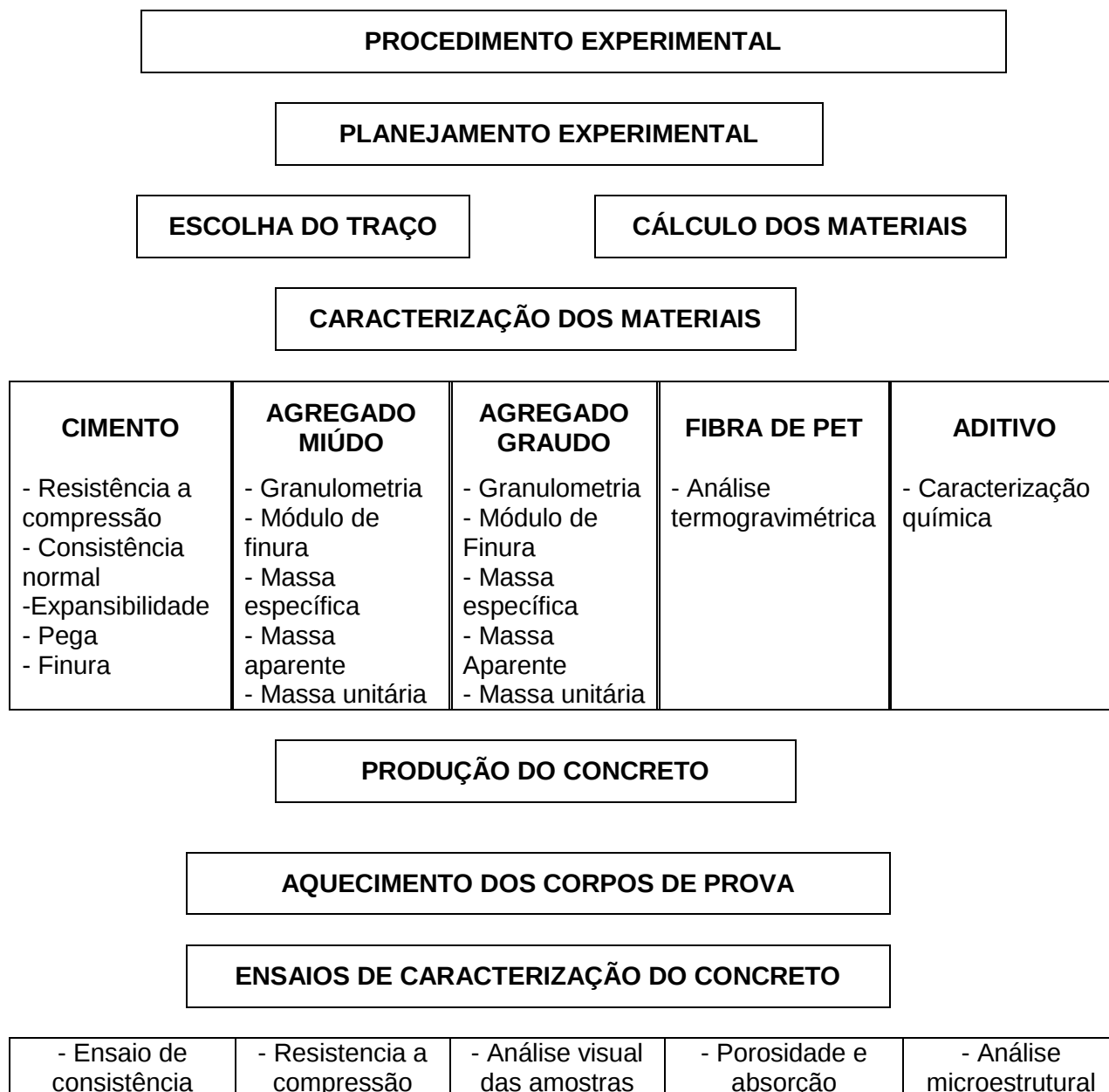
O aquecimento dos corpos de prova foi feito no Laboratório de Nutrição Animal do Núcleo de Tecnologia Industrial da UFRN.

A análise da microestrutura do concreto foi feita utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do Laboratório de Análise de Materiais do CTGÁS-RN.

3.1 Planejamento Experimental

O fluxograma esquemático do procedimento experimental pode ser visualizado na Figura 3.1:

Figura 8 – Esquema simplificado do procedimento experimental



Fonte: elaborada pelo autor

3.1.1 Escolha do Traço

O traço de referência utilizado foi 1:1,9:2,85 (cimento CP IV 32 RS: areia quartzosa: brita granítica), fator água cimento 0.46, um traço para concreto convencional de consistência plástica (*slump test* de 100 a 120mm), usado em obras da região, para uma resistência de 30 Mpa e o consumo de cimento de 413Kg/m³.

As fibras de PET utilizadas neste trabalho são provenientes de reciclagem de garrafas PET de refrigerante de 2 litros, cortadas no comprimento médio 15 mm.

O aditivo utilizado foi o polifuncional redutor de água SIKAMENT PF 171, na proporção de 300 ml por saco de cimento.

3.1.2 Cálculo dos Materiais

O concreto foi produzido para a confecção dos 50 corpos de prova e os ensaios de abatimento (*slump test*). Utilizou-se a quantidade de material para uma betonada de um saco de cimento, com rendimento médio previsto de 120,9 litros de concreto pronto. O volume de concreto confeccionado pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Volume estimado de concreto para os corpos de prova em litros.

Ensaio	Traço de Referência	Com PET	Total	Volume unitário (litros)	Volume total (litros)
Corpos de prova	24	26	50	1,57	78,50
Slump Test	3	3	6	5,50	33,00
Volume Total (litros)					111,50

Fonte: elaborada pelo autor

Na bibliografia vigente, o teor de adição de fibras de PET varia muito. Para o concreto desta pesquisa foi utilizado 3,0 Kg/m³ baseado no trabalho de Kalifa (2001), que ensaiou teores entre 0,5 a 3,0 Kg/m³ ou cerca de 0,6 % do peso de cimento (LIMA, 2005), baseados nos trabalhos de vários autores entre eles: Andeberg (1997), Sun, Luo e Chan (2001) e Lima et al (2004). Sendo, portanto, a quantidade de fibra de PET utilizada de 363 gramas.

A tabela 3 resume a quantidade de material para uma betonada de um saco de cimento.

Tabela 3 - Composição do concreto

Traço	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Água (L)	Aditivo (mL)	Fibra de PET (g)
Tipo	50	95	142,50	23	300	363

Fonte: elaborada pelo autor

3.2 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados na confecção do concreto foram caracterizados no Laboratório de materiais de construção da UFRN.

O concreto foi confeccionado utilizando cimento, areia, brita, água, aditivo e fibras de PET.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado na obra é da marca POTY – VOTORANTIM tipo CP IV – 32 RS RRAA, produzido em Paulista/PE. O fabricante¹ do cimento, afirma, que este cimento, o POTY CP IV-32 RS RRAA, produzido em Paulista foi desenvolvido especialmente para atender às necessidades específicas da região, com maior resistência à maresia e à umidade, proporcionando, assim, uma maior durabilidade. Ideal para meios agressivos, inibidor da reação álcali-agregado, resistente a sulfatos, baixo calor durante a hidratação, tem melhor cura, sem fissuras, maior impermeabilidade e proteção para a ferrugem). O concreto confeccionado com o CP IV apresenta, a longo prazo, resistência mecânica à compressão superior ao concreto de cimento Portland comum (NBR 5736/1999). O cimento do tipo RS – resistente a sulfatos, ideal para meios agressivos sulfatados como redes de esgoto de água servida ou industriais e alguns tipos de solo. (NBR 5737/1992).

¹ (http://www.vcimentos.com.br/htms-ptb/Imprensa/Noticias_Ver.asp_obj=Noticia_110727)

Para a caracterização do cimento foram realizados os ensaios de finura, tempos de pega, ensaio de consistência do cimento,

3.2.1.1 Ensaio de Finura

O ensaio de finura baseou-se na NBR 11579(1991) - Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).A aparelhagem do ensaio é composta por balança de precisão 0,01g, cápsula de porcelana, peneira 75 µm (nº 200), pincel e cronômetro. Pesou-se 50±0,05 g de cimento, em seguida colocou-se sobre a tela da peneira nº 200 com fundo e tampa, começando-se o peneiramento manual que é dado em três etapas. A massa passante, que deve ser desprezada, tem que ser inferior a 0,05g (0,1% da massa inicial). Ao final obtém-se o módulo de finura do cimento pela equação:

$$F = \left[\frac{R \times C}{M} \right] \times 100 \quad (3.1)$$

Onde,

F - índice de finura do cimento, em porcentagem;

R – resíduo do cimento na peneira nº 200, em g;

M – massa inicial do cimento, em g;

C – fator de correção da peneira utilizada no ensaio, devendo está compreendida no intervalo de 1,00 ± 0,20.

3.2.1.2 Determinação do Tempo de Pega do Cimento

Para determinação dos tempos de pega do cimento, o ensaio foi baseado na NBR NM 65(2002) – Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. A aparelhagem do ensaio consiste em uma balança com capacidade de 1000g, misturador mecânico, espátula e Aparelho de Vicat. O tempo de pega é o intervalo entre a adição da água ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat penetra

na pasta até uma distancia de 4 ± 1 mm da placa da base. No início da pega a agulha deve estacionar a 1 mm da base inferior do tronco de cone e o fim da pega será quando esta mesma agulha não mais penetrar na pasta deixando apenas uma pequena deformação na superfície da mesma. Depois de estacionada a agulha nas posições descritas, foram marcados os tempos em que elas ocorreram. Para isso foi necessário que se fizesse leituras periódicas até achar o tempo de pega.

