

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ROBERTO MENDES

**A TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X COMO
MÉTODO NÃO DESTRUTIVO DE ANÁLISE VOLUMÉTRICA
DE CONCRETO: ESTUDO DE CASO EM TESTEMUNHO DE
CONCRETO DA USINA HIDROELÉTRICA MOURÃO**

**Curitiba
2010**

ROBERTO MENDES

**A TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X COMO MÉTODO
NÃO DESTRUTIVO DE ANÁLISE VOLUMÉTRICA DE CONCRETO: ESTUDO DE
CASO EM TESTEMUNHO DE CONCRETO DA USINA HIDROELÉTRICA
MOURÃO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Franke Portella

**Curitiba
2010**

DEDICATÓRIA

**Aos meus pais José e Maria
À minha irmã
À Keli, minha namorada
E a todos que de alguma forma
apoiaram a minha formação**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por dar forças nessa caminhada, mostrando que os obstáculos são difíceis, mas não impossíveis de serem superados.

Ao professor, Dr. Kleber Franke Portella, pela orientação, apoio, incentivos, confiança fornecidos durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais que me ajudaram a trilhar esse caminho. Mais que a vida, vocês me deram a oportunidade de conhecer o mundo. Através de seus cuidados, preces e carinho, sempre estiveram comigo nessa trajetória.

Ao professor, Dr. Vitoldo Swinka-Filho, pelo apoio, disponibilização do Laboratório de Tomografia para a realização das imagens tomográficas e participação na banca de qualificação.

À professora Neide Kazue Kuromoto pelas correções sugeridas durante a qualificação.

Aos membros da banca examinadora, meus agradecimentos pela inestimável colaboração para o aperfeiçoamento do conteúdo desta dissertação.

Ao Colega Walmor Cardoso Godoi pela ajuda com a instrumentação e reconstruções tomográficas, pelo incentivo e discussões em todo o desenvolvimento do trabalho. E aos estagiários do Laboratório de Tomografia, pela aquisição das imagens radiográficas.

Ao colega de laboratório Alex Joukoski, pela amizade, discussões técnicas e por suas importantíssimas colaborações ao conteúdo desta dissertação.

Ao estimado amigo e colega de estudo, José Carlos Alves Galvão, expresseo o meu agradecimento por ter-me incentivado e contribuído para a descoberta do gosto pela pesquisa e pelo companheirismo durante as viagens.

Ao técnico César Ricardo Hubsch pelo apoio na confecção das amostras e demais atividades no laboratório.

À Keli que ao meu lado foi a maior incentivadora para enfrentar essa jornada. Soube compreender minhas lamentações, angústias e por meio das suas palavras de carinho e apoio, deu-me forças para tornar os momentos mais difíceis desse trabalho os mais leves.

À minha irmã, pelo carinho e envio de arquivos de última hora.

Aos funcionários do PIPE que sempre se mostraram prestativos em minhas dúvidas e solicitações.

Ao meus grandes amigos: Cleiton e Rodrigo. Mais que amigos, são dois irmãos para mim.

Aos amigos Patrick, João e Rui que me acompanharam durante esta jornada e comigo estiveram grande parte do tempo.

Aos amigos e parentes que aqui não foram citados, mas que de alguma forma contribuía para execução.

A todos os professores que passaram pela minha vida estudantil

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) pela disponibilização de recursos e infra-estrutura.

À Universidade Federal do Paraná, mais especificamente ao PIPE, pelo fomento à educação e condução deste curso.

A todos aqueles que ajudaram, direta ou indiretamente, na elaboração deste trabalho, o meu muito obrigado.

RESUMO

Em geral, ensaios que verificam as propriedades do concreto no estado endurecido são de ordem destrutiva. Poucos ensaios com caráter não destrutivo são utilizados, além disso, a análise do material se torna mais difícil quanto maior o seu envelhecimento. A Tomografia Computadorizada de Raios X (TC) é uma das técnicas com grande tendência de aplicação como ensaio não destrutivo, depois de ser amplamente utilizada com sucesso na medicina. Essa técnica pode ser aplicada na caracterização de vários materiais, inclusive o concreto no estado endurecido, podendo ser analisados diversos parâmetros como a formação e a propagação de trincas, vazios, volume de agregados, argamassa e armaduras, além da identificação de possíveis corpos estranhos contidos no mesmo. Neste trabalho, apresentam-se os resultados do uso da TC para a localização de vazios e obtenção do volume de britas em ensaios de testemunhos de concreto retirados de usinas hidroelétricas (UHE). Para determinar a energia adequada no tubo de raios X para as amostras com espessuras conhecidas, obteve-se o coeficiente de atenuação linear médio μ da pasta de cimento e argamassa. As tomografias bidimensionais foram reconstruídas utilizando-se 180 radiografias digitais (projeções) adquiridas por um equipamento de radioscopia e também por um sistema de alta resolução. As tomografias 3D foram renderizadas utilizando-se fatias no formato *Bitmap* e a biblioteca *open source VTK* ("*Visualisation Toolkit*"), a partir dessa aplicou-se o algoritmo de "*Marching Cubes*", para a visualização volumétrica das amostras. Para o estudo da qualidade das imagens radiográficas em concreto desenvolveu-se uma avaliação da resolução de baixo contraste. Dois *phantoms* foram fabricados (um feito com pasta de cimento e outro com argamassa) para testar o sistema de medida de volumes nas amostras. Aplicações em amostras retiradas de barragens de usina hidrelétrica também foram realizadas.

Palavras-Chave: Tomografia Computadorizada, Radiografia Digital, Concreto, Marching Cubes, Ensaio não destrutivo.

