



## APLICAÇÃO DA MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X NO PROCESSO DE CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS INTERNAS DO CONCRETO

Luan Ferreira Bastos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2019

APLICAÇÃO DA MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X NO PROCESSO DE  
CARACATERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS INTERNAS DO CONCRETO

Luan Ferreira Bastos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

---

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

---

Dra. Alessandra Silveira Machado, D.Sc.

---

Prof. Joaquim Teixeira de Assis, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2019

Bastos, Luan Ferreira

Aplicação da microtomografia de raios X no processo de caracterização das estruturas internas do concreto / Luan Ferreira Bastos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XII, 67 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 62-67.

1. Microtomografia computadorizada. 2. Estruturas Internas do concreto. 3. Metodologia de caracterização. I. Lopes, Ricardo Tadeu. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*“Deixa algum sinal de alegria por onde passes.”*  
*Francisco Cândido Xavier*

## AGRADECIMENTO

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus e a nosso Mestre Jesus Cristo, por estar sempre me iluminando, me inspirando e me auxiliando nessa jornada pela qual estou passando.

A minha namorada, Isabela, por ser minha melhor amiga, companheira, psicóloga, por sempre estar ao meu lado, por me apoiar, por me chamar à atenção nos diversos momentos e pelas horas de conversas que temos todas as noites. Saiba que sou completamente apaixonado por você, te amo!

Aos meus pais, Cida e João, que mesmo diante de todas as dificuldades que surgiram durante o meu crescimento estiveram sempre ao meu lado e fizeram várias coisas por mim e a minha irmã Mariah por todo o companheirismo, conversas, brigas e brincadeiras.

Aos meus sogros, Altair e Iranilda, por me acolherem em sua casa durante quase todos os finais de semana e a Thais, Victor e Sofia pelos momentos compartilhados.

Ao meu orientador, prof. Ricardo, por todo o ensinamento e oportunidades que surgiram ao longo dessa caminhada.

À professora Susana Marrero Iglesias e a sua aluna Flávia Lopes de Almeida Nascimento da Universidade Estadual de Santa Cruz por disponibilizarem a utilização das amostras e ao professor Joaquim Teixeira de Assis por ter possibilitado o intercambio das informações.

Aos profs. Davi e Edgar pelos conhecimentos compartilhados e convivência em congresso e em Angra I.

Aos meus familiares, que apesar de distantes, estamos sempre nos encontrando nas minhas idas para Três Rios, seja durante algum almoço ou durante um passeio, obrigado pela convivência, em especial a minha avó Hilda e ao meu primo Filipe.

Um agradecimento em especial ao meu padrinho Celso Leite, que infelizmente não poderá assistir ao desfecho dessa trajetória, mas tenho certeza que estará sorrindo e brincando como em todos os momentos compartilhados.

Aos amigos do grupo do ensino médio, por todas as piadas e resenhas após cada rodada do brasileirão. Obrigado por me irritarem, mesmo após as grandes vitórias do Flamengo.

Aos amigos Fernando e Lucas (Fefoso ou Chuck) por dividirem o apartamento durante esse tempo, pelas conversas jogadas fora durante os jogos do Flamengo e pelas piadas constantes que surgem durante a noite, mas chega de mudança!

Aos amigos da microtomografia do LIN pelos momentos e conhecimentos compartilhados. E também aos funcionários e técnicos pelos conhecimentos compartilhados, pelas resenhas pós-jogos e pelas conversas durante o café.

Aos amigos do Remanso Fraternal pelas manhãs de sábado e aos amigos da SEF pelas noites de estudo e palestra.

Ao pessoal do futebol de quarta e dos jogos online da UFRJ, agradeço pelos risos, brincadeiras, dribles e conversas durante esse período.

Ao CNPq, pela bolsa de fomento.

Aos professores e funcionários do PEN.

A todos aqueles que não foram citados, mas contribuíram direta e indiretamente neste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## APLICAÇÃO DA MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X NO PROCESSO DE CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS INTERNAS DO CONCRETO

Luan Ferreira Bastos

Fevereiro/2019

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

A microtomografia de raios X é um método não destrutivo que permite a visualização das estruturas internas de um objeto e torna possível gerar confiáveis modelos internos. O concreto é uma mistura amplamente utilizada no setor da construção civil devido à união entre suas propriedades mecânicas com o baixo custo para sua produção. A aplicação da microtomografia de raios X nas estruturas de concreto tem a função de entender a disposição e a formação das estruturas internas existentes no concreto. O trabalho apresenta uma metodologia para segmentar, quantificar e analisar as estruturas dos poros, agregados com maiores densidades e fibras, que foram classificados de acordo com as normas ASTM C125-18 e NBR 7211:2009. Após a classificação, percebeu-se a predominância de agregados com um menor grau de finura e a predominância de poros com o volume entre 0,0001 e 0,01 mm<sup>3</sup>. Também foi possível identificar a presença do EVA e das fibras na estrutura interna das amostras, que são de concreto leve. O sistema de microtomografia de raios X mostrou sua eficiência no estudo das estruturas internas do concreto e na possibilidade de classificar seus elementos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

APPLICATION OF X-RAY MICROTOMOGRAPHY IN THE PROCESS OF  
CHARACTERIZATION OF INTERNAL STRUCTURES OF CONCRETE

Luan Ferreira Bastos

February/2019

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

X-ray microtomography is a non-destructive method that allows the visualization of the internal structure of the object and makes possible to generate trust internal graphics models of the object. Concrete is a mixture widely used in the construction industry due to the union between its mechanical properties with the low cost for its production. The application of X-ray microtomography in concrete structures allows the visualization of the layout and formation of existing internal structures in the concrete. The work presents a methodology to segment, quantify and analyze the structures of pores, the high densities aggregates and fibers, which were classified according to ASTM C125-18 and NBR 7211:2009. After the classification, was noticed the predominance of aggregates with a lower degree of fineness and the majority of pores with the volume between 0.0001 and 0.01 mm<sup>3</sup>. It was also possible to identify the presence of EVA and piaçava fibers in the internal structure of the samples, which are lightweight concrete. X-ray microtomography system showed its efficiency in the study of the internal structures of the concrete.



# Índice

<b>Capítulo I</b> .....	1
<b>1. Introdução</b> .....	1
<b>Capítulo II</b> .....	4
<b>2. Fundamentação Teórica</b> .....	4
2.1. <i>Princípios da Microtomografia</i> .....	4
2.2. <i>Concreto</i> .....	13
2.2.1. <i>Cimento</i> .....	15
2.2.2. <i>Agregados</i> .....	16
2.2.3. <i>Poros</i> .....	18
2.3. <i>Microtomografia aplicada ao concreto</i> .....	19
2.4. <i>Classificação de acordo com a ASTM C125-18 e a NBR 7211:2009</i> .....	27
<b>Capítulo III</b> .....	30
<b>3. Materiais e Métodos</b> .....	30
3.1. <i>Sistema de Microtomografia</i> .....	30
3.2. <i>Amostras de Concreto</i> .....	31
3.3. <i>Processamento da Imagem</i> .....	33
3.3.1. <i>Binarização da Imagem</i> .....	34
3.3.2. <i>Operações Morfológicas</i> .....	35
3.3.3. <i>Análise dos Dados</i> .....	37
3.3.4. <i>Modelos 3D</i> .....	38
<b>Capítulo IV</b> .....	39
<b>4. Resultados e Discussões</b> .....	39
4.1. <i>Resultados e Discussões para os Agregados</i> .....	39
4.1.1. <i>Classificação dos Agregados Graúdos</i> .....	39
4.1.2. <i>Classificação dos Agregados Miúdos</i> .....	40

4.1.3. <i>Classificação global dos Agregados</i> .....	41
4.1.4. <i>Volume dos Agregados Graúdos</i> .....	42
4.1.5. <i>Volume dos Agregados Miúdos</i> .....	43
4.1.6. <i>Volume dos Agregados</i> .....	43
4.1.7. <i>Modelos gráficos para os Agregados</i> .....	44
4.2. <i>Resultado para os Poros</i> .....	47
4.2.1. <i>Classificação dos Poros</i> .....	47
4.2.2. <i>Percentual da frequência dos Poros</i> .....	47
4.2.3. <i>Porosidade</i> .....	48
4.2.4. <i>Modelos gráficos para os Poros</i> .....	49
4.3. <i>Resultado para as Fibras e E.V.A.</i> .....	52
4.3.1. <i>Classificação para as Fibras</i> .....	52
4.3.2. <i>Volume Individual das Fibras</i> .....	53
4.3.3. <i>Volume total e concentração das Fibras</i> .....	54
4.3.4. <i>Volume total e concentração do E.V.A.</i> .....	55
4.3.5. <i>Modelos gráficos para as Fibras</i> .....	56
4.4. <i>Análise Global</i> .....	58
<b>5. Conclusão</b> .....	60
<b>Referências</b> .....	62

## Lista de Figuras

Figura 1–Predominância das formas de interação entre um fóton e a matéria em função de sua energia e número atômico do material (KNOLL, 2000). .....	6
Figura 2 - Esquema de equipamento gerador de raios X (Fonte: (BUZUG, 2008)) .....	8
Figura 3 - Modelo de aquisição de imagens de uma sistema de microtomografia.....	9
Figura 4 - Foto do equipamento de microtomografia SkyScan/Brucker modelo 1173...30	
Figura 5 – Projeção de Y1 no CTAn. ....	33
Figura 6 - Slices e histogramas utilizados para a binarização da amostra Y1: a) slice antes da binarização; b) binarização para os agregados graúdos; c) binarização para os poros. ....	34
Figura 7 – Apresentação dos slices das imagens geradas após a microtomografia: a1) Y1 antes da binarização; a2) Y1 – agregados; a3) Y1 – poros; b1) X1 antes da binarização; b2) X1 – agregados; b3) X1 – piaçava; b4) X1 – E.V.A. mais piaçava; b5) X1 – poros; c1) X2 antes da binarização; c2) X2 – agregados; c3) X2 – piaçava; c4) X2 – E.V.A. mais piaçava; c5) X2 – poros; d1) X3 antes da binarização; d2) X3 – agregados; d3) X3 – piaçava; d4) X3 – E.V.A. mais piaçava; d5) X3 – poros; e1) X4 antes da binarização; c2) X4 – agregados; c3) X4 – piaçava; c4) X4 – E.V.A. mais piaçava; c5) X4 – poros;	37
Figura 8 - Representação gráfica da frequência ocupada pelos agregados nas amostras. ....	42
Figura 9 - Modelo gráfico dos agregados para as amostras: a) Y1; b) X1; c) X2; d) X3; e) X4. ....	46
Figura 10 - Percentual da frequência dos Poros. ....	48
Figura 11 - Porosidade apresentada pelas amostras .....	49
Figura 12 - Modelo gráfico dos poros para as amostras: a) X1; b) X2; c) X3; d) X4; e) X5. ....	51
Figura 13 - Concentração das Fibras. ....	54
Figura 14 - Concentração do E.V.A. ....	55
Figura 15 - Modelo gráfico para as fibras de piaçava presentes nas amostras: a) X1; b) X2; c) X3; d) X4.....	57

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Granulometria para a divisão dos agregados (Fonte: NBR 7211:2009, 2009). .....	29
Tabela 2 - Especificação das quantidades dos materiais utilizados em cada amostra.....	32
Tabela 3 - Valores dos parâmetros de correção utilizados para a reconstrução das imagens.....	33
Tabela 4 - Valores utilizados para a binarização de cada uma das amostras. ....	35
Tabela 5 - Quantidade de agregados graúdos presentes em cada amostra nos intervalos previstos pela NBR 7211:2009.....	39
Tabela 6 – Quantidade de agregados miúdos presentes em cada amostra nos intervalos previstos pela NBR 7211:2009.....	40
Tabela 7 – Quantidade de agregados presentes em cada amostra nos intervalos previstos pela NBR 7211:2009. ....	41
Tabela 8 - Volumes ocupados pelos Agregados Graúdos sobre o Volume Total de cada amostra. ....	42
Tabela 9 - Volumes ocupados pelos agregados miúdos sobre o volume total de cada amostra. ....	43
Tabela 10 - Volumes ocupados pelos agregados sobre o volume total de cada amostra. .....	44
Tabela 11 - Frequência dos poros para cada intervalo de volume. ....	47
Tabela 12 - Quantidade de fibras de piaçava classificados de acordo com as normas NBR 7211:2009.....	52
Tabela 13 - Frequência Volumétrica apresentada pelas Fibras .....	53
Tabela 14 - Volume total apresentado pelas Fibras.....	54
Tabela 15- Volume total apresentado pelo E.V.A.....	55
Tabela 16 - Volume ocupado por cada elemento do Concreto.....	58
Tabela 17 - Percentual ocupado por cada elemento do Concreto.....	58

# Capítulo I

## 1. Introdução

O concreto é um importante material utilizado no mercado brasileiro e é o elemento estrutural mais utilizado no mundo atualmente (MEHTA e MONTEIRO, 2006). O sistema de microtomografia por transmissão de raios X é uma sofisticada técnica utilizada para investigar a estrutura morfológica de um objeto (TELES *et al.* 2015) e sua aplicação em estrutura de concreto permitem a verificação da distribuição dos diferentes elementos presentes na sua estrutura.

O concreto pode ser definido como um material composto que consiste essencialmente de um meio de ligação dentro do qual estão incorporados partículas ou fragmentos dos agregados, sendo composto por cimento, que é um material inorgânico, agregados, que é um material granular que pode ser dividido entre grãos e miúdos de acordo com o módulo de finura apresentado pelas partículas, e água, que é o elemento responsável por provocar as reações no cimento. Os agregados podem ser provenientes de diferentes materiais, como areia e brita (ASTM C125-18, 2018).

Os agregados que puderam ser analisados são apenas aqueles com uma maior densidade em relação à matriz do concreto e são divididos em agregados grãos, que são aqueles com maiores diâmetros, e em agregados miúdos, que são aqueles com menores diâmetros. O módulo de finura apresentado por eles é soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Devido à importância econômica do concreto, torna-se fundamental o entendimento de sua estrutura interna.

A aplicação da microtomografia de raios X nas estruturas de concreto permite que se possam analisar estruturas novas e antigas, sem com que haja a destruição das amostras. O estudo de estruturas antigas procura entender o comportamento do concreto após vários anos, como o apresentado por (BYWALSKI, *et al.* 2015), além do entendimento da evolução da sua estrutura interna quando submetida a grandes esforços por longos períodos.

O estudo do concreto mais recente permite a visualização dos efeitos que ocorrem durante a sua cura, fase em que há a maior quantidade de reações, conforme apresentado por (GALLUCCI, *et al.* 2007).

A maioria dos estudos realizados até o momento foi direcionado para os poros e o comportamento da matriz de cimento sobre diferentes condições, tais como incêndio (KORAT, *et al.* 2013), deterioração da matriz de cimento através do processo da lixiviação (SUGIYAMA, *et al.* 2010), dentre outros que serão discutidos ao longo do trabalho. Um problema identificado por (LU, *et al.* 2016) durante seus estudos foi a dificuldade de se analisar os agregados graúdos nas amostras, pois os sistemas de microtomografia de bancada comportam apenas pequenos tamanhos de amostras. Mesmo diante da dificuldade apresentada, o presente trabalho apresenta a análise dos agregados mais densos, mostrando que é possível realizar a sua separação da matriz de cimento, o que foi permitido através do aprimoramento das ferramentas computacionais e da utilização de algumas operações morfológicas.

A realização de um estudo que envolve os agregados graúdos é de extrema importância para o concreto, visto que (WANG, *et al.* 2011) demonstraram em seus estudos a influência que a modificação do volume ocupado pelos agregados graúdos em relação ao volume total do concreto provoca alterações nas propriedades mecânicas do material.

Neste trabalho, foi realizada a aquisição das imagens através de um sistema de microtomografia por raios X de bancada. Para realizar a reconstrução das projeções foi utilizado o programa *NRecon*. A segmentação e a análise dos elementos internos das amostras de concreto leve foi possível através da utilização do programa *CTan*. A modelagem 3D dos elementos presentes na estrutura interna das amostras de concreto foi realizada com o programa *AvizoFire*.

O objetivo desse trabalho é desenvolver uma metodologia para determinar a porosidade, a concentração dos agregados e classificá-los de acordo com as normas através da técnica de microtomografia de raios X.

No capítulo II será apresentada a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica da dissertação. Nela está contida a física e as propriedades encontradas nos sistemas de microtomografia de raios X. Em seguida, será apresentado o material alvo de estudo, o concreto e seus elementos como o cimento, agregados e poros, além dos trabalhos desenvolvidos até o momento em que a microtomografia de raios X foi aplicada.

No capítulo III será apresentada a metodologia, o sistema de microtomografia utilizado para a aquisição das amostras será apresentado, assim como as amostras, e o processo realizado desde a aquisição, o processamento das imagens e a análise dos dados.

No capítulo IV serão apresentados os resultados e as suas discussões. Serão discutidos os resultados encontrados para cada um dos elementos presentes na amostra de concreto, como os agregados e os poros. Para finalizar a discussão, será apresentada uma análise com o tratamento global dos resultados obtidos e o volume ocupado por cada elemento na amostra. A conclusão do estudo e sugestão de estudos posteriores poderá ser encontrada em seguida.

## Capítulo II

### 2. Fundamentação Teórica

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica e uma revisão da bibliografia relacionada ao descobrimento dos raios X, ao sistema de microtomografia, ao concreto, à microtomografia aplicada ao concreto e à classificação proposta pela ASTM C125-18 e pela NBR 7211:2009 para os agregados.

#### 2.1. Princípios da Microtomografia

A descoberta dos raios X por Wilhelm Conrad Röntgen em 1895 trouxe uma nova perspectiva para a física, proporcionando o desenvolvimento de uma grande variedade de aplicações e técnicas, desde a radiografia até a tomografia computadorizada. O seu trabalho com tubos de raios catódicos desenvolvidos antes da descoberta dos raios X podem ser encontrados em (RONTGEN, 1896). Após a descoberta, vários trabalhos na área da radiografia começaram a ser desenvolvidos.

Um algoritmo que permitiu a reconstrução computacional de uma tomografia por radiação gama foi desenvolvido por (CORMACK, 1963; 1964) e permitiu a realização de testes com aplicações radiológicas. Mas foi (HOUNSFIELD, 1973) que elaborou um aparato experimental de raios X e conseguiu obter a primeira imagem tomográfica de um cérebro humano, e com um trabalho conjunto, (AMBROSE, 1973) determinou as aplicações clínicas.

(RADON, 1917) elaborou um processo matemático que anos mais tarde veio a ser a solução matemática utilizada para a reconstrução de imagens de tomografia por meios algébricos e que foi complementada através do algoritmo desenvolvido por (FELDKAMP, *et al.* 1984) e que se tornaram a base da reconstrução tridimensional das imagens tomográficas de forma rápida e com melhor resolução.

A tomografia computadorizada pode ser aplicada tanto para fins médicos, como para quaisquer outras áreas da ciência e pode ser classificada de acordo com o tamanho focal do equipamento de raios X, os quais são gerados no filamento do equipamento.

A forma como a radiação interage com a matéria é extremamente importante para entender o processo. Os principais modos de interação da radiação com a matéria são o



efeito fotoelétrico, o efeito Compton, ou espalhamento Compton, e a produção de pares. Os tipos de radiação podem ser a radiação alfa ( $\alpha$ ), radiação beta ( $\beta$ ), radiação gama ( $\gamma$ ) e raios X. As radiações  $\alpha$  e  $\beta$  são corpusculares e não serão abordadas nesse trabalho, enquanto a radiação  $\gamma$  e raios X são ondas eletromagnéticas, sendo apenas os raios X do interesse para o desenvolvimento desse trabalho.

