



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Átila Sala Bourguignon

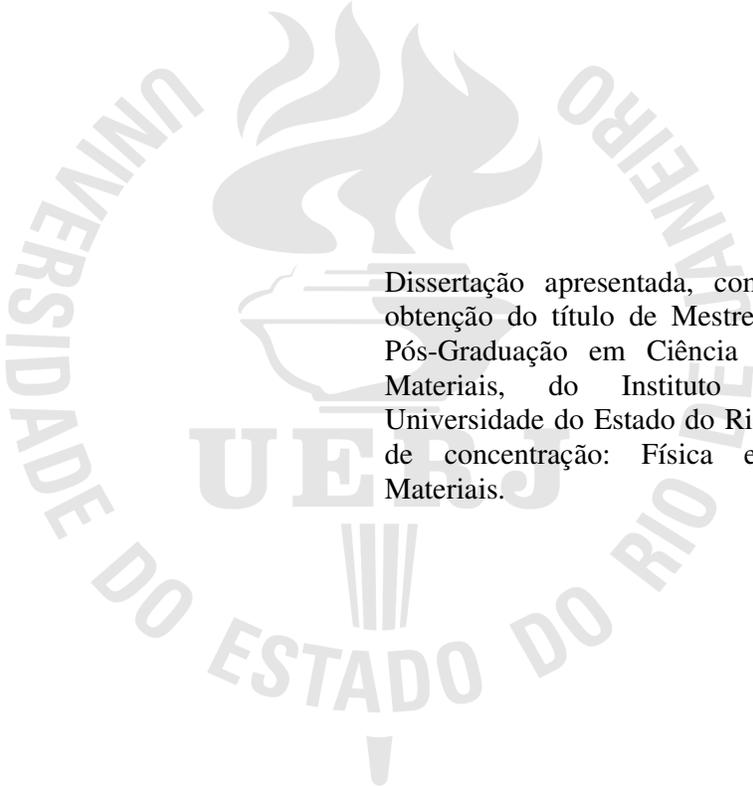
**Caracterização de concreto reforçado com fibras pela técnica de
microtomografia computadorizada por transmissão de raios X**

Nova Friburgo

2011

Átila Sala Bourguignon

**Caracterização de concreto reforçado com fibras pela técnica de microtomografia
computadorizada por transmissão de raios X**



Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Física e Mecânica dos Materiais.

Orientadores: Prof. Joaquim Teixeira de Assis, D.Sc.
Prof. Gil de Carvalho, D.Sc.

Nova Friburgo

2011

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/E

B773 Bourguignon, Átila Sala.
Caracterização de concreto reforçado com fibras pela técnica de microtomografia computadorizada por transmissão de raios X / Átila Sala Bourguignon. - 2011. 79 f.: il.

Orientadores: Joaquim Teixeira de Assis e Gil de Carvalho.
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Concreto - Teses. 2. Tomografia - Teses. 3. Raios X - Teses . 4. Processamento de imagens - Teses. I. Assis, Joaquim Teixeira de. II. Carvalho, Gil de. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. IV. Título.

CDU 691.32

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Átila Sala Bourguignon

**Caracterização de concreto reforçado com fibras pela técnica de microtomografia
computadorizada por transmissão de raios X**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Física e Mecânica dos Materiais.

Aprovado em 5 de agosto de 2011.

Banca examinadora:

Prof. Joaquim Teixeira de Assis, D.Sc (Orientador)
Instituto Politécnico - UERJ

Prof. Gil de Carvalho, D.Sc (Orientador)
Instituto Politécnico - UERJ

Prof. José Renato de Castro Pessôa, D.Sc
Instituto Politécnico - UERJ

Dr. Glauco José de Oliveira Rodrigues, D.Sc
Eletrobras – Furnas. RJ

Nova Friburgo

2011

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais Pedrelina e Argeu (In Memoriam) e meus irmãos Alan e Argeu.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por continuar a minha caminhada com a sua proteção.

Ao professor Joaquim Teixeira de Assis pelo incentivo de continuar as pesquisas em concreto no mestrado, ajudando, contribuindo e motivando em todas as etapas de elaboração desta dissertação.

Ao professor Gil de Carvalho pelo empenho, disponibilidade e atenção indispensável na realização deste trabalho.

Ao Dr. José Renato de Castro Pessôa por ter aceitado participar desta banca e pela grande ajuda na moldagem e ensaios de compressão dos corpos de prova de concreto reforçado com fibras e na disponibilidade em todas as horas que precisei.

Ao Dr. Glauco José de Oliveira Rodrigues por ter aceitado o convite para participar desta banca.

Aos alunos de graduação em Engenharia Mecânica Rodrigo Risso Schuenck Leal e Gabriel Serrão Seabra na ajuda na aquisição das imagens de microtomografia.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo incentivo financeiro durante esses dois anos.

A todos que contribuíram e colaboraram de alguma maneira nesta dissertação.

Mestre não é quem sempre ensina, mas quem de repente aprende.

João Guimarães Rosa

RESUMO

BOURGUIGNON, Átila Sala. Caracterização de concreto reforçado com fibras pela técnica de microtomografia computadorizada por transmissão de raios X, 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico do Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2011.

Nesta dissertação de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais é apresentado um estudo para a caracterização do concreto reforçado com fibras de polipropileno e de aço pela análise das imagens de microtomografia computadorizada por transmissão de raios X (μ CT). Foram produzidos corpos de prova de concreto para determinar a sua resistência mecânica à compressão. As imagens foram obtidas no sistema Skyscan®, modelo 1174, reconstruídas e analisadas. Foi possível observar na análise das imagens a estrutura da fibra de aço dispersa na matriz do concreto e quantificá-las pelo programa de análise de imagens Ctan® e perceber um ganho na resistência mecânica em relação ao concreto sem fibras. Não foi feita a quantificação das amostras de fibras de polipropileno dispersas na matriz de concreto, mas foi observada a presença de aglomerados dessa fibra que resultaram na perda da resistência mecânica em relação ao concreto sem fibras.

Palavras-chave: Concreto. Fibras de reforço. Ensaio mecânicos de compressão. Microtomografia computadorizada por transmissão de raios X.

ABSTRACT

In this dissertation Masters Program Graduate in Science and Technology of Materials is presented a study for characterization of concrete reinforced with polypropylene fibers and steel by image analysis of computed microtomography X ray transmission (μ CT). Concrete samples were produced to determine their mechanical resistance to compression. The images were obtained in the SkyScan® model 1174, reconstructed and analyzed. It was possible, in image analysis, to observe the structure of steel fiber dispersed in the concrete matrix and quantify them by image analysis program Ctan® and observed a gain in strength compared to concrete fiber less. The quantification was not did to samples of polypropylene fibers dispersed in the matrix of concrete, but we observed the presence of clusters fibers resulting in the loss of mechanical strength compared to concrete fiber less.

Keywords: Concrete. Fiber reinforcement. Mechanical compression testing. Computed microtomography X ray transmission.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto.	30
Figura 2 - Fibrilas finas em forma retangular e na forma de mono-filamentos cilíndricos finos.....	32
Figura 3 - Fibra de aço corrugada.....	33
Figura 4 - Fibra de aço com ancoragem em gancho e seção quadrada.....	33
Figura 5 - Fibra de aço com ancoragem em gancho e seção circular solta (a) e em pentes (b).	33
Figura 6 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem reforço de fibras	34
Figura 7 - Esquema de concentração de tensões para um concreto com o reforço de fibras .	35
Figura 8 - Compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo no concreto reforçado com fibras	36
Figura 9 - Incompatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo no concreto reforçado com fibras	36
Figura 10 - Fibras de aço longas (a) e curtas (b)	37
Figura 11 - Tipos de deformações das fibras de aço.....	37
Figura 12 - Ouriço formado por fibras de aço mal misturadas ao concreto.....	39
Figura 13 - Fibras coladas em pente	39
Figura 14 - Exemplo de aplicação de CRF em pistas de aeroportos	39
Figura 15 - Exemplo de aplicação de CRF em pisos industriais	40
Figura 16 - Exemplo de aplicação de CRF em pisos de estacionamentos	41
Figura 17 - Exemplo de aplicação de CRF em túneis.....	41
Figura 18 - Exemplo de aplicação de CRF na estabilização de taludes.....	42
Figura 19 - Esquema do ensaio não destrutivo de microtomografia computadorizada.....	43
Figura 20 - Retroprojeção.	45
Figura 21 - Convolução, (a) somente retroprojeção, (b) retroprojeção e convolução.....	46
Figura 22 - Representação de ‘pixel’ e “voxel”. É a representação básica de um elemento bidimensional de uma imagem digital.voxel é a representação 3D, com a terceira dimensão representa e espessura do “slice”.....	47
Figura 23 - Tomografia 2D.....	47

Figura 24 - Tomografia 3D	48
Figura 25 - Fibras usadas no experimento	49
Figura 26 - Agregados devidamente pesados.....	51
Figura 27 - Lubrificação dos moldes com óleo mineral	51
Figura 28 - Preparo do concreto na betoneira durante 5 minutos.....	52
Figura 29 - Ensaio de abatimento do tronco de cone.....	52
Figura 30 - Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone...	53
Figura 31 - Moldagem dos corpos de prova de concreto.....	54
Figura 32 - Golpeamento por camadas nos corpos de prova de concreto.....	54
Figura 33 - Corpos de prova de concreto... ..	55
Figura 34 - Desforma dos corpos de prova de concreto	55
Figura 35 - Corpos de prova de concreto desformados	56
Figura 36 - Tanque de cura dos corpos de prova de concreto.....	56
Figura 37 - Marcação dos corpos de prova de concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno... ..	57
Figura 38 - Corte dos corpos de prova de concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno com serra mármore industrial e manual	57
Figura 39 - Etapas do corte dos corpos de prova de CRF.....	58
Figura 40 - Região de interesse para o estudo das imagens de microtomografia.....	59
Figura 41 - Redução da região de interesse para o estudo das imagens de microtomografia..	59
Figura 42 - Microtomografo Skyscan® 1174 com o computador de aquisição de dados	60
Figura 43 - Dimensões da amostra de concreto reforçado com fibras.....	60
Figura 44 - Posicionamento da amostra no microtomografo de raios X... ..	61
Figura 45 - Projeção de imagem no formato TIFF de 16 bits	61
Figura 46 - Exemplo de uma imagem reconstruída.....	62
Figura 47 - Imagem em 3D das fibras no interior da amostra de concreto reforçado com fibras de aço.	62
Figura 48 - Ensaio de compressão uniaxial em CRF de aço e PP.	63
Figura 49 - Detecção das fibras de aço e de vazios no tom de cinza da imagem.....	64
Figura 50 - Posição da reconstrução da imagem analisada na projeção da imagem	65
Figura 51 - Reconstrução das imagens de μ CT de CRF de PP e concreto sem fibras indicando o alto índice de vazios do CRF de PP.....	65
Figura 52 - Posição das amostras em azul que foram encontradas fibras de aço na matriz do CRF.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de cimento	22
Tabela 2 - Teores dos componentes do cimento Portland composto.....	23
Tabela 3 - Resistência à compressão de rochas americanas geralmente usadas como agregados de concreto	25
Tabela 4 - Limites granulométricos de agregado graúdo.....	27
Tabela 5 - Limites granulométricos de agregado miúdo.....	28
Tabela 6 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes	30
Tabela 7 - Resistência à compressão uniaxial.....	64
Tabela 8 - Resultado do volume calculado e medido dos fragmentos das fibras de aço na matriz do concreto	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Técnica Brasileira
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
PP	Polipropileno
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
μ CT	Microtomografia computadorizada por transmissão de raios X
LTHC	Laboratório de Tecnologia da Habitação e da Construção

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	14
1	CRONOLOGIA.....	15
2	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....	20
2.1	Compósitos	20
2.1.1	<u>Compósito reforçado com fibras</u>	20
2.2	Concreto.....	21
2.2.1	<u>Cimento Portland</u>	22
2.2.1.1	Cimento Portland Composto.....	23
2.2.2	<u>Agregados</u>	24
2.2.2.1	Brita	26
2.2.2.2	Areia	27
2.2.3	<u>Água</u>	28
2.3	Concreto reforçado com fibras	29
2.3.1	<u>Fibras de polipropileno</u>	31
2.3.2	<u>Fibras de aço</u>	32
2.3.3	<u>Aplicações das fibras de reforço</u>	39
2.4	Microtomografia computadorizada por transmissão de raios X.....	42
2.4.1	<u>A reconstrução das projeções de imagem</u>	44
2.4.2	<u>A imagem de microtomografia</u>	46
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	49
3.1	Preparação dos corpos de prova de concreto reforçado com fibras.....	49
3.2	Preparação das amostras de CRF para o ensaio de μCT.....	57
3.3	Metodologia para o processo de aquisição das imagens de microtomografia	58
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	63
4.1	Ensaio uniaxial de compressão em corpos de prova de CRF de aço e em corpos de prova de CRF de polipropileno	63
4.2	Análise das imagens de μCT no concreto reforçado com fibras de aço.....	66
5	CONCLUSÕES	70
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
	REFERÊNCIAS	72

APÊNDICE - artigos científicos sobre concreto desenvolvidos durante a pesquisa e apresentados em congressos nacionais e internacionais.....	76
--	----

INTRODUÇÃO

Concreto na atualidade é definido como a mistura de um aglomerante, o cimento, com agregado miúdo (areia) e graúdo (brita), água e, em alguns casos, aditivos químicos com a finalidade de melhorar algumas propriedades do concreto.

As fibras mais usadas como reforço em concreto são as fibras de aço e de polipropileno, que podem melhorar as suas propriedades mecânicas e diminuir a fissuração do concreto. As fibras mais conhecidas misturadas ao concreto são as fibras minerais de amianto, a partir daí vem sendo usadas diversos tipos de fibras de reforço como as fibras metálicas, poliméricas e vegetais.

A distribuição destas fibras de reforço na matriz do concreto influencia diretamente na sua resistência mecânica, impedindo que as fissuras se propaguem pelo efeito da retração plástica, pela ação de cargas externas e por outros efeitos reológicos do concreto.

O concreto é um dos materiais mais importante da construção civil, usado na construção dos mais diversos tipos de estruturas, e vem sendo muito estudado em diversas técnicas não destrutivas de caracterização de materiais.

Neste trabalho será usada a técnica de caracterização não destrutiva de concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno por microtomografia computadorizada por transmissão de raios X. O equipamento usado foi microtomógrafo computadorizado compacto de transmissão de raios X, Skyscan® modelo 1174 com a finalidade de estudar a quantificação e identificação dessas fibras na matriz do concreto.

1 CRONOLOGIA

Figueiredo (2000) em seu trabalho mostra a influência da adição das fibras de aço e polipropileno na matriz de concreto, com diversos tipos e concentrações de fibras, mostrando diversos estudos no comportamento mecânico do concreto.

Pereira-Oliveira (2009) avaliou o desempenho do método ICDAS, (Sistema Internacional de Avaliação e Detecção de Cáries) de radiografias digitais pela técnica interproximal, da CBCT (tomografia computadorizada de cone beam) e da μ CT (microtomografia computadorizada) para lesões precoces de cárie, com relação à histologia. Houve correlação entre os dados obtidos com o sistema ICDAS para superfícies proximais e as imagens da μ CT, no que diz respeito à classificação quanto à profundidade das lesões. A μ CT teve correlação positiva com a histologia tanto na classificação das lesões como na profundidade, contudo esta relação poderia ser maior se uma melhor resolução fosse conseguida. As radiografias digitais pela técnica interproximal tiveram o melhor desempenho com relação à μ CT e à histologia, sendo este desempenho muito semelhante ao método clínico ICDAS. A CBCT obteve o pior desempenho, contudo ainda assim houve correlação positiva com a histologia e com a μ CT. A associação do método clínico ICDAS e as radiografias interproximais digitais tiveram o melhor desempenho com relação à histologia.

Bardauil (2010) estudou e investigou in vivo as imagens obtidas por microtomografia computadorizada (μ CT) no estudo da anatomia apical de dentes humanos portadores de polpa viva e mortificada. Os dentes de ambos os grupos foram escaneados com o microtomógrafo computadorizado Skyscan® modelo 1172, com resolução de $6,7\mu\text{m}$ e suas imagens reconstruídas para a análise da região apical nos cortes sagital e coronal. Os resultados indicaram que não houve diferença estatisticamente significativa nos limites estabelecidos dos parâmetros escolhidos.