ABSTRACT

In general, tests to analyze hardened concrete properties are destructive and very few tests are considered non-destructive. Moreover, as aged the material is more complicated is to test it. The Computed Tomography X-Ray analysis (CT) is becoming the most common technique to test materials once it has already been used as an important tool in medicine field. It can be applied to various materials including hardened concrete in which distinct parameters can be evaluated such as: cracks formation and propagation, aggregate volume, mortar and reinforced concrete besides crusted materials identification. In this research are presents the results of a methodology for obtaining the volume of crushed stones using industrial tomography in concrete cores from hydroelectric power plant dams. In order to apply the appropriate voltage in the X-ray tube during radiograph acquisition, the average linear attenuation coefficients (μ) of the cement paste and the mortar were determined. The two-dimensional tomographic images were reconstructed using 180 digital X-ray projections obtained by a computed tomography. The 3D tomography images were rendered using slices in the bitmap format and the VTK (Visualization Toolkit) open source library, and finally, the Marching Cubes algorithm was used for the volumetric visualisation of the data. The low contrast resolution was also evaluated. The methodology for volume determination was evaluated using two phantoms (one with cement paste and another with mortar).

Keywords: Computed tomography, Digital radiography, Concrete, Marching Cubes, Non-destructive test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	a) Poros na zona de transição do concreto (100x) (b) ampliação da região marcada com um círculo (400x).....	5
Figura 2.	Permeabilidade no vertedouro de uma barragem de UHE.....	9
Figura 3.	Rompimento da barragem da Pampulha em Belo Horizonte.	10
Figura 4.	Ensaio destrutivo de resistência em uma amostra de concreto.	11
Figura 5.	Esclerômetro de Reflexão. FONTE Mehta e Monteiro (2008).....	13
Figura 6.	(a) Equipamento penetrômetro Windsor composto pela pistola (1), pino (2), modelo de sonda simples (3) e escala calibrada de profundidade (4); (b) Execução do ensaio de resistência à penetração em uma amostra de concreto.....	15
Figura 7.	Gráfico da resistência a compressão em função do comprimento exposto do pino. FONTE Mehta e Monteiro (2008).....	16
Figura 8.	Teste de ultra som. FONTE Ferreira e Freire (2004)	17
Figura 9.	Equipamento usado para o ensaio de eco-impacto. FONTE Grabowski, Padaratz e Pinto (2008)	21
Figura 10.	Representação da forma de emissão acústica. FONTE Mehta e Monteiro (2008).....	22
Figura 11.	Ondas de emissão acústica, contínuas (a) e descontínuas (b). FONTE Mehta e Monteiro (2008).....	23
Figura 12.	Conexão dos eletrodos para medida de potencial de correção nas barras de aço do concreto.	25
Figura 13.	Visão geral do microscópio eletrônico de varredura (MEV).	26

Figura 14.	Equipamento de tomografia industrial. A amostra é posicionada sobre mesa giratória, entre o detector e a fonte de raios X.	30
Figura 15.	Imagem representativa dos efeitos da interação do feixe de raios X com a amostra.	31
Figura 16.	Espectro de radiação contínua em função da energia, com os respectivos raios X. FONTE Teixeira (2010)	32
Figura 17.	Tomografia de uma amostra de concreto de argila expandida que sofreu o efeito de “endurecimento do feixe”.	33
Figura 18.	Projeção de feixes de raios X, em paralelo. FONTE Mehta e Monteiro (2008).....	34
Figura 19.	Projeção de feixes de raios X, em forma de leque. FONTE Mehta e Monteiro (2008).....	34
Figura 20.	Esquema representativo da projeção em forma de cone. FONTE Piekarz (2006).....	35
Figura 21.	Reconstrução tomográfica com diferentes quantidades de projeções.....	36
Figura 22.	(a) Representação de uma imagem digital, (b) visualização dos elementos da imagem (pixels).....	39
Figura 23.	Representação matricial de uma imagem digital.....	39
Figura 24.	Possibilidades de conectividade dos “pixels” vizinhos ao “pixel” central i_0 . FONTE Albuquerque <i>et al.</i> (2004)	40
Figura 25.	Imagem monocromática com indicação das tonalidades de cinza de alguns “pixels”. FONTE Quiorin (2004).....	40
Figura 26.	Representação matricial de uma imagem com perspectiva tridimensional. FONTE Piekarz (2006).....	41

Figura 27.	Vizinhanças tridimensionais. (a) vizinhança 6 de um “voxel” (b) vizinhança 18 de um “voxel” (e) vizinhança 26 de um “voxel”. FONTE Piekarz (2006).....	41
Figura 28.	Aplicação dos filtros média e mediana. FONTE Quiorin (2004) 45	
Figura 29.	(a) Imagem fotográfica do “phantom” de pasta de cimento. (b) Imagem fotográfica do “phantom” de argamassa.	48
Figura 30.	(a) Extração do testemunho da barragem. (b) Esquema do testemunho com tamanho reduzido.	50
Figura 31.	Imagem fotográfica do testemunho de UHE Mourão.	50
Figura 32.	Imagem fotográfica da amostra de concreto leve.	51
Figura 33.	Imagem da amostra “phantom” em escada. (a) pasta de cimento e (b) argamassa.....	53
Figura 34.	Imagem do testemunho de UHE separado em agregado gráudo e argamassa.	54
Figura 35.	Radiografia digital do “phantom” na forma de “escada” (100 kV; 5,0 mAs). Fonte de raios X do sistema CT2000 e detector do sistema RDP.	56
Figura 36.	Gráfico utilizado para a determinação do coeficiente de atenuação linear médio da pasta de cimento.....	57
Figura 37.	Gráfico utilizado para a determinação do coeficiente de atenuação linear médio da argamassa.	57
Figura 38.	(a) Imagem fotográfica do phantom de pasta de cimento. Tomografia 2D do (b) topo, (c) centro e (d) base da amostra (75 kV, 1,0 mA, 3 s).....	60
Figura 39.	(a) Imagem fotográfica do phantom de argamassa. Tomografia 2D do (b) topo, (c) centro e (d) base da amostra (75 kV, 1,0 mA, 3 s).....	61