3.2.1.3 Ensaio de Consistência do Cimento

Para verificar a consistência do cimento utilizou-se a NBR 43(2003). Segundo a mesma, a pasta de consistência normal é aquela a qual a sonda penetra uma distância de (6 ± 1) mm da placa base. Usou-se uma balança com resolução de 0,1 g e capacidade de 1.000g, um misturador, espátulas de borracha e metálica, régua metálica, molde e aparelho de Vicat. Prepara-se a pasta de acordo com a norma. Após um intervalo de, no mínimo, 30 minutos, depois do enchimento do molde, desce a agulha suavemente até que haja seu contato com a pasta. Faz-se a leitura indicada na escala. Quando essa indicação estiver a 4 ± 1 mm da placa da base, anota-se a leitura na escala e o tempo contado a partir do instante em que a água e o cimento entram em contato. O resultado é expresso em horas e minutos, com uma aproximação de 5 minutos.

3.2.1.4 Ensaio de Expansibilidade do Cimento

O ensaio de expansibilidade do cimento foi baseado na NBR 11582(1991). Esse ensaio consiste na moldagem de agulhas de *Le Chatelier* com a pasta de consistência normal. O fim da cura inicial é de 12 horas após a moldagem das agulhas, onde nesse período, as agulhas devem ficar com um vidro untado com óleo mineral. Uma vez terminada a cura, as agulhas foram posta em água com $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e com as extremidades fora d'água, sendo feitas as leituras durante seis dias até que se alcance um valor constante, sendo este a leitura final.

3.2.1.5 Determinação da Resistência à Compressão do Cimento

Para a determinação da resistência à compressão do cimento, tomou-se como base a NBR 7215(1997).

Primeiramente prepara-se a areia que será usada na mistura, a qual é composta de 4 porções iguais de material retido nas peneiras: 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm. Pesou-se a água de acordo com o fator água/cimento. Para efetuar a mistura, primeiro colocou-se toda água na cuba e aos poucos se foi adicionando o cimento com o misturador em velocidade baixa durante 30 segundos. Depois se adicionou a areia sem parar a operação com cuidado e durante 30 segundos. Após o término, colocou-se o misturador em velocidade alta e deixou-se por 30s.

Depois desligou-se o misturador durante 1minuto e 30 segundos e retirou-se com uma espátula a argamassa aderida as paredes da cuba. Durante o tempo restante a argamassa deve ficar em repouso na cuba. Imediatamente após esse intervalo, ligou-se o misturador na velocidade alta, por mais 60 segundos. Logo após, iniciou-se a moldagem colocando a argamassa no molde cilíndrico de forma a preenchê-lo com 4 camadas e em cada camada com o auxílio do soquete foram aplicados os 30 golpes sobre a superfície da argamassa. Após 24 horas de moldagem os corpos de prova foram retirados dos moldes aguardando as datas de rompimento. Para garantir que a carga aplicada durante o rompimento fosse uniformemente distribuída foi feita uma leve camada de enxofre para regularização das faces dos corpos de prova (capeamento).

O rompimento foi feito em uma Máquina Universal de Ensaio Mecânicos da marca AMSLER, suíça, e mudou-se a célula de carga para 10.000 kg.

3.2.2 Agregado Miúdo

A areia utilizada para confecção dos corpos de prova foi proveniente de jazidas do Rio Grande do Norte. A mesma foi armazenada em baia exposta ao tempo.

Para caracterização da areia, foi coletada uma amostra no canteiro de obras, sendo conduzidas em sacos plásticos para conservar a umidade natural até a chegada ao laboratório.

O ensaio de massa específica real baseou-se na norma NBR NM 52(2009) – Agregados miúdos, utilizando o Frasco de Chapman.

A massa unitária é a relação da massa do agregado lançado no recipiente de volume e massa conhecidos previamente. Para o ensaio de massa unitária foi seguida a norma NBR NM 45(2006) – Agregados.

Foi feito o ensaio de granulometria da areia, conforme prescreve a NBR NM 248(2003). Com esse ensaio foi determinado a dimensão máxima ($D_{m\acute{a}x}$) bem como o módulo de finura da areia, pelo peneiramento do material e a aplicação da equação 3.2.

$$MF = \frac{\Sigma \% acumuladas}{100} \quad (3.2)$$

3.2.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado na pesquisa foi brita 19 mm, de origem granítica e, assim como a areia, foi proveniente de jazidas do Rio Grande do Norte, de uso comum na região.

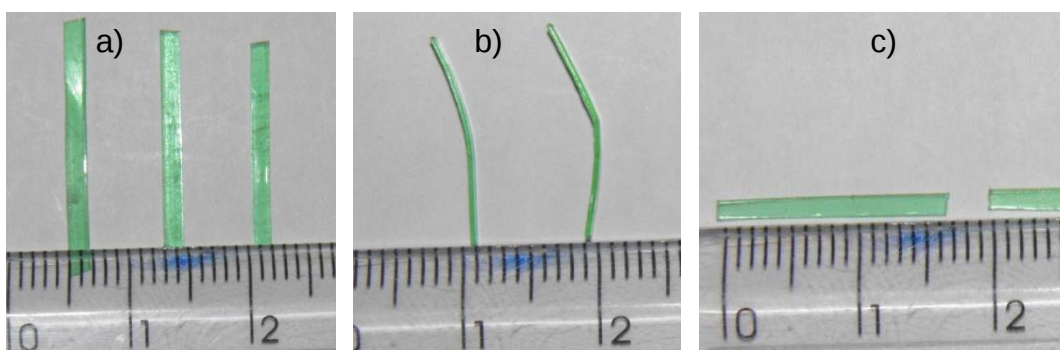
Para a sua caracterização, foi coletada uma amostra com cerca de 5 Kg do volume de brita do canteiro de obras e transportada em saco plástico para o laboratório.

Para o agregado graúdo a determinação da massa específica foi feita pelo método da balança hidrostática, de acordo com a NBR NM 53(2009) – Agregado Graúdo, enquanto que a massa unitária foi obtida a partir da Norma NBR NM 45(2006) - Agregados.

3.2.4 Fibra de PET

As fibras de PET utilizadas nessa pesquisa foram provenientes de um processo de reciclagem de garrafas de refrigerante, que consiste em desfiar o corpo da garrafa numa máquina artesanal e armazená-las em rolos por uma fábrica de vassouras da cidade de Natal-RN. A fita de PET do rolo foi fornecida com largura de 2mm (Figura 9a). A espessura da fita era a mesma da parede da garrafa PET, cerca de 0,2mm, como pode ser visto na figura 9b e foram cortadas manualmente em comprimentos de, aproximadamente, 15 mm, figura 9c.

Figura 9 – Detalhe da Fibra: a) largura; b) espessura; b) comprimento.



Fonte: Foto do autor

Na Figura 10 pode-se ver a preparação da fibra de PET: Em a) a máquina artesanal que desfia a garrafa; em b) A fibra que veio da fábrica de vassoura já desfiada– em rolo.

Figura 10 - Preparação da fibra de PET: a) desfiadora artesanal; b) fibra embalada.



(a)



(b)

Fonte: Foto do autor

A fibra de PET foi ensaiada para identificação da temperatura de degradação térmica da fibra. Foi usada a termogravimetria (TG), uma técnica que se baseia no estudo da variação de massa da amostra devido a transformações físicas (sublimação, evaporação, condensação) ou químicas (degradação, decomposição, oxidação) em função da temperatura.

Para a pesquisa, a fibra de PET foi ensaiada pelo método dinâmico de termogravimetria, onde a perda de massa é registrada continuamente à medida que a temperatura aumenta.

A massa do material foi obtida pelo corte da fibra em pedaços milimétricos colocado na balança do equipamento. O material foi aquecido até a temperatura de 900°C (temperatura máxima de aquecimento que seria utilizada nos corpos de prova).

3.5.2 O aditivo

No concreto pesquisado foi utilizado o aditivo polifuncional SIKAMENT PF 171, contendo a base química (lignosulfonatos), sendo sua função principal a ação superplastificante (reduzidor de água de alta eficiência), suas funções secundárias são: incorporação de ar, aceleração da pega, aceleração do endurecimento, retardamento de pega com eventual redução da resistência mecânica.

Segundo Lobo et al (2004), os aditivos polifuncionais são aditivos que se comportam como plastificantes quando utilizados a baixas dosagens (entre 0,3 e 0,6%) e como superplastificantes a altas dosagens (entre 0,7 e 1,5%). Estes aditivos possuem como ponto forte o aumento da trabalhabilidade e a retenção desta. Além desta característica, também proporcionam trabalhabilidade requerida na maioria das aplicações reduzindo a quantidade de água entre 10% a 20%) atendendo a NBR 11768(2011) que estipula que um aditivo plastificante provoca uma redução de pelo menos 6% a água unitária do concreto referência com aditivo comparativamente aquele sem aditivo, diminuem a permeabilidade do concreto aumentando a resistência e a durabilidade e incorporam de 3 a 5% de ar.

As características do aditivo utilizado estão compiladas na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização do Aditivo Polifuncional SIKAMENT PF 171

Características	
Ação principal:	Plastificante ou superplastificante de pega normal
Ação secundária:	Redutor de água
Composição básica:	Sais sulfonados em meio aquoso
Aspecto:	Líquido
Cor:	Castanho escuro
Densidade à 25°C:	1,22 a 1,26 kg/l
PH:	6 – 8
Dosagem	
Plastificante	De 0,3 a 0,5% sobre o peso do cimento (300 à 500 g ou 250 a 420 ml para cada 100 kg de cimento Portland)
Superplastificante	De 0,6 a 1,5% sobre o peso do cimento (0,6 à 1,5 kg ou 500 a 1250 ml para cada 100 kg de cimento Portland)

Fonte: Fabricante SIKA - **Ficha de Produto** Edição 08/08/2011 Sikament® PF 171

No trabalho de Lobo et al. (2004) foi ressaltado que é importante observar o modo que o superplastificante é adicionado na mistura, para atingir melhor eficácia. A adição do superplastificante na água de amassamento reduz a eficácia, possivelmente devido à absorção dos agregados durante a mistura.

A dosagem adotada para o tipo de concreto utilizado na obra e na pesquisa foi proporção de 300 ml por saco de cimento.

