

## 3D investigation of steel fiber distribution in reinforced concrete by X-ray microtomography

### *Investigação 3D da distribuição de fibras de aço em concreto reforçado por microtomografia de raios X*

A. C. MACHADO <sup>a</sup>  
alecastro@lin.ufrj.br

M. A. SILVA <sup>a</sup>  
marcofcr@gmail.com

R. D. T. FILHO <sup>a</sup>  
toledo@coc.ufrj.br

M. S. PFEIL <sup>a</sup>  
mpfeil@coc.ufrj.br

I. LIMA <sup>a</sup>  
inayacorrea@gmail.com

R. T. LOPES <sup>a</sup>  
ricardo@lin.ufrj.br

#### Abstract

The effects of the inclusion of steel fibers in concrete have been widely studied in order to investigate possible changes in mechanical properties, such as the increase in tensile strength, ductility, stiffness, toughness (energy absorption capacity), and durability. An immediate consequence of this addition is the mitigation of concrete's brittle behavior, so that the material meets new quality requirements. In this context, it is important to study the spatial distribution of the entire internal structure of these materials. Three-dimensional computed microtomography is a non-destructive inspection technique used to characterize the internal structures of various materials based on X-ray interaction with the inspected object. Topological and morphological properties can be obtained directly in three dimensions by means of mathematical reconstruction of the radiographs, which allows analyzing, for example, porosity and distribution of objects. In this context, the aim of this study is to investigate the spatial distribution of steel fibers, as well as of porosity in reinforced concrete samples. To this end, we used a microtomography system calibrated to operate at a voltage of 80 kV, electric current of 100  $\mu$ A and a pixel size equal to 24  $\mu$ m. The results showed low porosity and that the steel fibers were not uniformly distributed throughout the sample.

**Keywords:** X-ray, steel fibers, microtomography, porosity, concrete.

#### Resumo

Os efeitos da inserção de fibras de aço em concretos têm sido amplamente estudados com o objetivo de investigar possíveis modificações nas propriedades mecânicas, tais como, o aumento da resistência à tração, ductilidade, rigidez, tenacidade (capacidade de absorção de energia), e durabilidade. Uma das consequências imediatas dessa adição é a mitigação do comportamento frágil do concreto, de forma que o material passe a ter novas exigências de qualidade. Nesse contexto, é de grande importância o conhecimento espacial da distribuição de toda estrutura interna desses materiais. A microtomografia computadorizada tridimensional é uma técnica utilizada na caracterização de estruturas internas de diversos materiais, baseada na interação dos raios X com o objeto inspecionado, sendo considerado um ensaio não destrutivo. Propriedades morfológicas e topológicas podem ser obtidas diretamente em três dimensões através da reconstrução matemática das radiografias, o que possibilita analisar, por exemplo, a porosidade e a distribuição de diversos objetos. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é a investigação da distribuição espacial das fibras de aço, assim como da porosidade em amostras de concreto. Para tal, foi utilizado um sistema de microtomografia calibrado para operar com uma tensão de 80 KV, corrente elétrica de 100  $\mu$ A e um tamanho de pixel igual a 24  $\mu$ m. Os resultados mostraram uma porosidade baixa e que as fibras de aço não estão distribuídas uniformemente ao longo da amostra.

**Palavras-chave:** raios X, fibras de aço, microtomografia, porosidade, concreto.

<sup>a</sup> Programa de Engenharia Nuclear, Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

<sup>b</sup> Programa de Engenharia Civil, Laboratório de Estruturas e Materiais (LabEST), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## 1. Introdução

O concreto simples, não armado, é um material frágil, quebradiço, com baixa resistência e capacidade de alongamento à tração e por isso, a inserção de fibras de aço em sua composição tem sido amplamente empregada na indústria da construção civil. Este fato pode ser largamente visualizado em diversas aplicações, tais como em revestimentos de túneis, em pisos de fábricas e em tubos de concreto, visto que a resistência à tração, a ductilidade, a tenacidade e a durabilidade do concreto são sensivelmente aprimoradas com a adição de fibras [1].