Figura 40.	Imagem radiográfica da amostra de concreto leve produzido em laboratório.	63
Figura 41.	Imagem 2D por TC da amostra de concreto leve feito em laboratório, (a) fatia próxima ao topo, (b) e (c) região central e (d) fatia próxima a base da amostra (512 x 512) “pixels”.	64
Figura 42.	Radiografias do testemunho de concreto extraído de UHE (a) 0°, (b) 45°, (c) 90° e (d) 180° (80 kV, 4 mA).	65
Figura 43.	Tomografia 2D (a) do topo, (b) e (c) da região central e (d) da base do testemunho. (178 x 178) “pixels”.	66
Figura 44.	Tomografia 3D da amostra ilustrada na Figura 39 (duas vistas). Algoritmo “marching cubes” com limiar para renderizar a interface ar e argamassa.	67
Figura 45.	Reconstrução da superfície do testemunho retirado da UHE Mourão.	68
Figura 46.	Reconstrução 3D da superfície do testemunho retirado da UHE Mourão em diferentes ângulos. Algoritmo “ <i>marching cubes</i> ”. Limiar escolhido para renderizar apenas a brita.	69
Figura 47.	Reconstrução 3D da superfície do testemunho retirado da UHE Mourão com ampliação de uma região.	70
Figura 48.	Gráfico da distribuição do volume de vazios da Figura 44.	71
Figura 49.	Gráfico da distribuição do volume de brita contida no testemunho da UHE Mourão.	72
Figura 50.	Tomografia 3D da região 5, com cálculo de volume.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Valores do potencial de corrosão do aço no concreto.....	24
Tabela 2.	Análise química do cimento CP II Z – 32.	48
Tabela 3.	Propriedades do agregado miúdo.	49
Tabela 4.	Valores do Coeficiente de Atenuação Linear. FONTE Andreucci (2010).....	59
Tabela 5.	Massa específica do testemunho de UHE, obtido analiticamente e via TC.....	73

LISTA DE SIGLAS

a/c	- relação água/cimento
ACI	- <i>American Concrete Institute</i>
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
CCD	- <i>Charge-Coupled Device</i>
CP	- Copo de Prova
CP II – Z	- cimento Portland composto com pozolana
CSH	- gel de silicato de cálcio hidratado
EA	- emissão acústica
EDS	- <i>Energy Energy Dispersive Dispersive Spectroscopy</i>
END	- Ensaios não destrutivos
ERE	- Elétrons retroespalhados
LacTec	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
MEV	- Microscopia eletrônica da varredura
MR	- Material de reparo
ONU	- Organização das Nações Unidas
PVC	- Cloreto de polivinila
PID	- Processamento de imagens digitais
RDP	- Sistema de Radiografia Digital Portátil
s/c	- Relação areia/cimento
TC	- Tomografia Computadorizada
UHE	- Usina Hidroelétrica
VTK	- <i>Visualisation Toolkit</i>
WDS	- <i>Wavelength Wavelength Dispersive Dispersive Spectroscopy</i>

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SIGLAS.....	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 Principal	2
1.1.2 Secundários	3
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 POROSIDADE NO CONCRETO	4
2.2 POROSIDADE E RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	5
2.3 POROSIDADE E DURABILIDADE	7
2.4 PERMEABILIDADE	8
2.5 BARRAGENS E ACIDENTES	10
2.6 ENSAIOS NO CONCRETO	11
2.6.1 Esclerômetro de Reflexão	13
2.6.2 Ensaio de resistência à penetração	15
2.6.3 Ensaio de velocidade de pulsos ultrassônicos	17
2.6.4 Método de impacto.....	19
2.6.5 Emissão acústica	22
2.7 MÉTODOS ELÉTRICOS	23
2.7.1 Métodos eletroquímicos	24
2.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	25
2.9 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA, TC	27

2.9.1	Tomografia computadorizada,TC, como END.....	28
2.9.2	Tomografia de raios X.....	29
2.9.3	A Tomografia Computadorizada e o Concreto	46
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	47
3.1	DOSAGENS E PREPARO DAS AMOSTRAS	47
3.2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TOMOGRAFIA	51
3.3	DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE AGREGADO DO CONCRETO DA UHE MOURÃO.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1	ESTUDO DO CONTRASTE DA IMAGEM EM RADIOGRAFIA E TOMOGRAFIA INDUSTRIAL A PARTIR DE AMOSTRAS DE CONCRETO	56
4.2	DETERMINAÇÃO DA RESOLUÇÃO DE BAIXO CONTRASTE.....	59
4.3	ESTUDO DA POTENCIALIDADE DO USO DA TOMOGRAFIA COMPUTACIONAL 2D E 3D EM AMOSTRAS DE CONCRETO	62
4.4	DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS E BRITAS	70
5	CONCLUSÃO.....	75
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
6	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