O efeito fotoelétrico ocorre quando um fóton interage com um átomo absorvedor, fazendo com que um elétron seja ejetado de uma camada interna. O buraco deixado pelo elétron ejetado é preenchido por outro de uma camada mais externa ou do meio, fazendo com que seja liberada um ou mais fótons de raios X característicos. Esse efeito é predominante em interações de baixa energia e para elementos atômicos com o número atômico elevado (KNOLL, 2000).

O efeito Compton ocorre quando um fóton, proveniente da radiação gama ou X, é defletido por um elétron em uma angulação  $\theta$  em relação a sua direção original após o choque. O fóton transfere parte de sua energia para o elétron, que é considerado como inicialmente em repouso. Como o fóton pode ser desviado em qualquer angulação  $\theta$ , a energia transferida para o elétron pode variar de zero até a energia inicial apresentada pelo fóton. A probabilidade de o efeito Compton ocorrer depende diretamente do número de elétrons disponíveis como alvo em um átomo, ou seja, aumenta linearmente com o número atômico e geralmente diminui com o aumento da energia do fóton (KNOLL, 2000).

Um caso particular do efeito Compton, que merece ser citado, é o espalhamento Compton coerente ou efeito Rayleigh, que consiste na interação de fótons de baixa energia com elétrons muito ligados. Nesse efeito, o fóton não perde energia, pois ao se chocar com o átomo, ele é rebatido, ocasionando uma mudança na direção, e o átomo sofre apenas um recuo. Esse efeito tem maior probabilidade de ocorrência quando fótons de baixa energia interagem com elemento de elevado número atômico (KNOLL, 2000).

Quando a energia incidente excede a energia de repouso do elétron em duas vezes (1,022 MeV), o efeito de produção de pares passa a ser possível. Como resultado dessa interação, a radiação desaparece e dá origem a um par de elétron-pósitron, sendo a energia excedente ao valor de 1,022 MeV convertida em energia cinética das partículas. Como o pósitron interage com o meio logo após a sua criação, dois fótons de aniquilação são produzidos nas interações secundárias (KNOLL, 2000). Esse efeito não

ocorre durante a realização de tomografias em sistemas convencionais devido à alta energia necessária.

A figura 1 apresenta um gráfico em que temos a relação entre o número atômico do material alvo e a energia da partícula incidente com a predominância de ocorrência dos efeitos fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares.

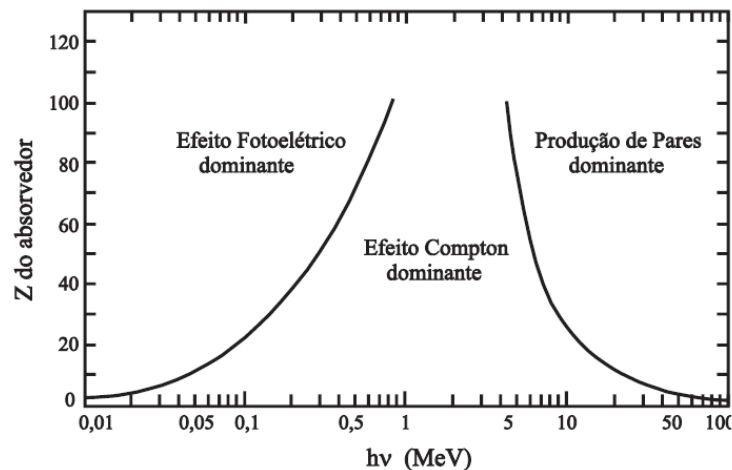


Figura 1–Predominância das formas de interação entre um fóton e a matéria em função de sua energia e número atômico do material (KNOLL, 2000).

A produção de raios X característicos ocorre quando há a retirada de um elétron de uma camada interna, mas que é preenchido por outro elétron de uma camada mais externa da eletrosfera. O excesso de energia proveniente do elétron da camada mais externa é liberado por meio de uma radiação eletromagnética característica de cada elemento e de energia igual à diferença energética entre as camadas de origem e destino, sendo monoenergéticas (KNOLL, 2000).

A radiação de freamento, ou Bremsstrahlung, ocorre quando há a interação entre elétrons rápidos com núcleos de elevado números atômicos ou com a eletrosfera, reduzindo a energia cinética dos elétrons e modificando a sua trajetória. A energia cinética perdida é convertida em ondas eletromagnéticas que são denominadas de raios X de freamento ou Bremsstrahlung. Ressalta-se que o espectro da energia liberada é contínuo, pois libera energias que variam de zero à energia cinética máxima apresentada pelo elétron (KNOLL, 2000). Essa forma de produção de raios X é a predominante em equipamentos radiológicos.

Outra forma de produção de raios X que merece ser citada é a radiação sincrotron. Essa radiação é produzida quando elétrons energizados estão dentro de uma órbita circular. Ela funciona de acordo com a Teoria Eletromagnética, que a cada ciclo uma pequena fração de energia é irradiada. Quando essa energia é extraída em uma direção tangencial à órbita do feixe, ela pode ser direcionada com um feixe de fótons que pode abranger da luz visível, que é de poucos keV, até a energia predominante em raios X, próximo de  $10^4$  keV (KNOLL, 2000).

O tubo de raios X funciona conforme o explicado para a radiação de freamento, que é a predominante, e a de raios X característicos, que ocorre no ânodo. A radiação é gerada pela desaceleração dos elétrons rápidos, que são gerados em um cátodo, que é o filamento, e direcionados a um ânodo. A energia da radiação dependerá da velocidade do elétron, que depende da aceleração do elétron, que é a diferença de potencial ( $U_a$ ) entre o cátodo e o ânodo. Uma nuvem de elétrons se forma ao redor do filamento e esses elétrons são acelerados em direção ao ânodo. Quando os elétrons alcançarem a superfície do ânodo, eles serão interrompidos abruptamente. Para se produzir um pequeno tamanho focal, as trajetórias dos elétrons acelerados devem ser controladas por um eletrodo que forma um campo elétrico próximo aos filamentos, de tal forma que a corrente de elétrons é direcionada para um pequeno ponto (BUZUG, 2008). A figura 2 mostra o esquema de um equipamento gerador de raios X comum.

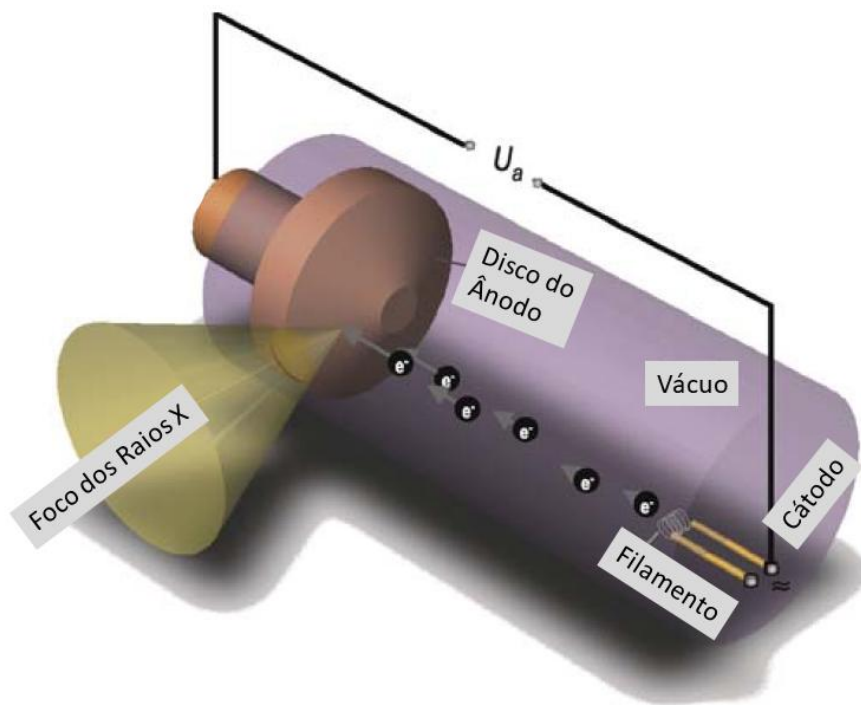


Figura 2 - Esquema de equipamento gerador de raios X (Fonte: (BUZUG, 2008))

O feixe de raios X gerado pelo tubo é direcionado ao objeto de estudo. A radiação interage com o corpo estudado e o fenômeno de efeito fotoelétrico pode ser observado. O detector tem a função de registrar os fótons que estão sendo recebidos. A quantidade de fótons que incide sobre o detector dependerá do coeficiente de atenuação do objeto, que segue a Lei de Beer-Lambert, que diz que a intensidade de um feixe de fótons decresce exponencialmente à medida que a concentração da substância absorvente aumenta, sendo a unidade do coeficiente de atenuação de massa de  $m^2/kg$  (BUZUG, 2008). Dessa forma, é possível visualizar o interior do corpo estudado.

A primeira geração de tomógrafos foi equipada por um feixe e um único detector que eram movidos de forma linear e configurados para uma rotação sobre diferentes ângulos de projeção. Cada ponto dentro do campo de visão precisava ser radiografado de todos os lados, girando o tubo de raios X e o detector em  $180^\circ$ . O feixe de raios X utilizava um colimador apropriado para extrair o feixe característico da fonte. A segunda geração contava com um feixe estreito e uma matriz de detector curta. A terceira geração contava com um feixe de abertura ampla e uma matriz de detectores maior que a

segunda. A quarta geração não apresentou mudanças na fonte dos raios X, mas passou a utilizar um detector em anel em que o corpo estudado fica envolvido (BUZUG, 2008).

O sistema de microtomografia de raios X permite a visualização da estrutura interna de um objeto sem danificá-lo. A técnica permite a visualização de diferentes materiais, como órgãos e ossos de animais (RITMAN, 2011), rochas (MACHADO, 2015), concreto (LORENZONI, 2017), além de outros. E consiste em uma fonte de emissão de raios X, um objeto que gira em torno do seu próprio eixo e um detector que tem a função de receber os fótons e converte-los em dados para que os programas os interprete.

A figura 3 apresenta um modelo de um sistema de microtomografia durante a aquisição. Os raios X são emitidos pela fonte em uma geometria cônica, enquanto o objeto rotacional em torno do seu próprio eixo a um passo de pequenos graus, como  $0,5^\circ$  e  $1^\circ$ . A cada passo, é realizada uma radiografia e pode ser configurado para que o objeto gire em torno de  $180^\circ$  ou  $360^\circ$ . O detector registra os fótons que estão atravessando o objeto, que como dito anteriormente, dependerá do coeficiente de atenuação do objeto. Dessa forma, o detector converte os fótons recebidos em dados para que sejam interpretados por programas específicos.

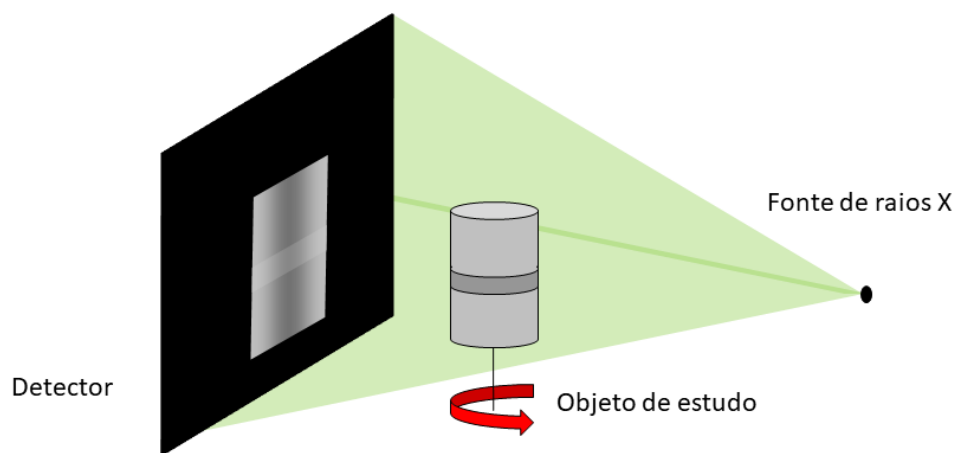


Figura 3 - Modelo de aquisição de imagens de uma sistema de microtomografia

(FELDKAMP, *et al.* 1984) demonstraram as operações matemáticas que facilitaram o processamento das imagens de microtomografia. Com a elaboração do algoritmo de Feldkamp, que é amplamente utilizado na reconstrução de objetos alvos da microtomografia devido a sua simplicidade e vantagem em lidar com o truncamento de

dados na longitudinal (LI, *et al.* 2008), a utilização desse sistema se tornou comum nos meios de pesquisa e diagnósticos médicos.

A reconstrução da imagem obtida através de um sistema de microtomografia segue os princípios matemáticos apresentados em (RANDON, 1917) e (FELDKAMP, *et al.* 1984). A reprodução bi ou tri dimensional de um objeto é realizada a partir da repetição em série de todas as projeções. O processo de reconstrução é baseado em um caminho matemático onde se obtém  $\mu(x,y)$  a partir das medidas dos raios-soma, sendo necessário encontrar a transformada inversa de Randon,  $P(\theta,t)$ . O algoritmo de Feldkamp (FDK) é amplamente aplicado nos feixes de raios X cônicos.

A imagem digital pode ser definida como uma função  $f(x,y)$ , em que  $x$  e  $y$  são as coordenadas espaciais, e a amplitude de  $f$  em qualquer par de coordenadas  $(x,y)$  é a intensidade ou o chamado nível de cinza da imagem nesse ponto (MACHADO, 2015). A imagem digital representa um conjunto de pontos ou *pixels* que formam uma matriz, onde cada *pixel* é definido como o menor elemento num dispositivo de exibição, de forma que o conjunto de *pixels* forma a imagem inteira e a cada elemento é representado por um valor numérico em um tom de cinza segundo Gonzalez e Woods (2013), (apud MACHADO, 2015, p. 21).

A qualidade da imagem depende de parâmetros fundamentais como a resolução espacial e resolução de contraste. Esses parâmetros estão associados ao tamanho focal, a magnificação da imagem, a matriz de *pixels* do detector, ao número de projeções e filtros físicos.

O tamanho focal está associado ao feixe de elétrons que é formado no cátodo e direcionado ao ânodo. Numa situação ideal, os raios X deveriam ser gerados por uma fonte pontual, pois o aumento do tamanho da fonte resulta no aumento da região de penumbra. Para que a penumbra diminua, são utilizadas lentes eletromagnéticas entre o cátodo e o ânodo que possibilita a convergência do feixe de elétrons em um pequeno ponto do ânodo, para que dessa forma, o menor tamanho focal permitido pelo tubo possa ser alcançado. Entretanto, devido a área necessária para deposição do calor, para se obter feixes de alta energia é necessária uma maior angulação, o que impede que o tamanho focal seja pontual (BUZUG, 2008).

A magnificação é alcançada quando o objeto é aproximado do ponto focal. Dessa forma, a magnificação pode ser calculada em função da distância fonte-objeto e

distância objeto-detector. Para um tubo de raios X comum, o aumento da magnificação aumenta a região da penumbra. Entretanto, para pequenos tamanhos focais, a magnificação é um aliado da resolução espacial, além disso, a magnificação está diretamente relacionada com a redução do tamanho do *pixel* efetivo da imagem, que auxilia na melhora da resolução espacial (BUSHBERG *et al.* 2012).

Nos sistemas que trabalham com detector *Flat Panel*, eles podem ser caracterizados como um painel composto por sensores, chamados de *pixels*. A imagem digital será formada pelas informações coletadas individualmente por cada sensor. Dessa forma, podemos dizer que para um detector *Flat Panel*, quanto menor for o tamanho de *pixel* do detector, melhor será a resolução espacial (BUZUG, 2008).

O número de projeções está ligado à quantidade de imagens que será adquirida e está relacionada ao passo angular escolhido para realizar a aquisição. Na geração da imagem tridimensional, ao fim do escaneamento, as projeções serão interpoladas. Dessa forma, quanto menor for o passo angular, mais projeções serão obtidas e a interpolação será realizada em intervalos menores, ganhando uma maior quantidade de detalhes.

Os feixes de raios X apresentam uma natureza polienergética e a utilização de filtros se torna essencial para haja uma melhor qualidade da imagem. Caso não haja a utilização de filtros, os fótons menos energéticos não conseguem atravessar a amostra, devido a maior probabilidade de absorção pela borda, o que gera um efeito chamado *beam hardening*. A introdução de um material metálico próximo a janela do tubo de raios X impede que os fótons de menor energia cheguem ao objeto, reduzindo a ocorrência desse efeito.

O processamento da imagem digital é tão importante quanto à aquisição das imagens, pois este procedimento permitirá modificar e analisar as estruturas de interesse presentes na imagem. Dessa forma, o processamento para eliminar ruídos e corrigir artefatos que possam surgir nas projeções, como o *Smoothing*, *Misalignment compensation*, *beam hardening* e *ring artifacts*.

O *Smoothing* deve ser aplicado à projeção, de forma que ocorra uma suavização de cada *pixel* de acordo com os *pixels* vizinhos  $M \times N$ , onde M representa a direção horizontal e N a vertical. A aplicação do *Smoothing* permite a redução dos ruídos, mas pode desfocar a imagem quando a estrutura apresentar uma pequena espessura.

O *Misalignment compensation* tem a função de corrigir qualquer desalinhamento ocorrido durante a aquisição. Problemas surgidos no desalinhamento podem embaçar a imagem e fazer com que surjam sombras.

O *Beam hardening* é o endurecimento de feixe e ocorre devido a não homogeneidade da amostra, pois os raios X percorrerá uma quantidade maior de material ao passar pelo centro em relação às bordas. Essa diferença faz com que os fótons que passam pelas bordas cheguem ao detector com uma energia maior do que os que atravessam o centro da amostra. A utilização de filtros na saída do feixe de raios X também auxilia a correção do *Beam hardening*, pois os fótons menos energéticos não chegam ao objeto.

O *Ring artifacts* ocorre quando há pequenas variações de sensibilidade nos *pixels* do detector. Essa variação faz com que surja um artefato circular durante a aquisição, pois na medida em que o objeto realiza o movimento de rotação, o *pixel*, que pode ser um *pixel* morto, permanece na mesma posição, fazendo com que o detector entenda o problema como se fosse uma característica do material. O fator de correção cria um valor médio através da informação dos *pixels* vizinhos, utilizando uma matriz de no mínimo 7x7 *pixels*.

Alguns estudos sobre a aplicação da microtomografia merecem ser citados.

(DU, *et al.* 2007) avaliaram a capacidade do sistema em distinguir pequenas variações na densidade através de diferentes coeficientes de atenuação. Foi utilizado um *phantom* com seis camadas fechadas em uma estrutura cilíndrica de policarbonato, que continha seis frascos com diferentes concentrações de iodo, além de um frasco com água e outro com ar. Através da realização de vários escaneamentos sob diferentes condições, foi possível analisar e determinar a resolução da densidade para um sistema pré-clínico que combina a alta resolução da microCT e a rápida velocidade de aquisição da tomografia computadorizada clínica.

(TSAFNAT, *et al.* 2009) realizaram um estudo de minerais para analisar a porosidade e a distribuição dos poros. Após a aquisição e reconstrução das imagens, foi utilizada uma ferramenta de elementos finitos para que pudessem analisar a distribuição dos poros e a porosidade na rocha, além de simular a aplicação de uma força de compressão e sua distribuição ao longo da estrutura interna. Foi utilizado o sistema de microtomografia de bancada SkyScan 1172 para a realização do estudo.



(ERSOY, *et al.* 2010) fizeram um estudo em que compararam os resultados obtidos pela microtomografia através de um sistema de bancada, SkyScan 1174, com os obtidos pelo microscópio de varredura eletrônica na análise de cinzas vulcânicas e compararam com considerações geométricas simples, como esferas e elipses. A caracterização das superfícies das cinzas vulcânicas se torna essencial para o entendimento das suas propriedades físicas, para as medições realizadas por aerossóis e sensoriamento remoto, realização dos processos interfaciais, traçar os padrões de transporte e deposição e caracterizar os estilos de erupção. Os dados obtidos após a análise indicaram que valores entre as razões da área pelo volume foram próximos para os dois métodos, mas divergentes para as caracterizações geométricas utilizadas. Dessa forma, os autores concluíram que a consideração das cinzas como esferas e elipses não é adequado.