Pereira (2006) desenvolveu um sistema para estudar a microtomografia por fluorescência de raios X. Para excitar os elementos foi utilizado um feixe branco com energia máxima de 23 kV, onde os fótons foram detectados usando um HPGe, posicionados a 90 graus em relação ao feixe incidente. Foi utilizado esse detector cintilador rápido para detectar fótons transmitidos e o monitoramento do feixe incidente em uma câmara de ionização. As amostras biológicas, minerais e vegetais foram rotacionadas em 180° com passo de 3° e transladadas perpendicularmente na direção do feixe com passos de $200\mu\text{m}$ ou $80\mu\text{m}$. Nas

amostras de tecidos biológicos a reconstrução da distribuição dos elementos ferro, cobre e zinco e o potássio foram possíveis devido à utilização do algoritmo de retroprojeção filtrada.

Silva (2009) investigou amostras de ossos trabeculares cilíndricos extraídos da cabeça femoral bovina por μ CT. O software CT-Analyser® foi utilizado para medidas em três direções (crânio-caudal, lateral-medial e anterior-posterior) de diversos parâmetros da microestrutura trabecular tais como espessura trabecular, separação trabecular, número trabecular e os autovalores do tensor de anisotropia (M). A comparação entre os valores dos parâmetros medidos por análises morfométricas 2D e 3D foi realizada pelo teste-t pareado com nível de significância $p < 0,05$ e por correlação linear de Pearson. Os resultados obtidos mostraram que a microtomografia tridimensional por raios X é uma técnica de grande potencial para caracterização da qualidade óssea gerando bons parâmetros para o diagnóstico de doenças do metabolismo ósseo.

Argenta et al. (2010) apresenta uma metodologia básica para a determinação das propriedades físicas e parâmetros geométricos do tecido trabecular ósseo a partir de imagens de microtomografia de uma amostra de osso trabecular extraída da cabeça de um fêmur humano. O aparelho utilizado para a tomografia foi o micro-CT Skyscan® modelo 1172 de alta resolução. A partir das imagens obtidas pelo detector de raios X, função do coeficiente de atenuação, são reconstruídas as fatias tomográficas transversais utilizando-se o algoritmo de Feldkamp modificado. Sobre essas fatias, são aplicados algoritmos para a obtenção de propriedades físicas da amostra como volume de vazios, volume de osso, densidade aparente, densidade do pixel, grau de anisotropia, direções anisotrópicas e dimensão fractal tridimensional. A aplicação do método em ossos trabeculares mostrou-se viável apesar da grande quantidade de dados e da demorada execução dos cálculos matemáticos. Essa dificuldade pode ser contornada utilizando-se modernas técnicas de computação, como por exemplo, a utilização dos processadores das placas gráficas.

Lima (2006) usou duas técnicas de raios X para caracterizar amostras de ossos (humano e animal). Primeiramente utilizou a técnica de microtomografia computadorizada de raios X e depois a técnica de fluorescência de raios X em dois métodos diferentes: a fluorescência de raios X por dispersão de energia e a microfluorescência de raios X por radiação Síncrotron, revelando que são excelentes técnicas para caracterizar amostras ósseas.

Rocha (2005) utilizou a técnica de transmissão de raios gama e de microtomografia de raios X para avaliação da porosidade e da distribuição do tamanho de poros de espumas cerâmicas de SiC. Realizou também a reconstrução tridimensional após a determinação de parâmetros geométricos das amostras, que foram obtidos a partir de análises de imagens

bidimensionais geradas utilizando um sistema Microfocus. A resolução espacial das imagens microtomográficas foi de, aproximadamente, 32 μm . As amostras analisadas possuíam densidade de poros de 30, 45, 60, 80 e 100 ppi (poros por polegada linear). A técnica de transmissão de raios gama mostrou-se precisa e acurada ao fornecer a porosidade das amostras, em torno de 90%, e estão em acordo com os valores fornecidos pelo fabricante das espumas. As amostras de 30 e 45 ppi analisadas pela técnica de microtomografia apresentaram porosidade equivalentes à fornecida pelo fabricante das cerâmicas. Já as amostras de 60, 80 e 100 ppi apresentaram porosidade média, sistematicamente, inferior à do fabricante (= 4%). As distribuições de tamanho de poros mostraram a presença de poros menores do que aqueles indicados pelo fabricante. As amostras de 30 ppi apresentam um vazio dentro do material sólido da estrutura da espuma cerâmica. O método de gaussiana truncada, utilizado na reconstrução tridimensional, não foi capaz de levar em conta esse vazio dentro da matriz sólida.

Macedo et al. (1999) desenvolveu, na Embrapa Instrumentação Agropecuária, um tomógrafo de raios X, de resolução micrométrica, com o objetivo de obter imagens, de forma não-destrutiva, de amostras de solo, com resolução espacial igual ou inferior a 100 μm . Foi possível projetar e construir um equipamento, de alta resolução, com baixo custo, em comparação equipamentos comerciais disponíveis. Obteve imagens de amostras de solos com estrutura deformada, compostos por agregados de 212 a 250 μm , nos quais foram identificados poros medindo 100 μm ou menos. Poros dessas dimensões foram visualizados, também, em tomografias de amostras compostas de grãos de areia de 1 mm em capilares de vidro com diâmetros internos de 100, 200 e 300 μm . Tomografias de amostras não deformadas de solos evidenciaram, além de poros de 200 a 800 μm , partículas de alta densidade não-detectáveis com a tomografia de resolução milimétrica.

Appoloni et al. (2009) usou a técnica da microtomografia computadorizada na análise de rochas de reservatório conseguindo parâmetros estruturais importantes como porosidade, permeabilidade e distribuição de tamanho de poros. A resolução espacial da imagem da amostra foi de 2,5 μm . As imagens 2-D foram analisadas pelo *software* Imago onde foram obtidas 490 seções para análise microestrutural apresentando uma porosidade total média de $(7,0 \pm 0,2) \%$. A distribuição de tamanho de poros da amostra mostrou que, 95 % da fase porosa refere-se a poros com raios entre 2,5 e 10,2 μm . A reconstrução da imagem 3-D real da amostra foi feita através do *software* CTan®.

A aplicação da técnica de microtomografia computadorizada para a caracterização de materiais porosos cerâmicos, descrito no trabalho de (LIMA et al., 2007), onde são estudadas estruturas internamente conexas. Na caracterização foram obtidos parâmetros morfológicos fundamentados em conceitos de estereologia, baseados no algoritmo de Feldkamp. Para tal, foram utilizados materiais cerâmicos com diferentes tamanhos de poros: 10, 20, 30, 60, 75, 80 e 90 ppi. As condições experimentais como tensão de operação, corrente elétrica e tamanho de ampliação do objeto (magnificação) foram de 50 kV, 0,3 mA e 5 vezes respectivamente.

Assis et al. (2007) apresentou uma técnica de processamento de imagens para a determinação da porosidade em concreto. Este estudo foi iniciado pelo Laboratório de Ensaios Físicos do IPRJ-UERJ. O concreto usado nos primeiros estudos de porosidade foi o CAD (concreto de alto desempenho), onde a aplicação de aditivos visando à redução do índice de vazios do material desempenha papel importante na diminuição da permeabilidade e aumento da resistência mecânica do material. No trabalho de Pêssoa et al., (2008) foi usado a mesma técnica somente mudando o tipo do concreto que neste trabalho foi o concreto comum. Após a aquisição das imagens da superfície das amostras de concreto através de um scanner, estas foram separadas em suas componentes HSV através de um programa em MATLAB®. A componente V foi ajustada em contraste e binarizada e filtrada utilizando a operação de erosão com elemento estruturante circular para a remoção de pontos isolados, interpretados como ruído. Nessa imagem-resultado são contados os vazios obtidos para determinação da porosidade.

Assis et al. (2009) calculou o índice de porosidade da matriz do concreto a partir de imagens obtidas por microtomografias, utilizando técnicas de processamento de pixel e morfologia matemática. As imagens microtomográficas das amostras de concreto foram obtidas num sistema Skyscan® modelo 1172 com 256 tons de cinza, ajustadas em contraste, binarizadas e filtradas utilizando a operação de erosão com elemento estruturante circular para a remoção de pontos isolados, interpretados como ruído. Nessas imagens resultado são contados os vazios obtidos para determinação do índice de porosidade da matriz.

Pêssoa et al. (2010) comparou o valor encontrado para o índice porosidade da matriz do concreto com resistência à compressão de 25 MPa preparado com cimento CP III, obtidos a partir de imagens obtidas por microtomografia e o valor encontrado para esse mesmo índice calculado a partir de imagens obtidas por escâner comercial.

Pêssoa (2011) utilizou métodos não destrutivos (END), como a microtomografia com raios X e técnicas de processamento de imagens, para obtenção da porosidade do concreto. Foram apresentados dois métodos. Em um método as imagens foram obtidas por meio de

microtomografia por raios X e no outro foi utilizado o escâner comercial para obtenção das imagens. Os resultados obtidos para a porosidade foram comparados com resultado obtido por meio do método proposto pela NBR 9778 (2005) – (Absorção de água, índice de vazios e massa específica em argamassa e concreto endurecido). Os resultados mostraram compatibilidade entre os dois métodos apresentados e o método proposto pela NBR 9778 (2005). Observou-se que os resultados obtidos por microtomografia são mais precisos, mas o método utilizando o escâner comercial se apresenta como um método não destrutivo aceitável por seus resultados e principalmente por seu baixo custo e facilidade de operação.

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

2.1 Compósitos

Os materiais compósitos estão cada vez mais presentes no cotidiano da engenharia de materiais ligado ao avanço tecnológico e a diversas aplicações no setor automobilístico, aeronáutico, aeroespacial e subaquático que não pode ser atendida por ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos. Um exemplo clássico é o setor aeroespacial que busca materiais estruturais que tenham baixa densidade, alta resistência à abrasão e impacto e sejam fortes e rígidos e não sejam facilmente corroídos. O material compósito é uma combinação de dois ou mais materiais que utilizados juntos resultam em uma combinação de propriedades que podem ser encontradas em uma única fase (CALLISTER, 2008, p. 423).

O concreto por definição é um material compósito cerâmico cimentício e as fases são denominadas fase matriz, que neste trabalho será o concreto convencional, e a fase dispersa, que é a fibra de reforço.

2.1.1 Compósito reforçado com fibras

Os materiais compósitos ditos mais importantes na engenharia de materiais são aqueles que a fase dispersa está na forma de fibras de reforço, pois apresentam maiores: limites de resistência à compressão, resistência à fadiga; módulo de Young e resistência específica. O material da matriz protege as fibras e transmite tensões às fibras que resistem à força aplicada, diminuindo a difusão de oxigênio e umidade que degradam as propriedades mecânicas desses materiais. Portanto, a resistência do material compósito eleva-se a temperatura ambiente e em altas temperaturas. Existem vários tipos de materiais usados como reforço, primeiramente o mais antigo, a palha de fibras vegetais usadas em tijolos de barro, as barras de aço usadas em estruturas de concreto, as fibras de vidro em conjunto com uma matriz polimérica usado na indústria automobilística e aeronáutica. As fibras de boro, carbono e polímeros que oferecem reforços extraordinários em compósitos com base em matriz

polimérica, metálica e cerâmica (ASKELAND; PHULÉ, 2008, p. 535). As fibras de reforço de aço e polipropileno que foi usada nesta dissertação são as mais usadas na construção civil.

2.2 Concreto

O concreto é um mistura físico-química de cimento, agregados e água. A qualidade desta mistura dependerá da qualidade dos componentes; a água e o cimento combinam-se formando a pasta que liga os agregados entre si. Se uma pequena parte desta pasta não preencher os vazios do agregado prejudicará a qualidade do concreto. Da mesma forma o uso excessivo da água, na hidratação do cimento formará por evaporação posterior vazios, que prejudicará as propriedades mecânicas e físicas do concreto (NÁPOLES NETO et al., 1968, p. 358).

Na aplicação do concreto reforçado com fibras, existem considerações de uso comum para a aplicação de aditivos na mistura que não diferem daquelas consideradas normalmente para misturas em concreto simples. Os fluidificantes, superfluidificantes retardadores, são usados para manter a trabalhabilidade do concreto; normalmente são a base de Copolímeros de Vinil, Policarboxilatos Modificados, apresentados na forma líquida; conseguem manter a trabalhabilidade do concreto por 2 a 6 horas, de acordo com a necessidade. Os aditivos são incorporados, uma vez elaborada a mistura, para controlar a trabalhabilidade necessária onde existam dificuldades de acesso no local de projeção, ou nos casos de percursos longos da usina até a obra. Os acelerantes de pega são incorporados na mistura quando há necessidade de rápido ganho de resistência; normalmente, são produzidos a base de silicato e sulfato de alumínio; é importante controlar a porcentagem deste produto já que o seu uso excessivo em longo prazo pode reduzir a resistência do material; normalmente é utilizado de 4% a 6% da fração de cimento; com o formato em pó ou líquido. Os protetores de corrosão fazem parte de uma nova geração de aditivos que ativam os álcalis do concreto e agem junto a estes para gerar uma interação mais rigorosa contra a ação dos íons de cloro que induzem a oxidação (MACAFERRI, 2008, p. 74).

Os principais fabricantes de aditivos para concreto reforçado com fibras são: Sika, Mc Bauchemie, Basf, Otto Baumgart e Weber.

2.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um material constituído principalmente de material calcário, como rocha calcária ou gesso, alumina e sílica, encontrados como argilas ou xisto. Pode também ser usada a marga, mistura de materiais calcários e argilosos (NEVILLE, 1997, p. 24).

O processo de fabricação do cimento Portland, segundo (NEVILLE, 1997, p. 24), consiste essencialmente em moer a matéria prima, misturá-la intimamente nas proporções adequadas e queimar essa mistura em um grande forno rotativo até uma temperatura de cerca de 1450°C, sofrendo uma fusão incipiente formando pelotas chamadas clínquer. É resfriado e moído até um ponto bem fino com adição de um pouco de gesso.

No mercado existem diversos tipos de cimento. A diferença entre eles está na composição, mas todos atendem às exigências das Normas Técnicas Brasileiras. Cada tipo tem o nome e a sigla correspondente estampada na embalagem, para facilitar a identificação. Os tipos de cimento adequados aos usos gerais são apresentados na (Tab 1):

Tabela 1 - Tipos de cimento

Tipos de Cimento		Classe de Resistência (MPa)	Norma Brasileira
CP I	Cimento Portland Comum	25	NBR 5732
CP I – S	Cimento Portland Comum com Adição	32 40	NBR 5732
CP II –E	Cimento Portland Composto com Escória de Alto Forno	25 32 40	NBR 11578
CP II –Z	Cimento Portland Composto com Pozolana	25 32 40	NBR 11578
CP II –F	Cimento Portland Composto com Filer (Calcário)	25 32 40	NBR 11578
CP III	Cimento Portland de Alto Forno	25 32 40	NBR 5735
CP IV	Cimento Portland Pozolânico	25 32	NBR 5736
CP V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	-	NBR 5733
RS	Cimento Portland Resistente a Sulfatos	-	NBR 5737
	Cimentos Especiais		

Fonte: HOLCIM, 2011.

2.2.1.1 Cimento Portland Composto

Segundo a norma ABNT NBR 11578 (1991, p. 2), o Cimento Portland Composto é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto forno e / ou materiais carbonáticos, nos teores especificados na (Tab 2).

Tabela 2 - Teores dos componentes do cimento Portland composto

Sigla	Classe de resistência	Componentes (% em massa)			
		Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
CP II-E	25	94-56	6-34	-	0-10
	32				
	40				
CP II-Z	25	94-76	-	6-14	0-10
	32				
	40				
CP II-F	25	94-90	-	-	6-10
	32				
	40				

Fonte: ABNT NBR 11578, 1991, p. 2.

Onde as siglas significam: CP II-E – Cimento Portland composto com escória

CP II-Z – Cimento Portland composto com pozolana

CP II-F – Cimento Portland composto com filer

E as classes 25, 32 e 40 representam os mínimos de resistência à compressão aos 28 dias em MPa (ABNT NBR 11578, 1991, p 2).

2.2.2 - Agregados

Segundo Petrucci (1980), entende-se por agregado o material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inertes, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia. As rochas britadas (granito), os fragmentos rolados no leito dos cursos d'água e os materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rocha (gnaisse) são exemplos de agregados. Suas aplicações são variadas: servem para lastro em vias férreas, bases para calçamentos, são adicionados aos solos que constituem a pista de rolamento das estradas, entram na composição de material para revestimentos betuminosos e são, finalmente, utilizados como material granuloso e inerte na confecção de argamassas e concreto.