3.3 Produção do Concreto

3.3.1 Mistura, Moldagem e Cura do Concreto

A mistura, moldagem e cura do concreto foram realizadas no canteiro de obras, sob a supervisão da pesquisadora. Após 28 dias, os corpos de prova foram levados para o laboratório para aquecimento em diferentes temperaturas. Nos subitens a seguir, será descrito cada uma das fases de preparo dos corpos de prova.

3.3.1.1 Mistura dos Corpos de Prova

Os materiais para fabricação do concreto foram misturados com uso de betoneiras. Para a produção do concreto para na pesquisa, foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado para 600l, existente no canteiro de obras.

Antes de iniciar a mistura, a betoneira foi lubrificada com água, com o objetivo da água de amassamento do concreto não ser absorvida pelo equipamento, depois essa água foi removida (HELENE, 2005).

Os materiais foram introduzidos na betoneira na seguinte ordem:

- a) Com a betoneira ligada, foi colocada 50% da água da composição do traço;
- b) Em seguida o agregado graúdo;
- c) Logo em seguida, adicionou-se o cimento;
- d) Depois o agregado miúdo;
- e) Por fim, o restante da água que continha o aditivo redutor de água incorporado;

Após todos os materiais serem colocados na betoneira, esta permaneceu girando durante 5 minutos. Depois de retirado o concreto de referência, as fibras de PET foram adicionadas. Na Figura 11 pode ser visto o interior da betoneira após a adição das fibras de PET ao concreto de referência.

Figura 11 - Interior da betoneira após a adição das fibras de PET.



Fonte: Foto do autor

3.3.1.2 Moldagem dos Corpos de Prova do Concreto

Para a realização do ensaio de compressão simples foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100x200 mm, de acordo com a Norma NBR 5738(1984).

Com os moldes montados e lubrificados, o concreto foi colocado dentro do molde. O adensamento do concreto foi feito manualmente com o auxílio de um soquete, com duas camadas de doze golpes cada, após a moldagem, o concreto foi deixado em repouso por 24 horas.

O processo de moldagem dos corpos de prova do concreto com fibra de PET pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Processo de moldagem dos corpos de prova: a) Colocação da primeira camada de concreto do corpo de prova; b) Socamento da camada.



(a)



(b)

Fonte: Foto do autor

Dos cinquenta corpos de prova, 24 eram de referência e 26 com a fibra de PET. A Tabela 5 compila a distribuição dos corpos de prova moldados. Na Figura 13 podem ser vistos os corpos de prova com PET após a moldagem.

Tabela 5 – Distribuição dos corpos de prova confeccionados

Concreto	Temperaturas								
	30	100	200	300	400	600	900	R	total
Referência	3	3	3	3	3	3	3	3	24
Com PET	3	3	3	3	3	3	3	5	26

Onde os concretos foram identificados da seguinte forma:

XPYYY, onde X pode ser sem ou com PET e YYY é a temperatura em que o concreto foi submetido antes do ensaio de compressão. Exemplo:

- SP030 – Sem PET a temperatura ambiente (30°C)
- CP900 – Com PET aquecido a temperatura de 900°

Figura 13 - Corpos de prova produzidos para a pesquisa



Fonte: Foto do autor

3.3.1.3 Ensaio de Abatimento – *Slump test*

A consistência do concreto fresco foi determinada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test), conforme a NBR NM 67(1998). Para esta pesquisa foram feitos ensaios de caracterização do concreto no estado fresco para o concreto de referencia e o concreto com adição de fibra de PET.

Na Figura 14 (a) pode ser visto o processo de enchimento do tronco de cone; na Figura 14 (b) o abatimento do concreto de referência.

Figura 14 - Processo do ensaio de abatimento do tronco de cone: enchimento do tronco de cone, b) preparação para o socamento da camada.



Fonte: Foto do autor

Para o traço escolhido, o parâmetro considerado foi a trabalhabilidade, para um resultado no ensaio de abatimento (slump test) entre 100 e 120 mm e a resistência a compressão aos 28 dias da ordem de 30 MPa.

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios foram os seguintes:

- a) Molde metálico com diâmetro de base inferior de 200 mm, diâmetro da base superior de 100 mm e altura de 300 mm;
- b) Haste de aço com diâmetro de 16 mm e comprimento de 600 mm;
- c) Placa de base para apoio do molde
- d) Régua graduada.

O ensaio consiste em preencher o tronco de cone com 03 camadas iguais alternado com a compactação de cada camada com 25 golpes. Depois de encher o cone, retira-se o molde e mede-se o deslocamento do material deformado.

Na Figura 15(a) pode ser visto o abatimento atingido pelo concreto de referencia e na Figura 15(b) o concreto com fibra de PET.

Figura 15 – Ensaio de abatimento do tronco de cone: a) abatimento do concreto de referencia; b) abatimento do concreto com PET.



(a)



(b)

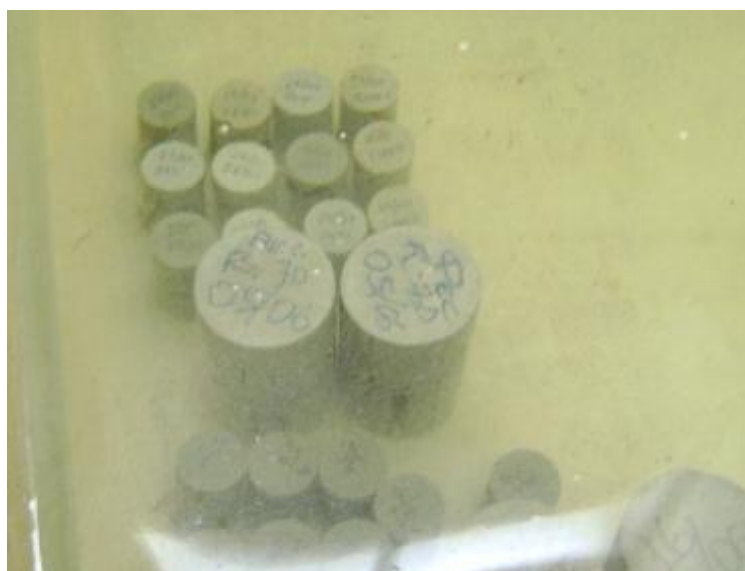
Fonte: Foto do autor

3.3.1.4 Cura dos Corpos de Prova de concreto

Passadas as 24 horas os corpo de prova dos concretos foram retirados dos moldes e submetidos ao processo de cura, sendo colocados em imersão em agua durante 28 dias. Conforme as recomendações da NBR NM67(1998). Na Figura 16, pode ser visto o tanque de imersão onde os corpos de prova passam pelo processo de cura.

Após os 28 dias, o concreto permaneceu fora do tanque aguardando a data de ser aquecido e submetido ao ensaio de resistência à compressão.

Figura 16 – Processo de cura dos corpos de prova.



Fonte: Foto do autor

3.4 Aquecimento dos Corpos de Prova de concreto

Os corpos de prova foram aquecidos às temperaturas de 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 600°C e 900°C. O forno utilizado para aquecer os corpos de prova às diferentes temperaturas, foi o Jung n° 4383, modelo 2710 – 1000°C, do Laboratório de Nutrição Animal do Núcleo de Tecnologia Industrial da UFRN.

O forno foi programado para aquecer a uma taxa de 1°C/min. Após atingir a temperatura desejada os corpos de prova permaneceram submetidos à essa temperatura durante 30 minutos e em seguida permaneceram no forno até

temperaturas da ordem de 50°C onde fosse possível retirá-los. O resfriamento natural teve duração mínima de 24 horas para em seguida serem realizados os ensaios de resistência à compressão.

Na figura 17 podem ser visualizadas o exterior e o interior do forno utilizado. A capacidade do forno permitiu que três corpos de prova fossem aquecidos para cada temperatura.

Figura 17 – Equipamento utilizado para aquecimento dos corpos de prova: a) exterior e b) interior



(a)



(b)

Fonte: Foto do autor

3.5 Ensaios do Concreto

Para este trabalho foram feitos, além dos ensaios de caracterização do concreto no estado fresco, o Ensaio de Abatimento (*Slump Test*) e, ensaios no concreto endurecido: os ensaios de resistência a compressão, análise visual da amostra, e análise da microestrutura do concreto. Os ensaios dos concretos endurecidos foram feitos após os 28 dias. Os corpos de prova foram aquecidos as temperaturas já citadas antes de serem rompidos no ensaio de resistência a compressão.

3.5.1 Resistência à compressão

A avaliação da resistência à compressão dos corpos de prova utilizados para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada de acordo com as orientações da NBR 5739(2007). Como já especificado no item 3.4, os corpos de prova foram ensaiados depois de serem aquecidos no forno e esfriarem naturalmente por no mínimo 24 horas.

Os corpos de prova foram capeados com enxofre antes do ensaio para obter uma melhor distribuição de carga na máquina do ensaio. O aspecto de um corpo de prova após capeamento pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Corpo de prova capeado com enxofre para o ensaio de resistência a compressão



Fonte: Foto do autor

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de resistência a compressão foi a máquina universal de Ensaio Mecânico da marca AMSLER, Suíça nº 699/474, com capacidade de carga até 100 t, existente no Laboratório de Concreto do Núcleo de Tecnologia da UFRN.

3.5.2 Análise Visual das Amostras

Os corpos de prova também foram observados quanto à alteração de cor após a exposição às altas temperaturas. Comparando-os uns em relação aos outros.

3.5.3 Absorção e porosidade

Para o ensaio de absorção, foram separadas dois corpos de prova, um do concreto de referencia e um do concreto com fibra de PET. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 9778(2005). Os corpos de prova, após cura submersa de 28 dias, foram secos em estufa por 72 horas ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) e tiveram as massas medidas. Em seguida ficaram submersos em água à temperatura ambiente por mais 72 horas e foram pesados novamente.

Os valores da absorção e da porosidade podem ser obtidos a partir das equações: 3.3, 3.4 e 3.5.

$$A = \left(\frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

$$e = \left(\frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_{imersa}} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

$$\rho_{real} = \left(\frac{m_s}{m_s - m_{imersa}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

Sendo,

A – Absorção após imersão em água, em porcentagem.

e – Índice de vazios após saturação em água, em porcentagem.