(KRUTH, *et al.* 2011) fizeram um estudo metrológico dos sistemas de tomografia computadorizada, CT, com a aplicação industrial. O estudo atestou a capacidade de realização de ensaios não destrutivos com a CT, prevendo um amplo uso nos anos seguintes. (DE CHIFFRE, *et al.* 2014) fez um estudo em que listou várias aplicações que podem ser encontradas na utilização dos sistemas de tomografia computadorizada, além de apresentar as resoluções que podem ser alcançadas com os diferentes tamanhos focais.

(RITMAN, 2011) fez um estudo em que analisou a aplicação da microtomografia em pequenos animais. Ele fez um compilado dos estudos realizados até o momento e mostrou as aplicações que podem ser realizadas em ratos, como a detecção e monitoramento de tumores no fígado, o desenvolvimento embrionário, o remodelamento ventricular pós-infarto do miocárdio, o movimento de inspiração e expiração realizada pelos pulmões, verificação da arquitetura vascular do cérebro, apresentação do corte transaxial de uma seção do tórax e dos rins; e a imagem de uma tomografia computadorizada do pulmão de um coelho após a inalação do gás xenônio.

## 2.2. *Concreto*

O concreto é muito importante para a indústria da construção civil e pode ser definido como um material composto que consiste essencialmente de um meio de ligação dentro do qual estão incorporados partículas ou fragmentos dos agregados (ASTM C125-18, 2018).

Segundo (MEHTA e MONTEIRO, 2006), o concreto é uma mistura de areia natural e cascalho ou pedra britada com o cimento e água.

O Concreto não é tão resistente quanto o aço, mas possui uma excelente resistência a água. Diferente da madeira e do aço, a habilidade do concreto em lidar com a ação da água sem que sofra sérias deteriorações faz com que ele se torne o material ideal para ser usado em projetos que controla, armazena e transporta água. Uma das suas aplicações mais antigas são os aquedutos e barragens de contenção de água romanas. Ele pode adquirir uma grande variedade de formas e tamanho, porque o concreto fresco possui uma consistência plástica, que o permite adquirir o formato desejado com a utilização de formas. Além disso, é um dos materiais mais baratos e de maior disponibilidade encontrado no mercado (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

A resistência do concreto depende da coesão da pasta de cimento, da sua adesão com as partículas dos agregados e, de certa forma, da resistência dos próprios agregados (NEVILLE, 2011).

O processo de pega ocorre após a mistura de todos os componentes do concreto e é quando as reações ocorrem. Os agregados são materiais inertes e não reagem com o cimento e nem com a água, dessa forma, o processo de hidratação do cimento é o responsável pelas reações que ocorrem no concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

As reações provenientes do processo de pega do concreto são exotérmicas e como a sua condutividade térmica é baixa, há um grande aumento na temperatura quando existem elementos com grande volume de concreto. O aumento de temperatura provoca o surgimento de fissuras tanto na parte interna como na parte externa, sendo necessário haver um resfriamento do elemento durante o processo de pega (NEVILLE, 2011). O resfriamento é executado através do lançamento de pequenas quantidades de água na sua superfície externa, de forma que ela se mantenha sempre úmida durante as primeiras setenta e duas horas.

O processo de pega é extremamente importante para os elementos de concreto, pois é quando ocorre o endurecimento da massa e o ganho de resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Como o surgimento de fissuras prejudica o alcance da resistência desejada, é importante que o resfriamento seja realizado de forma adequada para que não haja comprometimento de suas propriedades mecânicas.

O estudo do concreto é muito importante para entender como os seus componentes trabalham durante a aplicação dos esforços e após a estabilização da estrutura. (GILKEY, 1961) estudou a relação entre a resistência e o fator água-cimento e elaborou a seguinte proposição:

Para um determinado cimento e agregados em condições aceitáveis, a resistência que pode ser desenvolvida por uma mistura adequada de cimento, água e agregados (sob as mesmas condições de mistura, cura e teste) é influenciada por:

- a) relação água-cimento;
- b) proporção entre o cimento e os agregados;
- c) classificação, textura superficial, forma, resistência e rigidez das partículas agregadas;
- d) tamanho máximo do agregado;

Pode-se avançar com (NEVILLE, 2011) que diz que os fatores do (b) ao (d) são menos importantes que o fator (a) quando agregados com o diâmetro maior que 40 mm são utilizados, pois há um aumento considerável da zona de transição interfacial entre a matriz de cimento e o agregado utilizado, o que prejudica as propriedades mecânicas alcançadas pelo concreto. (GILKEY, 1961) também demonstrou em sua pesquisa que as tensões que o concreto pode ser submetido aumentam com o tamanho dos agregados, a não ser que sejam utilizados agregados acima de 40 mm. A zona de transição interfacial é discutida no subtópico relacionado aos agregados.

### 2.2.1. Cimento

É um material inorgânico ou uma mistura de materiais inorgânicos que definem e desenvolvem resistência a esforços por meio de reações químicas com a água através da formação de hidratos (ASTM C125-18, 2018).

(MEHTA e MONTEIRO, 2006) define o cimento como um material seco e pulverizado em grãos extremamente finos e não aglutinante, entretanto, desenvolve a propriedade de ligação quando hidratados devido às reações que ocorrem entre os minerais do cimento e a água. O cimento chamado de hidráulico é aquele em que os produtos de hidratação se encontram estáveis em um ambiente aquoso. O cimento hidráulico mais utilizado é o cimento Portland que consiste em silicatos de cálcio reativos.

(NEVILLE, 2011) realizou um estudo da finura dos grãos do cimento e diz que é necessário que pelo menos 50% dos grãos tenham o diâmetro entre 3 e 30  $\mu\text{m}$  para desenvolver uma melhor resistência inicial. Acredita-se que se a quantidade ideal de grãos entre 3 e 30  $\mu\text{m}$  de diâmetro seja de até 95% para que as resistências iniciais e finais alcançadas sejam maiores.

### 2.2.2. Agregados

Os agregados são materiais granulares como areia, cascalho, brita, escória de alto forno triturada, ou resíduos de construção e demolição que são usadas com um meio de cimentação para produzir concreto ou argamassa. Os agregados são materiais inertes e não reagem com o cimento e nem a água, dessa forma, seu volume pode variar entre 60 a 80% do volume do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

A maioria dos agregados minerais naturais, como areia e cascalho, possui uma densidade entre 1520 a 1680  $\text{kg}/\text{m}^3$  e produz o concreto conhecido com a densidade próxima de 2400  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Dependendo das especificações de projeto, também podem ser utilizados os agregados leves, que possuem densidade inferior a 1120  $\text{kg}/\text{m}^3$ , e podem ser argilas e cinzas volantes. Quando possuem uma densidade maior que 2080  $\text{kg}/\text{m}^3$ , são conhecidos como agregados pesados e podem ser escória de alto forno, minérios de ferro, minério de titânio e um produto sintético conhecido como escória de ferro-fósforo. Os agregados pesados são utilizados no concreto que atua como escudo radioativo (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

A norma (NBR 7211:2009, 2009) diz que os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidades que possam afetar a hidratação, o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade, ou, quando for requerido e o aspecto visual externo do concreto.

Uma mudança no tamanho máximo de um agregado graúdo bem classificado de uma dada mineralogia pode ter dois efeitos opostos na resistência do concreto. Com o mesmo teor e consistência de cimento, uma mistura de concreto com os agregados graúdos maiores requerem uma menor quantidade de água na mistura do que as misturas que possuem agregados graúdos menores. Os agregados maiores tendem a formar uma zona de transição interfacial mais fraca, gerando uma maior quantidade de microfissuras. O efeito líquido irá variar com a relação água-cimento do concreto e o

tipo de esforço aplicado. Isso ocorre porque em uma menor relação água-cimento, a reduzida porosidade na zona de transição interfacial desempenha um importante papel na resistência do concreto. Além disso, uma vez que as características da zona de transição interfacial têm mais efeito sobre a resistência à tração do concreto em comparação com a resistência à compressão, é de se esperar que com uma dada mistura de concreto quaisquer mudanças nas propriedades de agregados graúdos influenciariam a relação de resistência à tração. Por exemplo, uma diminuição no tamanho dos agregados graúdos, com uma mesma relação água-cimento, irá aumentar a relação de resistência à tração e compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

A quantidade de agregados graúdos utilizadas no traço do concreto afeta o seu desempenho. (WANG, *et al.* 2011) realizaram vários experimentos com uma diferente proporção de agregados graúdos em relação ao volume do concreto, mas mantendo-se sempre o mesmo traço para o cimento, água e areia. Foram utilizados os seguintes volumes correspondentes para os agregados em relação ao volume total do concreto: 0,0%, 40%, 50%, 60%, 75% e 80%. Os experimentos realizados verificaram o *slump*, que determina a fluidez do concreto, a resistência à compressão, a tração por flexão e a capacidade da água de penetrar nas amostras. O teste do *slump*, que tem a função de determinar a consistência do concreto antes que haja o endurecimento da estrutura, demonstrou que a amostra com uma menor concentração de agregados graúdos é mais fluida, enquanto a com uma maior concentração mostrou-se menos fluida. A resistência à compressão apresentou um acréscimo com o aumento percentual do volume dos agregados, porém o aumento apresentado pelas amostras com 75% e 80% foram bem próximo da apresentada pelo de 60%. A resistência à tração mostrou que a amostra com 0,0% apresenta o melhor desempenho entre todas e a com 40% a pior. A amostra com 75% apresentou a melhor resistência à tração dentre as que possuem os agregados graúdos na sua estrutura. O teste da impermeabilidade demonstrou que a amostra com 75% apresentou o melhor resultado, seguida pela amostra de 60%. A amostra com 0,0% seguida da com 80% apresentaram os piores resultados. Dessa forma, (WANG, *et al.* 2011) concluíram que a amostra com 60% do volume ocupado pelos agregados graúdos apresentou o melhor desempenho geral.

A norma (NBR 7211:2009, 2009) também prevê a utilização de agregados recuperados de concreto fresco por lavagem, mas diz que se não houver um controle em relação à

granulometria do agregado recuperado, ele não deve ser utilizado em quantidades maiores que 5% do total de agregados para o novo concreto.

Conforme o previsto pela norma NBR 7211:2009, há a possibilidade da utilização de agregados graúdos recicláveis em substituição aos tradicionais, desde que sejam atendidas aos critérios presentes na norma. (CHAKRADHAR RAO, *et al.* 2010) realizaram um experimento onde foram utilizadas amostras de concreto com o mesmo traço e uma substituição gradual da quantidade de agregados graúdos utilizados foi realizada de acordo com as normas indianas. Foram analisadas quatro amostras, uma com 0,0% de agregados recicláveis e outras com 25%, 50% e 100% em relação ao total de agregados graúdos utilizados no traço. Foi necessária a utilização de aditivos fluidificantes nas amostras com agregados graúdos recicláveis, pois os mesmos apresentam uma porosidade maior que os naturais na sua estrutura interna. Foi testada a resistência à compressão; à força de tração para rachar o concreto, que consiste em um ensaio em que uma força de compressão é aplicada no eixo longitudinal do concreto; a resistência à flexão; o módulo de elasticidade; a verificação dos aspectos de durabilidade, que determinou a densidade, a impermeabilidade e a porosidade; e a capacidade de penetração de cloretos. Os autores concluíram que os agregados graúdos recicláveis demandam uma maior quantidade de água para que a fluidez possa ser mantida, o que modifica a razão água-cimento; não foi verificada uma grande diferença na resistência a compressão para as amostras com 50% ou mais agregados graúdos recicláveis na sua composição, enquanto que a força de tração para rachar o concreto e o módulo de elasticidade se mostraram bem diferentes, sendo a amostra com 0,0% de agregados recicláveis apresentando o melhor desempenho e a com 100% o pior; o ganho de resistência para as amostras com agregados graúdos recicláveis são mais lentos; e as amostras com os agregados recicláveis mostrou uma menor densidade.

### 2.2.3. Poros

O estudo da porosidade é muito importante para entender a resistência apresentado pelo concreto, mas como foi dito por (NEVILLE, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2006) há algumas dúvidas de como ela se aplica ao concreto.

O efeito da porosidade na pasta de cimento hidratada tem sido amplamente estudado. É necessário cuidado ao traduzir as observações em amostras feitas em laboratórios com pasta de cimento puro em informações úteis sobre o concreto, mas uma compreensão do

efeito da porosidade na resistência da pasta de cimento hidratada também é valiosa (NEVILLE, 2011).

Enquanto que a porosidade pode ser relacionada com a resistência apresentada pela pasta de cimento endurecida ou pela argamassa, a situação não é tão simples quando se trata do concreto. A presença de micro fissuras na zona de transição entre o agregado gráúdo e a matriz faz com que o concreto seja um material complexo para prever a resistência através das relações precisas de resistência-porosidade. A validade geral da relação resistência-porosidade, no entanto, deve ser respeitada porque as porosidades das fases componentes do concreto, incluindo a zona de transição, tornam-se realmente limitantes da resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Dessa forma, (WARD, *et al.* 1969) dizem que a resistência do concreto é influenciada pelo volume de todos os vazios no concreto: ar aprisionado, poros capilares, poros de gel e ar arrastado, se houver, sem que a relação resistência-porosidade identificada para as argamassas sejam desprezadas ao serem aplicadas ao concreto. Dessa forma, o estudo da porosidade se torna muito importante para as estruturas de concreto.

### 2.3. *Microtomografia aplicada ao concreto*

Até agora os estudos direcionados à microtomografia e ao concreto foram apresentados de forma individualizados. Nesta seção, eles serão apresentados em conjunto e exemplificado a forma como a microtomografia pode auxiliar no entendimento das estruturas de concreto.

(LANDIS, *et al.* 2003) utilizaram uma fonte de raios X sincrotron para estudar o comportamento de duas amostras de argamassa enquanto comprimidas. Foram realizados seis escaneamentos, sendo o primeiro apenas para verificar as propriedades da argamassa antes de comprimida. O objetivo do trabalho foi verificar as fraturas que se formaram enquanto o material sofria a compressão e calcular a energia total necessária para causá-las na argamassa.

(RATTANASAK e KENDALL, 2005) identificaram a porosidade e as características apresentadas pelos poros em argamassas de cimento com compostos pozolânicos utilizando a microtomografia com fonte de raios X do sistema de bancada SkyScan 1072. Foram utilizadas três amostras no estudo, uma apresentando apenas o cimento

Portland, outra que substituiu 25% do cimento Portland por cinzas volantes e outro que substituiu 10% do cimento Portland pela caulinita. O trabalho identificou uma maior porosidade para a amostra com cinzas volantes, seguida pela caulinita e, por último, sem compósitos pozolânicos. A análise também identificou que o tamanho médio dos poros foi menor para a amostra com caulinita, seguida pela amostra com cinzas volantes e o material sem compósitos apresentou o maior tamanho médio para os poros.

(BURLION, *et al.* 2006) utilizaram uma fonte de raios X sincrotron para analisar a evolução da porosidade durante o processo de lixiviação em argamassas. O processo de lixiviação foi acelerado com a utilização de nitrato de amônio e, para determinar a evolução da degradação da argamassa, o coeficiente de atenuação foi medido em vários locais da amostra. Foi realizado o escaneamento antes da aplicação do nitrato de amônio e outros com 24, 48 e 61 horas após a aplicação. Foi possível perceber a degradação do material e a diminuição do coeficiente de atenuação. Também foi detectado um aumento da porosidade devido ao processo de lixiviação.

(GALLUCCI, *et al.* 2007) aproveitaram a reação dos grãos anídricos do cimento para estudar a evolução da porosidade das amostras e entender o processo de percolação no início da formação do cimento com a utilização de microtomografia com fonte de raios X sincrotron. Ele separou as amostras em duas séries, a microtomografia foi realizada na série 1 com as idades de 1, 3, 7, 14, 28 e 60 dias, enquanto a microtomografia foi realizada na série 2 apenas quando essa possuía 60 dias de idade. O trabalho concluiu que após o terceiro dia não há poros capazes de sofrerem a percolação.

(PROMENTILLA e SUGIYAMA, 2007) estudaram a porosidade com a utilização de microtomografia com fonte de raios X sincrotron e fizeram simulações para avaliar a tortuosidade, que é o caminho que pode ser percorrido pelos fluídos, de materiais a base de cimento. Após a aquisição das imagens, foram quantificadas as características dos poros e foi identificado o agrupamento responsável pela percolação no material. Através dessas informações, foi realizada uma simulação que previa o caminho que seria percorrido pelos fluídos.

(CNUUDE, *et al.* 2008) utilizaram amostras de concreto e rochas para verificar os resultados obtidos para a porosidade com a utilização de três métodos: o de microtomografia de raios X, o de absorção de água pelo vácuo e o sistema de porosimetria por intrusão de mercúrio – MIP. Após a determinação dos resultados



obtidos, foi possível compará-los. A aquisição das imagens de microCT do concreto e das rochas foram realizadas de forma simultâneas e com um material padrão de calcita para referenciar os níveis de cinza. O sistema de bancada SkyScan 1072 foi o equipamento utilizado. O sistema de absorção de água pelo vácuo consiste em retirar toda a umidade possível da amostra, colocá-la em uma câmara, onde ela ficará no vácuo, preencher a câmara com água desmineralizada, ainda no vácuo, e depois igualar a pressão interna com a externa de forma gradual e lenta, demorando 24 horas e com a amostra ainda debaixo da água. Após esse processo, o peso da amostra debaixo da água é comparado com o peso dela no ar, possibilitando o cálculo da porosidade. O sistema de porosimetria por intrusão de mercúrio permite a aferição apenas dos poros interconectados e que possuam contato com a superfície externa maior que 90°. O experimento consistiu em preparar as amostras em uma câmara a vácuo por duas semanas, para que fossem eliminadas qualquer umidade. Após o preparo, as amostras foram submetidas ao método de absorção de água pelo vácuo, à microCT, à porosimetria por mercúrio e à microCT novamente, para avaliar até onde o mercúrio conseguiu penetrar nas amostras. Foram identificaram resultados diferentes para os três métodos e concluído que todos os sistemas possuem limitações, mas que a obtenção de um resultado mais próximo da realidade pode ser obtido, principalmente, com a utilização da microCT e do MIP, que podem ser utilizados de forma complementares.

(PROMENTILLA, *et al.* 2008) realizaram a caracterização do sistema de vazios em quatro amostras de concreto com diferentes traços, sendo que em duas foram utilizadas cinzas volantes. Em uma das amostras com cinzas volantes e em outra sem, foi aplicado um aditivo que fez com que a argamassa adquirisse características de uma argamassa aerada. Foi utilizado um sistema de microtomografia de raios X TOSCANER-30000µhd da Toshiba IT & Control Systems Corporations. Os resultados mostraram que as amostras não aeradas apresentaram poros maiores, enquanto as amostras aeradas apresentaram uma quantidade muito maior de poros menores. Também foi percebido que as amostras aeradas apresentam uma maior quantidade de poros entre 20 e 200 µm e apresentam uma distribuição log-normal com a moda entre 30 e 50 µm. Como o fator de espaçamento recomendado para os vazios nas normas japonesas são de 0,20 e 0,25, o material aerado se mostrou mais eficiente em um ambiente de clima mais frio, onde ocorrem constantes congelamentos e descongelamentos da água.