Como pelo menos três quartas partes do volume do concreto são ocupadas pelos agregados, não surpreende que a sua qualidade seja de considerável importância. O agregado não só pode influenciar a resistência do concreto, pois agregados com propriedades indesejáveis podem não apenas produzir um concreto pouco resistente, mas também podem comprometer a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto. O agregado antes era tido como um material inerte disperso por entre a pasta de cimento principalmente por razões econômicas. No entanto, é possível adotar um ponto de vista oposto e considerar o agregado como um material de construção de alvenaria. Na verdade o agregado não é inerte na exata acepção da palavra e suas propriedades físicas, térmicas e, às vezes, também químicas têm influência no desempenho do concreto. O agregado custa menos do que o cimento e, portanto, é econômico usar no concreto quanto mais agregado e menos cimento possível. Mas a economia não é única razão de se usar agregado: ele confere vantagens técnicas consideráveis ao concreto, que passa a ter maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade do que a pasta de cimento pura (NEVILLE, 1997, p. 125).

Mas a idéia do passado de que o agregado é um material de baixo custo em relação ao cimento, não pode ser mais usado nos dias de hoje devido ao alto custo ambiental, onde a geografia do local explorado para a extração destes materiais na natureza jamais será repostos.

Um empacotamento denso do agregado e um bom contato interfacial são obtidos empregando-se partículas com dois tamanhos diferentes; as partículas finas de areia devem preencher os espaços vazios entre as partículas de brita, esses agregados compreendem entre

60% a 80% do volume total do concreto. A quantidade da pasta de cimento-água deve ser suficiente para cobrir todas as partículas de areia e de brita. De outra forma a ligação de cimentação não ocorrerá (CALLISTER, 2008, p. 426).

Os agregados podem ser classificados do ponto de vista de sua origem e, neste caso, podemos dividi-los em naturais e artificiais. Os agregados naturais são aqueles encontrados na natureza como, por exemplo: as areias de mina, as areias de cursos d'água, e os pedregulhos ou seixos rolados. Denominam-se artificiais aqueles que necessitam de um trabalho de aperfeiçoamento pela ação do homem, a fim de chegar à situação de uso como agregado, como por exemplo, as areias e pedras obtidas por moagem de fragmentos maiores (PETRUCCI, 1980).

A resistência inadequada do agregado representa um caso limite porque as propriedades físicas do agregado têm alguma influência sobre a resistência do concreto, mesmo quando o agregado é suficientemente resistente para não se romper prematuramente. Comparando concretos preparados com agregados diferentes, pode-se observar que a influência sobre a resistência do concreto é qualitativamente igual, quaisquer que sejam as proporções da mistura, tanto para o ensaio de compressão como de tração. Em geral a resistência e a elasticidade do concreto dependem da sua composição, textura e estrutura (NEVILLE, 1997, p. 136).

Tabela 3: Resistência à compressão de rochas americanas geralmente usadas como agregados de concreto

Resistência à compressão, MPa				
Após eliminação dos valores extremos				
Tipo de Rocha	Nº de amostras	Valor médio	Valor Máximo	Valor Mínimo
Granito	278	181	257	114
Felsito	12	324	526	120
Basalto	59	283	377	201
Calcário	241	159	241	93
Arenito	79	131	240	44
Mármore	34	117	244	51
Quartzito	26	252	423	124
Gnaisse	36	147	235	94
Xisto	31	170	297	91

Fonte: NEVILLE, 1997, p. 136.

Os agregados são classificados por dois grupos de tamanhos, sendo as principais divisões entre agregado miúdo, que compreende material não maior do que 5 mm, ou 4,8 mm, muitas vezes denominado areia (por exemplo, na BS 882:1992), e agregado graúdo, que compreende material igual ou maior do que 5 mm, ou 4,8 mm. (NEVILLE, 1997, p. 125).

Neste trabalho não foi feito uma análise granulométrica dos agregados (miúdo, graúdo), devido ao início de implementação do Laboratório de Tecnologia da Habitação e da Construção, não tinham sido ainda adquiridas as peneiras necessárias para este ensaio, mas a falta deste ensaio não influenciou o foco do estudo que é identificação e quantificação das fibras de reforço na matriz do concreto pela técnica de microtomografia computadorizada por transmissão de raios X. Porém, a análise granulométrica dos agregados contribuiria muito para o ensaio de compressão apresentado neste trabalho.

2.2.2.1 - Brita

As pedras britadas são grãos de superfície rugosa, proveniente do britamento de rochas estáveis, o tamanho das pedras varia muito e tem influência na qualidade do concreto. Por isso, as pedras são classificadas por tamanhos medidos em peneiras pela abertura da malha, (PETRUCCI, 1980). Na (Tab 4) são apresentados os limites granulométricos do agregado graúdo pela norma ABNT NBR 7211, 1983:

Tabela 4 - Limites granulométricos de agregado graúdo

Graduação		0	1	2	3	4	5
Porcentagem retida acumulada, em peso, nas peneiras de abertura nominal, em mm, de	152	-	-	-	-	-	-
	76	-	-	-	-	0	-
	64	-	-	-	-	0-30	-
	50	-	-	-	0	0-75	-
	38	-	-	-	0-30	90-100	-
	32	-	-	0	75-100	95-100	-
	25	-	0	0-25	87-100	-	-
	19	-	0-10	75-100	95-100	-	-
	12,5	0	-	90-100	-	-	-
	9,5	0-10	80-100	95-100	-	-	-
	6,3	-	92-100	-	-	-	-
	4,8	80-100	95-100	-	-	-	-
	2,4	95-100	-	-	-	-	-

Fonte: ABNT NBR 7211, 1983, p. 4.

As britas devem estar limpas antes de seu uso, sendo retirados a mão ou por lavagem o pó de britagem, galhos, folhas e raízes.

2.2.2.2 Areia

A areia natural quartzosa ou a artificial resultante do britamento de rochas estáveis. São classificadas de acordo com a origem como natural ou artificial. A areia natural é encontrada em minas ou no leito de rios e a areia artificial é obtida em usinas apropriadas, pelo britamento de rochas até o diâmetro máximo especificado. E, assim como a brita, ela também precisa estar limpa e livre de impurezas como: argila, matéria orgânica e pó muito fino denominado material pulverulento, antes de ser usada (PETRUCCI, 1980).

A Norma Técnica (ABNT NBR 7211, 1983, p 4) classificam a areia, segundo o tamanho de seus grãos, em: muito fina, fina, média, grossa, como mostra a (Tab 5):

Tabela 5 - Limites granulométricos de agregado miúdo

Peneira ABNT	Porcentagem, em peso, retida acumulada na peneira ABNT, para a			
	Zona 1 (muito fina)	Zona 2 (fina)	Zona 3 (média)	Zona 4 (grossa)
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4,8 mm	0 a 5 ^(A)	0 a 10	0 a 11	0 a 12
2,4 mm	0 a 5 ^(A)	0 a 15 ^(A)	0 a 25 ^(A)	5 ^(A) a 40
1,2 mm	0 a 10 ^(A)	0 a 25 ^(A)	10 ^(A) a 45 ^(A)	30 ^(A) a 70
0,6 mm	0 a 20	21 a 40	41 a 65	66 a 85
0,3 mm	50 a 85 ^(A)	60 ^(A) a 88 ^(A)	70 ^(A) a 92 ^(A)	80 ^(A) a 95
0,15 mm	85 ^(B) a 100	90 ^(B) a 100	90 ^(B) a 100	90 ^(B) a 100

Fonte: ABNT NBR 7211, 1983, p. 4.

Obs: (A) Pode haver uma tolerância de até um máximo de cinco unidades de por cento em um só dos limites marcados com a letra A ou distribuídos em vários deles.

(B) Para agregado miúdo resultante de britamento, este limite pode ser 80.

2.2.3 Água

A água a ser utilizada no concreto deve ser limpa sem argila e material orgânico. Nunca deve ser usada água poluída com esgoto na preparação do concreto.

A quantidade de água empregada no concreto tem uma grande importância, tão importante que a relação entre o volume da água e o volume do cimento dentro de uma mistura recebeu um nome: fator água cimento (A/C).

A água deve ser empregada na quantidade necessária para envolver os grãos, permitindo a hidratação e posterior cristalização do cimento.

A água é importantíssima para a cura do concreto, pois a hidratação do cimento continua por um tempo muito longo, em torno de 28 dias para o concreto atingir a sua resistência máxima.

2.3 Concreto reforçado com fibras

Concreto reforçado com fibras por definição é um material composto de cimento Portland, agregados, água para hidratação e fibras descontínuas misturadas. A adição das fibras melhora as propriedades mecânicas do concreto convencional diminuindo as fissuras.

As fibras mais comuns misturadas ao cimento são as fibras de amianto, a partir daí vem sendo usado como reforço vários tipos de fibras como: aço, polipropileno, polietileno, nylon, carbono, vidro, celulose, sisal, etc.

O emprego das fibras em lajes de concreto chega a de 60%, em concreto projetados por volta de 25% e em pré-moldados cerca de 5% e também são usados em outras diversas aplicações (MINDESS apud THOMAS, 2002, p. 1).

O papel principal da aplicação das fibras descontinuas aleatórias, que são distribuídas no material, é de atravessar as fissuras que se formam no concreto, quando sob ação de cargas externas ou quando sujeito a mudança na temperatura ou umidade do meio ambiente.

Algumas dessas fibras têm o Módulo de Elasticidade maior que o concreto, como no caso do aço, outras têm o Módulo de Elasticidade menor que o concreto, caso das fibras de polipropileno (Fig 1).

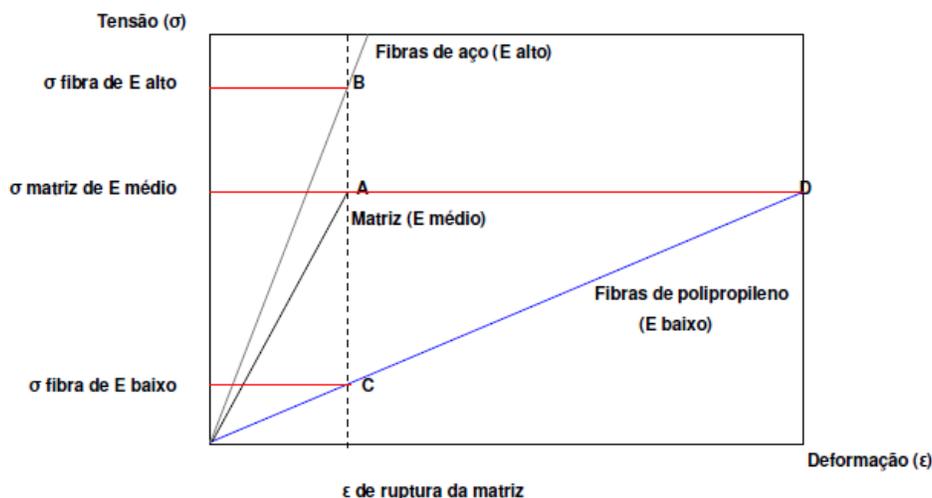


Figura 1 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto

Fonte: FIGUEIREDO, 2000, p. 5.

Na (Fig 1), é mostrado um diagrama onde o concreto reforçado com fibras de aço apresenta uma capacidade de funcionar como reforço pelo fato de apresentar um maior módulo de elasticidade em comparação com um concreto comum sem reforço. No caso do concreto reforçado com fibras de polipropileno não funcionará como reforço isto devido ao baixo módulo de elasticidade em comparação ao concreto comum sem reforço e sim como redutor de fissuração por retração plástica. Alguns valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade são mostrados na (Tab 6).

Tabela 6 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes

Material	Diâmetro (μm)	Densidade (g/m ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação de Ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-200	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	0,02-0,40	2,60	160-200	3-3,5	2-3
Polipropileno	20-200	0,90	5-7,7	0,50-0,75	8
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono	9	1,90	230	2,6	1,0
Nylon	-	1,10	4	0,9	13-15
Celulose	-	1,20	10	0,3-0,5	-
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno	-	0,95	0,3	0,7x10 ⁻³	10
Fibra de madeira	-	1,50	71	0,9	-
Sisal	10-50	1-50	-	0,8	3
Matriz de Cimento (para Comparação)	-	2,50	10-45	3,7x10 ⁻³	0,02

Fonte: BENTUR e MINDESS apud FIGUEIREDO, 2000.

2.3.1 Fibras de polipropileno

As fibras sintéticas de polipropileno têm sido uma alternativa de substituição das fibras de amianto no reforço de matrizes de concreto, isto devido a uma série de problemas de saúde ocasionados pelo manuseio das fibras de amianto; apesar do desempenho mecânico das fibras de amianto ser superior as fibras sintéticas e vegetais. As fibras sintéticas de polipropileno tem tido um grande aumento no volume de aplicação, principalmente em argamassas e em reforço em concreto, devido a um ganho considerável de desempenho no controle da fissuração por retração plástica na matriz do concreto, onde o baixo módulo de elasticidade das fibras de polipropileno é suficiente para inibir a propagação das fissuras. Mas, quando o módulo de elasticidade da matriz é menor que o módulo das fibras de polipropileno, essas tendem a ter uma pequena capacidade de funcionar como reforço; sendo questionada a sua função de controle de fissuras por retração plástica; este fato se deve aos cimentos atuais, em conjunto com uma série de aditivos acelerados de pega e redutores de água que aumentam a resistência inicial do concreto e do módulo de elasticidade. Portanto, as fibras de baixo módulo de elasticidade, como as fibras de polipropileno, só atuam como reforço em um curto espaço de tempo após o lançamento adquirindo bons resultados após a cura (FIGUEIREDO, 2000).

As fibras de polipropileno também são aplicadas como proteção contra danos físicos durante incêndio em túneis, esta aplicação foi descoberta após o incêndio ocorrido no Eurotúnel, em uma parte do túnel com concreto simples houve comprometimento do revestimento de concreto devido à tensão interna gerada pela pressão de vapor água e em outra parte em que foram usadas as fibras de polipropileno como reforço este problema não foi verificado, pois, com o aumento da temperatura, elas se fundiam produzindo um caminho livre para a saída do vapor de água, evitando a ruptura do revestimento pela pressão de vapor (RLE apud FIGUEIREDO, 2000, p. 5).

A baixa massa específica da fibra de polipropileno é um fator que dificulta a aplicação do concreto e prejudica a trabalhabilidade do material, que tende a flutuar para a parte superior do concreto, quando a mistura conta com uma alta relação água / materiais secos. O uso das fibras de polipropileno reduz a exsudação do concreto, isto ocorre devido à grande demanda da quantidade água de molhagem das fibras por sua elevada área específica que diminuem a mobilidade das fibras na mistura do concreto. As fibras monofibriladas são pequenas telas que se abrem durante a mistura do concreto, aumentando a capacidade de

reforço e provocando intertravamento das fibras na matriz do concreto. A dosagem padrão das fibras de polipropileno para qualquer tipo de aplicação gira em torno de 900 a 1000 gramas por metro cúbico (FIGUEIREDO, 2000, p. 6). Mas alguns fabricantes recomendam a dosagem em torno de 600 a 1500 gramas por metro cúbico.

As fibras de polipropileno são fabricadas em forma de fibrilas retangulares ou de mono-filamentos cilíndricos (Fig 2).



Figura 2 - Fibrilas finas em forma retangular e na forma de mono-filamentos cilíndricos finos

Fonte: (MINDESS apud THOMAS, 2002, p. 6-7).

As fibras de polipropileno são muito usadas em barragens, como em Estações de Tratamento de Água (E.T.A.), Estações de Tratamento de Esgotos (E.T.E.), galerias, paredes de canais, vertedouros e bacias de dissipação (MINDESS apud THOMAS, 2002, p. 12).

2.3.2 Fibras de aço

As fibras de aço descontínuas são produzidas em diversos formatos, dimensões e tipos de aço. Os três tipos mais comuns no mercado são: a fibra de aço corrugada que é fabricada com a sobra da produção da lâ de aço, a fibra com ancoragem em gancho com seção retangular que é produzida a partir de chapas de aço cortadas na largura da fibra e a fibra de ancoragem em gancho com seção circular que são produzidas a partir de fios trefilados (FIGUEIREDO, 2000, p. 8), (Figs 3, 4 e 5).

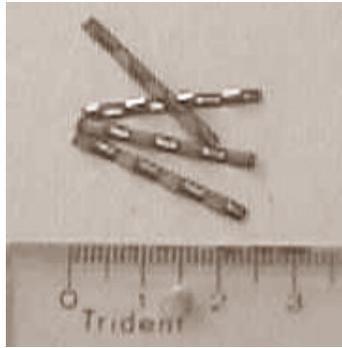


Figura 3 - Fibra de aço corrugada.
Fonte: FIGUEIREDO, 2000, p. 8.