A função de fibras de aço descontínuas, distribuídas aleatoriamente no concreto, é atravessar as fissuras que se formam no concreto seja sob a ação de cargas externas ou quando mudanças na temperatura ou na umidade do ambiente ocorrem [2; 3]. Dessa forma, essas fibras de aço, quando adicionadas ao concreto, dificultam a propagação de fissuras devido ao seu elevado módulo de elasticidade. Pela capacidade portante pós-fissuração que o compósito apresenta, as fibras permitem uma redistribuição de esforços no material mesmo quando utilizadas em baixos teores [4], de forma a provocarem certa ductilidade após a fissuração. Sendo assim, se as fibras forem suficientemente resistentes, bem aderidas à matriz cimentícia e em quantidade adequada, elas ajudam a manter pequena a abertura das fissuras, permitindo ao concreto resistir a altas tensões de tração, com uma grande capacidade de deformação no estágio pós-fissuração [2; 3]. Deve-se ressaltar

que o nível de tensão que a fibra consegue transferir através das fissuras depende de vários aspectos, tais como seu comprimento, seu teor de fibras (volume) e a sua distribuição aleatória [4].

As questões que envolvem a durabilidade do concreto reforçado com fibras de aço são diversas e uma das mais frequentes é o fato dessas fibras não receberem tratamento especial para evitar a corrosão. Este fato faz com que a sua durabilidade esteja condicionada ao seu confinamento e, em decorrência da restrição à propagação das fissuras proporcionada pelas fibras, ocorre um aumento da resistência à entrada de agentes agressivos com consequente aumento da durabilidade da estrutura [4]. A durabilidade do concreto pode ser definida como sendo a capacidade que o concreto possui em resistir à ação do tempo, aos ataques químicos, à abrasão ou a qualquer outra intempérie que venha causar sua destruição [5]. Esta definição está diretamente relacionada com a permeabilidade do concreto, que por sua vez pode ser descrita como sendo a facilidade que um fluido possui sob um determinado gradiente de pressão, de se mover através de um material. Portanto, permeabilidade não é apenas uma característica do material, mas também se refere a uma força motriz que atua sobre o fluido [6]. Deste modo, pode ser dito que um concreto pouco permeável tende a impedir a entrada de agentes agressivos dentro da matriz [7]. Outro parâmetro importante para a avaliação da durabilidade do concreto é a porosidade que, além de ter grande influência sobre a resistência mecânica (quanto maior a porosidade, menor a resistência do concreto), interfere diretamente na durabilidade do mesmo. A porosidade total pode ser definida como sendo a proporção volumétrica dos espaços vazios existentes no concreto [8]. Em outras palavras, quanto maior a permeabilidade do concreto, maior será a conectividade existente entre os poros e assim, mais sujeito a ações externas o material estará o que reflete diretamente no aumento da velocidade de deterioração e, conseqüentemente, afeta a durabilidade do concreto. São considerados concretos de excelente qualidade àqueles que possuem porosidade em torno de 1% [9]. Além do volume, a forma e as dimensões dos poros também têm influência na resistência do concreto. Em geral, para um mesmo valor numérico de porosidade total, poros com menores dimensões resultam em uma maior resistência da pasta de cimento hidratado [10].

Embora as fibras de aço possam de fato produzir melhorias no comportamento do concreto, é preciso ser realista quanto ao que realmente se pode esperar de seu desempenho, principalmente se a quantidade de fibras for pequena, (menos de 1% em volume), como é o caso geral [2; 3].

Nesse contexto, quantificar o teor (volume) das fibras de aço inseridas no concreto e analisar sua distribuição espacial se torna uma ferramenta importante no âmbito do controle de qualidade deste material. Para tal, a investigação de sua microestrutura se faz necessário e várias técnicas inovadoras estão em desenvolvimento tais como, a análise de emissão acústica, a termografia infravermelha ou a microtomografia computadorizada 3D por raios X (microCT) [11].

A microCT de alta resolução é uma valiosa ferramenta que proporciona a análise morfológica e topológica de estruturas internas de diversos tipos de materiais e o concreto reforçado com fibras é um deles.

A microCT é considerada um ensaio não destrutivo tendo como base o princípio físico da atenuação exponencial dos raios X quando estes interagem com o objeto de estudo. Ela é capaz de