(PROMENTILLA, *et al.* 2009) quantificaram a porosidade presente em amostras de cimento utilizando fontes de raios X sincrotron. Foram utilizados dois métodos para a binarização das imagens, o método 1 utilizou apenas a análise do histograma, e o método 2 utilizou valores teóricos para os poros. Os resultados encontrados na análise das imagens foram utilizados para realizar simulações e prever o caminho percorrido pelos fluídos ao longo das amostras. O trabalho também comparou a relação entre a anisotropia dos poros e a tortuosidade utilizando oito regiões independentes da amostra. O método 1 apresentou uma maior tortuosidade e anisotropia dos poros, enquanto que o método 2 apresentou uma maior densidade na conectividade dos poros.

(SUGIYAMA, *et al.* 2010) estudaram a porosidade após o processo de lixiviação no cimento. Foram realizadas amostras com um fator de água-cimento de 0,5 e que passaram por um processo de eletrólise para que ocorresse uma maior degradação da estrutura através da retirada dos íons de cálcio. O processo de eletrólise foi realizado por treze semanas antes da microtomografia de raios X ser realizada. Foi realizada uma microanálise por sonda eletrônica (EPMA) para determinar o teor C/S ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) presente na superfície das amostras. Seis amostras foram enviadas para a microtomografia utilizando fontes de raios X sincrotron, sendo que duas não foram expostas ao processo de eletrólise, enquanto quatro sofreram exposição, mas foram provenientes de cortes em diferentes posições de um mesmo corpo de prova. O resultado após a segmentação mostrou que as amostras mais próximas da superfície apresentaram uma maior conexão entre os poros e uma maior porosidade. O resultado foi comparado com o obtido pela análise EPMA, onde a deterioração também se mostrou maior nas camadas mais próximas da superfície. A evolução do processo de lixiviação foi estimada através de simulações, como as realizadas antes por (PROMENTILLA e SUGIYAMA, 2007) e (PROMENTILLA, *et al.* 2009).

(PESSÔA, 2011) comparou os resultados alcançados com a microtomografia de raios X com os resultados obtidos por um escâner comercial com resolução de 2400 dpi e pelo método proposto pela NBR 9778:2005. Foram moldados dez corpos de prova cilíndricos para cada traço de 20 e 30 MPa com as dimensões de 10 (diâmetro) x 20 (altura) cm. Sete corpos de prova foram analisados através da microtomografia de raios X e pelo escâner comercial, sendo que um dos sete foi testado antes conforme prevê a NBR 9778:2005, e três corpos de prova foram rompidos pelo ensaio de resistência à compressão de acordo com a NBR 5739, que versa sobre os ensaios de compressão de

corpos de prova cilíndricos. As sete amostras alvos da análise da microtomografia de raios X e do escâner comercial e tiveram que ser preparadas para realizar a aquisição das imagens. Elas foram cortadas em pequenas fatias, sendo que somente a fatia mais interna e retirada da metade da altura foi analisada com a utilização do escâner e um testemunho com uma pioleta de diâmetro foi extraído para ser analisado pelo sistema de microtomografia de raios X após a realização do escaneamento. O trabalho apresentou uma compatibilidade nos três métodos e que o traço com o concreto de 30 MPa se mostrou mais poroso do que o de 20 MPa, apesar do traço de 30 MPa ter apresentado uma resistência à compressão maior, e o método por microtomografia de raios X se mostrou mais confiável que o do escâner.

(KIM, *et al.* 2013) aqueceram amostras de cimento de forma gradual a temperaturas de até 1000 °C para estudar os danos que ocorrem em uma estrutura após um incêndio. Com o auxílio da microtomografia de raios X, foi possível estudar a evolução da porosidade nas amostras e avaliar a disposição espacial das fraturas desenvolvidas com o calor. Também foram utilizados um sistema de difração de raios X para estudar as modificações que ocorrem nos subprodutos da hidratação do cimento, como o  $\text{Ca(OH)}_2$  e C-S-H e um microscópio eletrônico de varredura – SEM – para identificar as modificações nas estruturas internas do cimento. A aquisição das imagens de microtomografia de raios X ocorreu com o sistema X-EYE CT System (SEC Corporation, Korea). A análise pela microtomografia de raios X mostrou que houve um aumento da porosidade nas regiões mais centrais das amostras, pois a região mais externa permite que o vapor que surge com o aquecimento seja liberado. A microCT de raios X também mostrou que as fraturas começam a surgir nas regiões mais externas com a temperatura de 600 °C, e, nas temperaturas acima de 900 °C, foi possível perceber uma fragmentação intensa na estrutura. A difração de raios X mostrou que acima da temperatura de 450 °C, as estruturas moleculares do  $\text{Ca(OH)}_2$  começam a se modificar e a colapsar e, na temperatura de 700 °C, a maioria dos produtos de hidratação do cimento já se decompôs. Os resultados adquiridos com o SEM mostraram a forma como a estrutura do cimento se deteriora, além da deposição e modificação das moléculas de C-S-H.

(KORAT, *et al.* 2013) utilizaram o sistema de microtomografia de raios X, a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio – MIP – e um microscópio eletrônico de varredura – SEM – para estudar o processo de evolução dos poros em argamassas de

agregados leves após o aquecimento. As amostras foram aquecidas e analisadas através dos diferentes métodos. O sistema utilizado para realizar a aquisição das imagens de microtomografia foi o Xradia 400<sup>7</sup>. O SEM realizou uma análise qualitativa da presença dos poros e da fase líquida e apresentou apenas uma seção do objeto, devido as suas limitações. As análises realizadas pelo sistema de microCT e pelo MIP foram complementares e mostraram que o aquecimento das amostras para a temperatura de 1220 °C provocaram uma elevação na quantidade e no volume dos poros existentes. Analisando os dados adquiridos pelos diferentes métodos, foi possível perceber que a presença do líquido, que surgiu devido às cinzas volantes e ficou preso na estrutura pela ação espumante do Carbetto de Silício (SiC), foram responsáveis pelo crescimento da porosidade.

(LIU, *et al.* 2013) utilizaram a técnica de microCT para estudar a distribuição de fibras de aço em uma amostra de concreto e como a disposição dos agregados graúdos afetam a sua direção e distribuição ao longo da amostra. Foram utilizadas cinco amostras, sendo quatro apenas com agregados graúdos com os diâmetros entre 5 e 10 mm, uma com os diâmetros entre 5 e 15 mm e uma com os diâmetros entre 5 e 20 mm. O sistema utilizado para realizar a aquisição das imagens foi o Y.CT Precision S. O trabalho concluiu que o aumento do tamanho e da concentração do agregado graúdo, faz com que o fator de orientação das fibras na direção da tração diminua gradativamente.

(HENRY, *et al.* 2014) utilizaram um microtomógrafo de raios X para analisar amostras de concreto treze semanas após terem sido produzidas e após sofrerem um aquecimento de 600 °C por 1h, que simula a ocorrência de um incêndio, e após o processo de re-cura das amostras na água e no ar. A análise das imagens mostrou que após o aquecimento, houve um considerável aumento na porosidade, seja na interface entre a matriz de cimento com o agregado, seja com a conexão entre os poros já existentes. Também foi possível perceber que a re-cura com a água se mostrou mais eficiente que o processo realizado pelo ar, pois diminuiu a conectividade dos poros. O processo de re-cura pela água após os vinte oito dias fez com que o volume total de poros fosse similar ao encontrado antes do aquecimento, mas a conectividade mostrou-se maior. A re-cura pelo ar apresentou uma pequena diminuição na conectividade dos poros e um aumento dos poros isolados.

(LYDZBA, *et al.* 2014) determinaram as mudanças na microestrutura do concreto durante o processo de deterioração com a utilização de um sistema de microtomografia de raios X de bancada, o SkyScan 1172. O sistema de microtomografia não se mostrou ser tão eficiente como nos casos anteriores, onde as análises se basearam na porosidade e fissuras, para a identificação das áreas que sofreram o processo de carbonatação. Para identificar a região de interesse, foi necessária analisar as curvas de atenuação, pois o processo de carbonatação provoca o surgimento de pequenas fissuras que puderam ser identificadas na vista coronal das imagens.

(PESSÔA, *et al.* 2014) utilizaram o sistema de bancada de microtomografia de raios X SkyScan 1172 e comparou a porosidade obtida com a encontrada pelo escâner digital EPSON TX200. As imagens foram processadas e analisadas através de um código gerado para o programa MATLAB e os resultados comparados com os obtidos através dos testes previsto pela NBR 9778:2005 que versa sobre a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica e prevê o método por intrusão de mercúrio. Os autores utilizaram amostras com concreto de 20 e 30 MPa de resistência. Resultados similares foram obtidos em relação à amostra de concreto com 30 MPa quando os resultados obtidos pela microtomografia de raios X foi comparado com os resultados obtidos com o escâner, enquanto o mesmo não aconteceu com as amostras de 20 MPa. A diferença nos resultados para as amostras de 20 MPa foram atribuídos aos critérios de segmentação adotados no processamento das imagens de microtomografia de raios X. Os autores também identificaram uma quantidade maior de poros menores na amostra com o concreto de 30 MPa.

(BYWALSKI, *et al.* 2015) analisaram a evolução da porosidade em amostras de concreto de uma barragem construída entre 1914 e 1917 utilizando um sistema de microtomografia de raios X de bancada, o SkyScan 1172. Foram retiradas oito amostras com diâmetro de 100 mm da barragem. A análise do ensaio a compressão demonstrou que os concretos são provenientes de diferentes lotes, pois a amostra 1 apresentou uma resistência a 33,40 MPa e a amostra 2 apresentou uma resistência a 17,55 MPa. Os resultados das imagens da microtomografia mostrou que a amostra 1 apresenta uma quantidade menor de poros abertos e fechados que a amostra 2.

(ĆOSIĆ, *et al.* 2015) utilizaram a microtomografia de raios X para determinar a porosidade de misturas de concreto permeável com diferentes agregados. O sistema de

microtomografia de raios X utilizado foi o MicroXCT-400, Xradia. Foram realizadas cinco amostras com o mesmo fator água/cimento, uma padrão e quatro com a utilização de diferentes agregados (dolomita e escória de aço) com módulos de finura e quantidades variadas. O resultado da microtomografia apresentou uma quantidade maior na porosidade e de poros conectados para as amostras em que a dolomita foi utilizada. Também foi possível concluir que os poros conectados no concreto permeável são mais influenciados pelos tipos de agregados utilizados do que pelo tamanho dos mesmos.

(WILSON, 2015) desenvolveu uma metodologia que permitiu a identificação de agregados e poros através do processamento de imagens, possibilitando o cálculo da porosidade e produzindo imagens segmentadas que permita extrair a geometria dos elementos e pesquisar o risco da ocorrência da reação álcali-agregado em estruturas antigas. A aquisição das imagens foi realizada através de um Escâner Comercial e através de um sistema de microtomografia de raios X de bancada SkyScan 1172. Os corpos de prova foram produzidos com um traço de 20 MPa e seguindo a NBR 11578:1991, que versa sobre a especificação do cimento Portland, e a NBR 7211:1983, que versa sobre a especificação dos agregados. Para executar a análise pelo escâner, os corpos de prova foram fatiados com cortes de 5 cm e, após o tratamento, foi aplicada uma solução de fenolftaleína, que reage com matriz do concreto e possibilita a sua separação do agregado. O escâner utilizado foi o HP DESKJET F4180 com resolução de 2400 dpi. Para a identificação dos poros com o escâner, a amostra foi pintada com uma caneta preta de ponta de feltro e depois receberam uma fina camada de pó de volastonita, que possui uma coloração branca, para penetrar nos poros e permitir um contraste na imagem. O sistema de microtomografia de raios X permitiu a análise dos poros. Para a realização da binarização dos agregados graúdos, o autor optou pela escolha de *threshold* pelo método de Otsu, seguido da realização de operações morfológicas que permitiram a separação dos agregados da matriz de concreto. O autor concluiu que o método do escâner se mostrou satisfatória para a identificação dos poros e agregados, enquanto o de microtomografia de raios X se mostrou eficaz apenas para a identificação dos poros. A análise dos agregados pela metodologia proposta não se mostrou eficiente para a identificação do material, pois detectou apenas metade da quantidade definida no traço das amostras de concreto.

(LU, *et al.* 2016) utilizou um sistema de microtomografia de raios X, o GE V|tome|x|240D  $\mu$ CT, para realizar a análise da porosidade de oito amostras, sendo

quatro delas recolhidas de uma estrada construída em 2007 em Nottawa, e as outras quatro de uma coluna de um píer construído em 2008 em St. Catharines, ambas em Ontário, Canadá. Foi utilizado um critério para diferenciar poros próximos, que podiam ser entendidos como conectados. O processo de separação foi realizado através da utilização do algoritmo *watershed* para processar todos os volumes que excedessem seis *pixels* de diâmetro. Também foi utilizada uma binarização manual para separar a matriz de cimento dos agregados, que não foram analisados devido ao tamanho das amostras.

(LORENZONI, 2017) estudou a evolução dos danos causados em amostras de cimento após estarem submetidas a um carregamento cíclico em temperaturas elevadas com a utilização da microtomografia de raios X. O sistema utilizado foi o XRadia 510 Versa. As amostras de cimento utilizadas possuem o mesmo traço das que são utilizadas para a fabricação dos berços de oleodutos no fundo do oceano e estão submetidas a um alto carregamento e a elevadas temperaturas provenientes do processo de extração de petróleo. A utilização da microtomografia teve como objetivo avaliar a evolução da porosidade e o aparecimento das fissuras nos corpos de prova após os ensaios de carregamento cíclicos com 30%, 50% e 70% das tensões de ruptura e aquecimento de 100°, 200°, 450° e 650° C.

(PESSÔA, *et al.* 2018) apresentaram um método para obtenção da porosidade do concreto utilizando microtomografia por raios X com processamento de imagens digitais, caracterizando a distribuição, tamanho e volume dos poros presentes na matriz de cimento e os comparou com o método proposto pela NBR 9778:2009. O sistema de microtomografia de raios X utilizado foi o SkyScan 1172. Foram utilizadas amostras de concreto com o traço de 20 e 30 MPa. Foi moldado um corpo de prova de 100 (diâmetro) x 200 (altura) mm para estimar a porosidade de acordo com NBR 9778:2009, que versa sobre a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, para cada traço definido para as amostras. Para o sistema de microtomografia de raios X, foram extraídos sete testemunhos com 25 (diâmetro) x 50 (altura) mm para cada traço. Os resultados encontrados para a porosidade através da utilização dos diferentes métodos foram próximos e foi observado que o traço de 30 MPa apresentou uma porosidade maior que o de 20 MPa.

#### 2.4. Classificação de acordo com a ASTM C125-18 e a NBR 7211:2009

A NBR 7211:2009 é a norma brasileira responsável por especificar os agregados utilizados no concreto, enquanto a ASTM C125-18 é a norma americana responsável pela definição dos materiais nos Estados Unidos. As classificações propostas pelas duas seguem os mesmos padrões e dividem os agregados em agregados graúdos e agregados miúdos de acordo com o módulo de finura apresentado pelas partículas.

Segundo a (ASTM C125-18, 2018), os agregados miúdos são todos aqueles que possuem os grãos capazes de passar por uma peneira com abertura de 4,75 mm, mas ficam retidos em uma peneira com abertura de 150 µm. Os agregados graúdos são todos aqueles que passam por uma peneira com 75 mm de abertura, mas ficam retidos em uma com abertura de 4,75 mm.

A (NBR 7211:2009, 2009) também prevê um conjunto de peneiras utilizadas para a classificação dos agregados graúdos e as divide entre Série Normal e Série Intermediária e pode ser conferida na tabela 1. Essas aberturas servem para classificar os grãos vendidos no mercado brasileiro e definidos em projetos nacionais.

Conforme (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009) os agregados graúdos são provenientes de pedreiras e podem ser classificados conforme sua granulometria. Eles são divididos entre rachão; gabião; brita graduada; brita corrida; pedra ou brita 1, 2, 3, 4 e 5; pedrisco ou brita 0; pó de pedra; e areia de brita. Essa divisão é a forma com que os agregados são conhecidos no mercado.

Para esse trabalho será utilizada a classificação propostas pela ASTM C125-18 e pela NBR 7211:2009 para os agregados com maiores densidades presente nas amostras.

A tabela 1 apresenta a série de peneiras e classificação dos agregados de acordo com o apresentado pela (NBR 7211:2009, 2009).



Tabela 1 - Granulometria para a divisão dos agregados (Fonte: NBR 7211:2009, 2009).

<b>Série Normal</b>	<b>Série Intermediária</b>	
75 mm	-	Agregados Graúdos
-	63 mm	
-	50 mm	
37.5 mm	-	
-	31.5 mm	
-	25 mm	
19 mm	-	
-	12.5 mm	
9.5 mm	-	
-	6.3 mm	
4.75 mm	-	
2.36 mm	-	
1.18 mm	-	
600 µm	-	
300 µm	-	
150 µm	-	

## Capítulo III

### 3. Materiais e Métodos

Neste capítulo é feita uma apresentação dos materiais e da metodologia utilizada para a elaboração da pesquisa.

#### 3.1. Sistema de Microtomografia

Para a realização desse estudo, foi utilizado um tomógrafo de bancada – SkyScan-Brucker modelo 1173 – com um tamanho mínimo de pixel de 5  $\mu\text{m}$ . O microfoco, do tubo de raios X da Hamamatsu, consegue operar com uma tensão máxima de 130 kV e uma potência máxima de 8 W. A caracterização do sistema foi realizada e apresentada por (MACHADO *et al.* 2012). A figura 4 apresenta a foto do equipamento de microtomografia de raios X utilizado para a elaboração do trabalho.



Figura 4 - Foto do equipamento de microtomografia SkyScan/Brucker modelo 1173.

O detector usado é um sensor do tipo *flat panel* com matriz de 2240 x 2240 *pixels*, com tamanho de *pixel* de 50  $\mu\text{m}$  e 12 bits de range dinâmico, produzido pela Hamamatsu, modelo C7942SK-05, com material cintilador de Oxisulfeto de Gadolínio (GSO) (HAMAMATSU PHOTONICS, 2012).

A aquisição das imagens foi realizada seguindo os seguintes parâmetros: voltagem de 100 kV, corrente de 80  $\mu$ A, potência de 8 W, passo angular de 0,5° com uma rotação de 360°, filtro de alumínio com 1,0 mm, matriz de pixel de 2240x2240, tempo de exposição de 1000 ms, número de *frames* de cinco e o tamanho de *pixel* de 12,11  $\mu$ m. Com o software desenvolvido pela empresa, NRecon (versão 1.7.3.0), foi possível realizar a reconstrução das imagens.

### 3.2. *Amostras de Concreto*

Para a realização desse trabalho foram utilizadas dez amostras de concreto, que foram cedidas por um colaborador externo da Universidade Estadual de Santa Cruz, e que puderam ser encontradas em outro estudo (NASCIMENTO, 2019). Foram utilizadas cinco amostras para a elaboração do estudo, uma definida como controle e as outras quatro amostras apresentaram fibra de piaçava com E.V.A.

O concreto utilizado para o preparo dos corpos de prova foi um concreto de 20 MPa e uma relação água/cimento de 0,62. Também foram utilizados areia e brita 0, com o diâmetro entre 4,8 e 9,5 mm, e brita 1, que apresenta o diâmetro de 9,5 à 19 mm. O E.V.A. e a fibra de piaçava foram utilizados em diferentes quantidades para cada uma das amostras. Na tabela 2 é possível encontrar o traço adotado para a preparação das amostras, sendo a amostra Y1 a utilizada para realizar o controle.