Figura 4 - Fibra de aço com ancoragem em gancho e seção quadrada.
Fonte: FIGUEIREDO, 2000, p. 9.

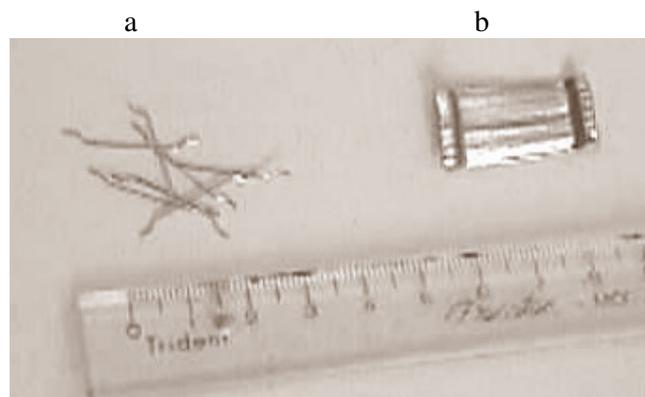


Figura 5 - Fibra de aço com ancoragem em gancho e seção circular solta (a) e em pentes (b).
Fonte: FIGUEIREDO, 2000, p. 9.

O papel fundamental das fibras de aço adicionadas ao concreto é dificultar a propagação das fissuras na matriz do concreto, devido ao seu alto módulo de elasticidade. As fibras têm a função de redistribuir os esforços na matriz do concreto, mesmo usando baixos teores de fibras, na mistura. O concreto é um material frágil e está susceptível a concentração de tensões, quando é iniciado o surgimento e a propagação dessa fissura, devido ao aumento da tensão aplicada, (FIGUEIREDO, 2000, p. 11).

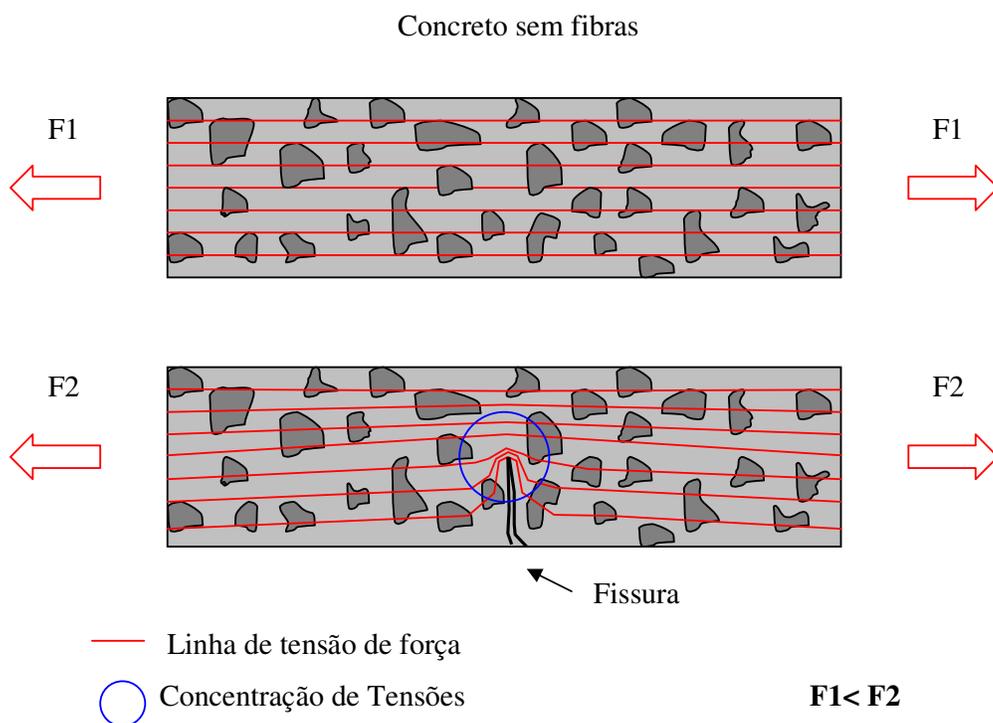


Figura 6 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem reforço de fibras
Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

No caso do concreto sem fibras de reforço, a fissura representa uma barreira à propagação de tensões representada pelas linhas de tensões da (Fig 6); este desvio das linhas de tensões mostra uma concentração de tensões na extremidade da fissura. Caso esta tensão seja maior que a resistência da matriz do concreto resultará ruptura instantânea do material. Se o esforço for cíclico teremos uma ruptura por fadiga. Em cada ciclo ocorrerá uma pequena propagação de microfissuras que vai progredindo a concentração de tensões na sua

extremidade até a ruptura e no momento que a fissura se abre imediatamente ocorre à ruptura do material. Quando adicionamos fibras de reforço de aço no concreto (Fig 7), o comportamento frágil deste material deixa de existir, pois as fibras de aço servem de ponte de transferência de tensões pelas fissuras da matriz, diminuindo as concentrações de tensões nas extremidades dessas fissuras; diminuindo a velocidade de propagação de fissuras passando a ter um comportamento dúctil (FIGUEIREDO, 2000, p. 11).

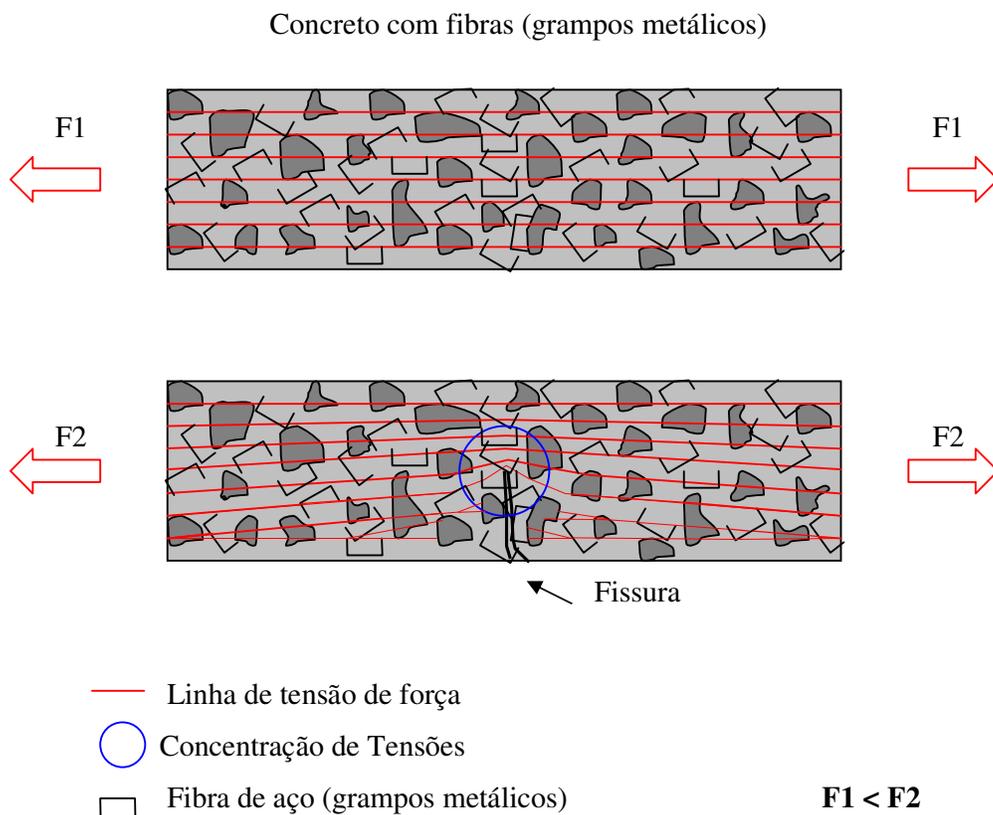


Figura 7 - Esquema de concentração de tensões para um concreto com o reforço de fibras
 Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

A eficiência das fibras de aço depende do seu direcionamento em relação ao sentido da tensão de tração aplicada, que melhorará a eficiência da matriz do concreto. Devem-se utilizar fibras cujo comprimento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto e haver uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras de reforço de modo que estas interceptem com maior frequência a fissura que ocorre no compósito. A fratura do concreto de baixa e média resistência sempre ocorre na interface

agregado graúdo e pasta. Portanto as fibras devem atuar como ponte de transferência de tensões nas fissuras, sendo indispensável um comprimento que facilite o seu posicionamento em relação à fissura (FIGUEIREDO, 2000, p. 18).

Na (Fig 8) está representado um concreto com compatibilidade dimensional entre agregado e fibra e na (Fig 9) onde isso não ocorre.

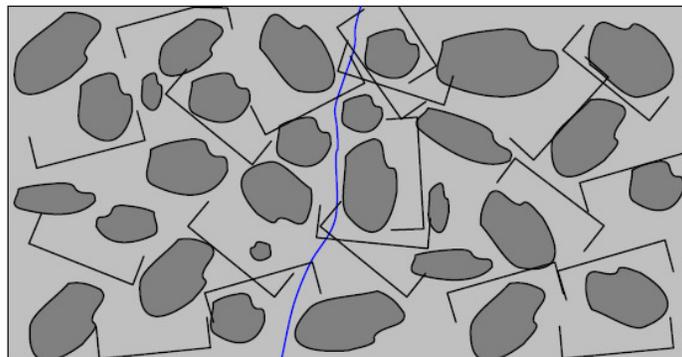


Figura 8 - Compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo no concreto reforçado com fibras

Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

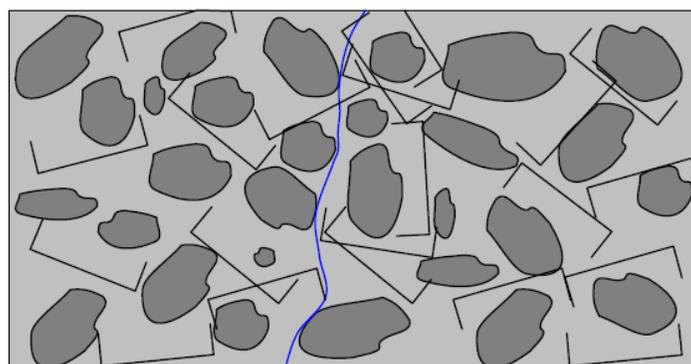


Figura 9 - Incompatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo no concreto reforçado com fibras

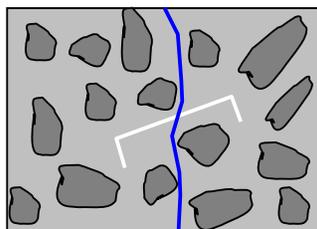
Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

Em pavimentos recomenda-se o uso das fibras mais longas, pois não há restrições às dimensões dos agregados do concreto, já no caso do concreto projetado devido à restrição dimensional do agregado que não ultrapassa de 9,5 mm devem-se usar fibras curtas (FIGUEIREDO, 2000, p. 19), (Fig 10).

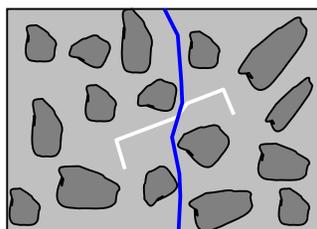


Figura 10 - Fibras de aço longas (a) e curtas (b)
Fonte: FIGUEIREDO, 2000, p. 20.

A fibra que se encontra inclinada em relação ao plano de ruptura pode perder eficiência caso não apresente uma boa ductilidade. Isto ocorre devido ao alto nível de tensão de cisalhamento em que a fibra é submetida. Caso a fibra não se deforme plasticamente de modo a se alinhar na direção do esforço principal ela irá romper por cisalhamento (FIGUEIREDO, 2000, p. 19), (Fig 11).



Fibra frágil



Fibra dúctil

Figura 11 - Tipos de deformações das fibras de aço
Fonte: FIGUEIREDO, 2000

As fibras de aço empregadas na mistura do concreto alteram as condições de consistência, pois está adicionando também uma grande área superficial necessitando de mais água de molhagem. Um exemplo descrito por Figueiredo (2000, p. 41), diz que se adicionarmos 50 kg de fibra de aço com ancoragem em gancho com 30 mm de comprimento e seção circular com diâmetro de 0,5 mm em um metro cúbico de concreto, teremos uma nova área de molhagem de, aproximadamente, 50 m². Com isso, a água destinada a fluidificar a mistura será menor e quanto menor for o diâmetro da fibra maior será a perda da fluidez da mistura.

O fator de forma das fibras de reforço é a relação do comprimento da fibra e o diâmetro da circunferência com área equivalente à sua seção transversal. Quanto maior o fator de forma, maior a influência na trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras (FIGUEIREDO, 2000, p. 41). Neste trabalho não foi possível determinar o fator de forma dos grampos metálicos devido à geometria retangular da seção transversal.

O ensaio de medida da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras usado neste trabalho foi o ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) (ABNT NBR 7223, 1992).

Neste trabalho, devido ao baixo teor de fibras de aço 11 kg/m³, não foi verificada nenhuma diferença na trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço pelo ensaio (ABNT NBR 7223, 1992). O abatimento do tronco do cone foi de 180 mm igualmente ao concreto comum sem reforço de fibras de aço.

Um problema comum encontrado na aplicação das fibras de aço em pavimentos de concreto é o fato que algumas fibras surgem na superfície do concreto gerando pontos de ferrugem. As fibras oxidadas são incapazes de produzir a perfuração dos pneus, sendo somente um problema estético na superfície do concreto e para solucionar este problema adota-se elevados abatimentos do tronco de cone na ordem de 10 cm (FIGUEREDO, 2000, p. 44). Este problema pode gerar outro risco para o concreto que é a segregação das fibras, cuja massa específica é cerca de três vezes maior que a do concreto, afastando essas fibras da superfície, reduzindo o reforço e surgindo o aparecimento de fissuras (CECCATO, 1998).

Outro problema originado da aplicação de fibras de aço ao concreto é o ouriçamento; que pretendemos estudá-lo através de imagens microtomográficas. Os ouriços são bolas aglomeradas de fibras de aço que reduz o teor de fibra distribuído na matriz e produz pontos de fragilidade, com espaços vazios onde o ouriço se aloja.

No caso do bombeamento do concreto projetado deve-se utilizar alguma proteção para impedir o entupimento do mangote que pode gerar riscos ao processo.

Para diminuir a formação dos ouriços na mistura do concreto reforçado com fibras de aço devem-se misturar adequadamente as fibras, evitando-se jogar as fibras de uma só vez na betoneira, sendo recomendado a distribuição das fibras a uma taxa controlada junto com os agregados e posteriormente o lançamento do cimento. Uma outra alternativa é o uso das fibras coladas em pentes que tem a sua cola dissolvida e que permite uma melhor homogeneização do concreto (FIGUEIREDO, 2000, p. 44), (Figs 12 e 13).

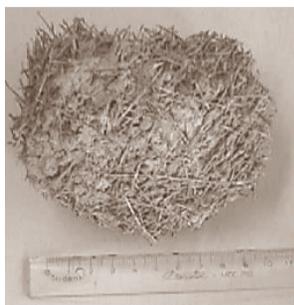


Figura 12 - Ouriço formado por fibras de aço mal misturadas ao concreto.
Fonte: FIGUEIREDO, 2000, p. 44.



Figura 13 - Fibras coladas em pente
Fonte: FIGUEIREDO, 2000, p. 44.

2.3.3 Aplicações das fibras de reforço

- Concretos com fibra de aço são muito usados em pavimentos de estradas, em pistas e pátios de aeroportos (Fig 14). O objetivo é diminuir a espessura das lajes e reduzir a fissuração (MINDESS apud THOMAS, 2002, p. 9).



Figura 14 - Exemplo de aplicação de CRF em pistas de aeroportos
Fonte: (MACCAFERRI, 2008, p. 137).

- Concretos com fibras de aço são muito usados em pisos industriais (Fig 15). O objetivo é reduzir danos devidos à abrasão, ao impacto e à fadiga (MINDESS apud THOMAS, 2002, p. 10).



Figura 15 - Exemplo de aplicação de CRF em pisos industriais.
Foto: (MACCAFERRI, 2008, p. 137).

- Fibras de polipropileno também são muito usadas em pisos industriais. O objetivo é reduzir danos devidos à fissuração da retração plástica (retração que ocorre nas primeiras 12 horas, antes que o concreto tenha desenvolvido muita resistência). Para aproveitar os efeitos benéficos desses dois tipos de fibra, e combater todos esses tipos de danos, usa-se o concreto com uma mistura de fibras de aço e fibras de polipropileno (MINDESS apud THOMAS, 2002, p. 10).

- Concretos com fibras de aço ou de polipropileno são usados em pisos de garagens e estacionamentos (Fig 16).



Figura 16 - Exemplo de aplicação de CRF em pisos de estacionamentos.