No Estado do Paraná, localizado na região Sul do Brasil, encontra-se grande parte do potencial energético de origem hidráulica do país. Com diversas usinas hidroelétricas em seus mananciais o estado tem grande parte da capacidade geradora do país. Muitas tecnologias referentes à construção de barragens foram e vêm sendo adotadas ao longo dos anos, destacando-se as de terra, enrocamento, concreto do tipo gravidade, até as mais recentes envolvendo o concreto compactado com rolo.¹

O concreto é o material mais aplicado nas estruturas hidráulicas. Porém, com o passar do tempo essas estruturas estão sujeitas a diversos tipos de degradações e, com isto, necessidades de inspeções e manutenções periódicas, além de possíveis reparos. Para a realização de reparos é necessário efetuar diversas análises prévias da estrutura para encontrar o Material de Reparo (MR), ideal e que apresente o melhor desempenho.²

Dentre as diferentes formas de análise do concreto endurecido, as técnicas de ensaios não destrutivos (END) vêm se destacando devido ao aprimoramento das técnicas utilizadas. São diversos os ENDs que possibilitam a detecção de falhas sem danificar o material.³

Após a identificação da grande eficiência da Tomografia Computadorizada (TC) de raios X na medicina, foram iniciados vários estudos com a finalidade de implementar a técnica no campo da indústria. Os primeiros testes realizados com sucesso foram feitos em materiais leves com um equipamento de raios X médico. O fato da possibilidade de visualização de materiais como madeira, polímero, cerâmica e objetos arqueológicos instigaram o estudo do desempenho da TC em materiais com maior atenuação como concreto, aço, ferro, latão e outros. A tecnologia de raios X possibilita o desenvolvimento de métodos de TC, mais rápida, não destrutiva e tridimensional para a análise de materiais.⁴

Mesmo com imagens de boa qualidade a interpretação das tomografias exige do inspetor boa experiência visual das imagens, além do conhecimento da técnica empregada. Também seria importante a aquisição das radiografias no local onde a estrutura está localizada, porém ainda não se dispõe de equipamentos que possam ser usados fora do laboratório.

Diante dos bons resultados apresentados no uso da TC em materiais da indústria, surge a possibilidade de aplicação dessa técnica na avaliação interna de amostras de concreto com longo tempo de vida útil para a visualização de vazios, como o tamanho médio, a disposição e volume total dos mesmos, sem a necessidade de danificar a amostra permitindo a realização do ensaio diversas vezes para o acompanhamento da degradação ao longo do tempo, ao contrário dos ensaios atualmente usados, nos quais as amostras são destruídas durante o ensaio como esta apresentado na Figura 4.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 *Principal*

Verificar a aplicação da técnica TC, como END, na avaliação do volume de testemunhos (que são amostras de concreto extraídas diretamente da estrutura, neste trabalho correspondem a barragens de hidroelétrica) incluindo a visualização de vazios, disposição do agregado graúdo em relação à argamassa e a identificação do volume de britas no interior das amostras de concreto. Como padrões de referência foram utilizados testemunhos de concreto da barragem de concreto, tipo gravidade, da UHE Mourão.

1.1.2 Secundários

Verificar a eficácia na fidelidade das imagens e comparar os resultados da técnica TC com o método tradicional, em corpos de prova (CPs) produzidos em laboratório com vazios especialmente elaborados em dimensões variadas e conhecidas.

Estudar o emprego da técnica de segmentação virtual em TC via processamento de imagens digitais, para a separação de diferentes agregados graúdos, vazios da argamassa ou outros defeitos volumétricos em testemunhos de concreto, extraídos da UHE Mourão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste tópico, estão abordados os parâmetros essenciais para melhorar a qualidade de uma imagem tomográfica por TC, correspondendo desde uma breve introdução aos principais defeitos e materiais encontrados em testemunhos de concreto extraídos de uma barragem sob envelhecimento natural (poros, agregados, vazios de exsudação devido a perda de água durante a cura), até o processamento das suas imagens, na qual se procura obter nuances de cinza bem definidos com exclusão de ruídos e outros efeitos de borda.

2.1 POROSIDADE NO CONCRETO

O volume de vazios é fator fundamental para a determinação das propriedades de dureza do concreto. Segundo Romano (2004)⁵, o concreto é um material poroso pela sua própria constituição, devido à impossibilidade de preencher todos os vazios do agregado com a pasta de cimento, por várias razões, entre elas, a necessidade de utilizar uma quantidade de água maior que a necessária para hidratar o aglomerante. Esta água excedente deixa vazios ao evaporar, ou seja, pastas de cimento com a mesma hidratação apresentam permeabilidade menor quando o teor de cimento é maior, isto é, quanto menor a relação água/cimento (a/c). A junção desses vazios forma caminhos tornando o concreto permeável à água.

A permeabilidade é uma das principais propriedades analisadas em concreto de barragens, por tender a uma menor resistência química às águas ionicamente agressivas.⁵

A existência de vazios (Figura 1(a)(b)) em uma estrutura de concreto reduz, também, a resistência da estrutura, sendo que 5% de vazios podem gerar uma redução de resistência da amostra de até 30%.⁶ Estes vazios são provenientes de

bolhas de ar aprisionadas ou espaços anteriormente ocupados pelo excesso de água, onde o volume de água depende diretamente da relação água/cimento da mistura. A armadura e algumas partículas do agregado também podem influenciar no aprisionamento de água. Para a redução do volume total de bolhas de ar e de espaço com água, é necessário identificar o teor ótimo de água de acordo com cada tipo de adensamento, pois é mais fácil expelir as bolhas de ar de uma mistura mais molhada do que uma mais seca, deste modo é possível alcançar a máxima massa específica relativa do concreto.⁶

Devido à grande influência dos vazios na resistência do concreto torna-se necessário o diagnóstico do volume de vazios em estruturas já prontas, de forma não destrutiva.