Tabela 2 - Especificação das quantidades dos materiais utilizados em cada amostra

<b>TRAÇOS</b>	<b>AMOSTRA</b>	<b>CIMENTO (kg)</b>	<b>AREIA (kg)</b>	<b>BRITA 0 (kg)</b>	<b>BRITA 1 (kg)</b>	<b>ÁGUA (l)</b>	<b>EVA (kg)</b>	<b>FIBRA (kg)</b>	<b>a/c</b>
CR	Y1	10,64	18,05	10,4	25,69	6,60	-	-	0,62
1EF15	X1	10,64	18,05	8,84	21,84	6,60	0,89	0,36	0,62
1EF25	X2	10,64	18,05	7,8	19,27	6,60	1,49	0,36	0,62
1EG15	X3	10,64	18,05	8,84	21,84	6,60	0,61	0,36	0,62
2EF15	X4	10,64	18,05	8,84	21,84	6,60	0,89	0,72	0,62

As amostras de concreto têm o formato cilíndrico com as dimensões próximas de 30 mm de altura e o diâmetro próximo de 25 mm. A aplicação da técnica de microtomografia de raios X nas amostras visa à identificação e classificação dos agregados graúdos e poros. Na figura 5 é possível verificar a projeção gerada pelo sistema de microCT antes de qualquer tratamento.

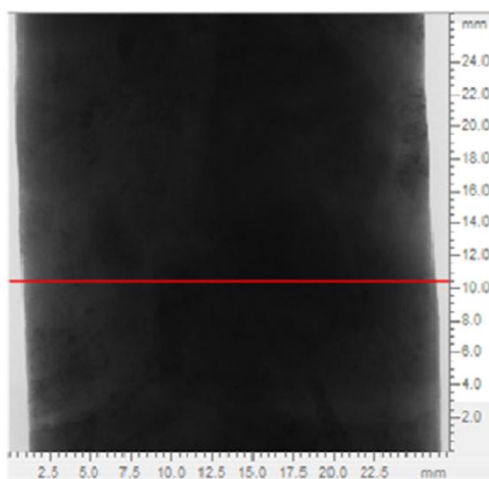


Figura 5 – Projeção de Y1 no CTAn.

### 3.3. *Processamento da Imagem*

A reconstrução 3D pode ser realizada por métodos interativos e métodos analíticos. A reconstrução das imagens foi realizada com o auxílio do software desenvolvido pela fabricante do microtomógrafo, NRecon (versão 1.7.3.0), que permitiu a correção do *Smoothing*, do *Misalignment compensation*, do *Beam hardening* e do *Ring artifacts* e os valores utilizados para a correção das projeções podem ser conferidos na tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos parâmetros de correção utilizados para a reconstrução das imagens.

<b>Amostras</b>	<b><i>Smoothing</i></b>	<b><i>Misalignment Compensation</i></b>	<b><i>Beam hardening (%)</i></b>	<b><i>Ring artifacts</i></b>
<b>Y1</b>	5	9,50	40	5
<b>X1</b>	4	6,00	25	8
<b>X2</b>	5	3,50	35	5
<b>X3</b>	5	6,00	40	5

Amostras	<i>Smoothing</i>	<i>Misalignment Compensation</i>	<i>Beam hardening (%)</i>	<i>Ring artifacts</i>
X4	4	5,50	35	5

### 3.3.1. Binarização da Imagem

A binarização consiste em dividir uma imagem de acordo com alguns critérios de uniformidade ou regiões homogêneas que devem representar um ou mais objetos de interesse, dessa forma, a imagem que apresentava diferentes tons de cinzas, passa a apresentar apenas o branco e o preto.

CTAn, v. 1.18.4.0, foi o software utilizado para realizar a binarização e analisar os dados. Nesse trabalho foi utilizado a *thresholding* global, que consiste em definir os mesmos parâmetros para toda a amostra. Os valores definidos para a binarização de cada amostra foram definidos através da análise visual em conjunto com a análise do histograma. A figura 6 indica a amostra Y1 antes e após a binarização com o histograma de nível de cinzas para os agregados e os poros.

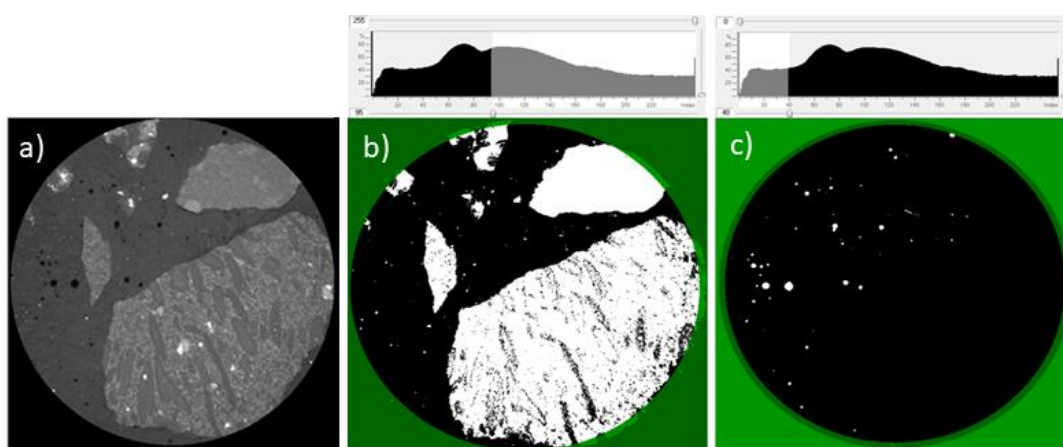


Figura 6 - Slices e histogramas utilizados para a binarização da amostra Y1: a) slice antes da binarização; b) binarização para os agregados graúdos; c) binarização para os poros.

Através do CTAn também é possível definir uma região de interesse, ROI, que é uma área definida pelo usuário para que o programa realize a análise dos dados. Não é necessário definir o ROI para todos os *slices*, pois o software trabalha com a interpolação entre os ROI's para toda a amostra, sendo necessário apenas verificar as regiões que foram selecionadas automaticamente. O programa gera um volume de

interesse, VOI, utilizando a interpolação dos ROI's. É através do VOI que as análises em três dimensões serão realizadas pelo CTAn e, apenas, as informações presentes no interior do VOI serão analisadas pelo programa. Os *slices* pertencentes ao topo e a base das amostras não foram considerados para a geração do VOI.

Para as amostras X1, X2, X3 e X4, foi possível realizar a separação do EVA e das fibras dos outros elementos do concreto. No decorrer do trabalho, o EVA em conjunto com as fibras serão identificados apenas como fibras.

Os parâmetros definidos para a binarização são encontrados na tabela 4, os valores mínimos e máximos representam os níveis de cinzas do histograma definidos para realizar a análise.

Tabela 4 - Valores utilizados para a binarização de cada uma das amostras.

<b>Binarização</b>								
	<b>Graúdos</b>		<b>Fibras + E.V.A</b>		<b>Fibras</b>		<b>Poros</b>	
	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>Y1</b>	95	255	-	-	-	-	0	40
<b>X1</b>	100	255	25	60	45	60	0	25
<b>X2</b>	105	255	25	70	45	70	0	25
<b>X3</b>	115	255	25	70	35	70	0	25
<b>X4</b>	95	255	25	60	45	60	0	25

### 3.3.2. Operações Morfológicas

Com a definição do ROI e o *thresholding* para realizar a binarização das imagens, a próxima etapa consiste na realização de operações morfológicas e análises dos dados. As operações morfológicas são operações matemáticas que tem como objetivo adicionar ou remover *pixels* ou *voxels* nos objetos binarizados (SKYSCAN, 2013). Foram utilizadas as funções *Despeckle*, *Dilate*, *Closing* e *Erosion*.

A função *Despeckle* tem como objetivo selecionar ou rejeitar objetos binarizados de acordo com o tamanho (SKYSCAN, 2013). As unidades do parâmetro podem ser definidas em *pixels* ou *voxels*.

A função *Dilate* tem como objetivo inserir *pixels* ou *voxels* nos objetos binarizados (SKYSCAN, 2013). O *Kernel* da função morfológica pode ser definido como *square* (formato quadrado), *round* (formato circular) e *hexagonal* (formato hexagonal), também é possível escolher o raio em que será executada, sendo o valor em *pixels* ou *voxels*.

A função *Erosion* tem como objetivo remover *pixels* ou *voxels* dos objetos binarizados (SKYSCAN, 2013). Assim como a função *Dilate*, o *Kernel* pode ser definido como *square*, *round* e *hexagonal*, sendo também possível escolher o raio em que será executada com o valor em *pixels* ou *voxels*.

A função *Closing* tem como objetivo unir objetos próximos, mas que inicialmente foram considerados como objetos separados (SKYSCAN, 2013). Assim como as funções anteriores, a função *Closing* pode ser definida com o *Kernel square*, *round* e *hexagonal*, sendo também possível escolher o raio em que será executada com o valor em *pixels* ou *voxels*.

Para a análise dos agregados, foi aplicado o comando *Despeckle* para a eliminação dos objetos com o volume abaixo de 1500 *voxels* após a binarização. Foram utilizados as funções *Closing* para aproximar os objetos que estavam próximos com o *Kernel hexagonal* e raio 5. Após a execução da função *Closing*, foi aplicada a função *Dilate* com o *Kernel circular* e raio 2, A função *Erosion* foi aplicada em seguida com os mesmos parâmetros. Para finalizar as operações morfológicas realizadas, a função *Closing* foi aplicada mais uma vez, mas com o *Kernel circular* e raio 5. Para a análise do E.V.A. e das fibras, foi aplicada a mesma metodologia utilizada para os agregados. Para a análise dos poros, foi aplicada a função *Despeckle* para objetos com o volume inferiores a 100 *voxels*. Os valores utilizados para os *voxels*, os *Kernel's* e os raios foram obtidos após a realização de várias análises.

Os *slices* antes da binarização e já segmentados com as operações morfológicas já realizadas para as amostras Y1, X1, X2, X3 e X4 podem ser verificados na figura 7.



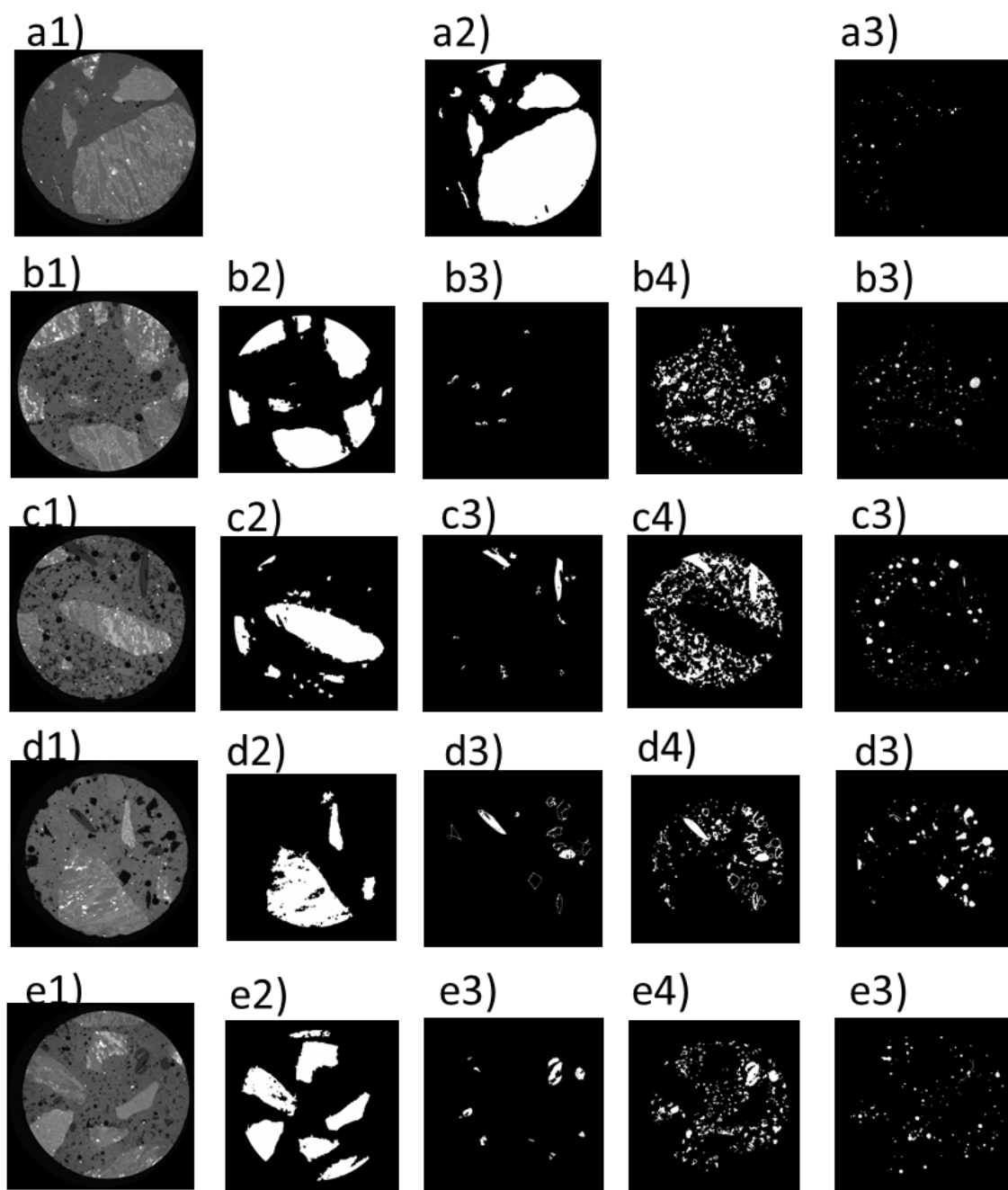


Figura 7 – Apresentação dos *slices* das imagens geradas após a microtomografia: a1) Y1 antes da binarização; a2) Y1 – agregados; a3) Y1 – poros; b1) X1 antes da binarização; b2) X1 – agregados; b3) X1 – piaçava; b4) X1 – E.V.A. mais piaçava; b5) X1 – poros; c1) X2 antes da binarização; c2) X2 – agregados; c3) X2 – piaçava; c4) X2 – E.V.A. mais piaçava; c5) X2 – poros; d1) X3 antes da binarização; d2) X3 – agregados; d3) X3 – piaçava; d4) X3 – E.V.A. mais piaçava; d5) X3 – poros; e1) X4 antes da binarização; e2) X4 – agregados; e3) X4 – piaçava; e4) X4 – E.V.A. mais piaçava; e5) X4 – poros;

### 3.3.3. Análise dos Dados

A função *Individual Objects Analysis* considera cada objeto que esteja envolvido por *pixels* pretos de forma individual e os analisa (SKYSCAN, 2013). Essa função foi

utilizada para analisar as características volumétricas de cada objeto. A análise retorna com a descrição de várias características dos objetos, mas apenas os resultados da função *Volume-equivalent sphere diameter* foi considerado para os agregados. A função *Volume-equivalent sphere diameter* calcula o volume do objeto e o diâmetro necessário para obter uma esfera com o mesmo volume. Essa função é importante para que se possa prever por quais peneiras cada agregado ficaria retido.

A função *Individual Objects Analysis* também foi utilizada para analisar os poros, mas só os resultados presentes na função *Object Volume* foram considerados. Essa função retorna com volume de cada objeto.

A função *Individual Objects Analysis* também foi utilizada para analisar as fibras de piaçava e o E.V.A. e utilizou o mesmo resultado que foi considerado para os agregados, a função *Volume-equivalent sphere diameter*. O motivo de escolha dessa função foi para determinar por quais peneiras os objetos conseguem passar. Também foi estudado o volume através da função *Object Volume*. A informação referente ao volume é considerada importante para que se possa haver um melhor entendimento das características do material.

A função *Save2D Analysis Results* analisa os dados 2D de cada *slice* (SKYSCAN, 2013). Essa função permitiu analisar a porcentagem ocupada pelos objetos binarizados e, dessa forma, descobrir o valor global ocupado pelos agregados, pelos poros, pelas fibras e pelo E.V.A.

#### 3.3.4. Modelos 3D

O *software AvizoFire*, v. 8.1.1.0, foi utilizado para gerar os modelos 3D para os agregados, os poros e a piaçava. A função *Connected Components* tem como objetivo procurar por regiões conectadas (FEI, 2015) e retorna com o modelo gráfico do objeto. Cabe salientar que é necessário definir o *Shared Colormap* como “*Labels.am*” antes de aplicar a função *Connected Components*. Cada objeto irá adquirir uma coloração diferente dentre as oitos disponíveis de forma aleatória. Não foram gerados modelo 3D para o E.V.A., pois as imagens apresentaram uma poluição grande, dessa forma, o E.V.A. foi alvo apenas de análise quantitativa.

## Capítulo IV

### 4. Resultados e Discussões

O sistema de microtomografia de raios X provou ser capaz de ser aplicado para a identificação dos elementos inertes de uma amostra de concreto. Neste capítulo serão apresentados os resultados encontrados e as discussões.

#### 4.1. Resultados e Discussões para os Agregados

Nesta seção serão apresentados os resultados encontrados e as discussões para os agregados com uma densidade maior que a matriz do cimento.

##### 4.1.1. Classificação dos Agregados Graúdos

A classificação dos agregados como agregados graúdos é prevista pelas normas ASTM C125-18 e NBR 7211:2009. A classificação dos agregados conforme prevê a norma e quantidade total das amostras pode ser conferida na tabela 5. Os dados apresentados consideram apenas aqueles com o diâmetro acima de 4,75 mm, dessa forma, apenas os agregados graúdos são apresentados nesse momento.

Tabela 5 - Quantidade de agregados graúdos presentes em cada amostra nos intervalos previstos pela NBR 7211:2009.

	4,75 - 9,5 mm	9,5 - 19 mm	19 - 37,5 mm	37,5 - 75 mm	Total
<b>Y1</b>	9	2	0	0	11
<b>X1</b>	0	2	0	0	2
<b>X2</b>	4	1	0	0	5
<b>X3</b>	2	1	0	0	3
<b>X4</b>	1	2	0	0	3
<b>Total</b>	16	8	0	0	24

Conforme os resultados apresentados na tabela 4, não foram encontrados partículas de agregados maiores de 19 mm, o que já era esperado de acordo com o traço das amostras apresentado na tabela 2. A quantidade total de agregados encontrados na análise pela microtomografia acima de 4,75 mm foi de 24. A amostra Y1, que é a amostra de controle, foi a que apresentou a maior quantidade, sendo um número total de 11, sendo 9 entre os diâmetros de 4,75 à 9,5 mm e apenas 2 com o diâmetro equivalente entre 9,5 e 19 mm. A amostra X1 foi a que apresentou a menor quantidade de partículas, apenas

duas, porém os agregados estavam no intervalo entre 9,5 e 19 mm de diâmetro. A amostra X2 apresentou um total de 5 agregados, sendo 4 com o diâmetro entre 4,75 e 9,5 mm e 1 entre 9,5 e 19 mm. As amostras X3 e X4 apresentaram apenas 3 agregados cada uma, sendo que X3 teve 2 com o diâmetro apresentado entre 4,75 e 9,5 mm e X4 apresentou 2 agregados com o diâmetro entre 9,5 e 19 mm.

Ao se comparar os resultados apresentados pelo traço utilizado, a quantidade de agregados entre 9,5 e 19 mm foram maiores para todas as amostras, mas isso só foi visualizado para X1 e X4. Essa diferença no resultado pode ser justificada pelo tamanho das amostras e pela heterogeneidade apresentada pelo concreto.

#### 4.1.2. Classificação dos Agregados Miúdos

Nesta seção será apresentado o quantitativo encontrado para todos os agregados miúdos que apresentaram uma densidade maior que a da matriz do cimento. A tabela 6 apresenta a quantidade encontrada nas amostras.

Tabela 6 – Quantidade de agregados miúdos presentes em cada amostra nos intervalos previstos pela NBR 7211:2009.