Foto: (MACAFERRI, 2008, p. 137)

- Concretos com fibras de aço também são muito usados em pisos portuários.
- O concreto com fibras, de aço ou de polipropileno, é muito usado em revestimentos de túneis (Fig 17). É aplicado como concreto projetado. As perdas devidas à reflexão do concreto projetado (repique) ficam reduzidas, pois a coesão do concreto fresco fica maior, quando se usam fibras. O uso de fibras de aço, de micro-sílica e de aceleradores de pega permite a execução de camadas espessas de concreto projetado (MINDESS apud THOMAS, 2002, p. 11).

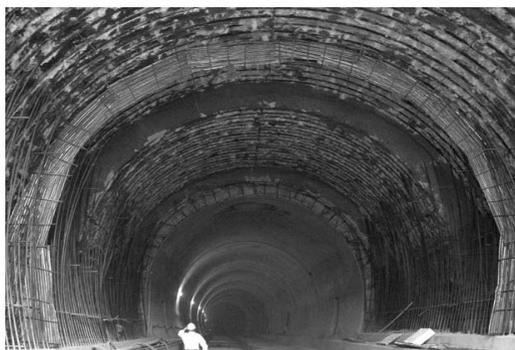


Figura 17 - Exemplo de aplicação de CRF em túneis.

Foto: (MACAFERRI, 2008, p. 79).

- Na estabilização de taludes é usado concreto projetado com fibras (Fig 18). São usadas fibras de aço, malhas soldadas de aço e tirantes ancorados no maciço rochoso. Usando-se concreto projetado com fibras de aço, micro-sílica e de aceleradores de pega, pode-se executar camadas espessas de concreto projetado (MINDESS apud THOMAS, 2002, p.11).



Figura 18 - Exemplo de aplicação de CRF na estabilização de taludes.
Foto: (MACAFERRI, 2008, p. 71).

2.4 - Microtomografia computadorizada por transmissão de raios X

A tomografia computadorizada tem sido usada freqüentemente na medicina desde anos 70, com uma resolução espacial da ordem de 0,5 a 1 mm, e com uma precisão no contraste de cerca de 1%. A partir dos anos 80 começou o uso dos equipamentos de tomografia computadorizada construídos para uso industriais de ensaios não destrutivos (BERNARDES, 2009).

O objetivo principal do uso da microtomografia computadorizada na caracterização de materiais cerâmicos, tal como o concreto reforçado com fibras, é a determinação de defeitos apresentados como fissuras, porosidade, suas posições, tamanhos e formas dos agregados e fibras na matriz do concreto.

No tomógrafo usado na medicina, a fonte de radiação (raios X) gira 360° em torno do paciente, já no caso dos estudos em materiais cerâmicos, a fonte permanece imóvel e a amostra gira 360° em torno do material (LIMA, 2007). A análise da identificação das fibras na matriz do concreto é realizada obtendo as projeções da amostra a partir de diversas direções, pelo rotacionamento do corpo de prova de concreto para cada ângulo de projeção (Fig 19). Com isso é medida a atenuação da radiação gerada pelo direcionamento da fonte de raios X.

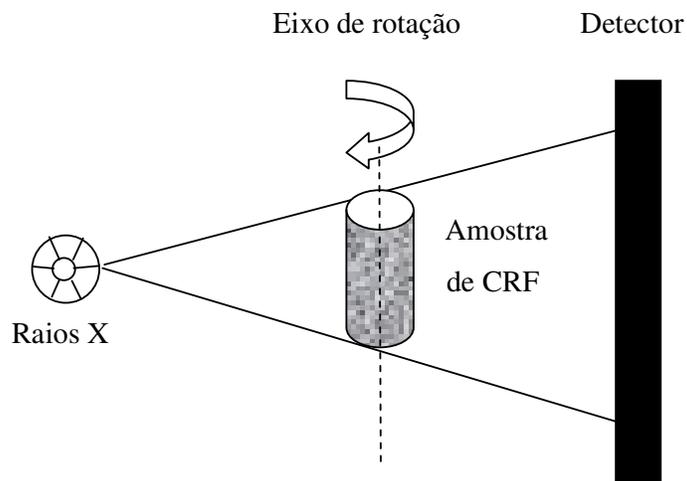


Figura 19 - Esquema do ensaio não destrutivo de microtomografia computadorizada.

São usados para medir a atenuação da radiação, feixes polienergéticos que são tubos de raios X que emitem um espectro contínuo. Então temos a seguinte equação: (MUDRY apud LIMA, 2006)

$$I = \int_0^{E_{MAX}} I_0 e^{\left[-\int_L \mu(x,y,E) dl \right]} dE \quad (1)$$

Neste caso, apresentará um efeito de endurecimento de feixe, que é a ocorrência de um deslocamento espectral devido à absorção preferencial dos fótons de baixa energia que penetram na amostra. Para minimizar estes efeitos colocam-se filtros de radiação de metal na janela de saída dos raios X, com o objetivo de reduzir a quantidade de raios X de baixa energia e aumentar a quantidade de energia mais alta (BRAY apud LIMA, 2006).

Quando a amostra apresenta grandes diferenças de espessura é necessário fundamentalmente o uso de filtros. Os materiais típicos usados para filtros são o alumínio, cobre, latão e chumbo. (LIMA, 2006, p. 34).

Esses efeitos serão desprezados para a simplificação da teoria, mas em situações reais podemos reescrever a equação (1) abaixo da seguinte forma:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \ln\left[e^{\left[-\int_L \mu(x,y)dl\right]}\right] \Rightarrow \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \int_L \mu(x,y)dl = P(x,y) \quad (2)$$

O termo $\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$ é definido por raio-soma e, representa uma soma de coeficientes de atenuação ao longo do caminho do feixe. Se existir um conjunto de raios, em um dado ângulo, no plano paralelo ao feixe de radiação, tem-se o termo projeção. Cada projeção é adquirida com o objeto (ou o sistema fonte-detector) girado de certo ângulo em relação à posição original, de modo que se obtém uma projeção para cada ângulo. Uma vez obtido o conjunto das projeções do sistema microtomografia computadorizada, dá-se então a necessidade de sua reconstrução (LIMA, 2006, p. 34).

2.4.1 A reconstrução das projeções de imagem

A reconstrução das projeções de imagem constitui em um processo matemático que envolve a obtenção de $\mu(x, y)$ a partir das medidas dos raios-soma. Dessa forma, a tomografia fornece uma imagem de uma fatia do material inspecionado na forma dos seus coeficientes de atenuação. Devido à grande quantidade de dados medidos que são necessários para as diversas fatias de corte e, a complexidade dos algoritmos de reconstrução para a confecção das imagens, há a necessidade de computadores rápidos de alta capacidade de processamento.

Os métodos utilizados estão exemplificados abaixo, agrupados em duas classes, onde em cada uma delas existirá vários tipos de algoritmos: (LIMA, 2006, p.36).

i) Métodos Diretos ou Analíticos:

- Retro projeção Filtrada ou Convolução;
- Reconstrução Direta de Fourier;
- Imagem Direta de Fourier.

ii) Métodos Iterativos ou Algébricos:

- Reconstrução Algébrica;
- Reconstrução Simultânea;
- Reconstrução por Mínimos quadrados.

O processo de reconstrução utilizado é feito utilizando-se o algoritmo de Feldkamp modificado. O algoritmo de Feldkamp (FELDKAMP apud ARGENTA, 2010) baseia-se em dois conceitos básicos para a reconstrução das fatias da amostra em função das projeções de feixe cônico: a retroprojeção e a convolução (RUSS apud ARGENTA 2010). A retroprojeção identifica a posição de um objeto a partir da superposição de projeções em diferentes ângulos, (Fig 20). Aumentando-se o número de projeções consegue-se uma suavidade melhor na borda do objeto (ARGENTA, 2010, p. 4).

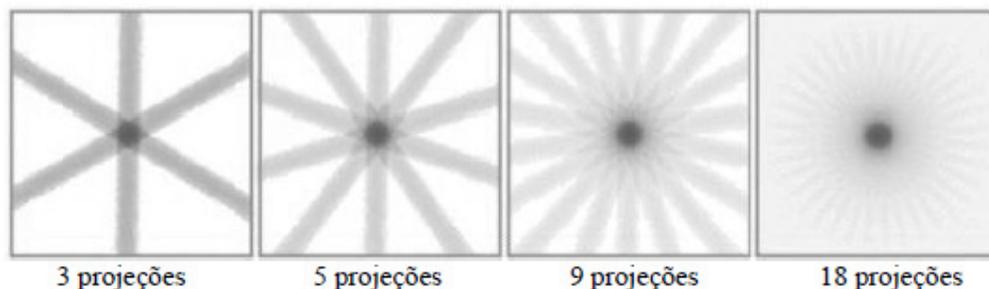


Figura 20 - Retroprojeção
Fonte: ARGENTA, 2010, p. 4.

No entanto, um anel borrado ainda aparece ao redor do objeto, não importando o número de projeções sobrepostas. A eliminação desse anel borrado é feita utilizando-se a convolução (Fig 21), um processo que subtrai o valor do brilho ao redor do objeto, fazendo o objeto aparecer mais nítido (ARGENTA, 2010, p. 4).

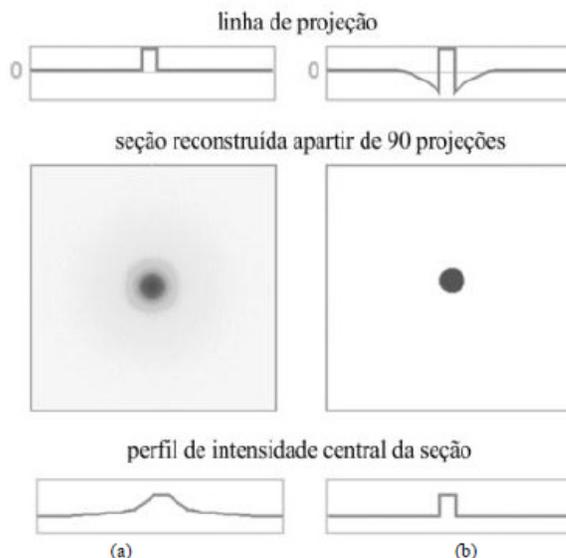


Figura 21 - Convolução, (a) somente retroprojeção, (b) retroprojeção e convolução
 Fonte: ARGENTA, 2010, p. 4.

2.4.2 A imagem de microtomografia

Uma vez reconstruída, a imagem é mostrada em forma de uma matriz digital $N \times M$ “pixels”, onde N representa o número de “pixels” existentes na vertical e M os da horizontal (Fig 22). Para cada valor do “pixel” designa-se um valor de cinza que é proporcional a $\mu(x,y)$, ponto a ponto. Assim, tem-se que a região mais densa aparece mais clara e conseqüentemente à região que é menos densa aparece menos clara, ou seja, quanto mais denso mais claro. Como a maioria dos monitores apresenta 256 níveis de cinza com um byte (1 byte= 8 bits e $2^8=256$ - o máximo para tais), a escala é realizada da seguinte forma: valor 0 para o preto, e 255 para o branco e, os valores que são intermediários a estes equivalem aos níveis de cinza propriamente dito (KUDO apud LIMA, 2006). Ao proceder a digitalização de uma imagem de níveis de cinza, cada um dos pontos da imagem-matriz tem que se colocar em dependência de um valor de níveis de cinza. O número de pontos da imagem por matriz é importante para a resolução local da imagem. São usados números duais (2^n) devido ao aproveitamento da memória, de forma que os tamanhos da matriz são utilizados em forma de (512 x 512 ou 1024 x 1024 pontos da imagem, etc.) (LIMA, 2006, p.38).

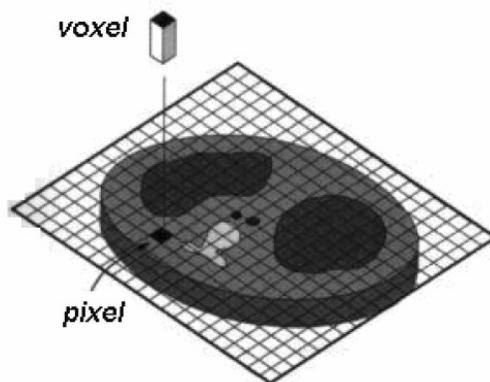


Figura 22 - Representação de ‘pixel’ e ‘voxel’. É a representação básica de um elemento bidimensional de uma imagem digital. voxel é a representação 3D, com a terceira dimensão representa a espessura do “slice”

Fonte: LIMA, 2006, p.38.

Em princípio há uma diferença entre a microtomografia bidimensional e a tridimensional, mostrada nas figuras a seguir. Na microtomografia bidimensional (Fig 23), é medido o nível de corte transversal, ou seja, o resultado da medição é uma imagem do corte transversal, na qual cada ponto da imagem representa um elemento de volume do objeto. Já na microtomografia tridimensional (Fig 24), são ao mesmo tempo registradas várias camadas de corte aproveitando-se o cone completo de radiação (KAPLAN apud LIMA, 2006).

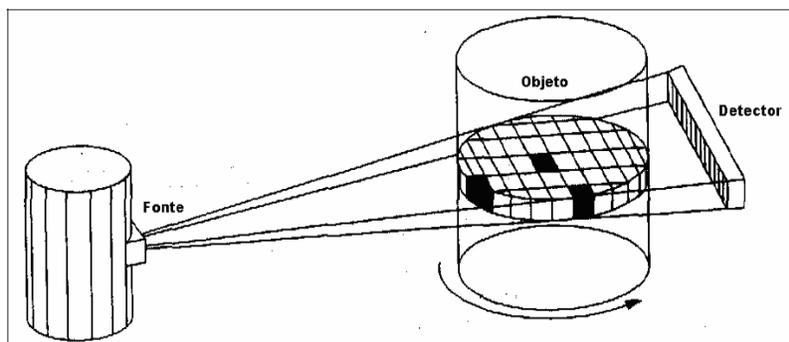


Figura 23 - Tomografia 2D

Fonte: LIMA, 2006, p. 40.

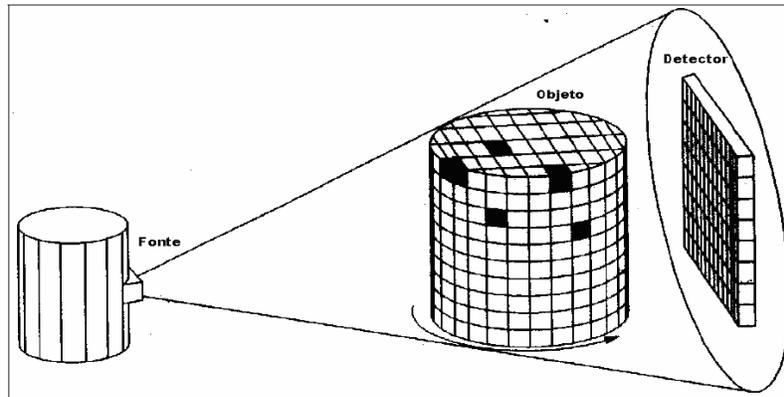


Figura 24 - Tomografia 3D
Fonte: LIMA, 2006, p.40.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Preparação dos corpos de prova de concreto reforçado com fibras

As fibras mais usadas como reforço em concreto são as fibras de polipropileno e de aço. Nesta dissertação de mestrado será iniciado um estudo, que investigará a distribuição destas fibras na pasta cimentícia de concreto convencional. As fibras em estudo serão fibras industriais de polipropileno e grampos de aço usados em escritório (Fig 25).



Figura 25 - Fibras usadas no experimento.

A escolha dos grampos de aço de escritório foi devido à falta de interesse, após contato de um dos maiores fabricantes mundiais de fibras, em contribuir com estas fibras para este estudo.

Foi feito uma análise de fluorescência de raios X no grampo de escritório que confirmou a presença majoritária de Ferro na composição química do aço empregado no grampo de escritório.

O comprimento da fibra de aço é de 13 mm de comprimento, e uma seção retangular de aproximadamente 0,5 mm de espessura, as fibras de polipropileno tem um comprimento de 20 mm.

O traço aplicado para o preparo do concreto com uma resistência final de 30 MPa aos 28 dias de cura, com o uso do cimento CP II E – 40, seguindo a norma (ABNT NBR 11578, 1991) e agregados seguindo a norma (ABNT NBR 7211, 1983) é o seguinte:

Traço pra 1 m³ de concreto

- **437 kg de cimento**
- **812,82 kg de areia**
- **148,58 kg de brita 0**
- **795,34 kg de brita 1**
- **223 litros de água**

No caso da aplicação das fibras de polipropileno foi seguida a dosagem indicada pelo fabricante e quanto à dosagem das fibras de aço foi dosada experimentalmente, baseado nos principais fabricantes de fibras de aço disponíveis no mercado.