ρ_{real} – Massa específica real, g/cm^3 .

M_{sat} – Massa saturada do concreto.

M_s - Massa seca do concreto.

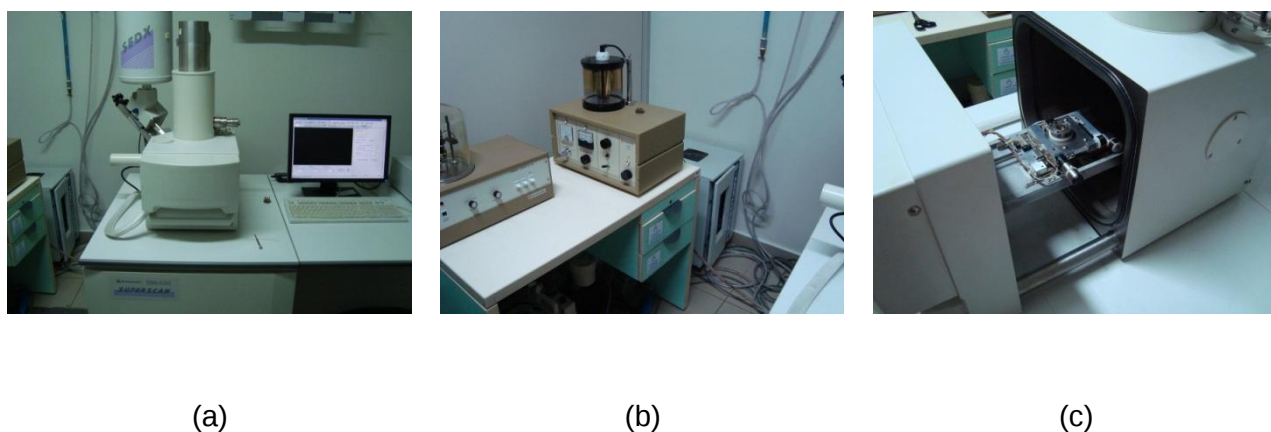
M_{imersa} - Massa imersa do concreto.

3.5.4 Análise microestrutural dos concretos

A análise microestrutural dos concretos foi realizada através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) do CTGÁS-RN.

A Figura 19 mostra a disposição dos equipamentos utilizados na análise microestrutural. O equipamento da Figura 18(a) é o metalizador de amostra. A Figura 19(b) mostra o MEV externamente e a Figura 19(c), o interior do MEV destacando o compartimento onde são colocadas as amostras metalizadas.

Figura 19 – Laboratório do CTGAS: a) Equipamento de metalização das amostras; b) o MEV c) interior do MEV



Fonte: Foto do autor

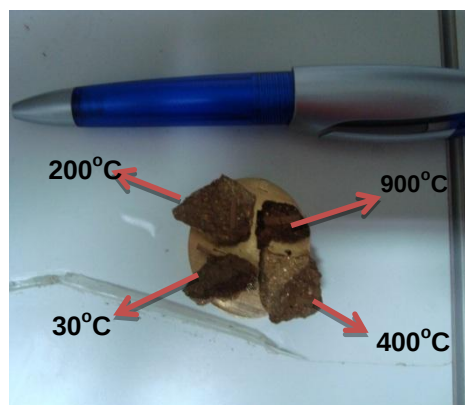
Para o MEV foram selecionadas 04 amostras de temperaturas diferentes, todas com PET. As temperaturas escolhidas foram: 30° ou ambiente, 200°, 400° e 900°C. Estas temperaturas foram selecionadas baseando-se na literatura existente. Segundo Costa; Figueredo; Silva, 2002(a) endossada por Kanéma et al (2011), e também afirmado em Lima (2005), em torno destas temperaturas há uma mudança significativa no componentes do concreto, pela saída da água constituinte.

As amostras foram retiradas dos corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão. Inicialmente foram retiradas as lascas de concreto, depois fraturadas, reduzidas a pedaços com diâmetro máximo de 2,5 cm. Posteriormente, foram novamente quebradas para se obter o tamanho ideal para a realização da análise da microestrutura (cerca de 1cm de diâmetro).

As amostras reduzidas tiveram suas as superfícies metalizadas antes de serem levadas para visualização no MEV. Na Figura 20 pode ser vista a disposição

das amostras na base do equipamento identificadas pelas suas respectivas temperaturas.

Figura 20 – Amostras metalizadas para o MEV: a) disposição das amostras identificadas pelas suas diferentes temperaturas; b) detalhe das amostras.



(a)



(b)

Fonte: Foto do autor

Considerando que em concretos convencionais a zona de transição possui características físico-químicas bem diferentes da matriz da paste de cimento e, portanto, influencia significativa na resistência e durabilidade do concreto, as visualizações no MEV foram concentradas nessa região.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados, observando a influência da adição de PET no concreto em estudo, quanto a exposição a altas temperaturas.

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Cimento

O resultado obtido no ensaio de finura do cimento foi de 0,6g de massa de material retido que equivale a 1,2% que é menor do 8,0% previsto em norma para o cimento CP IV 32. Esse índice confere ao cimento uma maior atividade, melhorando a resistência, diminuindo a exsudação, aumentando a trabalhabilidade e a coesão do concreto (NBR 11578,1991).

Os resultados do ensaio de início de pega estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Ensaio de início de pega do Cimento

Pasta	Pega
Água (150 ml) +Cimento (500g)	I = 9h e 19min
a/c 0,37	T = 11h e 59 min
	Pega: 2 h e 40min

Fonte: Tabela do autor

Onde, I é o horário de início e T o de termino do ensaio.

A NBR NM 65 (2002) exige que o cimento utilizado obtenha para o inicio de pega um tempo maior que uma hora. O resultado obtido pela amostra demonstra que o concreto fresco está em condições de ser trabalhado até no máximo 2h e 40 min. Por ser um cimento mais fino tem seu inicio de pega mais rápido e seu fim mais demorado.

A pasta de cimento e água não apresentou expansibilidade a frio, estando, portanto, dentro do valor da norma que é de no máximo 5 mm.

O resultado médio da resistência a compressão do cimento pode-se ser visto na Tabela 4.2.

Tabela 7– Ensaio de resistência do Cimento

Idade (dias)	Resistencia a compressão (MPa)
3	21,30
7	23,20
28	33,48

Fonte: Tabela do autor

Os resultados apresentados estão em conformidade com a NBR 7215 (1997), que especifica que o valor da resistência a compressão aos 3, 7 e 28 dias deverão atingir valores mínimos de 10, 20 e 30 MPa, respectivamente.

4.1.2 Agregado Miúdo

Da areia utilizada na pesquisa obteve-se a distribuição granulométrica apresentada na Tabela 8.

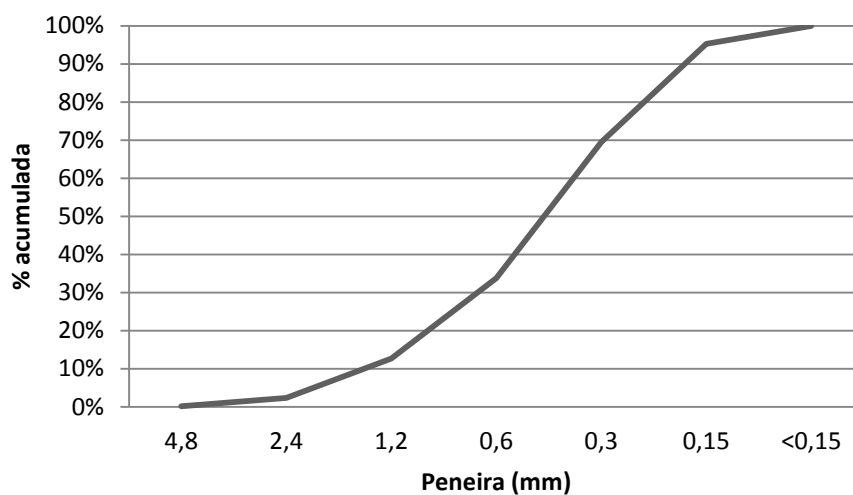
Tabela 8 - Composição granulométrica do agregado miúdo

Diâmetro	Retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida	Acumulada
4,8	1,7	0,17	0,17
2,4	21,9	2,19	2,36
1,2	103,8	10,38	12,74
0,6	210,6	21,06	33,80
0,3	356,5	35,65	69,45
0,15	258	25,80	95,25
<0,15	47,5	4,75	100,00
Total	1000,00		

Fonte: Tabela do autor

A distribuição granulométrica do agregado miúdo esta apresentada através da curva granulométrica na Figura 21.

Figura 21 - Composição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Tabela do autor

Os resultados obtidos dos demais índices relacionados ao agregado miúdo são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Massa específica e unitária, módulo de finura e diâmetro máximo do agregado miúdo.

Índices para o agregado miúdo	
Massa específica real (Kg/dm ³)	2,63
Massa unitária (Kg/dm ³)	1,483
Módulo de finura	2,14
Diâmetro máx. (mm)	2,4

Fonte: Tabela do autor

Pelos resultados obtidos o agregado miúdo foi classificado como agregado de granulometria fina. Essa classificação sugere um consumo maior de água para uma trabalhabilidade ideal para o concreto, mas a forma arredondada tende a aumentar a trabalhabilidade. Essa granulometria mais fina diminui o índice de vazios da argamassa, tornando o concreto mais compacto, com a estrutura mais fechada, o que diminui o volume de vazios, e por consequência, os espaços por onde podem penetrar os agentes agressivos. Porém, tal compactidade pode contribuir para o favorecimento do efeito “*spalling*” quando exposto a altas temperaturas.