**Figura 1 – Fotografia da amostra de concreto analisada**



Tabela 1 – Caracterização do concreto e dos materiais utilizados

Composição do concreto		Caracterização do agregado graúdo	
Agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	546,28	Ensaio realizado	Seixo
Agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	1011,3	Dimensão máx. característica (mm)	13,2
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	330	Módulo de finura	5,61
Cinza volante (kg/m <sup>3</sup> )	154	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,62
Sílica ativa (kg/m <sup>3</sup> )	39,6	Absorção (%)	0,14
Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	40,5	Material pulverulento (%)	2
Modificador de viscosidade (kg/m <sup>3</sup> )	0,1	Índice de forma	1,7
Água (kg/m <sup>3</sup> )	145		
Fibra de aço (kg/m <sup>3</sup> )	78	Caracterização do agregado miúdo	
Teor de superplastificante (%)	3,8	Ensaio realizado	Resultados
		Dimensão máxima característica (mm)	2,36
		Módulo de finura	2,64
		Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,67
		Absorção (%)	0,99
		Material pulverulento (%)	0,5
		Torrões de argila (%)	-
Valor da massa específica do cimento, cinza e sílica			
Material	Massa específica		
Cimento (g/cm <sup>3</sup> )	3,11		
Cinza (g/cm <sup>3</sup> )	2,39		
Sílica (g/cm <sup>3</sup> )	2,29		
		Fibras de aço	
		Propriedades	
		Módulo de elasticidade (GPa)	200
		Resistência à tração (MPa)	1150

fornecer a distribuição das diferentes fases existentes no material de interesse [12]. A intensidade do feixe de raios X transmitido, colimado, que interage com o objeto, é registrada por uma matriz de detectores situada no lado oposto à fonte [13]. A grande vantagem dessa técnica é a obtenção de informações das estruturas internas do objeto sem a necessidade do mesmo ser submetido a métodos de preparação, tais como impregnação, o desbaste ou polimento, possibilitando a quantificação de parâmetros como volume, tamanho, forma, distribuição e conectividade [14].

O objetivo é caracterizar uma amostra de concreto reforçado com fibras de aço, quantificando sua porosidade total bem como o volume de fibras de aço de forma a avaliar a distribuição espacial da espessura, tanto dos poros quanto das fibras. Ao final, modelos tridimensionais do meio estudado serão apresentados.

## 2. Materiais e programa experimental

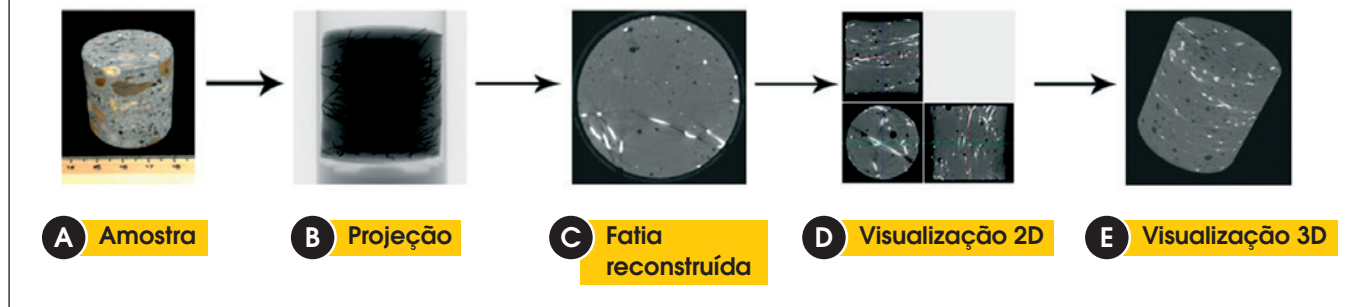
A amostra utilizada neste trabalho foi um plugue cilíndrico de concreto reforçado com fibras de aço, de dimensões iguais a (38,3 ± 0,25) mm de altura e (37,5 ± 0,25) mm de diâmetro, apresentada na figura [1]. Outras caracterizações do material de estudo, tais como o traço do concreto, podem ser visualizadas na tabela [1].

A produção do concreto estudado foi realizada em um misturador de eixo vertical planetário (CIBI), de forma que primeiramente foi realizado o umedecimento do misturador com água, retirando-se

o excesso com um pano. Posteriormente, foram lançados os agregados miúdos e graúdos secos que são misturados por 1 minuto para homogeneização, e então são adicionados os materiais cimentícios que são misturados por mais 1 minuto. Após esta etapa são adicionados 80% da água da mistura, o material superplastificante e depois o restante da água, e estes são misturados durante 8 minutos para que aconteça total ação do superplastificante. Por último ocorre a inserção das fibras que são misturadas por mais 4 minutos, totalizando um tempo de 14 minutos de mistura do material. Após as 48 horas, os corpos de prova são retirados das fôrmas e colocados em uma câmara úmida com umidade relativa superior a 95 % e temperatura de (22 ± 2) °C. Os agregados utilizados na produção da amostra de concreto são do tipo seixo rolado. Este tipo de agregado é oriundo dos leitos dos rios amazônicos.