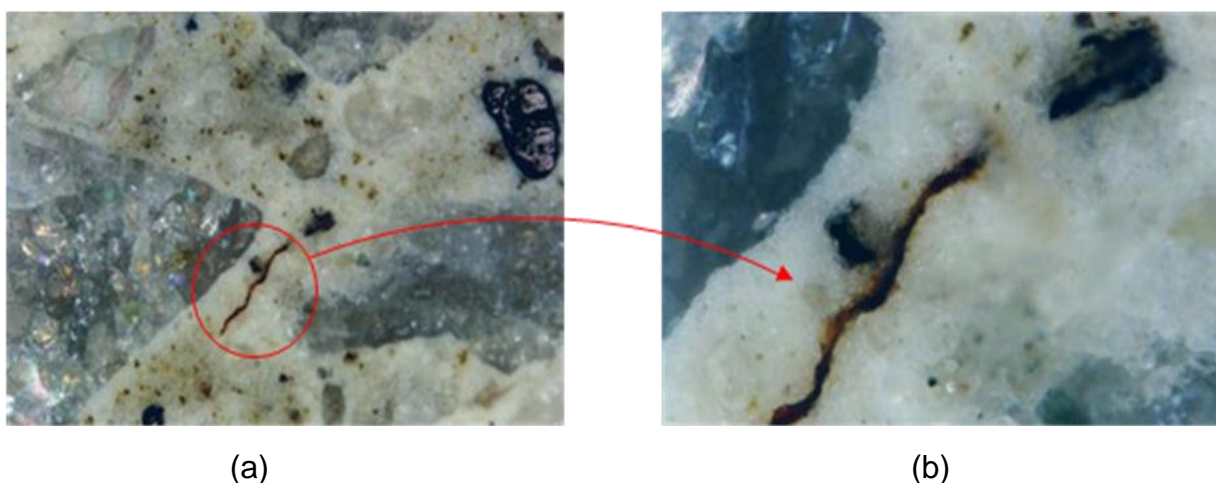


Figura 1. a) Poros na zona de transição do concreto (100x) (b) ampliação da região marcada com um círculo (400x).

2.2 POROSIDADE E RESISTÊNCIA MECÂNICA

A resistência dos materiais é relacionada com a capacidade que estes têm de suportar a tensão sem se romper. Em alguns casos a ruptura é identificada pelo surgimento de microfissuras, porém, o concreto comum apresenta várias fissuras finas mesmo antes de estar submetido a qualquer tipo de tensão. Portanto, no concreto, a resistência é definida como a tensão necessária para que ocorra a

ruptura, sendo então a tensão máxima que a estrutura suporta. Para o ensaio de tração, o CP é considerado rompido quando ocorre a ruptura externa aparente. Já, no ensaio de compressão não é necessário acontecer a fratura externa, pois a fissuras internas atingem um ponto em que o CP não suporta mais carga.⁷

A resistência do concreto é normalmente relacionada às dimensões da estrutura, logo, é diretamente associada à segurança estrutural. A resistência é uma das propriedades mais importante e que melhor qualifica o concreto.^{6,8,9} No projeto de uma estrutura, a resistência necessária para tal situação é determinada, porém, na execução da obra, ela fica sujeita a variações aleatórias, impossibilitando a previsão de um resultado final. Diversos fatores podem influenciar na resistência de uma estrutura de concreto como a heterogeneidade dos materiais, teor de cimento, fator água-cimento, transporte, grau de compactação, presença de vazios, massa específica e idade.^{6,8,9}

Outras características do concreto, como o módulo de elasticidade, estanqueidade ou impermeabilidade, e resistência a intempéries, incluindo águas agressivas, estão relacionadas com a resistência. O concreto se destaca pela sua resistência à compressão, sendo muito maior que a resistência à tração. Assim, as estruturas de concreto são projetadas para receber grandes cargas de compressão, apesar de, na prática, estas receberem tensões de compressão, de cisalhamento e de tração em várias direções.⁶

O valor da resistência do concreto é obtido por meio de ensaios destrutivos de compressão axial, a partir desse valor é verificado se corresponde ao projeto, então fixa-se o valor de segurança. Esse valor deve ser definido com a finalidade de permitir uma boa comunicação entre as etapas do projeto e execução da obra.⁷ Para isso, é necessário manter o CP em condições iguais à do concreto estrutural, porém, essa igualdade não é possível devido a diferenças de geometria, de acabamento, de adensamento, etc.⁶

2.3 POROSIDADE E DURABILIDADE

Um concreto bem preparado, com dosagem adequada aos materiais utilizados e curado, geralmente é durável, mas pode deteriorar muito antes do prazo previsto. Essa deterioração, em grande parte dos casos, está relacionada com o volume de vazios no interior do concreto.

Em muitos casos a durabilidade está relacionada a um tempo de vida útil relativamente longo. Um material pode ser durável a certo grupo de condições adversas, porém não a outro, então, para o estudo da durabilidade, adota-se, em geral, o meio ambiente como referência. Em relação ao concreto de cimento Portland a durabilidade é definida, pelo *ACI Committee 201*, como a capacidade de resistir ao ataque químico, abrasão, ação de intempéries ou a qualquer outro tipo de deterioração.⁷ Ou seja, uma estrutura de concreto é considerada durável quando preservar a sua forma, qualidade e capacidade de uso a qual foi projetada, em situação de exposição ao ambiente. Porém, o concreto, como qualquer outro material, não é totalmente durável, devido a interações ambientais com a microestrutura, causando alterações em suas propriedades com o tempo. Uma estrutura de concreto atinge o fim de sua vida útil quando as propriedades alteram de tal forma que o seu uso passa a ser economicamente inviável e insegura.⁷

Além da segurança e da situação econômica, outros fatores colocam a durabilidade como item de grande importância para uma estrutura, assim como, as propriedades mecânicas e o custo inicial. Atualmente, a durabilidade de materiais também é associada à ecologia, pois estruturas duradouras exigem menos recursos naturais ou, ainda, os custos sociais e ecológicos podem ser altíssimos em casos de falhas não esperadas, como já ocorridas em plataformas marítimas de aço.⁷ Por razões como essas, é que o concreto vem sendo muito utilizado em situações agressivas ambientalmente.