4.1.3 Agregado graúdo

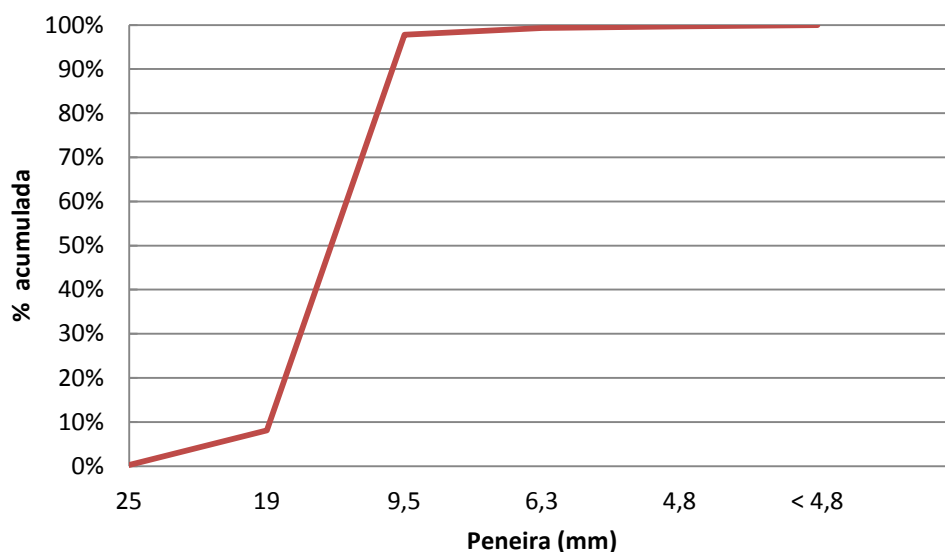
O agregado graúdo obteve a distribuição granulométrica apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição granulométrica do agregado graúdo

Diâmetro	Retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida	Acumulada
25	15	0,30%	0,30%
19	390	7,80%	8,10%
9,5	4485	89,70%	97,80%
6,3	75	1,50%	99,30%
4,8	20	0,40%	99,70%
2,4	15	0,30%	100,00%
Total	5000,00		

Fonte: Tabela do autor

A curva granulométrica do agregado graúdo encontra-se exposta na Figura 22.

Figura 22 - Composição granulométrica do agregado graúdo

Fonte: Tabela do autor

Portanto, baseado nos resultados obtidos e segundo a NBR NM 248(2003), a brita está classificada como 19 mm.

Os resultados obtidos para a densidades real e aparente, e ainda, módulo de finura do agregado graúdo podem ser vistos na Tabela 11.

Tabela 11 - Massas específica e unitária, módulo de finura do agregado graúdo

Índices para o agregado graúdo	
Massa específica real (Kg/dm ³)	2,65
Massa unitária (Kg/dm ³)	1,44
Módulo de finura	6,06

Como foi visto no item 2.2.1 a granulometria, dimensão máxima, forma, textura superficial, resistência e rigidez dos agregados, atribuem maior ou menor resistência ao concreto.

No caso do agregado graúdo utilizado no ensaio, ele é derivado de uma rocha granítica britada, praticamente equidimensional e por ser derivado de uma rocha granítica possui baixa porosidade e absorção, que diminuem a susceptibilidade

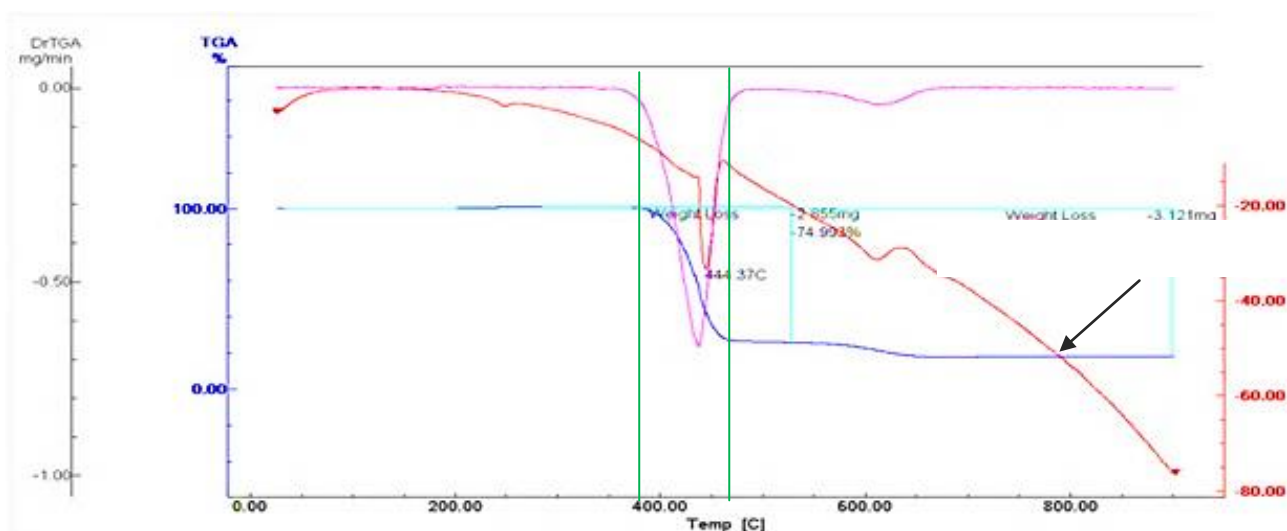
deste á expansão destrutiva (pipocamento), por menor movimento da umidade interna.

4.1.4 Fibra de PET

4.1.4.1 Análise Termogravimétrica

A Figura 23 mostra o gráfico da análise termogravimétrica (TGA) da fibra de PET:

Figura 23 - Análise Termogravimétrica do PET



Fonte: Ilustração do autor

Analisando os resultados do gráfico, observa-se que a massa do PET diminui com o aumento da temperatura. Em torno de 400°C há uma perda significativa da massa do PET e essa perda continua até temperaturas próximas aos 900°C.

Essa perda de massa se dá pela mudança de fase do PET. Saindo da fase sólida passando pela líquida, até não mais ocupar um volume no interior do concreto endurecido.

No intervalo de temperatura entre 395° e 480°C é possível ver que ocorre uma degradação acentuada. Na temperatura de 444°C ocorreu a mudança de fase.

A partir dessas temperaturas os espaços deixados pelas fibras passam a atuar como válvulas que reduzem a poropressão no interior da massa do concreto endurecido, favorecendo a redução do efeito “*spalling*”, e, por conseguinte a integridade física da estrutura do concreto.

4.2 Caracterização do concreto

4.2.1 Ensaio de abatimento

O ensaio de abatimento do tronco de cone foi realizado para cada traço, conforme pode ser visto na tabela 12.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de consistência do concreto

Concreto	Abatimento (mm)
Referência	120
Com PET	140

Fonte: Tabela do autor

Conforme os resultados obtidos, o concreto com fibra de PET apresentou um abatimento maior que o concreto de referência. Esse ganho de trabalhabilidade ocorreu devido geometria da fibra, uma fibra curta, menor que a dimensão do agregado, que tem boa dispersão na pasta de cimento. Além disso, elas escorrem pela massa deslizando e não absorvem a água de amassamento, não interferindo na relação água/cimento.

4.2.2 Absorção e porosidade

Para o ensaio de absorção, porosidade e massa específica real dos concretos obteve-se o resultado apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de absorção e de porosidade do concreto

Concreto	Absorção (%)	Porosidade (%)	Massa Esp. Real (g/cm ³)
Referência	4,33	9,63	222,56
Com PET	4,20	9,34	222,37

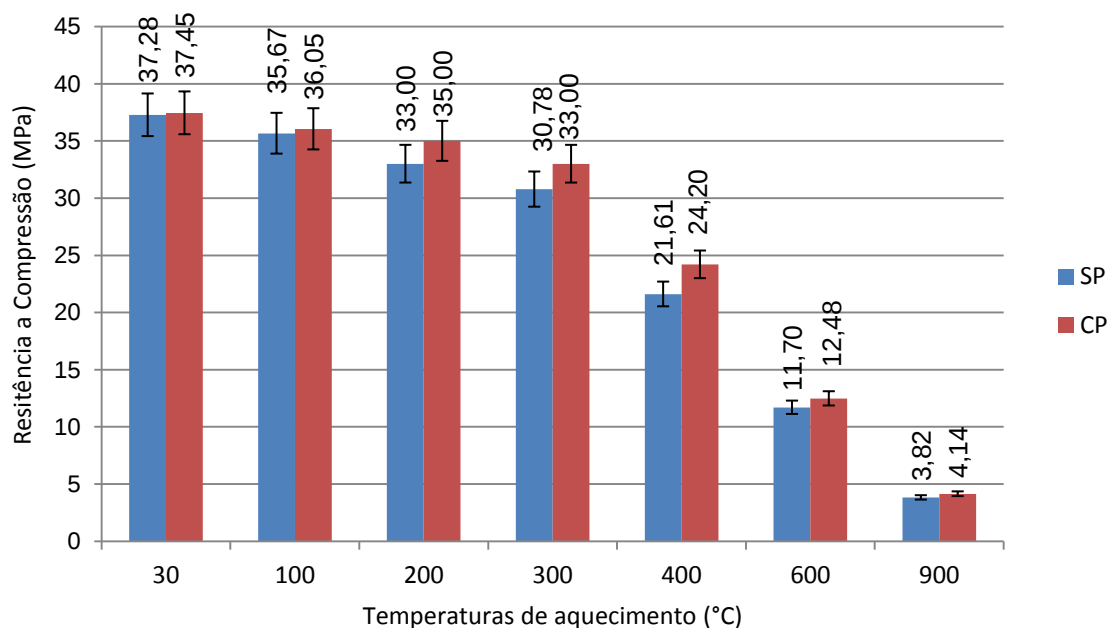
Fonte: Tabela do autor

Como pode ser visto na Figura 25 o concreto com adição da fibra de PET apresenta índices de vazios e porosidade muito próximos do concreto referência. Atribui-se tal resultado ao fato da adição de fibra apresentar pouca interferência na relação água/cimento da mistura.

4.2.3 Resistência a Compressão

A resistência a compressão residual do concreto é uma das propriedades mais importantes quando se analisa o desempenho de uma estrutura após sua exposição a altas temperaturas..