- **0,57684 kg/m³ de fibras de polipropileno**
- **11 kg/m³ de fibras de aço**

O volume total aplicado em 6 corpos de prova foi de aproximadamente 0,01413m³ de concreto e as dosagens para esses 6 corpos de prova são:

- **6,18 kg de cimento**
- **11,49 kg de areia**
- **2,1 kg de brita 0**
- **11,24 kg de brita 1**
- **3,15 litros de água**
- **0,00815 kg de fibras de polipropileno (8,15 gramas)**
- **0,155 kg de fibras de aço (155 gramas)**

Primeiramente foram preparado 6 corpos de prova sem fibras de reforço seguidos de 6 corpos de prova reforçados com fibras de polipropileno e mais 4 corpos de prova reforçados com grampos de aço; totalizando um total de 16 corpos de prova. Em seguida é apresentado o preparo (Figs 26 e 27) e moldagem destes corpos de prova.



Figura 26 - Agregados devidamente pesados.



Figura 27 - Lubrificação dos moldes com óleo mineral.

Segundo Neville (1997), quando se usam agregados leves, como os usados neste experimento, o tempo de mistura do concreto na betoneira não deve ser menor que 5 minutos e às vezes subdivididos em 2 minutos para mistura do agregado com a água, seguidos de 3 minutos depois da adição do cimento.

Os agregados foram inseridos na betoneira na seguinte ordem: Brita, 1/2 água, cimento, areia, 1/2 água por um tempo de 5 minutos (Fig 28).

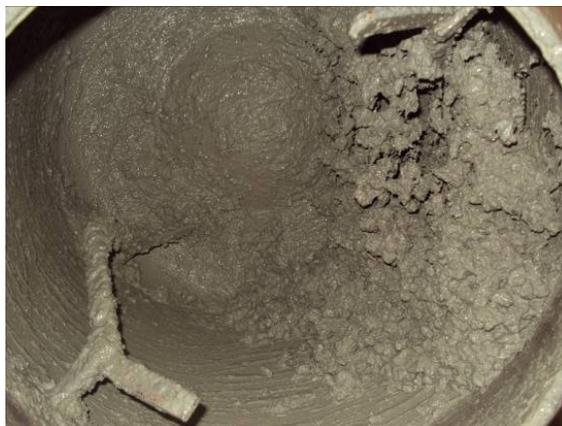


Figura 28 - Preparo do concreto na betoneira durante 5 minutos.

Neste ensaio foram postas três camadas de concreto e em cada camada foi aplicado 25 golpes com a haste de socamento e posteriormente o arremate do topo do cone com a colher de pedreiro e finalizando com a retirada do cone cuidadosamente conforme a norma (ABNT NBR 7223, 1992), (Fig 29).



Figura 29 - Ensaio de abatimento do tronco de cone.

Foi determinado pelo abatimento do tronco de cone um valor de 180 mm para a os corpos de prova com fibras de aço e de 80 mm para fibra de polipropileno demonstrando que a trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço com uma dosagem de 11 kg/m³

não foi alterado em comparação ao concreto sem fibras que permaneceu com 180 mm de abatimento do tronco de cone conforme a norma (ABNT NBR 7223, 1992), (Fig 30).



Figura 30 - Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone.

Foi observada uma redução da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de polipropileno, com 80 mm de abatimento do tronco de cone, como previsto, pois, devido ao aumento da área específica das fibras de PP, essas fibras precisam de mais água de molhagem e conseqüentemente ocorre uma redução da mobilidade das fibras dentro do concreto, influenciando na trabalhabilidade.

O preparo e a moldagem dos corpos de prova de concreto seguiram a norma (ABNT NBR 5738, 1994), para um molde de diâmetro de 10 cm, foi aplicado 2 camadas de concreto e 15 golpes por camada (Figs 31 e 32).



Figura 31 - Moldagem dos corpos de prova de concreto.



Figura 32 - Golpeamento por camadas nos corpos de prova de concreto.

Após o adensamento do concreto a superfície dos corpos de prova foi arrematada com uma colher de pedreiro (Fig 33).



Figura 33 - Corpos de prova de concreto.

Após 24 horas foi feita a desforma dos corpos de prova de concreto seguindo a norma (ABNT NBR 5738, 1994), (Fig 34 e 35).



Figura 34 - Desforma dos corpos de prova de concreto.



Figura 35 - Corpos de prova de concreto desformados.



Figura 36 - Tanque de cura dos corpos de prova de concreto

O processo de cura os corpos de prova de concreto seguiu a norma (ABNT NBR 9479, 1994), (Fig 36); Após este processo, 1 corpo de prova de concreto reforçado com fibras de aço foi destinado ao ensaio de imagens microtomográficas com 1 de reserva e os outros 12 corpos de prova destinados ao ensaio de compressão, 4 são com fibras de aço ,4 com fibras de polipropileno e 4 sem fibras, totalizando 14 corpos de prova.

3.2 Preparação das amostras de CRF para o ensaio de μ CT

Primeiramente os corpos de prova de concreto reforçado com fibras foram cortados com uma serra mármore industrial devido a seu grande diâmetro, em 9 fatias de 2 cm de altura (Figs 37 e 38).



Figura 37 - Marcação dos corpos de prova de concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno.



Figura 38 - Corte dos corpos de prova de concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno com serra mármore industrial e manual.

Cada uma das 9 fatias de cada fibra foram mapeadas, numeradas e cortadas com uma serra mármore manual, totalizando 52 amostras para uma única fatia e 936 amostras para todas as 9 fatias de concreto (Fig 39).

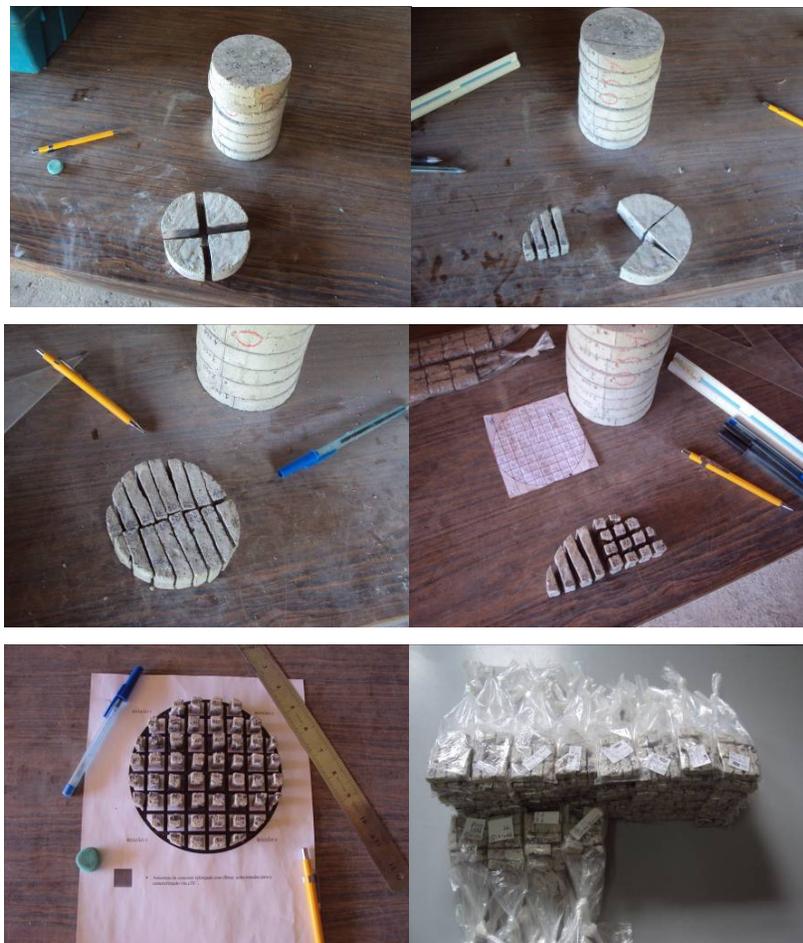


Figura 39 - Etapas do corte dos corpos de prova de CRF.

3.3 Metodologia para o processo de aquisição das imagens de microtomografia

A região de interesse indica a posição desejada no estudo de μ CT em CRF, onde é esperado uma maior concentração das fibras de aço na parte central de corpo de prova “fenômeno ouriçamento” e investigar a concentração nas bordas do corpo de prova.

Devido ao grande número de amostras (20 no total na região de interesse), mostrada na (Fig 40), e um tempo de aquisição das imagens de microtomografia de 30 minutos para cada amostra; a região de interesse foi reduzida pela metade em 10 amostras por fatia (Fig 41), e 180 amostras para todo o corpo de prova de CRF.



Figura 40 - Região de interesse para o estudo das imagens de microtomografia.

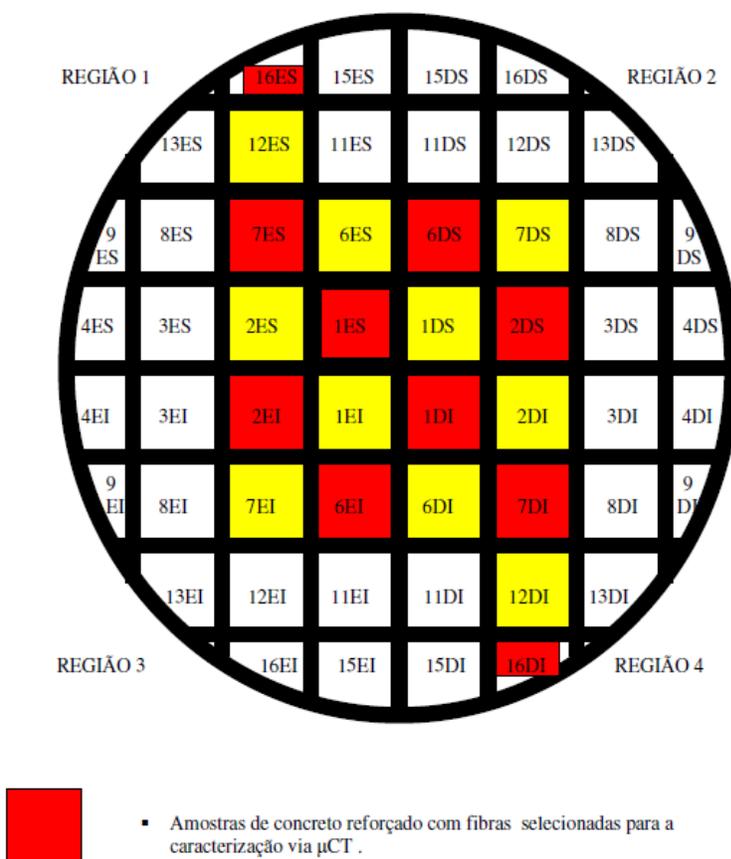


Figura 41 - Redução da região de interesse para o estudo das imagens de microtomografia.

O sistema de microtomografia de raios X usado nesta dissertação foi o da empresa belga Skyscan®, modelo 1174 (Fig 42), que é composto por um tubo de raios X de microfoco com fonte de alta tensão (50 kV e 0.800 mA), um porta amostra com manipulador de precisão e um detector baseado em uma câmara CCD de 1.3 Mp (1200 x 1024 pixel) conectados a um computador de aquisição de dados.

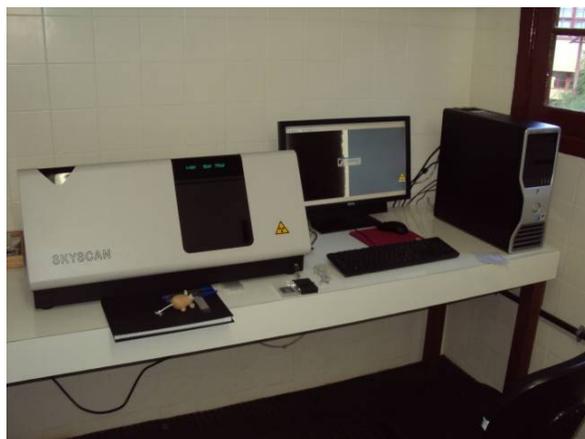


Figura 42 - Microtomógrafo Skyscan® 1174 com o computador de aquisição de dados.

As amostras de concreto reforçado com fibras foram cortadas com 1 cm² de base e 2 cm de altura devido a limitação dimensional do microtomógrafo de raios X (Figs 43 e 44).

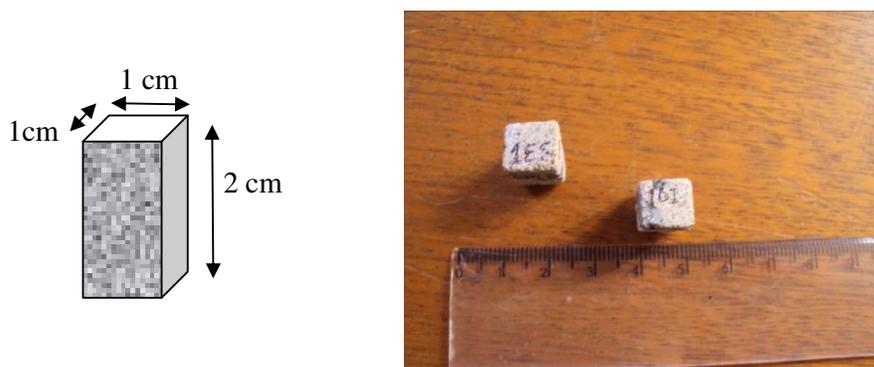


Figura 43 - Dimensões da amostra de concreto reforçado com fibras.



Figura 44 - Posicionamento da amostra no microtomografo de raios X.

A medida do feixe de radiação de raios X atravessando o corpo de prova de CRF foi executado em um ângulo de 1° (Fig 45), completando uma rotação de 360° ao redor da amostra gerando 360 projeções de imagens no formato TIFF de 16 bits.



Figura 45 - Projeção de imagem no formato TIFF de 16 bits.

Com as aquisições das projeções de imagens microtomografadas, reconstruímos essas imagens com o software NRecons®. As reconstruções de imagens totalizaram em torno de 1000 imagens. Um exemplo de uma imagem reconstruída é mostrado na (Fig 46).

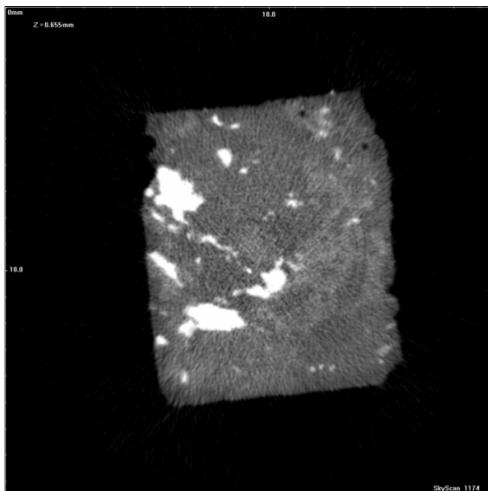


Figura 46 - Exemplo de uma imagem reconstruída.

Com essas reconstruções foi possível a visualização das fibras de aço e de ruídos na matriz do concreto em 3D pelo programa CTan® (Fig 47).



Figura 47 - Imagem em 3D das fibras no interior da amostra de concreto reforçado com fibras de aço.

Para adquirir melhores resultados foi usado a máxima capacidade do equipamento (50 kV) com um filtro de alumínio de 0.25 mm de espessura. O papel do filtro é de diminuir o endurecimento do feixe de raios X.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Ensaio uniaxial de compressão em corpos de prova de CRF de aço e em corpos de prova de CRF de polipropileno

O ensaio mecânico de compressão uniaxial foi realizado no LTHC do IPRJ-UERJ, com a utilização uma prensa hidráulica com capacidade de carga de 150 toneladas com um sistema de aquisição de dados digitais (Fig 48).



Figura 48 - Ensaio de compressão uniaxial em CRF de aço e PP.