O ensaio de microCT foi realizado em um sistema de alta energia (Skyscan/Bruker, modelo 1173). O sistema foi calibrado para operar com 80 kV de tensão e corrente de 100 µA. Os valores de corrente elétrica e tensão de aceleração utilizados no ensaio de microCT dependem da combinação entre o tipo de material que será estudado e do sistema experimental empregado. O valor da tensão deve ser tal para que os fótons tenham energia suficiente para atravessar a amostra e transmitir as informações necessárias à formação da imagem no receptor. Este parâmetro tem influência direta no contraste da imagem formada. Quanto maior o kV, maior a energia do feixe e a sua penetração no material, sendo menor

**Figura 2 – Exemplo das imagens obtidas em cada etapa do processo de microtomografia, (a) fotografia da amostra, (b) projeção obtida na etapa de aquisição, (c) fatia obtida na etapa de reconstrução (d) visualização 2D das seções coronal, transaxial e sagital e (e) visualização 3D**



a diferença entre a intensidade de fótons provenientes das várias densidades do material inspecionado (supondo que o material seja heterogêneo), produzindo uma menor variação na atenuação da radiação. O valor da corrente é atribuído à intensidade do feixe de raios X, não alterando o espectro em energia (a energia efetiva continua a mesma) e está relacionado com a estatística de contagem do feixe de elétrons na formação da imagem. Nesse contexto, a otimização da qualidade da imagem depende da relação escolhida entre a tensão de aceleração e a corrente eletrônica do tubo de raios X, além, é claro, de outros fatores tal como o tempo de exposição, que são mencionados no decorrer do texto.

O sistema de microCT utilizado possui um filtro de alumínio interno com  $1,0 \pm 0,05\text{mm}$  de espessura na saída do tubo de raios X. A razão desse filtro é diminuir a contribuição dos fótons de baixa energia minimizando o efeito de endurecimento de feixe, que é um artefato de degradação na imagem final produzida no ensaio de microCT. Este tipo de artefato faz com que a borda de um objeto seja evidenciada de forma mais brilhante do que seu centro, mesmo que o material seja homogêneo.

O tamanho de pixel utilizado foi de  $24 \mu\text{m}$ , o que equivale a uma resolução espacial igual a  $50 \mu\text{m}$ . Essa diferença entre o valor da resolução espacial e o tamanho de pixel ocorre porque a resolução espacial também depende de outros fatores, como por exemplo, a geometria do feixe e a penumbra (*unsharpness*) formada por ele. Com essa configuração, as distâncias fonte-amostra e amostra-detector foram de  $177,4 \text{ mm}$  e  $186,6 \text{ mm}$ , respectivamente. O tamanho do pixel está relacionado com o tamanho da amostra e o tamanho do sistema de microCT, de forma que seja possível obter fatores de magnificações diferentes para diferentes valores de combinações de distâncias [15].

Um detector do tipo plano, também conhecido como detector *flat panel*, que é um detector digital de geometria plana com tamanho de pixel isotrópico de  $50 \mu\text{m}$ , ou seja,  $50 \times 50 \mu\text{m}$ , operando com uma máxima matriz de pixels de  $2240 \times 2240$ , foi utilizado para registrar a transmissão do feixe cônico de raios X. Esse detector possui a vantagem de produzir imagens livres de distorções.

A aquisição foi realizada a partir de uma amostra cilíndrica de concreto posicionada na mesa manipuladora do sistema de forma que seu eixo principal z ficasse perpendicular ao feixe de

radiação. Sendo assim, a amostra foi rotacionada por  $360^\circ$  ao longo do seu eixo z, a cada passo de  $0,30^\circ$ . É importante salientar que outros parâmetros de aquisição de imagem podem ser ajustados, de forma que para cada radiografia foi realizada uma média de 05 quadros em um tempo de exposição igual a 800ms.

Após o processo de aquisição, as projeções foram reconstruídas utilizando o programa Nrecon®SkyScan - versão 1.6.4.1 [16] e InstaRecon - versão 1.3.5.0 [17] cujo algoritmo é baseado nos trabalhos de Feldkamp [18]. O programa de reconstrução permite a escolha de vários parâmetros de modo a criar uma imagem de qualidade mais apurada. Os parâmetros podem ser ajustados manualmente durante a reconstrução usando a função de visualização (*previews*). A função *fine tuning* do NRecon é projetada para fazer os ajustes necessários de acordo com o lançamento de uma série de *previews*. É possível ajustar um parâmetro de cada vez, mantendo todos os outros parâmetros fixos, de forma a ser possível escolher, um a um, a combinação desejada para uma melhor qualidade de imagem. Dentre as opções oferecidas, podem ser feitas as seguintes correções:

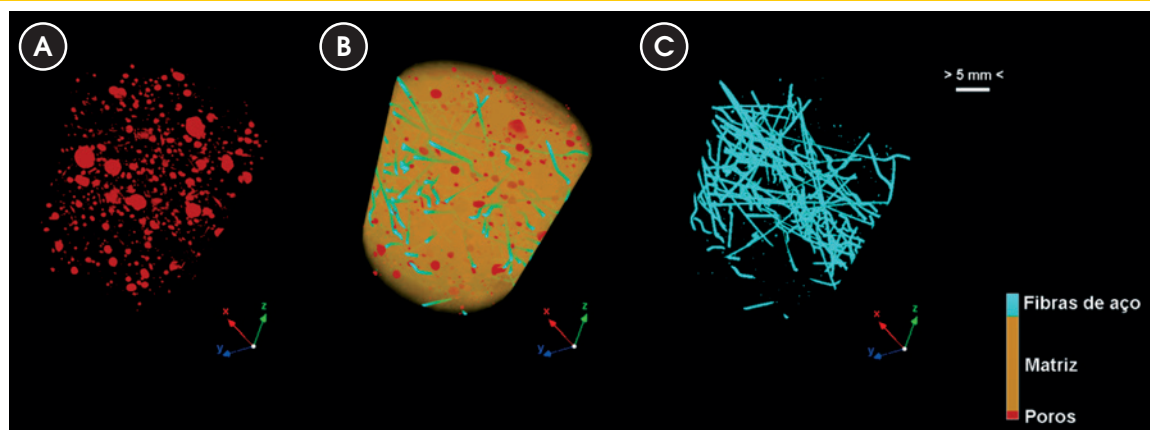
- i) Artefatos em Anel: os artefatos em anel que aparecem como círculos totais ou parciais centrados no eixo de rotação, sendo causados por mudanças na saída de detectores individuais ou conjuntos de detectores. Essa redução é aplicada às projeções antes do pré-processamento das imagens, de forma que a projeção média é usada para esse propósito. Pode-se selecionar a profundidade desta correção em um intervalo de 1 a 20 pixels.

**Tabela 2 – Resultados da  $\mu\text{CT}$ -3D**

Fase	Volume ( $\text{mm}^3$ )	Percentual (%)	$\rho$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	$\Delta\rho$ (mm)
Poros	604,69	1,58	-	-
Matriz	37028,19	97,09	-	-
Fibras de aço	504,55	1,32	0,024	15,16
Total	38137,43	-	-	-



Figura 3 – Modelos 3D das diferentes fases do concreto reforçado:  
(a) poros, (b) matriz + poros + fibras de aço e (c) fibras de aço



Nesse estudo foi utilizada uma redução de artefato em anel com grau 9.

- ii) Endurecimento de Feixe: além das correções que podem ser feitas na parte da aquisição do ensaio, um grau de correção via processamento matemático também é possível. Essa correção é feita por meio de uma transformação linear e a sua profundidade pode ser escolhida de acordo com a densidade do material. Nesse caso é utilizado um polinômio e uma alta ordem na função polinomial também pode ser usada para esse propósito. A correção do endurecimento de feixe pode ser feita em diferentes graus (1% a 100%). Uma correção do artefato de endurecimento de feixe com grau 9% foi aplicada neste estudo.
- iii) Atenuação de Ruído: o filtro de suavização tipo Gaussiano kernel é caracterizado como um *smoothing* aplicado às projeções. Ele suaviza cada pixel com uma vizinhança  $M \times N$ , onde  $M$  é a dimensão horizontal e  $N$  é a dimensão vertical. Ele reduz o ruído e procura um nível adequado de suavização com a utilização de filtros em diferentes graus (1 a 10). Nesse trabalho, foi utilizado um filtro de suavização do tipo Gaussiano com grau 8.