A água é um elemento fundamental na hidratação do concreto fresco, mas também, é o fator central que desencadeia seus diversos tipos de deterioração no estado seco, afetando diretamente a sua durabilidade. Em sólidos porosos como o concreto a água é responsável por diversos processos físicos da degradação. Assim como no transporte de íons agressivos, a água é fundamental para os processos químicos de degradação. Outro fator de deterioração é a permeabilidade, pela qual ocorrem os fenômenos físico-químicos resultantes do transporte de água em sólidos porosos. Ou seja, a taxa de deterioração depende diretamente do local onde o ataque químico está ocorrendo, se é apenas na superfície ou no interior da estrutura. Além do tipo de concentração de íons existentes na água, a taxa de deterioração é apurada pela composição química do sólido. Como o concreto é uma rocha artificial, em que os compostos de cálcio da hidratação do cimento são alcalinos, então o concreto é um sólido extremamente alcalino. Isso o torna vulnerável ao ataque de águas ácidas.⁷

Em casos reais é muito raro encontrar uma situação em que uma estrutura de concreto tenha sido deteriorada por apenas uma causa. Em muitos dos casos, onde o estágio de deterioração está muito adiantado, existem mais de um fenômeno deletério agindo. Nestas situações as causas físicas e químicas estão relacionadas de uma forma que estas se reforçam e separar as causas dos efeitos se torna inviável.⁷

2.4 PERMEABILIDADE

A água é um elemento fundamental para o concreto devido a sua importância na hidratação do cimento e na função de agente facilitador da mistura dos componentes do concreto. Em certas condições ambientais e de acordo com as dimensões do concreto, grande parte da água evapora deixando poros vazios ou não saturados. Uma estrutura de concreto, que apresenta pouca água evaporável ou

quando exposto ao ambiente não causa a re-saturação dos poros, não estará vulnerável aos fenômenos agressivos relacionados à água, que pode ser congelada ou se movimentar pelo interior da estrutura. A re-saturação é influenciada principalmente pelo *coeficiente de permeabilidade (K)*, ou apenas *permeabilidade*.⁷

A utilização de partículas de agregado com baixa permeabilidade, em pastas de cimento que apresentam alta permeabilidade, tem a finalidade de reduzir a permeabilidade do sistema, pois se espera que estas partículas bloqueiem os canais de fluxo na matriz da pasta de cimento. Então, quando é comparada uma pasta de cimento pura com um concreto, deveria apresentar menor permeabilidade. Porém, não é isso que ocorre na prática, segundo Mehta & Monteiro (2008), em que a integração do agregado com a pasta de cimento aumenta a permeabilidade do sistema. Isso ocorre devido às microfissuras localizadas na zona de transição na interface entre o agregado e a pasta de cimento. Na hidratação, a zona de transição fica vulnerável aos esforços que ocorrem entre a pasta de cimento e o agregado, decorrentes da retração por secagem, pela retração térmica e por cargas aplicadas externamente. Essas microfissuras acabam ocasionando intercomunicações no interior do concreto (Figura 2), resultando no aumento da permeabilidade.⁷



Figura 2. Permeabilidade no vertedouro de uma barragem de UHE.

2.5 BARRAGENS E ACIDENTES

Estima-se que cerca de 80 milhões de pessoas no mundo todo já foram vítimas, de forma direta ou indireta da construção e de acidentes ocasionados por rompimentos em barragens, de acordo com relatório da Comissão Mundial de Barragens, órgão ligado a Organização das Nações Unidas (ONU). As espécies da fauna e da flora, além de recursos hídricos, também já foram comprometidas pelo mesmo motivo.¹⁰

O mau dimensionamento na fase inicial de seu planejamento, construção e a falta de manutenção e monitoramento com equipamentos de alta precisão são as principais causas que comprometem a segurança desses empreendimentos. De fato, por acumularem um grande volume de água e, eventualmente, líquidos ou misturas de líquidos e sólidos, as obras de barragens são empreendimentos de alto risco. Qualquer falha na estrutura pode ocasionar liberação do volume acumulado (Figura 3) com uma energia impressionante, atingindo o ambiente e ocasionando mortes e devastação.¹⁰



Figura 3. Rompimento da barragem da Pampulha em Belo Horizonte.¹

¹ Fonte: <http://belo-horizonte.fotoblog.uol.com.br/>

2.6 ENSAIOS NO CONCRETO

Uma parte considerável do orçamento da construção civil é gasto com a restauração, reparo e manutenção de estruturas, segundo a revista Construção São Paulo, a estimativa de gastos com reparos foram superiores a 100 bilhões de dólares até o ano 2000¹¹. O grande impacto econômico perante uma ampla recuperação de estruturas vem despertando o interesse para desenvolvimento e aperfeiçoamento de ensaios, para avaliar estruturas de concreto.⁷

Ensaio realizados em concreto devem ser feitos em condições específicas ou conhecidas, para tanto, existem diversos métodos e técnicas utilizados. Muitas vezes, estes métodos influenciam as propriedades do concreto e para minimizar esses efeitos é necessário conhecer as diferenças entre as alterações causadas pelo ensaio das diferenças próprias da amostra ensaiada. Dentre as diversas finalidades destes testes destacam-se para este trabalho o controle de qualidade e a identificação de falhas em amostras de concreto. Em geral, os ensaios são classificados em determinações mecânicas destrutivas (Figura 4) e determinações não destrutivas que têm a conveniência de possibilitar que em um CP possam ser feitos repetidos ensaios, analisando assim a variação das propriedades em função do tempo ou, até mesmo, a realização de ensaios na própria estrutura.⁶



Figura 4. Ensaio destrutivo de resistência em uma amostra de concreto.