Na Figura 24 é apresentado o comportamento do concreto com e sem adição de PET em relação à resistência à compressão na idade de 28 dias, submetidos a diferentes temperaturas. Os valores de resistência à compressão correspondem à média aritmética de cada três corpos-de-prova ensaiados.

Figura 24 - Resistência média à compressão dos concretos aos 28 dias

Fonte: Gráfico do autor

Como pode ser visto na Figura 23 a resistência do concreto com fibra de PET apresentou resistência semelhante ao concreto sem PET, o ganho de resistência se dá pela geometria (plana) da fibra de PET que atua como adição, diminuindo a relação água e os materiais secos.

Observando o comportamento das amostras, pode ser percebido que a variação da resistência à compressão até a temperatura de 300°C é pequena (aproximadamente 12% para as amostras com PET e 17% para as sem PET), no entanto, a partir dessa temperatura a perda da resistência cai acentuadamente como aconteceu nos relatos das referencias.

Entre 100° e 200°C há uma perda de resistência atribuída a perda da água interlaminar causando uma instabilidade da pasta do concreto. A pasta começa a se retrair e a tende ao fissuramento pelo movimento da água evaporada. A fibra de PET nessas temperaturas não apresentam praticamente alterações.

Entre as temperaturas de 200° e 400° a resistência à compressão residual do concreto com PET é maior que a do concreto referencia. E essa diferença de

resistência diminui após a temperatura de 400° C, quando a fibra vai perdendo volume (processo de liquefação) no interior da amostra sendo reduzida na massa no concreto com PET à medida que aumenta a temperatura.

A partir de 300° C ocorrem perdas significativas de resistência a compressão em todas as amostras atribuída à progressiva desidratação do C-S-H (portlandita) e de outras fases hidratadas como foi citada no capítulo 2.

Por volta dos 400° C, começa o processo de expansão do agregado e com isso o fissuramento é intensificado. Esse gradiente de tensões entre as fases do concreto reduz sua resistência. No concreto com PET, o decréscimo na resistência se intensifica pela perda de massa molecular do PET, e a rede de vazios que se forma por causa dessa perda, no entanto, percebe-se que a queda da resistência é menor para o concreto com PET.

Verifica-se que na temperatura de 600°C, a resistência do concreto já reduziu mais de 65% da resistência inicial. Nessa temperatura já ocorreu a descarbonatação da calcita, a destruição do gel C-S-H e a decomposição total da fibra de PET. Nessa fase, de decomposição química dos produtos hidratados, ambos os tipos de concreto, tem resistência a compressão residual com valores muito próximos.

Aos 900°C, a pasta sofreu a substituição da estrutura hidráulica por uma estrutura cerâmica. A resistência residual das amostras com e sem PET, conforme discutido no capítulo 2, é cerca de 10% da resistência em temperatura ambiente. Os concretos, a essas temperaturas, perderam totalmente a função estrutural.

4.2.4 Análise visual das amostras

Os corpos de prova também foram observados quanto a alteração de cor após a exposição as altas temperaturas. Percebe-se que o comportamento do concreto com e sem PET está de acordo com o que foi discutido no item 3.5.3.

A Figura 25 apresenta a diferença de coloração observada no concreto com fibra de PET, nas diversas temperaturas.

Figura 25 – Corpos de Prova com PET em suas várias temperaturas – mudança de coloração



Fonte: Foto do autor

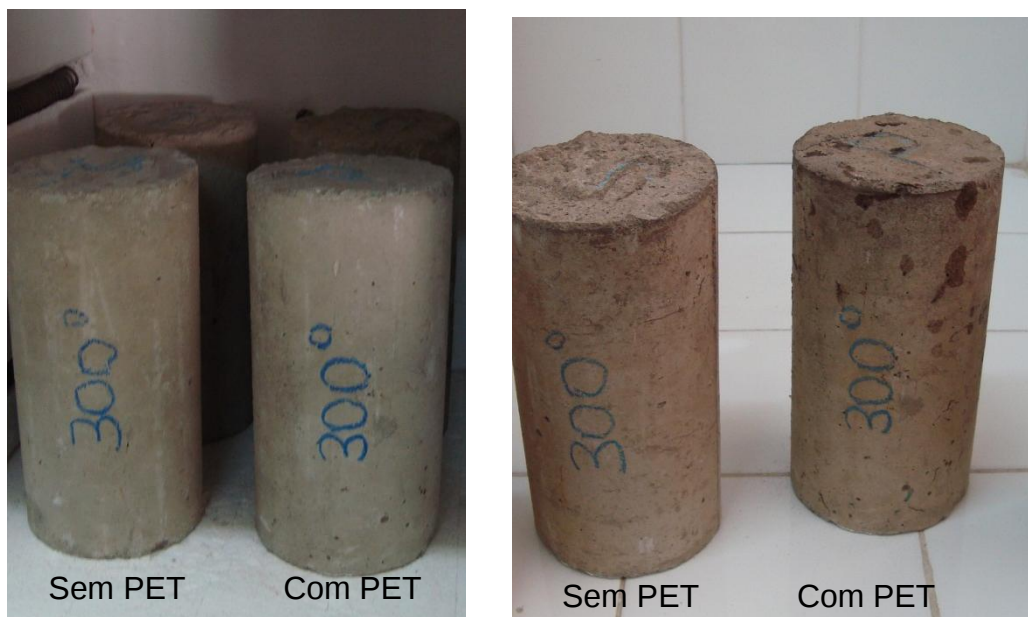
Nas amostras de concreto submetidas as temperaturas de 100°C e 200°C, a coloração cinza praticamente não se alterou.

Quando as amostras foram submetidas as temperaturas de 300°C e 400°C a coloração tende ao marrom, intensificado nas regiões da presença da fibra de PET. Pode-se observar o surgimento de microfissuras na face externa dos corpos de prova. Nas figuras 26a e 26b pode-se observar que as amostras com e sem PET antes e após o aquecimento a 300° C, onde a coloração possui diferença nas áreas em torno da fibra de PET.

Figura 26 – Corpos de prova com e em PET: a) temperatura ambiente, b) após o aquecimento a 300° C

a)

b)



Fonte: Foto do autor

A coloração dos concretos, quando se aumenta as temperaturas para 600°C, possui coloração marrom mais acinzentado, numa tonalidade mais uniforme

Observou-se que aos 900°C a coloração era bem clara numa tonalidade entre o amarelo e o rosa. A fissuração da superfície do corpo de prova nessa temperatura é intensa.

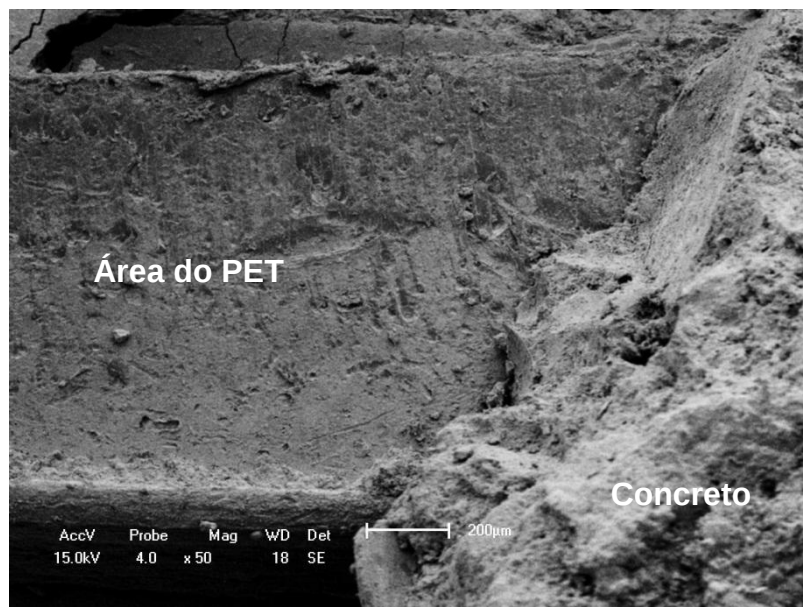
4.2.5 Análise Microestrutural dos Concretos

Na análise da microestrutura das amostras dos concretos submetidos às temperaturas de 200°C, 400°C e 900°C e a amostra em temperatura ambiente obteve-se os resultados ilustrados nas figuras a seguir.

Nas Figuras 27 (temperatura ambiente) e 28 (200°C) pode-se observar que a superfície da fibra de PET sofreu uma degradação entre as temperaturas ambiente (30°C) e 200°C, se tornando mais rugosa.

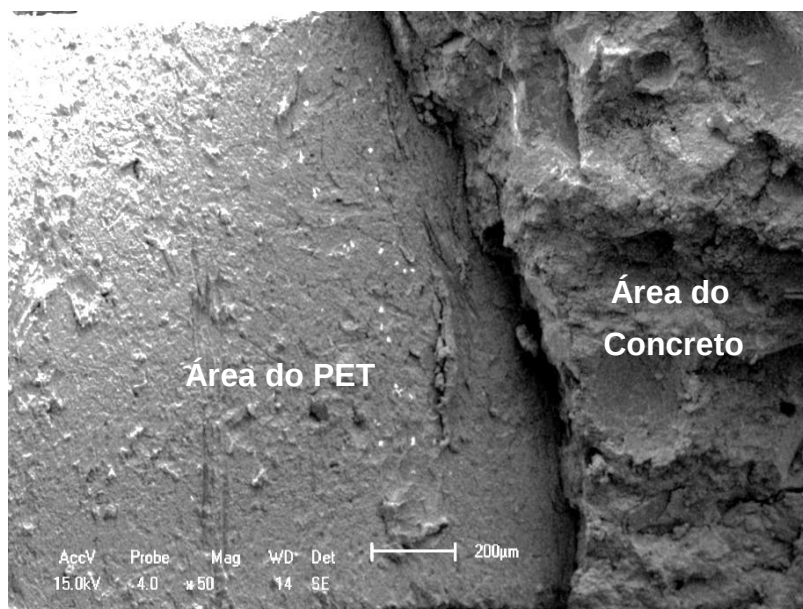
Nas Figuras 27 e 28 pode ser observada a interação fibra e pasta de cimento, verificando-se que a pasta envolve a fibra.