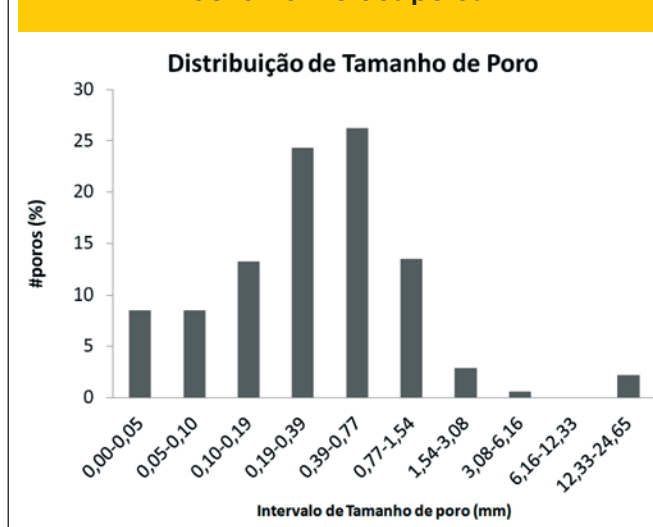
Nesta etapa, os resultados obtidos são fatias reconstruídas. Essas fatias fornecem a visualização da amostra tanto em 2D quanto em 3D e podem ser processados digitalmente, ou seja, informações qualitativas e quantitativas podem ser obtidas a partir dessas imagens após elas serem submetidas a uma série de operações matemáticas, como por exemplo, binarização, remoção de ruídos, melhora do contraste da imagem, etc. A figura [2] ilustra um exemplo das imagens obtidas em cada etapa do processo de microCT. Concluídas as etapas de aquisição e reconstrução, faz-se necessário analisar as imagens obtidas. Para o processamento e análise de imagem, o programa da SkyScan, CTAN® (v1.11.8.0) [19], foi utilizado. Nesta etapa, o objetivo foi quantificar parâmetros geométricos relacionados à porosidade do concreto e às fibras de aço. Essa quantificação é realizada somente após o processo de segmentação das imagens. A segmentação envolve a seleção de um valor limiar para fazer a separação entre o espaço poroso e as fases restantes do material. Neste trabalho, um método de limiarização global simples foi aplicado, com um valor limiar único selecionado para separar os poros de toda a matriz. Em

um segundo momento, foi escolhido um outro valor de limiar para separar as fibras dos demais materiais [20]. Desta forma foi contabilizada a quantidade de pixels/voxels brancos e pretos pertencentes ao volume de interesse (VOI) delimitado e, por conseguinte a porosidade total da amostra de concreto a densidade linear das fibras de aço ( $\rho$ ,  $\text{mm}^{-1}$ ), a separação das fibras ( $\Delta$ , mm), ou seja, o espaçamento existente entre elas e a distribuição de espessura tanto dos poros quanto das fibras de aço. Em todas as avaliações, os volumes dos poros, das fibras e da matriz foram essenciais.

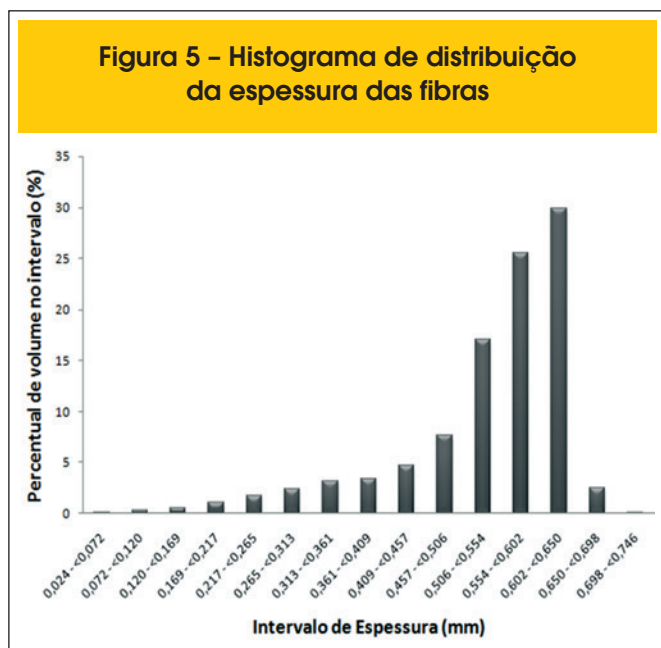
### 3., Resultados e discussões

Os resultados de microCT encontrados estão apresentados na tabela [2]. Os resultados evidenciam que a amostra de concreto reforçado com fibras de aço estudada pode ser considerada de

Figura 4 – Histograma de distribuição de tamanho dos poros



**Figura 5 – Histograma de distribuição da espessura das fibras**



alta qualidade, pois, de acordo com [2;3], possui um percentual de fibras de aço acima do recomendado para concretos de alta resistência (1,32%), garantindo um aumento de desempenho de suas propriedades mecânicas. Além disso, outro parâmetro que indica a qualidade dessa amostra é a porosidade total, que no caso deste estudo foi igual a 1,5%. Esse valor pode ser considerado baixo e influencia diretamente no aumento da durabilidade do concreto, pois de acordo com [9] são considerados concretos de excelente qualidade àqueles que possuem porosidade em torno de 1%.