Muitos dos ensaios que visam analisar o desempenho de estruturas de concreto apresentam a desvantagem de serem feitos normalmente por métodos destrutivos, tais como a caracterização mecânica por resistência à compressão, resistência à tração e módulo elástico, cujos CPs são destruídos sem deixar quaisquer evidências da natureza da fratura e de sua origem, ou devido a eles não representarem de maneira real o concreto existente na estrutura. A falta de relação entre o material ensaiado e o da estrutura ocasiona a necessidade de se avaliá-lo “in situ” desde a cura e ao longo de sua vida útil, seja por motivos das etapas construtivas ou para avaliar a necessidade de se efetuar reparos.^{6,12}

A grande maioria dos ensaios realizados necessita de CPs especiais feitos em laboratório que não fornecem informações corretas da estrutura real, ou a retirada de testemunhos que podem causar danos a estrutura. Com o intuito de evitar estes problemas é possível recorrer aos ENDs, que também causam de alguma forma avarias à estrutura, mas que não prejudicam a aparência e o desempenho, tendo ainda a propriedade de que o ensaio possa ser repetido no mesmo local, possibilitando o acompanhamento das variações no decorrer do tempo. Os ENDs podem ser de avaliação da resistência do concreto ou para determinar vazios, escamas, fissuras e deterioração.⁶

Em relação a outros materiais o desenvolvimento de técnicas não destrutivas para ensaios em concreto está muito defasado. Quando as técnicas para a detecção de fissuras, falhas, imperfeições e danos são bem sucedidas em materiais homogêneos, tem grandes limitações quando aplicados ao concreto, devido à heterogeneidade desse material, ocasionando interferências como, atenuação, dispersão, refração e reflexão. Porém, grandes avanços na aquisição de dados computadorizados, no tratamento de imagens digitais e o desenvolvimento de teorias complexas para meios heterogêneos tem como resultado novos métodos que são satisfatórios quando testados em campo.

Atualmente, já se sabe da necessidade da execução de estruturas de concreto para maiores tempos de vida útil, e que na maioria dos casos esse tempo está relacionado à permeabilidade do material. Dentre os diversos meios de se determinar a permeabilidade e a absorção, somente alguns se adequam a aplicação em campo. Alguns dos principais ENDS utilizados na caracterização de materiais estarão listados na sequência.

2.6.1 Esclerômetro de Reflexão

O esclerômetro de reflexão (Figura 5) é um dos mais antigos entre os ENDS e ainda é utilizado com grande frequência. Esse ensaio está fundamentado no princípio da reflexão de uma massa elástica, em que a dureza da superfície está relacionada com o quanto essa massa será lançada novamente. No ensaio com o esclerômetro, uma massa adquire energia oriunda da compressão de uma mola, ao se pressionar um pistão contra a superfície a ser ensaiada.

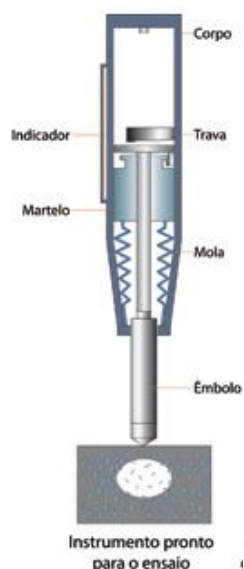


Figura 5. Esclerômetro de Reflexão. FONTE Mehta e Monteiro (2008)

Ao soltar a mola, a massa colide com o pistão e reflexiona, a distância percorrida durante o retorno da massa é considerada como o índice esclerométrico.

O valor referente a essa distância pode ser registrado de diversas maneiras, de acordo com o modelo do esclerômetro. Porém, o valor registrado é arbitrário, pois depende do tipo de mola utilizada e do valor da massa, além de que a superfície a ser aplicada deve ser lisa, ou então esmerilhada para que o resultado seja satisfatório.⁶

Diferentes localizações em uma mesma estrutura podem apresentar variações no índice, ou seja, uma partícula de agregado no ponto de verificação apresenta um índice muito alto. Já, em vazios, o resultado pode ser um índice muito baixo, para um mesmo concreto. Esse ensaio fica limitado à superfície do concreto, em profundidades de, aproximadamente, 30 mm. Porém, degradações como o grau de saturação superficial ou a carbonatação, tem grande influência apenas na superfície do concreto. Além de evitar o risco de se atingir um agregado ou um vazio que alteram o resultado obtido com o esclerômetro é necessário realizar o ensaio em diversos pontos, pois a dureza determinada pelo equipamento corresponde a uma região muito pequena. O ideal é que a distância entre um ponto e outro a ser ensaiado seja de, no mínimo, 10 cm.