Figura 27 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 30°C – detalhe da fibra de PET



Fonte: Ilustração do autor

Figura 28 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 200°C – detalhe da fibra de PET



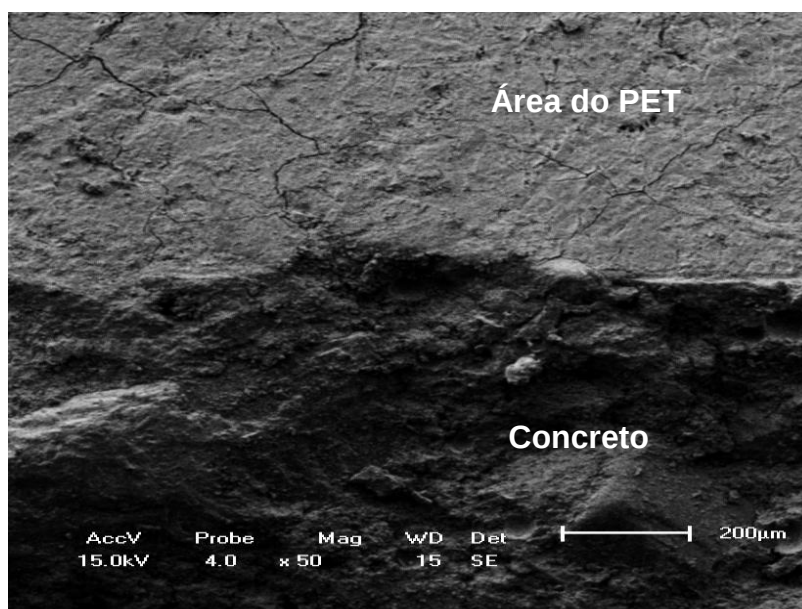
Fonte: Ilustração do autor

Observa-se, ao analisar a micrografia da figura 26, que a fibra de PET apresenta coloração mais escura e superfície mais uniforme, enquanto que o concreto, uma coloração mais clara, com presença de vários (poros). Na figura 27,

pode ser visto que a interface fibra/concreto, ou zona de transição, apresenta enfraquecimento, interferindo nos resultados de resistência a compressão.

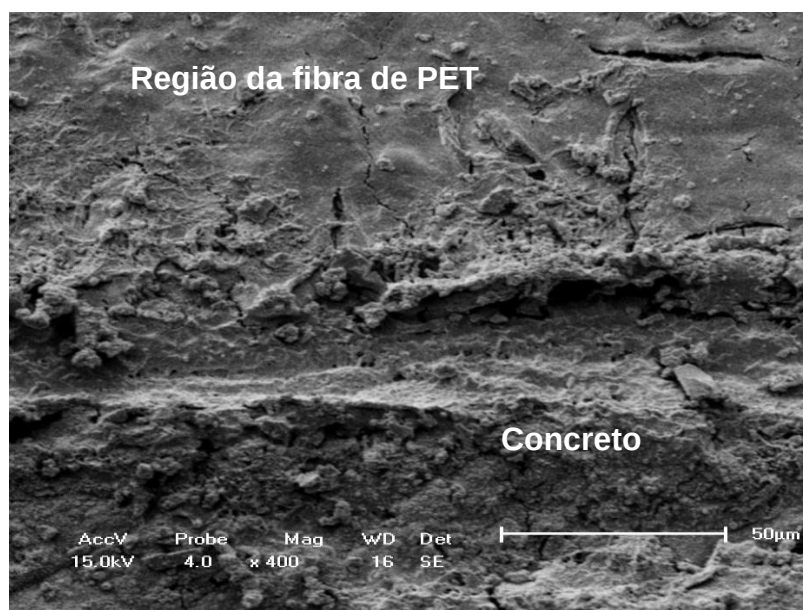
Pode ser visto nas figuras 29 e 30, que a 400°C, a fibra de PET no interior do concreto já não mais existe. A fibra, nessa temperatura passa a cumprir seu papel, criando canais para aliviar a poropressão no interior do concreto. As fissuras são evidências de tal situação.

Figura 29 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 400°C – detalhe da área do PET



Fonte: Ilustração do autor

Figura 30 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 400°C – detalhe das fases do concreto



Fonte: Ilustração do autor

Nas micrografias apresentadas nas figuras 31 a 33 observa-se o concreto submetido a 900°C. A figura 32 é uma ampliação do círculo da figura 31. Nessa temperatura, as microfissuras já possuem aberturas bem maiores. Ao se ampliar o detalhe da Figura 31, pode-se ver, claramente, uma estrutura bastante porosa e de baixa compacidade. Ratificando os resultados de resistência a compressão, apresentado apenas 10% da resistência à temperatura ambiente.

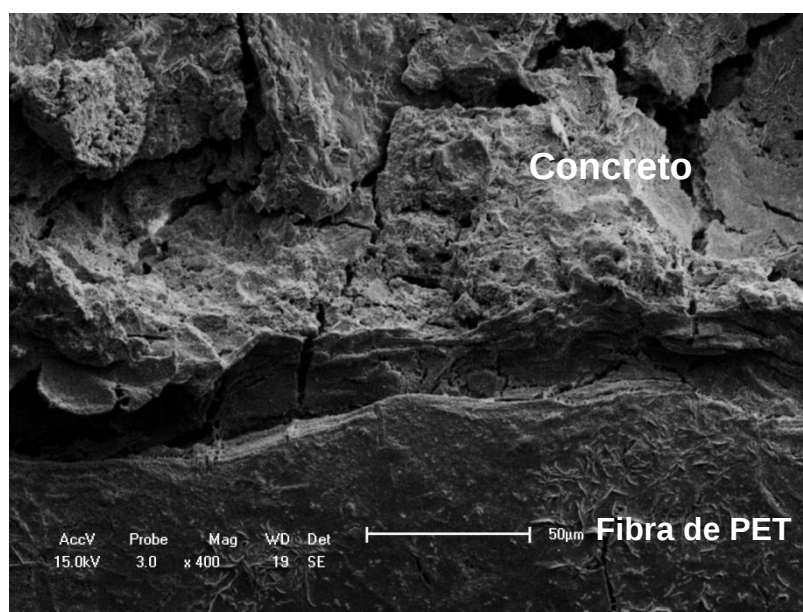
Na figura 33 pode-se ver a área do concreto como uma área mais clara, mais porosa, enquanto a área do PET, mais escura e menos porosa, no entanto, ambas muito fissuradas.

Figura 31 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 900°C – detalhe da área do PET



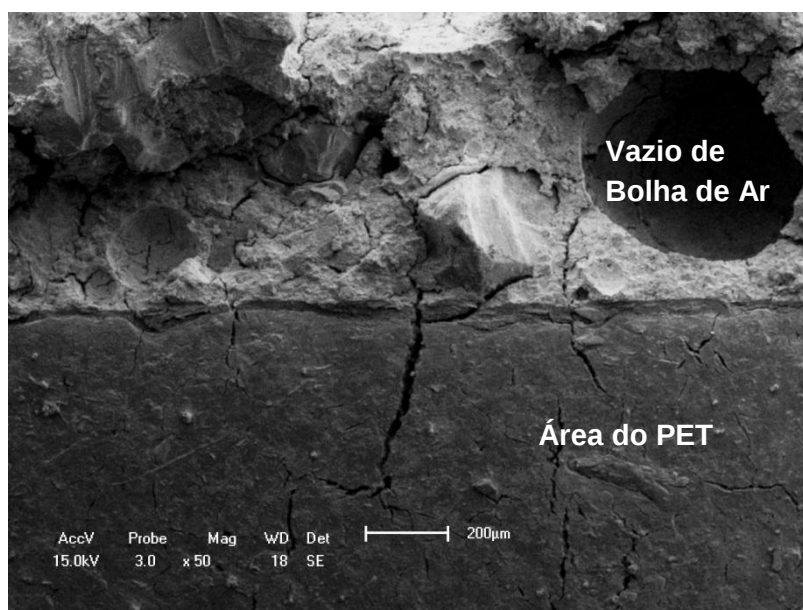
Fonte: Ilustração do autor

Figura 32 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 900°C – detalhe da área ampliada da figura 31



Fonte: Ilustração do autor

Figura 33 – Micrografia do concreto com fibra de PET a 900°C – detalhe das fases do concreto



Fonte: Ilustração do autor

CAPITULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento do concreto com adição de fibras de PET submetido a altas temperaturas. As principais conclusões obtidas no programa experimental serão apresentadas neste capítulo.

5.1 Conclusões

O objetivo inicial da pesquisa foi avaliar a contribuição da adição da fibra de PET no concreto submetido a temperaturas elevadas, contribuindo para melhorar o comportamento desse compósito consagrado na indústria da construção civil, introduzindo um produto advindo do processo de reciclagem das garrafas PET pós-uso contribuindo, finalmente, para aumento da segurança das estruturas de concreto submetido a altas temperaturas.

- A adição da fibra de PET com 15x2x0,5mm aumentou a trabalhabilidade do concreto em 15% em relação ao concreto de referência. Esse aumento pode está relacionado a forma plana e a textura lisa da fibra, que proporciona a formação de uma filme de água em torno da mesma;
- A resistência à compressão a temperatura ambiente (30° C) dos concretos com e sem fibra é praticamente o mesmo. Atribui-se tal desempenho a geometria da fibra;
- A resistência a compressão residual do concreto com PET apresenta valores ligeiramente maiores que o de referencia, como se espera de uma fibra introduzida na matriz do concreto;
- A queda de resistência a compressão do concreto com PET foi menor que o de referencia, principalmente no intervalo de temperaturas entre 200° C e 400° C, onde ocorrem as maiores transformações na microestrutura do

concreto pela perda de água. Contribuindo assim, para o retardamento da perda da função estrutural do concreto.