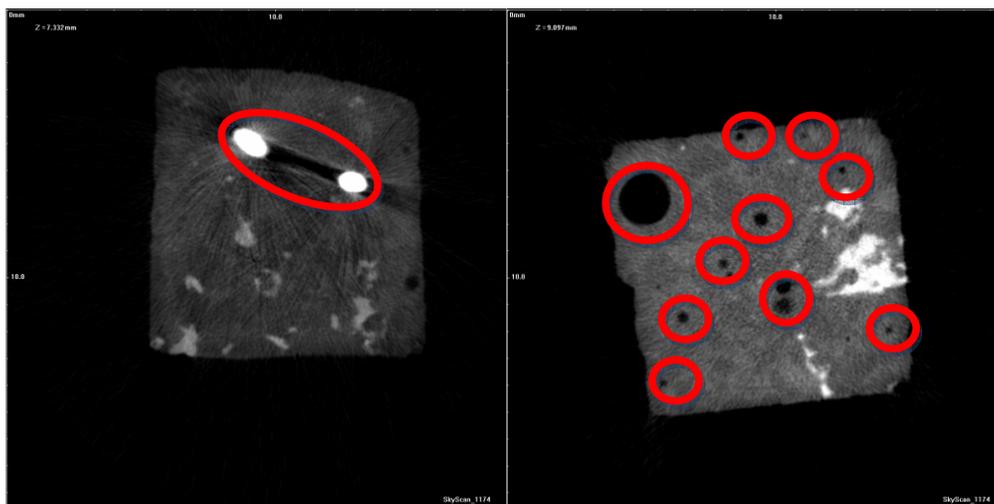
A velocidade de carregamento foi de 0,6 MPa/seg dentro dos limites da norma (NBR 5739,1994, p3), que estabelece uma faixa de velocidades de carregamento de (0,3 - 0,8) MPa/seg.

Tabela 7 - Resistência à compressão uniaxial

Corpos de prova	Tensão máxima concreto comum (MPa)	Tensão máxima CRF (aço) (MPa)	Tensão máxima CRF (PP) (MPa)
CP 1	26,84	27,50	24,83
CP 2	26,48	28,24	25,5
CP 3	26,41	27,02	25,66
CP 4	26,12	26,95	25,43
Média	26,46	27,43	25,36

O ensaio à compressão uniaxial apresentou resultados esperados para o CRF, com um pequeno aumento da resistência para o CRF de aço, apesar da pequena dosagem de 11 kg/m³ bem abaixo das dosagens comerciais que são acima de 20 kg/m³ (Tab 7).

Foi possível visualizar as fibras de aço e vazios originados pelas fibras de PP, pois nestas seções microtomografadas são detectadas diferentes fases de atenuação que dependem da densidade e número atômico do material investigado, o aço por ser um material metálico que tem uma densidade muito superior a do Polipropileno, apresenta tons de cinza mais claro na escala de cinza da imagem, no caso do PP que tem um coeficiente de atenuação muito baixo não se detecta a presença dessas fibras na matriz, mas a aglomeração dessas fibras que aparecem como vazios (Fig 49).



CRF de aço

CRF de Polipropileno

Figura 49 - Detecção das fibras de aço e de vazios no tom de cinza da imagem.

As imagens reconstruídas foram retiradas da seção no meio da amostra com fibras de PP e sem fibras nas mesmas posições (amostra 1DI). Na fatia superior do corpo de prova de CRF, nota-se o aumento da porosidade no CRF de PP em comparação ao concreto sem fibras, apresentando uma pequena queda na resistência mecânica à compressão, como mostra as (Figs 50 e 51).

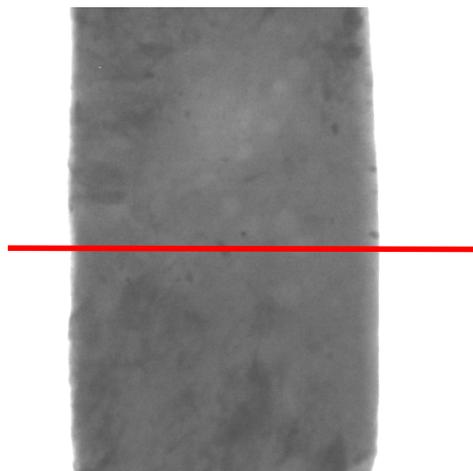


Figura 50 - Posição da reconstrução da imagem analisada na projeção da imagem.

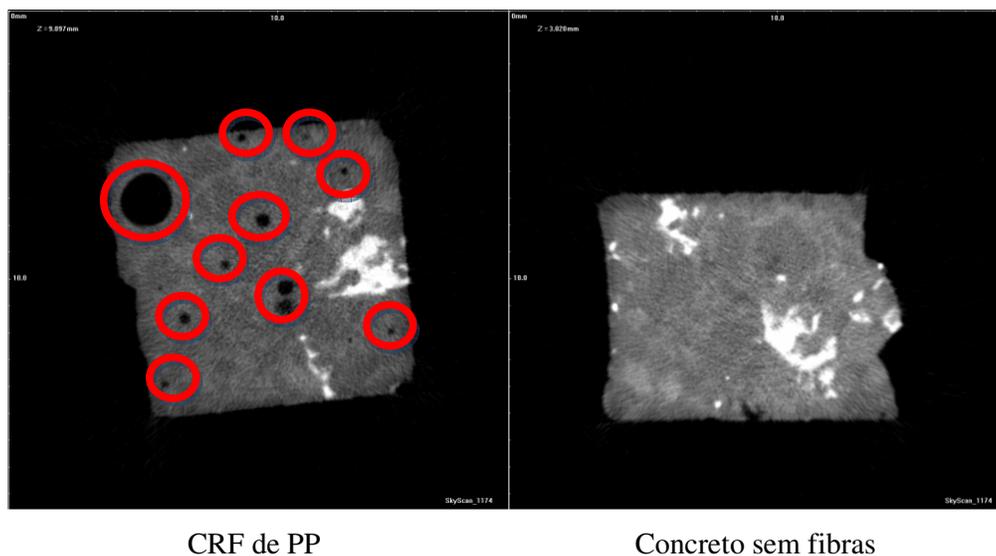


Figura 51 - Reconstrução das imagens de μ CT de CRF de PP e concreto sem fibras indicando o alto índice de vazios do CRF de PP.

4.2 Análise das imagens de μ CT no concreto reforçado com fibras de aço

A reconstrução das imagens das seções transversais da amostra de CRF, foram feitas por meio do algoritmo de reconstrução de feixe cônico de Feldkamp modificado, que é a base do programa NRecons® usado nesta dissertação.

Com a aquisição das imagens reconstruídas podemos representar em 3D a microestrutura interna da amostra de CRF, visualizando totalmente a estrutura da fibra de aço na matriz de concreto.

Para o processo de reconstrução das imagens de microtomografia foi utilizado o software de análise de imagens da Skyscan® denominado CTan®, as imagens foram binarizadas nos limites que possibilitaram a análise dos fragmentos das fibras de aço no interior da matriz do concreto.

Foram analisadas em torno de 1000 imagens de cada amostra, gerando um relatório final com diversos dados para a análise deste material.

Um dos dados fornecido por este relatório com o tamanho do pixel igual a $18,2 \times 10^{-6}$ m é o resultado do volume dos fragmentos das fibras de aço.

O pixel cúbico pode ser considerado por um cubo com a aresta do tamanho de um pixel, transformando os resultados temos:

$$18,2 \mu\text{m} \\ (18,2 \times 10^{-6} \text{ m})^3 = 6,02 \times 10^{-15} \text{ m}^3 = \mathbf{6,02 \times 10^{-6} \text{ mm}^3}$$

Os resultados do volume dos fragmentos das fibras de aço em mm^3 e $(\text{pixel})^3$ são apresentados na (Tab 8):

Tabela 8 - Resultado do volume calculado e medido dos fragmentos das fibras de aço na matriz do concreto

<i>Fatía 1</i>		<i>Volume da Fibra de Aço</i>		<i>Fatía 2</i>		<i>Volume da Fibra de Aço</i>		<i>Fatía 3</i>		<i>Volume da Fibra de Aço</i>	
<i>Posição</i>	<i>(pixel³)</i>	<i>(mm³)</i>	<i>Posição</i>	<i>(pixel³)</i>	<i>(mm³)</i>	<i>Posição</i>	<i>(pixel³)</i>	<i>(mm³)</i>			
1DI	18331	0,11	1DI	12295	0,07	1DI	934614	5,63			
1ES	21935	0,13	1ES	3231	0,02	1ES	12026	0,07			
2DS	21656	0,13	2DS	5429	0,03	2DS	28407	0,17			
2EI	1688792	10,17	2EI	43331	0,26	2EI	959910	5,78			
6DS	910863	5,48	6DS	883555	5,32	6DS	26827	0,16			
6EI	246739	1,49	6EI	435133	2,62	6EI	740994	4,46			
7DI	1444522	8,70	7DI	1124666	6,77	7DI	25519	0,15			
7ES	436046	2,63	7ES	22154	0,13	7ES	7900	0,05			
16DI	54664	0,33	16DI	26572	0,16	16DI	483984	2,92			
16ES	12528	0,08	16ES	10802	0,07	16ES	22167	0,13			
<i>Fatía 4</i>			<i>Fatía 5</i>			<i>Fatía 6</i>					
1DI	34356	0,21	1DI	6653	0,04	1DI	21522	0,13			
1ES	25754	0,16	1ES	14424	0,09	1ES	800109	4,82			
2DS	651804	3,93	2DS	433251	2,61	2DS *	79788	0,48			
2EI	29248	0,18	2EI	915369	5,51	2EI	22621	0,14			
6DS	1074831	6,47	6DS	11864	0,07	6DS	2765102	16,66			
6EI	5645	0,03	6EI	63778	0,38	6EI	7757	0,05			
7DI	13633	0,08	7DI	14673	0,09	7DI	12732	0,08			
7ES	580455	3,5	7ES	8240	0,05	7ES	625878	3,77			
16DI	439156	2,65	16DI	6994	0,04	16DI	6541	0,04			
16ES	481568	2,90	16ES	125108	0,75	16ES	872293	5,25			
<i>Fatía 7</i>			<i>Fatía 8</i>			<i>Fatía 9</i>					
1DI	12398	0,08	1DI	412361	2,48	1DI	9108	0,05			
1ES	311542	1,88	1ES	1664	0,01	1ES	7106	0,043			
2DS	4100	0,02	2DS	1049240	6,32	2DS	789069	4,75			
2EI	540050	3,25	2EI	927	0,01	2EI	410932	2,48			
6DS *	41285	0,25	6DS	184558	1,11	6DS	311626	1,88			
6EI	982471	5,92	6EI	470608	2,83	6EI	7932	0,045			
7DI	3472	0,02	7DI	710187	4,28	7DI	12012	0,07			
7ES	3171	0,02	7ES	2684	0,02	7ES	1636797	9,86			
16DI	283182	1,71	16DI	976	0,01	16DI	6780	0,04			
16ES	1491	0,01	16ES	0	0	16ES	5206	0,03			

***Apesar do pequeno volume, pela radiografia é possível visualizar o fragmento da fibra de aço.**

Cálculo da massa de fibra de aço adicionada à matriz de concreto.

Massa Total (Mt) = $\sum_{i=1}^n M_i$, somatório dos valores da massa de todos os componentes usados

no traço do concreto estão na página 52, considerando 1 litro de água = 1kg; $\sum_{i=1}^n M_i = 34315$.

gramas.

Volume das fibras de aço Vf = $\sum_{i=1}^n Vf_i$, somatório dos valores de volume de fragmentos de

fibras de aço especificados na (Tab 8) : $\sum_{i=1}^n Vf_i = 170 \text{ mm}^3 = 0,17 \text{ cm}^3$.

Volume Total da amostra de concreto Vtotal = Para cada amostra estudada tem-se volume de 2 cm³. A região de interesse é composta por 8 amostras centrais e ½ amostra para as extremidades em um total de 9 amostras, cada corpo de prova é composto por 9 fatias tem-se 81 amostras x 2 cm³ de volume de cada amostra = **162 cm³** de volume total das amostra de concreto.

(CALLISTER, 2008, p 639 e 641) informa valores de Massa Específica para o concreto e para o aço carbono e aço de baixa liga que tem a mesma massa específica.

$$\rho_{\text{concreto}} = 2,4 \text{ gramas/cm}^3 \text{ e } \rho_{\text{aço}} = 7,85 \text{ gramas/cm}^3$$

Massa específica (ρ) = massa/volume.

Temos aproximadamente:

$$\frac{\rho_{\text{concreto}} \times V_{\text{total}}}{\rho_{\text{fibra}} \times V_{\text{fibra}}} = \frac{M_{\text{total}}}{M_{\text{fibra}}} \quad M_{\text{fibra}} = \frac{\rho_{\text{fibra}} \times V_{\text{fibra}} \times M_{\text{total}}}{\rho_{\text{concreto}} \times V_{\text{total}}}$$

$$M_{\text{fibra}} = \frac{(7,85 \text{ gr/cm}^3) \times (0,17 \text{ cm}^3) \times (34315 \text{ gr})}{(2,4 \text{ gr/cm}^3) \times (162 \text{ cm}^3)} = 118 \text{ gramas}$$

Foi adicionado ao traço **155 gramas de fibras de aço**. 155 - 118 = **37 gramas**, que corresponde a uma diferença de **24%**. Essa diferença pode ser devida às fibras perdidas durante o corte dos corpos de prova e do ruído gerado durante a aquisição das imagens de

microtomografia que influenciam no volume; que mostra a importância do uso da técnica de processamento de imagens para a redução de ruídos.

Na (Fig 52) podem ser visualizadas as posições das amostras em azul onde foram encontradas fibras de aço no interior da matriz do concreto, analisando as posições das amostras, mesmo com poucas amostras microtomografadas, pode se notar a presença das fibras de aço na parte central do corpo de prova.

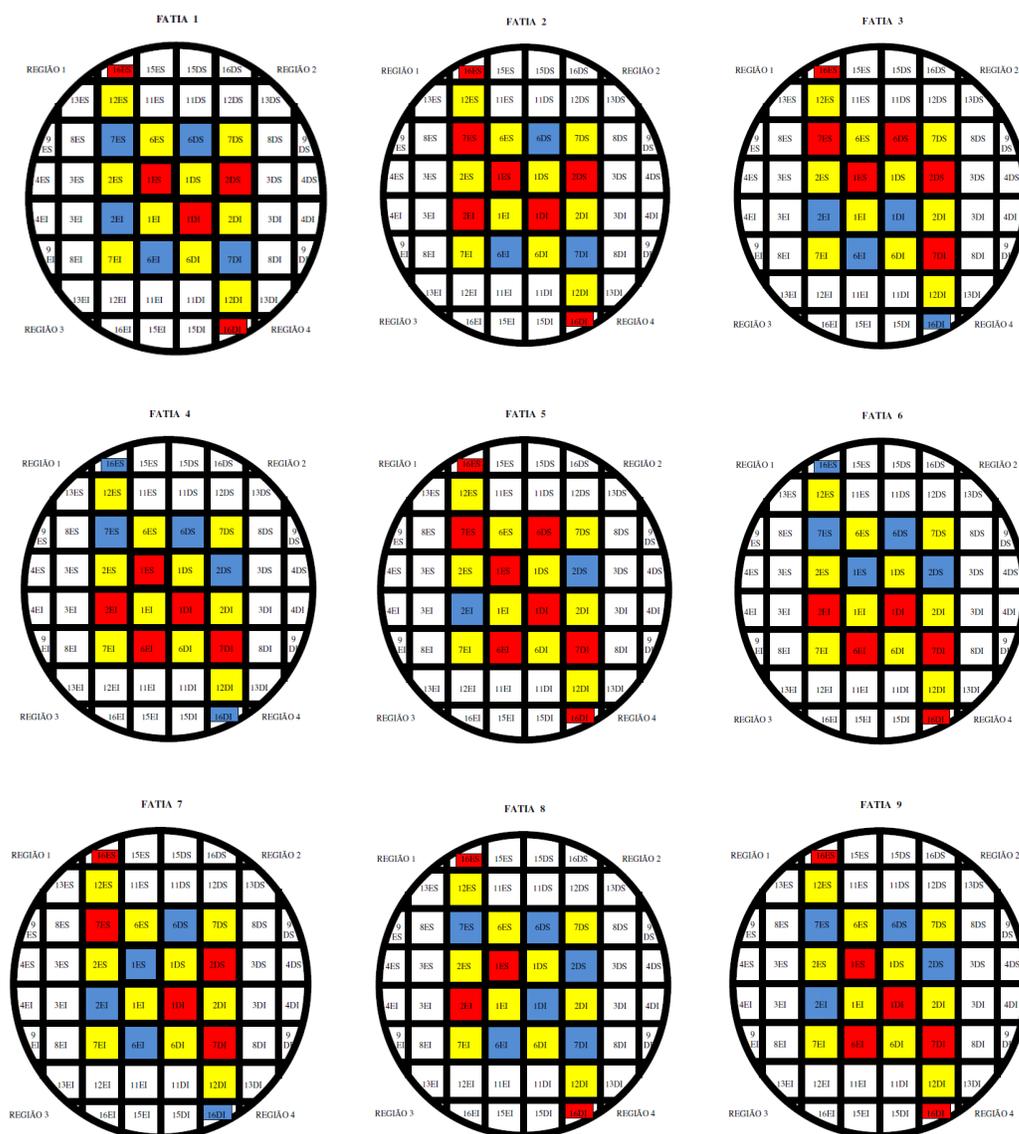


Figura 52 - Posição das amostras em azul que foram encontradas fibras de aço na matriz do CRF.