	<b>0,15-0,30 mm</b>	<b>0,30-0,60 mm</b>	<b>0,60-1,18 mm</b>	<b>1,18-2,36 mm</b>	<b>2,36-4,75 mm</b>	<b>Total</b>
<b>Y1</b>	62	140	17	4	6	229
<b>X1</b>	221	178	12	7	6	424
<b>X2</b>	0	381	172	11	4	568
<b>X3</b>	3	11	12	6	4	36
<b>X4</b>	7	3	3	5	5	23
<b>Total</b>	293	713	216	33	25	1280

A amostra Y1 apresentou 229 agregados no total, sendo que a maioria está presente no intervalo de 0,30 e 0,60 mm de diâmetro. A amostra X2 é a que apresentou maior quantidade de objetos com menos de 4,75 mm de diâmetro equivalente entre todas, com a maioria dos objetos estando no intervalo entre 0,30 e 0,60 mm e também não apresentou nenhum objeto menor que 0,300 mm. Enquanto a amostra X4 foi a que apresentou a menor quantidade, apenas 23, com a maioria dos objetos entre os diâmetros de 0,150 e 0,300 mm.

A amostra X1 apresentou a maior quantidade de agregados no intervalo de 0,15 e 0,30 mm, e a amostra X3 apresentou a maior quantidade no intervalo entre 0,60 e 1,18 mm e apenas 36 agregados no total.

A análise dos agregados miúdos considerou apenas aqueles com a densidade maior que a matriz do cimento. Como o traço apresenta como agregado apenas a areia, que é um material com a densidade próxima ao cimento, e a brita, que é um material com uma densidade maior que o cimento, é possível concluir que as partículas aferidas como agregados miúdos são britas que foram cortadas durante o processo de extração das amostras. Optou-se por continuar classificando esses agregados como miúdos, porque a análise está voltada para amostras com pequenas dimensões.

#### 4.1.3. Classificação global dos Agregados

Nesta seção será apresentado o quantitativo encontrado para todos os agregados que apresentaram uma densidade maior que a da matriz do cimento. A tabela 7 apresenta a quantidade encontrada nas amostras.

Tabela 7 – Quantidade de agregados presentes em cada amostra nos intervalos previstos pela NBR 7211:2009.

	<b>0,15- 0,30 mm</b>	<b>0,30- 0,60 mm</b>	<b>0,60- 1,18 mm</b>	<b>1,18- 2,36 mm</b>	<b>2,36- 4,75 mm</b>	<b>4,75- 9,50 mm</b>	<b>9,50- 19,0 mm</b>
<b>Y1</b>	62	140	17	4	6	9	2
<b>X1</b>	221	178	12	7	6	0	2
<b>X2</b>	0	381	172	11	4	4	1
<b>X3</b>	3	11	12	6	4	2	1
<b>X4</b>	7	3	3	5	5	1	2

A tabela 7 apresenta o quantitativo identificado para cada intervalo determinado pela série normal da NBR 7211:2009. Dessa forma, percebe-se que a maioria dos agregados identificados é classificada como miúdos de acordo com a norma. O intervalo com a maior quantidade de agregados para as amostras X1 e X4 é entre 0,150 e 0,300 mm, enquanto as amostras Y1 e X2 apresentaram a maior quantidade no intervalo entre 0,300 e 0,600 mm. A amostra X3 apresentou o intervalo entre 0,600 e 1,180 com a maior quantidade de objetos, além da melhor distribuição entre todas as amostras, conforme pode ser visualizado na representação gráfica da tabela na figura 10.

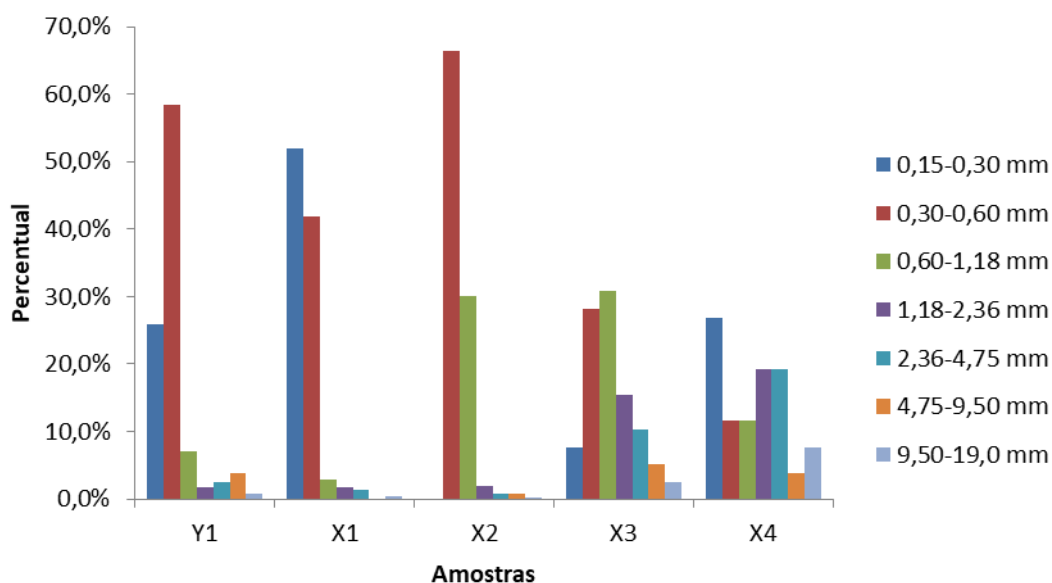


Figura 8 - Representação gráfica da frequência ocupada pelos agregados nas amostras.

#### 4.1.4. Volume dos Agregados Graúdos

A análise das amostras também permitiu identificar o volume ocupado apenas pelos agregados classificados como graúdos e é apresentada na tabela 8. O volume total das amostras foi determinado como o volume total definido pelo VOI.

Tabela 8 - Volumes ocupados pelos Agregados Graúdos sobre o Volume Total de cada amostra.

	Concentração (%)	Volume dos Agregados Graúdos (mm <sup>3</sup> )	Volume Total da amostra (mm <sup>3</sup> )
<b>Y1</b>	38,10	3.828,91	10.048,38
<b>X1</b>	28,93	2.127,77	7.353,77
<b>X2</b>	31,61	2.252,72	7.125,51
<b>X3</b>	35,37	2.346,73	6.635,14
<b>X4</b>	44,18	2.681,63	6.069,66

A amostra Y1 apresentou 38,10% do volume analisado ocupado pelos agregados graúdos. A amostra X4 apresentou o maior percentual de agregados em relação ao total da amostra com 44,18%, enquanto o menor percentual foi identificado para X1 com 28,93%. As amostras X2 e X3 ficaram abaixo do apresentado por Y1, com 31,61% e 35,37% respectivamente.

Ao se comparar os resultados apresentados pelo traço utilizado, espera-se que Y1 apresentasse o maior percentual, mas foi X4 que apresentou. Essa diferença pode ser

explicada por dois motivos, pela a heterogeneidade do concreto e à extração de pequenas amostras para análise no sistema de microtomografia de raios X de bancada.

#### 4.1.5. Volume dos Agregados Miúdos

Nesta seção serão apresentados os volumes ocupados pelos agregados classificados como miúdos. Os valores com o volume ocupado pelos agregados e o seu percentual em relação ao volume total do concreto é apresentado na tabela 9.

Tabela 9 - Volumes ocupados pelos agregados miúdos sobre o volume total de cada amostra.

	<b>Concentração (%)</b>	<b>Volume dos Agregados Miúdos (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume Total da amostra (mm<sup>3</sup>)</b>
<b>Y1</b>	1,40	141,05	10.048,38
<b>X1</b>	3,44	252,74	7.353,77
<b>X2</b>	2,16	153,86	7.125,51
<b>X3</b>	1,87	124,07	6.635,14
<b>X4</b>	2,66	161,23	6.069,66

A amostra Y1 foi a que apresentou o menor volume percentual para os agregados classificados como miúdos com 1,40%, enquanto o maior percentual foi observado em X1 com 3,44%. A amostra X4, que apresentou a maior concentração para os agregados classificados como graúdos, apresentou uma concentração de 2,66% para os agregados classificados como miúdos.

#### 4.1.6. Volume dos Agregados

A concentração dos agregados determina o volume ocupado por eles nas amostras de concreto. Essa razão considera todos os grãos, inclusive aqueles com um diâmetro menor que 4,75 mm, mas com a densidade superior a matriz do concreto. Ressalta-se que as normas utilizadas como base para esse trabalho (NBR 7211:2009 e ASTM C125-18) dividem os grãos entre agregados graúdos e agregados miúdos de acordo com o diâmetro apresentado por cada partícula e a sua capacidade de atravessar diferentes aberturas de peneiras e não pela sua densidade.

Os resultados apresentados para a quantificação dos agregados como agregados miúdos na tabela 5 mostraram a existência de pequenos objetos e o resultado percentual com o volume total ocupado pelos agregados em relação ao volume de concreto contabiliza os agregados graúdos e miúdos e pode ser encontrado na tabela 10.

A tabela 10 apresenta a concentração dos agregados presentes em cada amostra, o volume ocupado por eles e o volume total das amostras. O volume total das amostras foi determinado como o volume total definido pelo VOI.

Tabela 10 - Volumes ocupados pelos agregados sobre o volume total de cada amostra.

	<b>Concentração (%)</b>	<b>Volume dos Agregados (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume Total da amostra (mm<sup>3</sup>)</b>
<b>Y1</b>	39,51	3.969,96	10.048,38
<b>X1</b>	32,37	2.380,51	7.353,77
<b>X2</b>	33,77	2.406,58	7.125,51
<b>X3</b>	37,24	2.470,80	6.635,14
<b>X4</b>	46,84	2.842,86	6.069,66

Conforme foi apresentado nas tabelas 8 e 9, a amostra X4 foi a que apresentou a maior concentração para os agregados com 46,84%, enquanto a amostra X1 apresentou a menor com 32,37%. A amostra Y1 apresentou uma concentração de 39,51% para todos os agregados. Foi identificado que X2 possui apenas 33,77% do volume ocupado por agregados, enquanto X3 possui 37,24%.

Também é possível perceber que em nenhuma amostra foi verificado o percentual entre 60 e 80% do volume ocupado pelos agregados conforme o exemplificado na seção 2.2.2 e previsto por (MEHTA e MONTEIRO, 2006), visto que a binarização considerou apenas os elementos de maiores densidades, não incluindo outros elementos necessários para a fabricação do concreto e com uma densidade mais próxima da matriz do concreto como a areia. Outro fator que interfere para que o percentual seja alcançado é o tamanho das amostras, em que o maior volume encontrado é a Y1 com 10.048,38 mm<sup>3</sup> e o menor volume é a X4 com 6.069,66 mm<sup>3</sup>, pois limita a quantidade de agregados graúdos que podem estar presentes.

#### 4.1.7. Modelos gráficos para os Agregados

Os modelos 3D para representar os agregados binarizados e analisados podem ser conferidos na figura 9. Os eixos escolhidos para a apresentação das imagens foi o y-z. Conforme mencionado na seção 3.3.4, o programa utilizado, *AvizoFire*, v. 8.1.1.0, define de forma aleatória a coloração de cada objeto.



Os modelos gerados permitem a visualização dos agregados e sua distribuição em cada amostra. É possível visualizar que a amostra Y1, que apresentou a maior quantidade de agregados, apresenta uma boa uniformidade na distribuição. A amostra X1 apresenta a maior concentração de agregados na parte superior, enquanto a amostra X2 apresenta a maior quantidade na parte inferior. As amostras X3 e X4, assim como a Y1, apresentaram uma boa distribuição dos agregados.

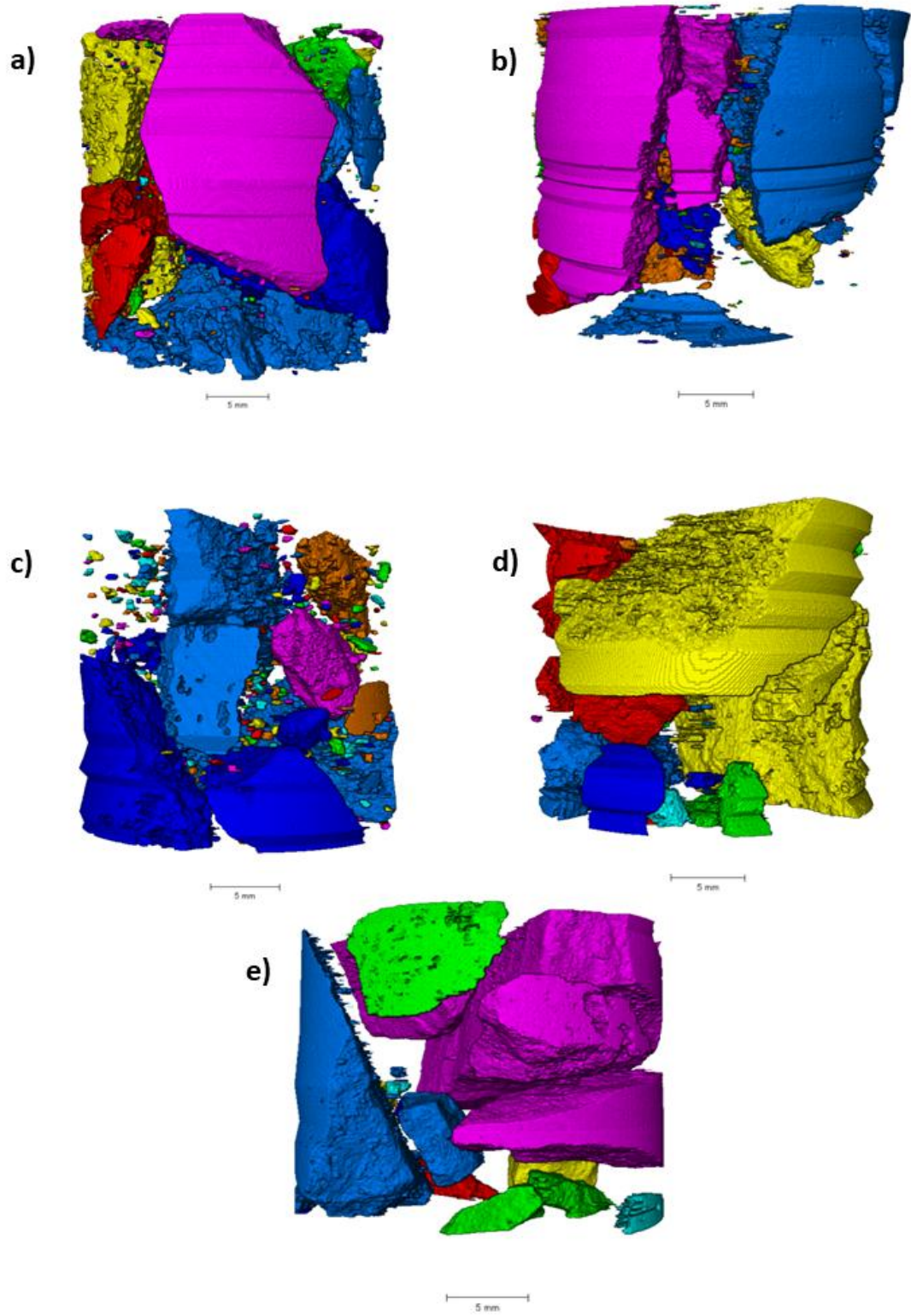


Figura 9 - Modelo gráfico dos agregados para as amostras: a) Y1; b) X1; c) X2; d) X3; e) X4.

## 4.2. Resultado para os Poros

Nesta seção serão apresentados os resultados encontrados para os poros.

### 4.2.1. Classificação dos Poros

Os poros foram classificados utilizando intervalos arbitrários que foram escolhidos após a análise dos resultados retornados pela função *Individual Objects Analysis - Object Volume*. Os intervalos foram escolhidos de forma que todos os poros fossem contabilizados. A tabela 11 mostra a frequência dos poros.

Tabela 11 - Frequência dos poros para cada intervalo de volume.

	Número de Poros						Total
	0-0,0001 (mm <sup>3</sup> )	0,0001-0,001 (mm <sup>3</sup> )	0,001-0,01 (mm <sup>3</sup> )	0,01-0,1 (mm <sup>3</sup> )	0,1-1,0 (mm <sup>3</sup> )	1,0-30,0 (mm <sup>3</sup> )	
<b>Y1</b>	0	2.900	3.967	1.262	114	12	8.255
<b>X1</b>	0	10.942	5.337	1.782	304	12	18.377
<b>X2</b>	173	9.286	4.782	1.719	388	32	16.380
<b>X3</b>	0	4.031	2.504	917	294	55	7.801
<b>X4</b>	63	4.373	4.200	1.435	155	16	10.242

Através da análise da tabela 10, percebe-se que as amostras X1 foi a que apresentou a maior quantidade de poros, sendo o valor total de 18.377. A amostra X3 foi a que apresentou a menor quantidade de poros, sendo o valor total de 7.801, mas próximo a amostra Y1, que apresentou 8.225 poros. A maioria dos poros identificados para cada amostra permaneceu entre os volumes de 0,0001 e 0,01 mm<sup>3</sup>, com os valores correspondendo a mais de 80% da quantidade total.

A análise dos poros apresentados pela amostra X3 entre o intervalo de 1,0 e 30 mm<sup>3</sup> se destaca entre todas as outras, pois é a única que apresenta um quantitativo acima de 50 para esse intervalo. A amostra que apresentou a segunda maior quantidade foi a X2, com 32 poros no intervalo de 1,0 a 30 mm<sup>3</sup>. Apesar da quantidade total de poros para X3 de 7.801 ser menor que a metade do número apresentado por X1, que é de 18.377, espera-se que X3 apresente a maior porosidade.

### 4.2.2. Percentual da frequência dos Poros

A figura 10 mostra a representação gráfica do percentual da frequência apresentada pelos poros.

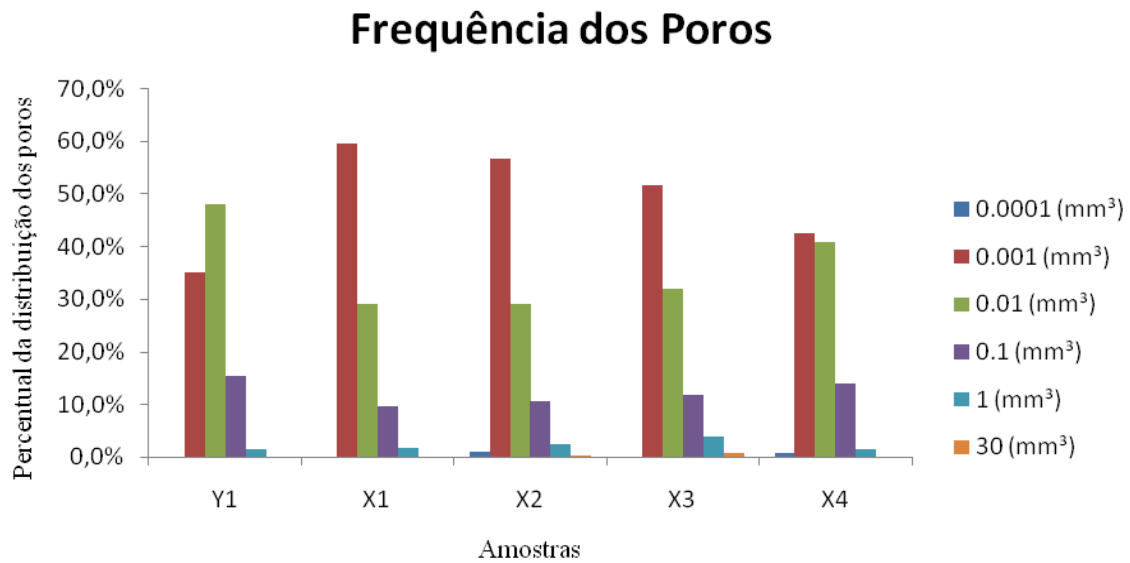


Figura 10 - Percentual da frequência dos Poros.

A análise da figura 10 confirmou que os resultados apresentados pela tabela 11 de forma gráfica e permitiu a visualização de que todas as amostras possuem a maioria dos poros com os volumes entre o intervalo de 0,0001 e 0,01 mm<sup>3</sup>.