– Em geral, a adição da fibra não altera a colorimetria do concreto exposto as variadas temperaturas. No entanto, nas temperaturas de degradação da fibra, por volta dos 400°C, a cor da fibra decomposta na face externa do concreto mancha a superfície do corpo de prova;

– A presença da fibra de PET manteve a massa do concreto praticamente a mesma. Devido a sua densidade ser em torno de 50% da alcançada pelo agregado miúdo; Funcionando como um adição pouco significativa em relação a massa do concreto;

- O concreto com fibra de PET apresentou, praticamente, a mesma condição de porosidade e absorção que o concreto;

– Para o concreto de 30 Mpa estudado, não foi observado o lascamento do concreto em nenhuma das amostras ensaiadas, com ou sem a fibra de PET, apenas a microfissuração foi evidente nas micrografias;

- Na avaliação microestrutural confirmou-se a análise termogravimétrica do PET, pois a temperatura de degradação do PET está em torno de 400°C;

– Percebe-se que o PET, por ser um polímero termoplástico, ele sublima em torno dos 400°C, permitindo a formação de uma rede de canais que favorecem a dissipação da poropressão promovida pela saída do vapor de água. Essa rede de canais foi responsável pelos resultados de resistência a compressão do concreto com PET em relação ao concreto sem as fibras, para a mesma temperatura de 200° C, 300° C, 400° C e 600° C.

5.2 Considerações gerais

O fato das resistências dos concretos com e sem PET estudados serem muito próximos e, com PET ser ligeiramente maiores, sugere que a adição de PET contribui de forma positiva tanto no desempenho mecânico, quanto na redução do deslocamento do concreto (efeito “*splalling*”) quando submetidos à ação de altas

temperaturas. Significando que a adição de PET pode melhorar a qualidade do concreto, e como consequência retardando o tempo para uma estrutura entrar em colapso. Além disso, vê-se que o uso da fibra de PET pode contribuir para o desenvolvimento sustentável da indústria da construção civil e ajuda a preservar os aterros sanitários dando mais uma possibilidade de uso para as garrafas PET descartadas, preservando o meio ambiente.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Considerando que a segurança das estruturas de concreto submetidas a temperaturas elevadas possui várias frentes de trabalho, desde a busca de novos materiais, passando pela formulação de normas técnicas, chegando a processos de execução mais seguros, vários trabalhos podem ser desenvolvidos para esse fim.

No campo dos materiais, alguns aspectos que não fizeram parte do escopo dessa pesquisa podem compor novos estudos, sugere-se:

- Pesquisar o comportamento do concreto com variação de dimensões da fibra de PET;
- Investigar a quantidade ideal de fibra de PET;
- Estudar a viabilidade econômica do uso da fibra de PET em adição ao concreto, objetivando a redução do efeito “*spalling*”;
- Investigar o produto residual da região ocupada pela fibra de PET antes de sua degradação;
- Estudar a influência do fator forma no comportamento do concreto fresco e endurecido;
- Caracterizar mecanicamente a fibra de PET para uso no concreto.

REFERÊNCIAS

ABIPET: Associação Brasileira da Indústria do PET, **7º Censo da Reciclagem de PET**

<http://abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=setimo_censo_da_Reciclagem_no_Brasil.pps>, acessado em 10/09/2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 10004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11578**: Cimento Portland composto - Especificação, Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento portland - Especificação, Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5736**: Cimento Portland Pozolânico - Especificação, Rio de Janeiro, 1999.

_____. **NBR 5737**: Cimento Portland resistentes a sulfatos- Especificação, Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR NM 43**: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003. Emenda 1:2008.

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

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

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

_____. **NBR NM 248,** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

_____. **NBR NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1996.

CANELLAS, S.S., **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas**, Dissertação M.Sc., PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

COSTA, C. N., FIGUEREDO, A. D. de, SILVA, V. P. **Aspectos Tecnológicos dos Materiais de Concreto em Altas Temperaturas**, apresentado no NUTAU, São Paulo, 2002 (a), <tecno_conc_NUTAU2002.pdf>, consultado em 25/10/2009.

COSTA, C. N., FIGUEREDO, A. D. de, SILVA, V. P. **O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica**, In: Congresso Brasileiro do IBRACON – 2002 (b), 44. 2002, Belo Horizonte, MG. Anais...CD-ROM

CUOGHI, R. S.; FIGUEIREDO, A. D. **Aspectos de análise de risco das estruturas de concreto em situação de incêndio**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. BT/PCC/463. São

Paulo: EPUSP, 2007. 31 p. Disponível em: <http://publicacoes.pcc.usp.br/lista.htm#boletins%20técnicos>. Acesso em outubro de 2008.

DE CASTRO, A. L.; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI, V. C. **Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas**. Revisão Cerâmica 57 (2011) 22-31

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com Fibras. Cap. 39. In: Isaia, G. C (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2005

FITESA, **As fibras de polipropileno e a retração plástica do concreto**, Boletim Técnico, nº 02, FITESA, 2002 Disponível em: www.fitesa.com, acessado em 05/05/2009

FITESA, **Efeito “anti-spalling” das fibras de polipropileno e a retração plástica do concreto**, Boletim Técnico, nº 06, FITESA, 2002 Disponível em: www.fitesa.com, acessado em 19/08/2010

FRASCÁ, M. H. B. O., Rocha como material de Construção. Cap. 15. In: Isaia, G. C (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Principios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2007

GORNISKI, J. P., KARZMIERCZAC, C. S. **Microestrutura dos polímeros**. Cap. 12. In: Isaia, G. C (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Principios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2007

GRIPPI, S. **Lixo, reciclagem e sua história: guia para as prefeituras brasileiras** / Sidney Grippi. – Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. ed. G. C. Isaia. 2v. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2007. 1712p. cap. 27.

HERTZ, K. D. SORENSEN, L. S., **Test methods for spalling of fire exposed concrete**, Fire Safety Journal 40, 466–476. (2003)

KALIFA, P.; CHÉNÉ, G.; GALLÉ, C.. **High-Temperature Behaviour HPC with Polypropylene Fibres from Spalling to Microstructure**. Cement and Concrete Research, N° 31. Elsevier Science Ltd. Amsterdam, 2001.

KANÉMA, M. PLIYA, P., NOUMOWÉ, A. GALLIAS, J-L, **Spalling, Thermal, and Hydrous Behavior of Ordinary and High-Strength Concrete Subjected to Elevated Temperature**, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 23, n.7, Technical Papers, pp. 921-931, 2011

KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2008.

LEI FEDERAL 12.305/10 (02/08/2010). **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>.

LIMA, R. C. A. de. **Investigação do Comportamento do Concreto em temperaturas elevadas**. 2005. 241p. Tese (Doutorado) –PPGEC - UFRGS, Porto Alegre, 2005

LIMA, R. C. A., KIRCHHOF, L.D., CASONATO, C.A., SILVA FILHO, L.C.P., **Efeito de altas temperaturas no Concreto**, 2004. In: II Seminário de Patologia das Edificações, Porto Alegre, RS, LEME_30anos_Rogério.pdf. Consultado em 19/09/2011

LOBO, A.V.L., SANTI, M. R. A., MOREIRA, A. R., WEBER, S. L., **Verificação do Desempenho de Aditivos Polifuncionais em Concretos Produzidos com Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos** In: Congresso Brasileiro do IBRACON – 2004, 46., Florianópolis/SC. Anais...CD-ROM

METHA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Ed. PINI. São Paulo, 2008.

MINDESS, S. **Fibre reinforced concrete – myth and reality**. Advances in Cement and Concrete – ASME – American society of Civil Engineers – 1994, notas de aula, acessado 12/05/2009.

MMA, Resolução - CONAMA nº 307 de 05 de julho de 2002. Ministério do Meio Ambiente www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html consultado em novembro/2011.

MODRO, N.L.R., **Desenvolvimento e Caracterização de Concreto de Cimento Portland Contendo Resíduos Poliméricos de PET**, Dissertação de M.Sc., UNIVILLE, Joinville, SC, Brasil, 2008.

NEVILLE, A. M, **Propriedades do Concreto**. Trad. Salvador E. Giamusso. São Paulo: PINI, 1997.

NINCE, A. A. **Lascamento do Concreto exposto a altas temperaturas**. 2007. 300p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007

PAULON, V. A. **A microo Concreto Convencional. Concreto: Ensino, Pesquisa Realizações**. IBRACON. São Paulo, 2005.

PERET, C. M. SALOMÃO, R. ZAMBON, A. M, PANDOLFELLI, V. C. **Concretos refratários contendo fibras poliméricas: correlação entre a permeabilidade e o comportamento de secagem**, apresentado no 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, João Pessoa/PB 2003 consultado em 25/08/2010.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. São Paulo: Globo, 1998.

PEZZIN, A.P.T., **Reciclagem química de embalagens de PET pós-consumo: Síntese de novos co-polímeros biodegradáveis**, Notas de aula, UNIVILLE, Joinville, SC, Brasil, 2007.

PINTO, T. de P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 189p.

POGGIALI, F.S.J. **Durabilidade de Estruturas de Concreto em usinas siderúrgicas**, Monografia (Especialização em Construção Civil), Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 2009.

Press Comunicação Empresarial - http://www.vcimentos.com.br/htms-ptb/Imprensa/Noticias_Ver.asp?obj=Noticia_110727 consultado em outubro de 2011

SALOMÃO, R. PANDOLFELLI, V. C. **Concretos refratários contendo fibras poliméricas: correlação entre a permeabilidade e o comportamento de secagem**, apresentado no 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, João Pessoa/PB 2003 consultado em 25/08/2010.

SBRIGHI NETO, C. Agregados para Concreto. Cap. 11. In: Isaia, G. C (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2005

SOUZA, V. C. M. de, RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. Ed. PINI, São Paulo, 1998.

WENDT, S. C, DAL MOLIN, D. C.C. **Mudança de cor do concreto exposto a condições de incêndio**, In: II Seminário Brasileiro de Eng. Forense – VI Seminário Nacional de Perícia em Crimes de Trânsito – VII Seminário Brasileiro de Perícia em Identificação Veicular, Junho 2008, Macapá/AP consultado em outubro de 2011.