5 CONCLUSÕES

A técnica de caracterização de imagens de microtomografia em concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno mostrou-se de grande eficiência na análise de parâmetros dificilmente obtidos por outras técnicas de caracterização de materiais.

Nos ensaios de resistência à compressão, percebe-se uma pequena queda na resistência para o concreto reforçado com fibras de PP pelo aumento da porosidade na parte superior do corpo de prova que afetou a sua resistência final em comparação ao concreto sem fibras. Nos corpos de prova de concreto reforçados com fibras de aço, apesar da dosagem de 11 kg/m³ ser abaixo da especificadas por diversos fabricantes de fibras, observa-se um pequeno aumento na resistência do concreto em comparação ao concreto sem fibras.

As fibras de aço que foram usadas como reforço na matriz do concreto foram facilmente quantificadas e identificadas no interior da amostra, mostrando a viabilidade do uso desta técnica para a caracterização de concreto reforçado com fibras metálicas.

Embora a identificação das fibras de polipropileno no interior da amostra não ser possível, notou-se a grande quantidade de vazios na amostra estudada em comparação a uma amostra sem fibras, sem garantias que esses vazios são poros ou fibras de PP que se formaram em um formato de esférico.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros pode-se usar a técnica demonstrada por Carvalho (2010) para identificar e quantificar com mais precisão as fibras de polipropileno dispersas na matriz do concreto reforçado com fibras.

Estudar a forma desses vazios dispersos na matriz, para tentar identificar as fibras pela forma do poro ou então calcular a porosidade do concreto sem fibras e comparar com a porosidade obtida do concreto reforçado com fibras de PP, no intuito de quantificar e identificar essas fibras dispersas na matriz do concreto.

A aplicabilidade desta técnica de caracterização deve ser ampliada para outros tipos de fibras, como as fibras vegetais de sisal com objetivo de estudar a forma que essas fibras se distribuem na matriz do concreto.

Usar o ensaio de microtomografia computadorizada no concreto com sílica ativa para esclarecer o que diz a literatura que a sílica ativa preenche os vazios existentes na matriz, esses vazios estão presentes na interface (agregado x pasta), por este ensaio pode esclarecer se ocorre de fato ou é um mito.

REFERÊNCIAS

APPOLONI et al., Determinação de Parâmetros Microestruturais e Reconstrução de Imagens 3-D de Rochas Reservatório por Microtomografia de Raios- X. Revista Ciências Exatas e Naturais, v.11, n. 1, p. 35-47, jan./jun. 2009.

ARGENTA et al. Metodologia para a obtenção de parâmetros físicos e geométricos do osso trabecular função de imagens de microtomografia. In: CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA (CILANCE), 2010.

ASKELAND, D.R.; PHULÉ, P.P. Ciência e Tecnologia dos Materiais. São Paulo : Cengage Learning, 2008.

ASSIS, J.T. et al. Caracterização da porosidade em Concreto de Alto Desempenho Utilizando Técnicas de Processamento de Imagens. In: X ENCONTRO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL, 2007, Nova Friburgo. [Anais] do X Encontro de Modelagem Computacional. UERJ, IPRJ, Nova Friburgo, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 1994.

_____. NBR 5739: concreto: ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 1994.

_____. NBR 7211: agregados para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

_____. NBR 7223: concreto: determinação de consistência pelo abatimento do tronco de cone - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

_____. NBR 9479: câmaras úmidas e tanques para cura de corpos - de - prova de argamassa e concreto. Rio de Janeiro, 1994.

_____. NBR 11578: cimento portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR 12655: concreto: preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996.

BARDAUIL, Márcia Regina Ramalho da Silva. Análise ex vivo de cortes apicais de dentes humanos em 3D empregando microtomografia computadorizada. 2010. 81 p. Tese de D.Sc. - Faculdade de Odontologia da USP , São Paulo, 2010.

BAUER, L.A. Falcão(coord.). Materiais de Construção. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. United Kingdom: Barking, Elsevier, 1990 apud FIGUEIREDO, A.D. Concreto com Fibras de Aço. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 69 p. São Paulo, 2000.

BERNARDES, Haroldo de Mayo et al. Observação da reação álcali-agregado auxiliada pelo processamento de imagens de tomografia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – IBRACON, Curitiba, 2009. [Anais]. CD-ROM.

BRAY,D.E. Nondestructive Evaluation. CRC Press Publisher, USA, 1996 apud LIMA, Inayá Corrêa Barbosa. Caracterização de estruturas internas ósseas através das técnicas de microtomografia computadorizada tridimensional e fluorescência de raios X. 2006. 152 p. Tese de D.Sc – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

CALLISTER, Jr.William D. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CECCATO, M.R. Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço. 1998, 98 p. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

FELDKAMP, L. A.; DAVIS, L. C.; KRESS, J. W. Practical Cone-Beam Algorithm. Journal of the Optical Society of America A: Image Science, and Vision, 1984: 612-619 apud ARGENTA et al., Metodologia para a obtenção de parâmetros físicos e geométricos do osso trabecular função de imagens de microtomografia. In: CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA (CILANCE), 2010.

FIGUEIREDO, A.D. Concreto com Fibras de Aço. 69 p. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

HOLCIN BRASIL. Disponível em: <<http://www.holcim.com.br/pt/produtos-e-servicos/cimento/tipos-de-cimento.html>>. Acesso em: 20 jul. 2011.

KAPLAN, I. et al. Física Nuclear. Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1962 apud LIMA, Inayá Corrêa Barbosa. Caracterização de estruturas internas ósseas através das técnicas de microtomografia computadorizada tridimensional e fluorescência de raios X. 2006. 152 p. Tese de D.Sc – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

KUDO, H. et al. Cone-beam filtered-backprojection algorithm for truncated helical data. Physics in medicine and Biology.43,2885-2909,1998 apud LIMA, Inayá Corrêa Barbosa. Caracterização de estruturas internas ósseas através das técnicas de microtomografia computadorizada tridimensional e fluorescência de raios X. 2006. 152 p. Tese de D.Sc – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

LIMA, Inayá Corrêa Barbosa. Caracterização de estruturas internas ósseas através das técnicas de microtomografia computadorizada tridimensional e fluorescência de raios X. 2006. 152 p. Tese de D.Sc – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

_____; et.al. Caracterização de materiais cerâmicos através da microtomografia computadorizada. Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação, v.1 ,n. 2 , p. 022-027, 2007.

MACEDO, A. et al., Avaliação da macroporosidade e da densidade de partículas do solo através da microtomografia de raios-X. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 23, p. 763-771, 1999.

MACCAFERRI: Manual Técnico, Fibras como Elemento Estrutural para Reforço de Concreto. Maccaferri do Brasil, 2008.

MINDESS, S. Fibre Reinforced Concrete – Myth and Reality Advances in cement and Concrete. ASME, American Society of Engineers, 1994. e _____. Concrete, cap. 22, Fiber reinforced concrete, Prentice Hall, 2002 apud THOMAS E.C.S; Concreto Reforçado com Fibras - Mito e Realidade. Rio de Janeiro: IME, 2002. 13 p. Notas de aula.

MUDRY, K.M. et al. Biomedical Imaging. CRC Press Publisher, USA, 2003 apud LIMA, Inayá Corrêa Barbosa. Caracterização de estruturas internas ósseas através das técnicas de microtomografia computadorizada tridimensional e fluorescência de raios X. 2006. 152 p. Tese de D.Sc – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

NÁPOLES NETO, A.D. Manual do engenheiro Globo, v. 4, Tomo1: mecânica dos solos – fundações - materiais de construção - perspectiva e sombra-hidráulica 3.ed. Porto Alegre: Globo, 1968.

NEVILLE, A.M.; Propriedades do Concreto. 2.ed. São Paulo: Editora Pini, 1997.

PEREIRA, Gabriela Ribeiro. Imagens de Distribuição Elementar por Microtomografia por Fluorescência de Raios-X utilizando Radiação Síncroton. 2006. 90p. Dissertação de M.Sc – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

PEREIRA-OLIVEIRA, Sibeles. Avaliação de cáries proximais por meio da microtomografia, tomografia Cone Beam e radiografias digitais. 2009. 103p. Tese de D.Sc. - Faculdade de Odontologia da USP, São Paulo, 2009.

PESSÔA, José Renato de Castro. Microtomografia com Raio X e Processamento de Imagem na Obtenção da Porosidade do Concreto. 2011. 142 p. Tese de D.Sc. - IPRJ/UERJ , Rio de Janeiro, 2011.

_____; et al. Medida da Porosidade em Concreto pela Técnica de Processamento de Imagem. In: XI ENCONTRO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL. [Anais] do X Encontro de Modelagem Computacional. Nova Friburgo: UERJ. IPRJ, 2008.

_____; BREDER, R.L.B. Concrete Porosity Measured by Image Processing Techniques. In: TWELFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIVIL, STRUCTURAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING COMPUTING,. [Anais] do Congresso. Funchal - Ilha da Madeira, Portugal, 2009.

_____; LIMA, I. Utilização da Microtomografia por Raios X e Escâner Comercial para Obtenção da Porosidade do Concreto. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS. [Anais] do III Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro. 2010.

PETRUCCI, Eládio G. R. Concreto de cimento Portland. 7.ed. Porto Alegre: Globo, 1980.

RLE- Rail Link Engineering. Fire performance of concrete for tunnel linings. Channel tunnel rail link, technical report n° 000-RUG-RLEEX-00005-AB.

ROCHA, Wilson Roberto Dejato da. Determinação de parâmetros geométricos estruturais de espumas cerâmicas industriais por transmissão de raios gama e microtomografia de raios -X. 2005. 99 p. Dissertação de M.Sc. - Universidade Estadual de Londrina , Londrina, 2005.

RUSS, John C. Image Processing Handbook. v. 5. Taylor & Francis Group, 2006 apud ARGENTA et al., Metodologia para a obtenção de parâmetros físicos e geométricos do osso trabecular função de imagens de microtomografia. In: CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA (CILANCE), 2010.

SILVA, Alessandro Márcio Hakme da. Análise Morfométrica 2D e 3D de Amostras de Osso Trabecular Utilizando Microtomografia Tridimensional por Raios-X. 2009. 73 p. Dissertação de M.Sc. - Escola de Engenharia de São Carlos/Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto e Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

APÊNDICE - artigos científicos sobre concreto desenvolvidos durante a pesquisa e apresentados em congressos nacionais e internacionais

CARACTERIZAÇÃO DA POROSIDADE EM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO UTILIZANDO TÉCNICAS DE PROCESAMENTO DE IMAGENS

Joaquim T. de Assis – joaquim@iprj.uerj.br

Ricardo A. Einsfeld – einsfeld@iprj.uerj.br

Marcus P. Pacheco – pacheco@iprj.uerj.br

Gil de Carvalho– gilde@iprj.uerj.br

José Renato C. Pessoa – jpessoa@iprj.uerj.br

Giberto D. Ottoni – gilberto.ottoni@gmail.com

Átila S. Bourguignon – atilateco@yahoo.com.br

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico

CP 972825 – 28630-050 – Nova Friburgo, RJ, Brasil

Resumo. Neste trabalho utiliza-se uma técnica de processamento de imagens para determinação da porosidade em concretos de alto desempenho, onde a aplicação de aditivos visando à redução do índice de vazios do material desempenha papel importante na diminuição da permeabilidade e aumento da resistência mecânica do material. Após a aquisição das imagens da superfície das amostras de concreto através de um scanner, estas foram separadas em suas componentes HSV através de um programa em MATLAB®. A componente V foi ajustada em contraste e binarizada e filtrada utilizando a operação de erosão com elemento estruturante circular para a remoção de pontos isolados, interpretados como ruído. Nessa imagem-resultado são contados os vazios obtidos para determinação da porosidade. Uma representação dessa operação é descrita no trabalho e comparações são feitas com relação à resolução empregada na aquisição das imagens das amostras de concreto.

Palavras chave: Porosidade, Concreto de alto desempenho, Processamento de imagens

Artigo Apresentado no X Encontro de Modelagem Computacional.
IPRJ – UERJ -RJ – 2007.

MEDIDA DE POROSIDADE EM CONCRETO PELA TÉCNICA DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS

José Renato C. Pessôa, M.Sc.- jpessoa@iprj.uerj.br

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Instituto Politécnico
Nova Friburgo, RJ, Brasil

Joaquim Teixeira de Assis, D.Sc.- joaquim@iprj.uerj.br

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Instituto Politécnico
Nova Friburgo, RJ, Brasil

Ricardo A. Einsfeld, D.Sc.- einsfeld@iprj.uerj.br

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Instituto Politécnico
Nova Friburgo, RJ, Brasil

Gil de Carvalho, D.Sc. – gilde@iprj.uerj.br

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Instituto Politécnico
Nova Friburgo, RJ, Brasil

Átila S. Bourguignon – atilateco@yahoo.com.br

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Instituto Politécnico
Nova Friburgo, RJ, Brasil

Resumo. *Neste trabalho utiliza-se uma técnica de processamento de imagens para determinação da porosidade em corpos-de-prova de concreto simples. Neste material a resistência é considerada como uma das propriedades mais importantes, nos fornecendo uma idéia geral da qualidade do concreto, estando ela diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento hidratada. A automação de métodos que determinem a porosidade dos concretos é objetivo de trabalhos que vêm sendo produzidos recentemente. A maioria desses métodos trabalha com imagens de alta qualidade (microscopia e escâner de alta resolução) e com o uso de programas de processamento de imagens. O objetivo do presente trabalho é calcular o valor da porosidade em concreto a partir de imagens obtidas em escâner comercial, utilizando técnicas de processamento de pixel e morfologia matemática. Para tal as imagens da superfície das amostras de concreto obtidas foram separadas em suas componentes HSV através de um programa em MATLAB®. A componente V foi ajustada em contraste e binarizada e filtrada utilizando a operação de erosão com elemento estruturante circular para a remoção de pontos isolados, interpretados como ruído. Nessa imagem-resultado são contados os vazios obtidos para determinação da porosidade. A representação dessas operações é descrita no trabalho e resultados são apresentados com objetivo de serem comparados com resultados obtidos experimentalmente.*

Palavras-chave: Porosidade, Concreto, Processamento de Imagens

**Artigo Apresentado no XI Encontro de Modelagem Computacional.
Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda UFF – RJ – 2008.**

CONCRETE POROSITY MEASURED BY IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

José Renato C. Pessoa, M.Sc.- jpessoa@iprj.uerj.br
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Instituto Politécnico
Nova Friburgo, RJ, Brasil

Joaquim Teixeira de Assis, D.Sc.- joaquim@iprj.uerj.br
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Instituto Politécnico
Nova Friburgo, RJ, Brasil

Ricardo A. Einsfeld, D.Sc.- einsfeld@iprj.uerj.br
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Instituto Politécnico
Nova Friburgo, RJ, Brasil

Gil de Carvalho, D.Sc. – gilde@iprj.uerj.br
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Instituto Politécnico
Nova Friburgo, RJ, Brasil

Átila S. Bourguignon – atilateco@yahoo.com.br
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Instituto Politécnico
Nova Friburgo, RJ, Brasil

Ricardo Lucas B. Breder – rlbbreder@gmail.com
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Instituto Politécnico
Nova Friburgo, RJ, Brasil

Abstract. *In this work an image processing technique is use to determine the porosity of simple concrete specimen. In this material the resistance is considered the most important property, showing an idea of the concrete quality, being directly connected to the structure of the hydrated cement paste. The automatization of the methods that determine the concrete porosity is the goal of a variety of recently developed works. The majority of this methods works with high quality images (microscopy and high resolution escâner) and uses image processing programs. The present work goal is calculate concrete porosity value from images obtained from commercial escâners, using pixel and morphology mathematic processing techniques. Therefore, the surface images of the concrete specimen obtained were separated into two HSV layers using a MATLAB® program. The V layer was adjusted in contrast, binarized and filtered using the erosion operation with circular structuring element to remove isolated points, interpreted as noise. In this result image the empty spaces are counted to determine the porosity. The representation of these operations is described in this work and the results are shown with the objective of being compared with results obtained experimentally.*

Keywords: Porosity, Concrete, Image Processing

Artigo Apresentado na Conferência Internacional de Eng. Civil e Eng. da Computação.

Ilha da Madeira – Portugal – 2009.