#### 4.2.3. Porosidade

A porosidade é a razão entre o volume ocupado pelos poros dividido pelo volume total da amostra. O estudo da porosidade no concreto é de extrema importância, conforme já mencionado na seção 2.2.3, a validade da relação resistência-porosidade deve ser respeitada para o concreto, visto que as porosidades das fases componentes do concreto tornam-se limitantes da resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2006). A figura 11 apresenta os valores das porosidades identificados para cada amostra.

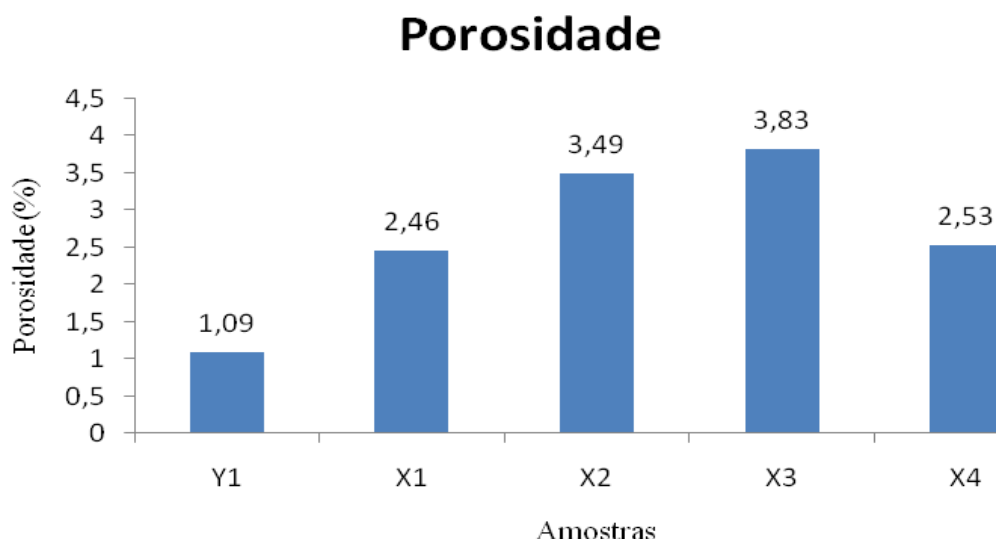


Figura 11 - Porosidade apresentada pelas amostras

A análise da porosidade apresentada na figura 11 mostra que o maior valor é encontrado para a amostra X3, conforme o esperado e previsto após a análise da tabela 11, devido à quantidade apresentada de poros com o volume acima de  $1,0 \text{ mm}^3$ . O menor valor para a porosidade foi identificado para a amostra Y1, o que também era esperado, que apesar de ficar atrás da amostra X3 em menor quantidade de poros, apresentou uma quantidade baixa de poros acima de  $1,0 \text{ mm}^3$  e de 8.255 poros no total.

As amostras X1 e X4 apresentaram a porosidade próxima de 2,50%, apesar de apresentarem uma diferença de 8.135 poros. A amostra X2 foi a que apresentou a segunda maior porosidade dentre as amostras e também foi a que apresentou a segunda maior quantidade de poros.

#### 4.2.4. Modelos gráficos para os Poros

Assim como os modelos gráficos gerados para os agregados graúdos, o eixo escolhido para a representação gráfica dos poros foi o y-z. Conforme mencionado na seção 3.3.4, o programa utilizado define de forma aleatória a coloração de cada objeto. As figuras 15 e 16 apresentam os modelos gráficos gerados para os poros identificados no decorrer da análise.

A figura 12 permite concluir que não há uma região em que há a concentração dos poros, mas que eles se distribuem de forma a tentar preencher toda a amostra.

Conforme o esperado pelo resultado apresentado pela porosidade, é possível perceber que a amostra Y1 realmente possui a menor porosidade. Nas amostras X1 e X4 é possível perceber há existência de poros maiores na região central das amostras.

Em todas as amostras é possível verificar o espaço em que não há poros e que é preenchido pelos agregados.

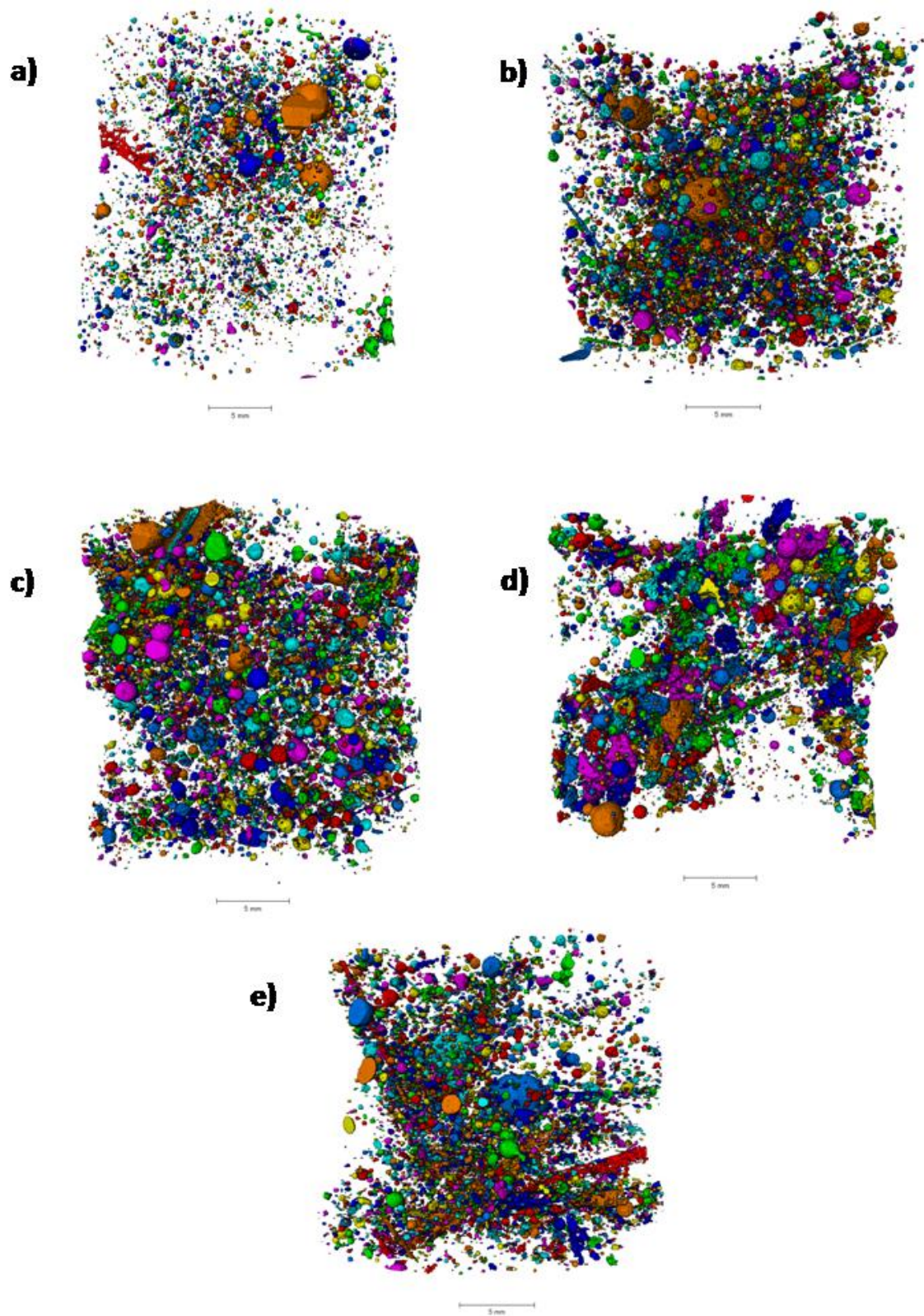


Figura 12 - Modelo gráfico dos poros para as amostras: a) Y1; b) X1; c) X2; d) X3; e) X4.

#### 4.3. Resultado para as Fibras e E.V.A.

Nesta seção serão apresentados os resultados encontrados para as fibras e E.V.A. para as amostras X1, X2, X3 e X4.

##### 4.3.1. Classificação para as Fibras

Conforme mencionado na seção 3.2, foram utilizadas fibras e E.V.A. no traço do concreto. O método utilizado para a classificação desses materiais foi o mesmo adotado para os agregados e que está estabelecido nas normas NBR 7211:2009 e ASTM C125-18.

Através da utilização de baixos valores de níveis de cinza para a binarização, conforme foi apresentado na tabela 3, é possível concluir que esses objetos apresentam uma densidade menor que a da matriz do concreto e os agregados.

A tabela 12 apresenta o quantitativo para cada intervalo da série normal prevista pelas normas NBR 7211:2009 e ASTM C125-18 para as fibras de piaçava.

Tabela 12 - Quantidade de fibras de piaçava classificados de acordo com as normas NBR 7211:2009.

	0,15 - 0,3 mm	0,3 - 0,6 mm	0,6 - 1,18 mm	1,18 - 2,36 mm	2,36 - 4,75 mm	2,26 - 4,75 mm	Total
<b>X1</b>	199	64	33	8	1	0	305
<b>X2</b>	0	125	22	6	2	0	155
<b>X3</b>	30	204	128	29	2	0	393
<b>X4</b>	0	2	16	10	4	0	32

A tabela 12 apresenta a classificação das fibras de piaçava conforme o previsto pelas normas. É possível perceber que as amostras apresentam uma a quantidade de objetos bem diferentes para cada intervalo. Um exemplo é que a amostra X1 apresenta a maioria dos objetos entre o intervalo de 0,15 a 0,30 mm, enquanto as amostras X2 e X3 apresentam a maior frequência de objetos para o intervalo entre 0,30 e 0,60 mm e a maior frequência de objetos é encontrado no intervalo até 0,600 e 1,18 mm de diâmetro para a amostra X4.



A amostra X3 foi a que apresentou a maior quantidade de objetos no total, com 393. A amostra X4 foi a que apresentou a menor quantidade, com um total de 32 fibras de piaçava.

Ao se analisar os valores encontrados com os traços definidos, esperasse que os valores para X1, X2 e X3 fossem próximos, pois foram utilizada a mesma quantidade. Enquanto isso, a amostra X4 deveria apresentar a maior quantidade, pois foi utilizado o dobro de fibras de piaçava, mas a análise demonstrou o contrário. Esse resultado pode ser entendido devido à heterogeneidade apresentada pelo concreto.

#### 4.3.2. Volume Individual das Fibras de Piaçava

Aqui serão apresentados os volumes de cada fibras de piaçava para as amostras X1, X2, X3 e X4. Os intervalos utilizados para a frequência apresentada foram escolhidos de forma arbitrária. A tabela 13 apresenta o resultado da frequência do volume que os objetos se encontram no intervalo determinado.

Tabela 13 - Frequência Volumétrica apresentada pelas Fibras

<b>Frequência das Fibras para cada intervalo de volume</b>					
	<b>0 - 0,01 mm<sup>3</sup></b>	<b>0,01 - 0,1 mm<sup>3</sup></b>	<b>0,1 – 1,0 mm<sup>3</sup></b>	<b>1,0 - 50 mm<sup>3</sup></b>	<b>Total</b>
<b>X1</b>	175	85	36	9	305
<b>X2</b>	0	114	33	8	155
<b>X3</b>	6	224	138	25	393
<b>X4</b>	0	1	18	13	32

De acordo com a tabela 13, a amostra X3 apresentou a maior quantidade de fibras com o volume entre 1 mm<sup>3</sup> e 50 mm<sup>3</sup>. O resultado para X3 já era esperado, visto que foi a amostra que apresentou a maior quantidade de fibras com o diâmetro acima de 0,6 mm. A amostra X1 foi a responsável pela maior quantidade de fibras com o volume de até 0,01 mm<sup>3</sup>, sendo a mesma amostra que apresentou a maior quantidade de fibras com o diâmetro equivalente entre o intervalo de 0,15 e 0,30 mm conforme o apresentado na tabela 12.

A amostra X2 apresentou a maior quantidade de fibras com o volume no intervalo entre 0,01 e 0,1 mm<sup>3</sup>, enquanto para a amostra X4, o intervalo com a maior frequência de fibras para o intervalo de 0,1 e 1,0 mm<sup>3</sup>.

#### 4.3.3. Volume total e concentração das Fibras

A tabela 14 apresenta o volume ocupado pelas fibras e a figura 13 apresenta o gráfico com os valores percentuais ocupados pelas fibras.

Tabela 14 - Volume total apresentado pelas Fibras

	X1	X2	X3	X4
<b>Total Fibras (mm<sup>3</sup>)</b>	48,13	89,65	139,56	106,77

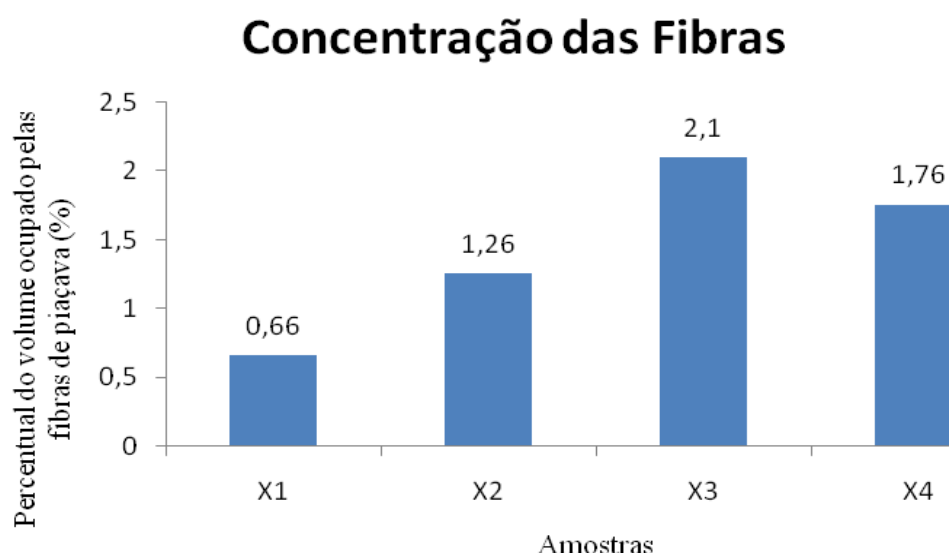


Figura 13 - Concentração das Fibras.

A figura 13 apresenta o percentual ocupado pelas fibras em todas as amostras. Nela é possível perceber que o maior percentual é encontrado para a amostra X3 – 2,1%, que apresentou 393 fibras no total, sendo as mais frequentes no intervalo entre 0,3 e 0,6 mm de diâmetro.

A amostra com a menor concentração foi encontrada na amostra X1, em que foram identificadas 305 fibras no total, mas a maioria com o diâmetro entre 0,150 mm e 0,300 mm de diâmetro. A amostra X4, que apresentou a menor quantidade total de fibras, foi a que apresentou a segunda maior concentração, ficando atrás apenas de X3 com o valor de 1,76%.

#### 4.3.4. Volume total e concentração do E.V.A.

Nesta seção serão apresentados os valores totais ocupado pelo E.V.A. nas amostras X1, X2, X3 e X4. A análise do E.V.A. irá se restringir apenas ao volume ocupado por eles na amostra. A tabela 15 apresenta o volume ocupado pelo E.V.A. nas amostras X1, X2, X3 e X4.

Tabela 15- Volume total apresentado pelo E.V.A.

	X1	X2	X3	X4
<b>Total E.V.A. (mm<sup>3</sup>)</b>	801,42	1223,01	436,77	431,07

A amostra X2 foi a que apresentou o maior volume ocupado para o E.V.A., enquanto a amostra X4 apresentou o menor. A amostra X3 apresentou um valor próximo ao de X4.

Ao se comparar os valores apresentados com o traço, era esperado que X2 apresentasse o maior valor e X3 o menor. O maior valor foi observado para X2, mas X3 não apresentou o menor, mas foi encontrado um valor próximo ao de X4, que foi o menor. Era esperado que X1 e X4 fossem valores próximos, mas foi apresentado uma diferença de 364,65 mm<sup>3</sup>.

A figura 14 apresenta a concentração total ocupada pelo E.V.A.

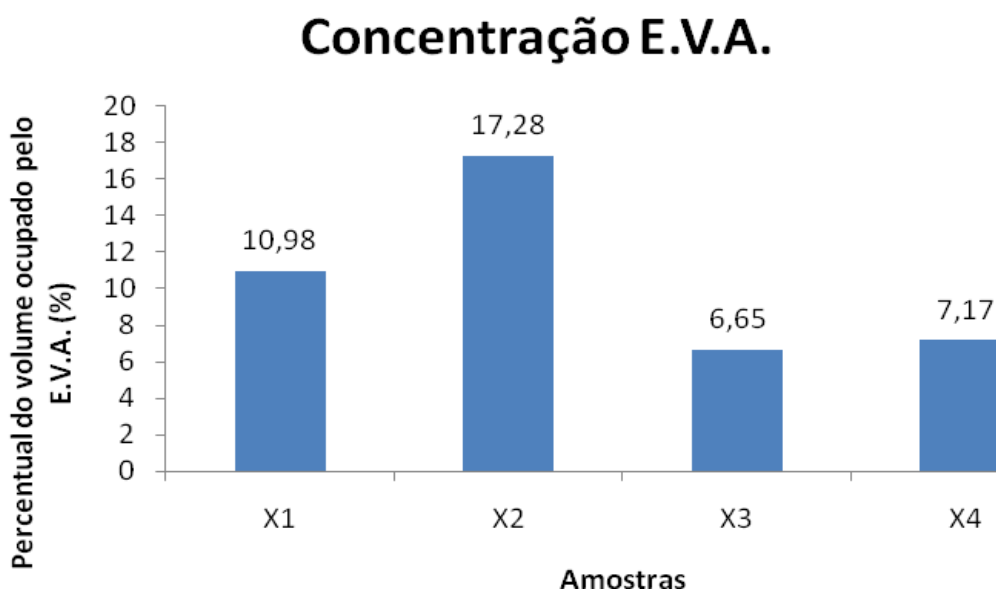


Figura 14 - Concentração do E.V.A.

Ao se comparar os valores apresentados com o traço, foi confirmado que X2 apresentasse o maior valor e X3 o menor. Era esperado que X1 e X4 fossem valores próximos, mas foi apresentado uma diferença entre as amostras.

#### *4.3.5. Modelos gráficos para as Fibras*

Assim como os modelos gráficos gerados para os agregados e para os poros, os modelos gráficos gerados para as fibras são apresentados na figura 15. O eixo escolhido para a representação gráfica no trabalho foi o y-z. É possível observar que a maioria das fibras se encontram próximas a direção vertical em todas as amostras. A amostra X2 apresenta pequenos objetos pedaços de fibras, assim como a X3. As amostras X1 e X4 foram as que apresentaram a melhor conservação das estruturas das fibras.

Não foi possível elaborar um modelo gráfico para o E.V.A., pois a imagem se apresentou extremamente poluída. Já era esperada essa dificuldade, visto que o material possui uma baixa densidade.