A figura [3] ilustra a distribuição 3D das fibras de aço dentro do volume de interesse estudado, a partir da visualização dos modelos tridimensionais das fases da amostra. Na figura é possível verificar a não uniformidade desta distribuição, pois ela apresenta um comportamento aleatório, o que pode resultar em uma diminuição da eficiência das fibras no que diz respeito à contenção do avanço de fissuras no concreto de alta resistência. Esse comportamento de distribuição não uniforme pode sugerir um problema na aderência da fibra-matriz através do efeito de ancoragem. Entretanto, não apenas o conhecimento da porosidade total é importante para a caracterização do espaço poroso. A distribuição de tamanho dos poros também é um fator preponderante no entendimento do comportamento da durabilidade do concreto. A figura [4] ilustra esse resultado obtido através da microCT, tendo sido avaliado *slice por slice* (fatia por fatia). São evidenciados dez intervalos de tamanho de poros (0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,19; 0,19-0,39; 0,39-0,77; 0,77-1,54; 1,54-3,08; 3,08-6,16; 6,16-12,33; 12,33-24,65) mm e nota-se que a maioria dos poros não está nos maiores e também não está nos menores intervalos, está concentrada nos intervalos de (0,19-0,39) e (0,39-0,77). Esta distribuição mostra que mais de 77% dos poros encontra-se nos intervalos entre 0,10 e 1,54 mm. O maior intervalo de tamanho de poro encontrado (12,33 a 24,65 mm) representa apenas 2,2% do total de poros, e o menor intervalo (entre 0,00 e 0,05 mm) apenas 8,53%.

Outros parâmetros que a microCT possibilita investigar é a densidade linear das fibras ( $\rho$ ) e a separação entre elas ( $\Delta\rho$ ). A densidade  $\rho$  é o inverso da distância entre o eixo médio das fibras, isso implica no número de percursos através de uma estrutura sólida feita por unidade de comprimento. Para a amostra estudada neste trabalho o resultado encontrado para  $\rho$  foi  $0,024 \text{ mm}^{-1}$ , este valor foi calculado diretamente em 3D. A separação  $\Delta\rho$  é, essencialmente, a espessura dos espaços definidos pelos objetos binarizados dentro do VOI, ou seja, a distância média entre as fibras. O valor para  $\Delta\rho$  encontrado foi 15,16 mm, este valor foi calculado em 2D (fatia por fatia). De acordo com [21], valores baixos de densidade das fibras e valores cada vez mais altos de separação entre as fibras estão associados a uma baixa resistência mecânica da amostra analisada.

O maior benefício obtido em reforçar uma matriz frágil com fibras é o de alterar o seu comportamento após a fissuração. O compósito, ao invés de romper-se após o início da fissura da matriz, pode apresentar uma deformação plástica considerável, tornando-o, assim, um material adequado para a construção. Para que isso aconteça, as fibras devem ser adicionadas em volume, comprimento e formatos adequados [5]. Dessa forma a caracterização morfológica das fibras é essencial para a avaliação da qualidade do concreto reforçado. A distribuição de espessura das fibras, figura [5], foi analisada diretamente em 3D. O método inicia-se com uma esqueletização, identificando os eixos mediais de todas as estruturas. Dessa forma uma esfera adaptativa auxiliará o cálculo local da espessura para todos os voxels que estarão ao longo desses eixos mediais identificados. Essa esfera adaptativa é uma esfera inscrita no sólido binarizado de forma a maximizar o tangenciamento de suas superfícies [22; 23]. O resultado indica uma uniformidade de espessura nas fibras de aço, ou seja, a maioria das fibras (mais de 70% do volume de fibras) que foram inseridas nesta amostra está no intervalo entre 0,50 e 0,65 mm de espessura.

## 4. Conclusões

A microtomografia computadorizada 3D de alta resolução mostrou-se uma técnica adequada para a caracterização de amostras de concreto reforçado com fibras de aço. Sem necessidade de qualquer processo de preparação da amostra, foi possível avaliar quantitativamente e qualitativamente o volume e distribuição de espessura de poros e fibras de aço, além da distribuição espacial dessas fibras ao longo da amostra.

Cada etapa do processo microtomográfico (aquisição, reconstrução e análise) foi avaliada cuidadosamente para que uma melhor qualidade fosse obtida garantindo assim resultados confiáveis. Os parâmetros utilizados em cada uma das etapas, como por exemplo, tensão, corrente, filtros físicos e matemáticos e limiares de segmentação, foram testados até que um valor final ótimo fosse encontrado.