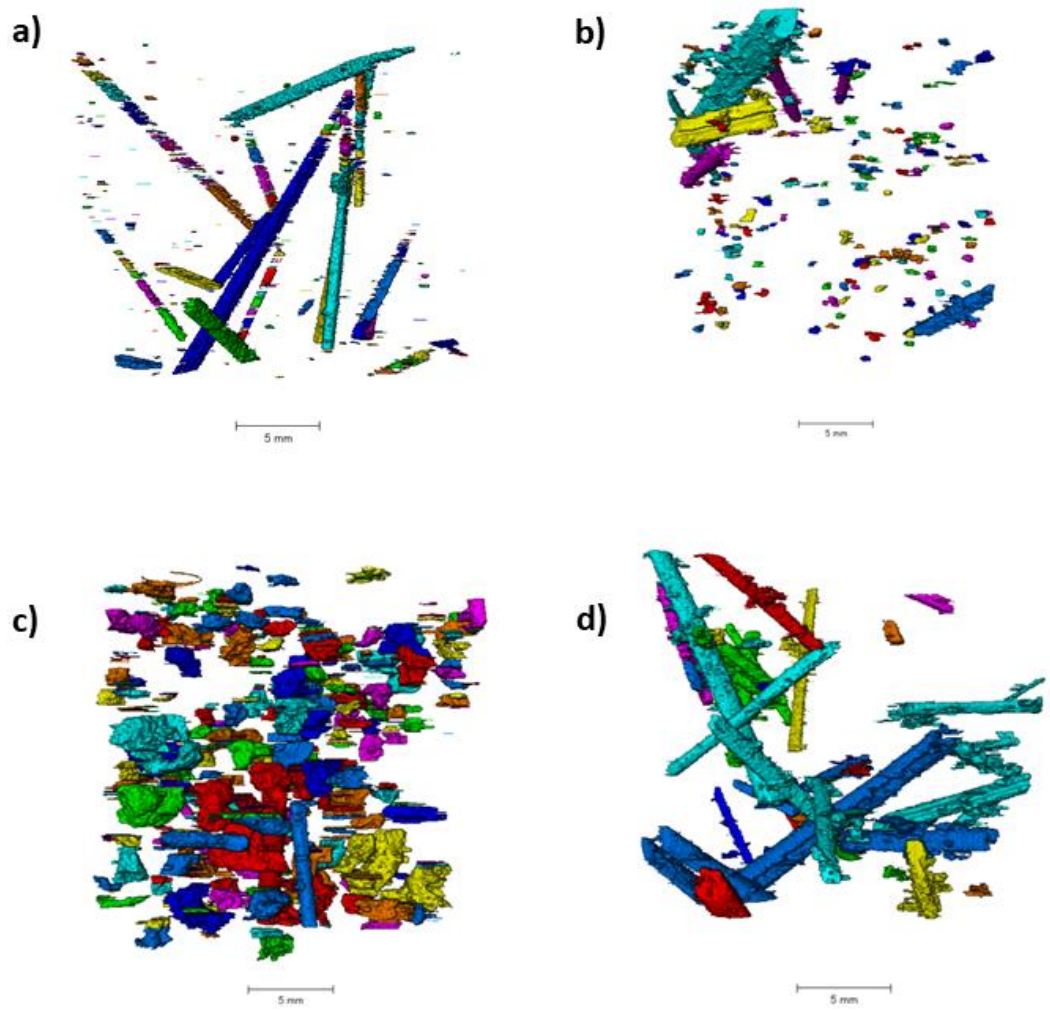


Figura 15 - Modelo gráfico para as fibras de piaçava presentes nas amostras: a) X1; b) X2; c) X3; d) X4.

#### 4.4. Análise Global

Nessa seção será apresentada uma visão global para os valores apresentados até aqui. Nas seções anteriores foram apresentados os volumes totais das regiões analisadas de cada amostra ocupados pelos poros, agregados (com maiores densidades) fibras e E.V.A. Dessa forma, é possível somar o volume ocupado por eles e subtrair a soma do volume total de cada corpo de prova para encontrar o volume ocupado pela matriz do concreto, formada por cimento e água e dos agregados com menores densidades que puderam ser contabilizados nesse trabalho.

As tabelas 16 e 17 mostram o volume ocupado por cada elemento do concreto e o percentual deles para as amostras respectivamente. É importante salientar que os valores apresentados como para agregados miúdos são aqueles classificados como miúdos para os agregados com uma densidade maior que a matriz do concreto. Optou-se em continuar a apresentar as fibras e o E.V.A. separado dos agregados apesar dele ter sido classificado da mesma forma.

Tabela 16 - Volume ocupado por cada elemento do Concreto.

Volume (mm <sup>3</sup> )							
	Poros	Agregados Miúdos	Agregados Graúdos	E.V.A.	Fibras	Matriz	Total
<b>Y1</b>	107,52	141,05	3.828,91	0,00	0,00	5.970,90	10.048,38
<b>X1</b>	253,71	252,74	2.127,77	849,55	48,13	3.821,87	7.353,77
<b>X2</b>	317,09	153,86	2.252,72	1.312,66	89,65	2.999,53	7.125,51
<b>X3</b>	300,57	124,07	2.346,73	576,33	139,56	3.147,88	6.635,14
<b>X4</b>	154,17	161,23	2.681,63	537,84	106,77	2.428,02	6.069,66

Tabela 17 - Percentual ocupado por cada elemento do Concreto.

	Poros	Agregados Miúdos	Agregados Graúdos	E.V.A.	Fibras	Matriz
<b>Y1</b>	1,07%	1,40%	38,10%	0,00%	0,00%	59,42%
<b>X1</b>	3,45%	3,44%	28,93%	11,55%	0,65%	51,97%
<b>X2</b>	4,45%	2,16%	31,61%	18,42%	1,26%	42,10%
<b>X3</b>	4,53%	1,87%	35,37%	8,69%	2,10%	47,44%
<b>X4</b>	2,54%	2,66%	44,18%	8,86%	1,76%	40,00%

A análise da tabela 17 permite concluir que a matriz do cimento é o elemento que ocupa o maior percentual do volume entre todos os outros componentes aferidos para o concreto.

As amostras Y1 e X1 foram as únicas que apresentaram um valor acima de 50% para a matriz de concreto. A amostra X4 foi a que apresentou o menor percentual entre todas para a matriz, que foi ultrapassada em percentual pelos agregados graúdos.

As amostras X1, X2, X3 e X4 apresentaram um valor percentual acima de 10% para o volume ocupado pelo E.V.A. em conjunto com as fibras de piaçava. Também é possível perceber que a utilização do E.V.A. e fibras aumentou a porosidade das amostras, o que já era previsto, visto que houve um aumento da área da zona de transição interfacial presente no concreto.

## 5. Conclusão

A utilização do sistema de microtomografia permitiu identificar e aferir os elementos da estrutura interna das amostras de concreto. A quantificação do total, a identificação do diâmetro e a definição dos volumes ocupados por cada elemento se mostraram possíveis de serem realizadas com a utilização do programa CT Analyzer, v. 1.18.4.0. Os modelos gráficos gerados com o auxílio do programa AvizoFire, v. 8.1.1.0, permitiu visualizar a distribuição dos elementos ao longo das amostras após a aplicação da função *Connected Components*. Dessa forma, a metodologia apresentado pelo presente trabalho se mostrou eficaz na segmentação, quantificação, análise e classificação dos agregados com maiores densidades em relação à matriz de cimento, do E.V.A., das fibras e dos poros.

Para a quantificação dos agregados, os programas CT Analyzer, v. 1.18.4.0, em conjunto com o AvizoFire, v. 8.1.1.0, mostrou ser uma poderosa ferramenta, sendo capaz de determinar o diâmetro dos agregados e classificá-los de acordo com o previsto pela NBR 7211:2009. A possibilidade de visualizar a sua distribuição ao longo da amostra é importante para futuros estudos, como para calcular o espaço definido como zona de transição interfacial.

A quantificação do E.V.A. mostrou ser útil para a determinação do volume total ocupado em cada amostra através da utilização do CT Analyzer, v. 1.18.4.0. O programa AvizoFire, v. 8.1.1.0, não se mostrou tão eficaz para a gerar um modelo gráfico para a distribuição.

A quantificação das fibras de piaçava com os programas CT Analyzer, v. 1.18.4.0, em conjunto com o AvizoFire, v. 8.1.1.0, também apresentou um resultado satisfatório, sendo capaz de quantificar e separar as fibras de acordo com o previsto pela NBR 7211:2009. Também foi possível aferir o volume ocupado e sua distribuição e orientação ao longo das amostras.

O sistema já estava consagrado para o estudo da porosidade de diferentes materiais e mais uma vez se mostrou útil para estudar a porosidade através do programa CT Analyzer, v. 1.18.4.0, e a sua distribuição ao longo da amostra através do programa AvizoFire, v. 8.1.1.0.

O estudo da microtomografia para elementos de concreto pode evoluir ainda mais. Dessa forma, sugere-se que outros trabalhos possam ser realizados em equipamentos



que comportem corpos de provas maiores para que a microtomografia de raios X possa ser aplicada para a classificação de agregados inteiros sem que haja a necessidade de cortá-lo ao extrair amostras menores. Também pode ser aplicado para determinar a orientação e distribuição de diferentes tipos de fibras e agregados graúdos ao longo do corpo de prova. A microtomografia por raios X também pode ser aplicada para estudar as reações que ocorrem e sua influência na porosidade de distribuição dos agregados graúdos durante o processo de pega.

## Referências

- AMBROSE, J, 1973, “Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 2. Clinical Application”. *British Journal of Radiology*, v. 46, pp. 1023-1047.
- ASTM C125-18, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, C125-18, “Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates”, 2018.
- BURLION, N.; BERNARD, D.; DA CHEN, 2006, “X-ray microtomography: Application to microstructure analysis of a cementitious material during leaching process”, *Cement and Concrete Research*, v.36, pp. 246-357.
- BUSHBERG, J. T.; SEIBERT, J. A.; LEIDHOLDT, E. M. JR. *et al.*, 2002. *The Essential Physics Medical Imaging*. 2ed. Philadelphia, Lippincott Williams and Wilkins.
- BUZUG, T. M., 2008. *Computed Tomography from Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT*. Verlag Berlin Heidelberg, Springer.
- BYWALSKI, C.; RAJCZAKOWSKA, M.; SADOWSKI, L., 2015, “Barrage lock concrete porosity evaluation using X-ray microtomography”, *Key Engineering Materials*, v. 662, pp. 161-164.
- CHAKRADHARA RAO, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V, 2011, “Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete”, *Materials and Structures*, v. 44, pp. 205-220.
- CNUUDE, V.; CWIRZEN, A.; MASSCHAELE, B. *et al.*, 2008, “Porosity and microstructure characterization of building stones and concretes”, *Engineering Geology*, v. 103, pp. 76-83.
- CORMACK, A. M., 1963, "*Representation of a Function by Its Line Integrals, with Some Radiological Applications*", *Journal of Applied Physics*, v. 34 (9), pp. 2722-2727.
- CORMACK, A. M., 1964, "*Representation of a Function by Its Line Integrals, with Some Radiological Applications. II*", *Journal of Applied Physics*, v. 35 (10), pp. 2908-2913.

ĆOSIĆ, K.; KORAT, L.; DUCMAN, V. *et al.*, 2015, “Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 78, pp. 69-76.

DE CHIFFRE, L.; CARMIGNATO, S.; KRUTH, J. P. *et al.*, 2014, “Industrial applications of computed tomography”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 63, pp. 655-677.

DU, L. Y.; UMOH, J.; NIKOLOV, H. N. *et al.*, 2007, “A quality assurance phantom for the performance evaluation of volumetric micro-CT systems”, *Physics in Medicine and Biology*, v. 52, pp. 7087-7108.

ERSOY, O.; SEN, E.; AYDAR, E. *et al.*, 2010, “Surface area and volume measurements of volcanic ash particles using micro-computed tomography (micro-CT): A comparison with scanning electron microscope (SEM) stereoscopic imaging and geometric considerations”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 196, pp. 281-286.

FEI: VISUALIZATION SCIENCES GROUP – Avizo User's Guide, Version 9, 2015. Disponível em: <https://cpb-ap-southeast-2-1-juc1ugur1qwqqo4.stackpathdns.com/blogs.uwa.edu.au/dist/6/47/files/2015/12/AvizoUsersGuide-12f37oh.pdf> acessado em 18/12/2018 às 14:13.

FELDKAMP, L. A.; DAVIS, L. C.; KRESS, J. W., 1984, “Practical cone-beam algorithm”, *J. Opt. Soc. Am.*, v. 1, pp. 612-619.

GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K.; GROSO, A.; *et al.*, 2007, “3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography ( $\mu$ CT)”, *Cement and Concrete Research*, v. 37, pp. 360-368.

GILKEY, H. J., 1961, “Water-Cement ratio versus strength – another look”, *Journal of the American Concrete Institute*, pp. 1287-1312.

HAMAMATSU PHOTONICS. “Flat Panel Sensor Hamamatsu C7942SK – 05”. Hamamatsu, Japão: 2012b, pp. 1-6.

HENRY, M.; DARMA, I. S.; SUGIYAMA, T., 2014, “Analysis of the effect of heating and re-curing on the microstructure of high-strength concrete using X-ray CT”, *Construction and Building Materials*, v. 67, pp. 37-46.

- HOUNSFIELD, G. N., 1973, “Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system”, *British Journal of Radiology*, v. 46, pp. 1016-1022.
- KIM, K. Y.; YUN, T. S.; PARK, K. P., 2013, “Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperatures by X-ray computed tomography”, *Cement and Concrete Research*, v. 50, pp. 34-40.
- KNOLL, G. F., 2000. *Radiation Detection and Measurement*. 3 ed. New York, John Wiley & Sons.
- KORAT, L.; DUCMAN, V.; LEGAT, A.; *et al.*, 2013, “Characterisation of the pore-forming process in lightweight aggregate based on silica sludge by means of X-ray micro-tomography (micro-CT) and mercury intrusion porosimetry (MIP)”, *Ceramics International*, v. 39, pp. 6997-7005.
- KRUTH, J. P.; BARTSCHER, M.; CARMIGNATO, S.; *et al.*, 2011, “Computed tomography for dimensional metrology”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 60, pp. 821-842.
- LANDIS, E. N.; NAGY, E. N.; KEANE, D. T., 2003, “Microstructure and fracture in three dimensions”, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 70, pp. 911-925.
- LI, H; ZHANG, H; TANG, Z; *et al.*, 2008, “Micro-computed tomography for small animal imaging: technological details”, *Progress in Natural Science*, v.18, pp. 513-521.
- LIU, J.; LI, C.; LIU, J.; *et al.*, 2013, “Study on 3D spatial distribution of steels fibers in fiber reinforced cementitious composites through micro-CT technique”, *Construction and Building Materials*, v. 48, pp. 656-661.
- LORENZONI, R., 2017, *Uso da microtomografia computadorizada para avaliação de danos na microestrutura de pasta de cimento submetida a carregamento cíclico e a temperaturas elevadas*. Dissertação de M.Sc. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- LU, H.; PETERSON, K.; CHERNOLOZ, O., 2016, “Measurement of entrained air-void parameters in Portland cement concrete using micro X-ray computed tomography”, *International Journal of Pavement Engineering*, v. 19,2, pp. 109-121.

LYDZBA, D.; RAJCZAKOWSKA, M.; STEFANIUK, D., 2014, "Identification of the carbonation zone in concrete using X-ray microtomography", *Studia Geotechnica et Mechanica*, v. 36(1), pp. 47-54.

MACHADO, A., 2015, *Caracterização Geológica de Rochas Carbonáticas através da Técnica de Microtomografia Computadorizada de Raios X*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MACHADO, A.; MACHADO, A. C.; ALVES, H.; *et al.*, "Characterization and quantification of a microtomographic system". *International Symposium on Radiation Physics*, Rio de Janeiro, Brazil, October 2012

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M., 2006, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 3 ed., California, McGraw-Hill Companies.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. DESENVOLVIMENTO DE ESTUDOS PARA ELABORAÇÃO DO PLANO DUODECENAL (2010 - 2030) DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL. [s.l.] J.Mendo Consultoria, 2009. [http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22\\_RT30\\_Perfil\\_de\\_brita\\_para\\_construxo\\_civil.pdf/01c75ac7-eed2-4d85-a127-3eeddecb2a31](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construxo_civil.pdf/01c75ac7-eed2-4d85-a127-3eeddecb2a31) acessado em 14/08/2018 às 13:57.

NASCIMENTO, F. L. de A., 2019, *Análise da porosidade em concretos leves reforçados com fibras de piaçava utilizando técnicas de processamento de imagens em microtomografias de raios X*. Dissertação de M.Sc. Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, BA, Brasil.

NBR 7211:2009, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7211, "Agregados para concreto – Especificação", 2009.

NEVILLE A. M., 2011, *Properties of Concrete*, 5 ed., Edimburgo, Pearson Education Limited.

PESSÔA, J. R. C., 2011, *Microtomografia com raio-X e processamento de imagens na obtenção da porosidade do concreto*. Tese de D.Sc., Instituto Politécnico/UERJ, Nova Friburgo, RJ, Brasil.

PESSÔA, J. R. C.; DOMINGUEZ, D. S.; ASSIS, J. T. *et al.*, 2014, “Obtaining porosity of concrete using X-ray microtomography or digital scanner”, *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, v. 8, pp. 371-377.

PESSÔA, J. R. C.; DOMINGUEZ, D. S.; ASSIS, J. T. *et al.*, 2018, “Análise volumétrica da porosidade do concreto através de microtomografia computadorizada por transmissão de raios-X e processamento de imagens”, *Revista da Faculdade Cenecista de Rio das Ostras*, v. 3, pp. 13-25.

PROMENTILLA, M. A. B.; SUGIYAMA, T., “Studies on 3D micro-geometry and diffusion tortuosity of cement-based materials using X-ray microtomography”, *32nd Conference on Our World in Concrete & Structures*, Singapore, August 2007.

PROMENTILLA, M. A. B.; SUGIYAMA, T; HITOMI, T. *et al.*, 2009, “Quantification of tortuosity in hardened cement pastes using synchrotron-based X-ray computed microtomography”, *Cement and Concrete Research*, v. 39, pp. 548-557.

PROMENTILLA, M. A. B.; SUGIYAMA, T; SHIMURA, K., “Three dimensional characterization of air void system in cement-based materials”, *The 3<sup>rd</sup> ACF International Conference*, Vietnam, November 2008.

RADON, J., 1917, “Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten”, *Berichte der Sachsischen Akadamie der Wissenschaft*, v. 69, pp 262-277. Translation: Radon, J.; Parks, P. C. (translator), "On the determination of functions from their integral values along certain manifolds", *Transactions on Medical Imaging*, v. 5 (4), pp. 170-176.

RATTANASAK, U.; KENDALL, K., 2005, “Pore structure of cement/pozzolan composites by X-ray microtomography”, *Cement and Concrete Research*, v. 35, pp. 637-640.

RITMAN, E. L., 2011, “Current Status of Developments and Applications of Micro-CT”, *Annual Review of Biomedical Engineering*, v. 13, pp. 531-552.

RONTGEN, W. C., 1896, “A new kind of rays”, *Science* 3, v. 59, pp. 227-231.

SKYSCAN: Skyscan 1173 – CT-Analyser. Version 1.13. The User's Guide, 2013. Disponível em: [http://bruker-microct.com/next/CTan\\_UserManual.pdf](http://bruker-microct.com/next/CTan_UserManual.pdf) Acessado em: 18/12/2018 às 10:45.

SUGIYAMA, T.; PROMENTILLA, M. A. B.; HITOMI, T., *et al.*, 2010, “Application of synchrotron microtomography for pore structure characterization of deteriorated cementitious materials due to leaching”, *Cement and Concrete Research*, v. 40, pp. 1265-1270.

TELES, A. P.; LOPES, R. T.; LIMA, I., “Dual Energy Microtomography Applied to Oil and Gas Assessments”, *3rd International Multidisciplinary Microscopy and Microanalysis Congress*, Turkey, October 2015.

TSAFNAT, N.; TSAFNAT, G.; JONES, A. S., 2009, “Automated mineralogy using finite element analysis and X-ray microtomography”, *Minerals Engineering*, v. 22, pp. 149-155.

WANG, Z.; WANG, L.; SU, H.; *et al.*, 2011, “Optimization of Coarse Aggregate Content based on Efficacy Coefficient Method”, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, v. 26 (2), pp. 329:334.

WARD, M. A.; NEVILLE, A. M.; SINGH, S. P., 1969, “Creep of air-entrained concrete”, *Magazine of Concrete Research*, v. 21, pp. 205-210.

WILSON, R. E., 2015, *Estudo da porosidade por processamento de imagens aplicado a patologias do concreto*. Tese de D.Sc., Instituto Politécnico/UERJ, Nova Friburgo, RJ, Brasil.