A oportunidade de avaliar a distribuição das fibras de aço e a porosidade formada no concreto possibilita analisar não somente o resultado final da amostra, mas também todo o processo de produção da peça.

## 5. Agradecimentos

Ao CNPq, CAPES e FAPERJ, pelo apoio financeiro e bolsas concedidas para a realização deste trabalho.

## 6. Referências bibliográficas

- [1] HAKTANIR, T., et al. Effects of steel fibers and mineral filler on the water-tightness of concrete pipes. *Cement & Concrete Composites*, vol. 28, 2006; p. 811-816.
- [2] MINDESS, S. Fibre Reinforced Concrete - Myth and Reality. *Advances in Cement and Concrete*, Book Conference Proceedings, Durham, New Hampshire, 1994, p. 217-222.
- [3] MINDESS, S., YONG J. F., DARWIN, D. *Concrete*. New Jersey: Prentice Hall, 2 ed., 2002, cap 22.
- [4] FIGUEIREDO, A. D.. *Concreto com fibras de aço*, São Paulo, 2000, Boletim Técnico - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [5] MIGLIORINI, A.V., GUIMARÃES, A.T.C., OZÓRIO, B.P.M., Fibras de aço em blocos de concreto: estudo para utilização em ambiente marítimo, *Revista Matéria*, v. 17, 2012, p. 997-1008.
- [6] REINHARDT, H.W., *Penetration and Permeability of Concrete: Barriers to organic and contaminating liquids.*, Rilem Report 16, E & FN Spon, London, 1997.
- [7] MIGLIORINI, A. V. Estudo de fibras de aço em blocos de concreto para a possível utilização em carapaça de molhes, Rio Grande, 2011, Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande.
- [8] NEVILLE, A. M., *Properties of concrete*, Longman, London, 4th ed., 1995.
- [9] PESSÔA, J. R. C. *Microtomografia com raios x e processamento de imagem na obtenção da porosidade do concreto*, Rio de Janeiro, 2011, Tese (doutorado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- [10] CARVALHO, G., et al. Caracterização do concreto utilizando microtomografia por raios x e scanner comercial, *CNMAC, Águas de Lindóia, SP, ISSN 1984-820X*, v.3, p. 694-700, 2010.
- [11] ROUGELOT, T., et al. About microcracking due to leaching in cementitious composites: X-ray microtomography description and numerical approach, *Cement and Concrete Research*, 40(2), 2010, p. 271-283.
- [12] LANDIS, E. N., KEANE, D.T.. X-ray Microtomography, *Materials Characterization*, 61(12), 2010, p. 1305-1316.
- [13] BRAZ, D., et al. Study of the concrete overlay (whitertopping) in paving using computed tomographic system, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 579(1), 2007, p. 510-513.
- [14] MACHADO, A. C., et al. Effect of 3d computed microtomography resolution on reservoir rocks, *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 95, 2014; pp. 405-407.
- [15] LIMA, I., DE ASSIS, J.T., LOPES, R.T., Three-dimensional conic beam X-ray microtomography in bone quality, *Spectrochimica Acta Part B*, 64, p. 1173-1179, 2009.
- [16] NRECON, SkyScan/Bruker micro-CT, Kartuizerweg 3B 2550 Kontich, Belgium, 2011.
- [17] INSTARECON®, CBR Premium 12-8K™, InstaRecon, Champaign, IL, USA, 2011.
- [18] FELDKAMP, L.A., L. C. Davis, and J. W. Kress, Practical cone beam algorithm, *J Opt Soc Am A*, vol. 1, 1984, p. 612-619.
- [19] CTANALYSER. The user's guide, Skyscan/Bruker micro-CT, Kartuizerweg 3B 2550 Kontich, Belgium, 2012.
- [20] PROVISA, J. L., et al. X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders, *Cement and Concrete Research*, 42(6), 2012, p. 855-864.
- [21] DAMILAKIS, J., et al. An update on the assessment of osteoporosis using radiological techniques, *Eur. Radiol. Jun*; 17, 2007, p. 1591-602.
- [22] CTANALYSER. Morphometric parameters measured, SkyScan/Bruker micro-CT, Kartuizerweg 3B 2550 Kontich, Belgium, 2012.
- [23] REMY, E., THIEL, E., Medial axis for chamfer distances: computing look-up tables and neighbourhoods in 2D or 3D, *Pattern Recognition Letters*, v. 23, 2002, p. 649-661.