Devido à característica comparativa desse ensaio, ele é utilizado para avaliar a uniformidade do concreto de uma estrutura ou para o controle de qualidade de artefatos pré-moldados. Porém, como o ensaio com o esclerômetro não é uma determinação de resistência, ele não deve substituir por completo o teste de compressão.⁶

Ensaio com o uso do esclerômetro foram realizados por Silva *et al.* (2008), em comparação com ensaios de resistência a compressão, para amostras feitas com várias relações a/c. Os ensaios foram realizados em CPs com diferentes tempos de cura que variam de 24 h a 28 dias, nos quais os resultados, tanto de resistência a compressão quanto do índice esclerométricos foram condizentes com o esperado, ou seja, foram maiores no decorrer das idades.¹³

2.6.2 Ensaio de resistência à penetração

Usado em geral para avaliar a resistência à compressão do concreto, esse ensaio é baseado na penetração de uma haste de aço, disparada contra a superfície da amostra, logo a resistência à compressão é inversamente proporcional a profundidade de penetração da haste. Na Figura 6 está apresentado um modelo de penetrômetro de Windsor composto pela pistola e pino. É convencional que a medida do pino padronizado fixado é feita na parte que fica exposta. O ensaio é realizado com três pinos onde a penetração corresponde ao valor médio dos mesmos e a região danificada deve ser reparada posteriormente.

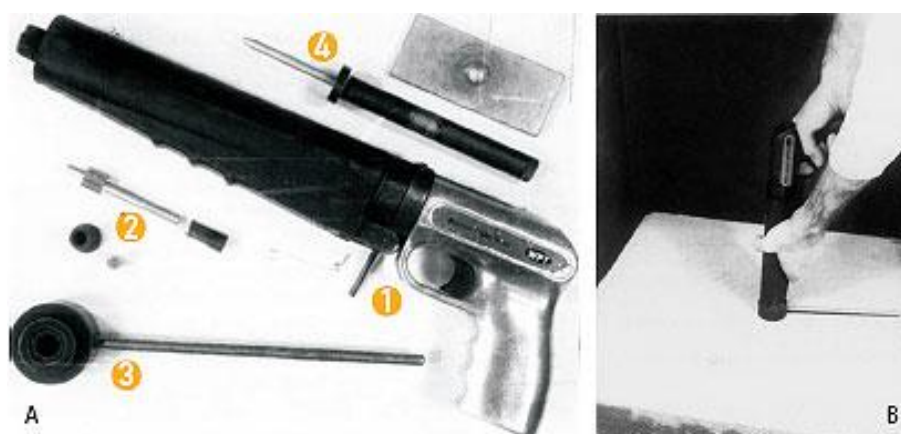


Figura 6. (a) Equipamento penetrômetro Windsor composto pela pistola (1), pino (2), modelo de sonda simples (3) e escala calibrada de profundidade (4); (b) Execução do ensaio de resistência à penetração em uma amostra de concreto.¹⁴

Da mesma forma que o esclerômetro, a relação entre a resistência e a penetração é afetada pelo tipo do agregado graúdo logo abaixo da superfície, pois eles são fraturados nesses ensaios, o que não acontece no ensaio de compressão, no entanto agregados mais moles possibilitam uma maior penetração, situação que não ocorre com o ensaio de resistência à compressão.

De acordo com alguns estudos,⁷ a relação entre a profundidade de penetração e a resistência deve ser determinada para cada tipo de concreto. Porém,

esse ensaio não permite a sua realização em dois locais próximos, devido ao enfraquecimento causado no CP durante a realização do ensaio. Para evitar danos permanentes à estrutura, o ensaio deve respeitar rigorosamente as especificações da norma ASTM C 803. Na Figura 7, encontra-se apresentado um gráfico comparando a resistência à compressão com a profundidade de penetração. Uma das grandes aplicações desse ensaio diz respeito à determinação do momento correto em que um artefato pode ser retirado da fôrma.⁷

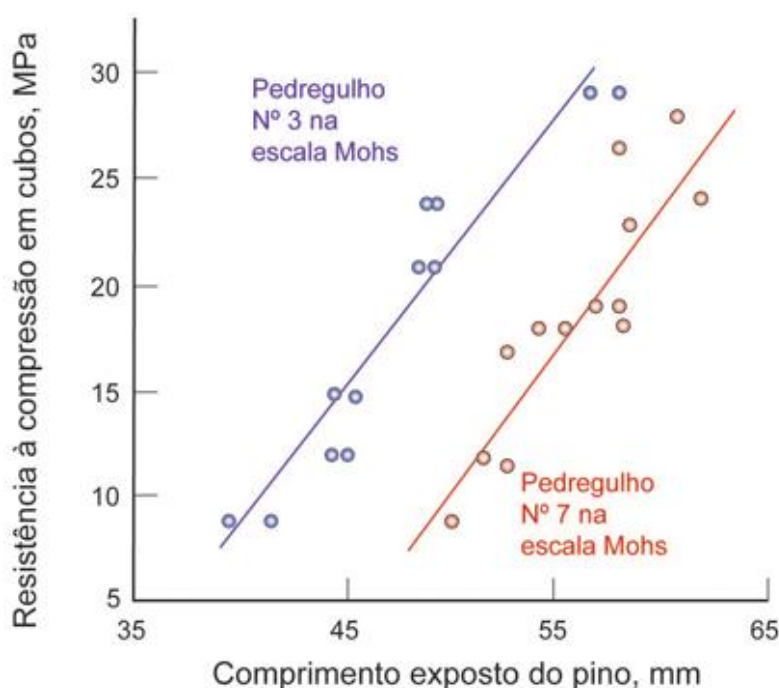


Figura 7. Gráfico da resistência a compressão em função do comprimento exposto do pino. FONTE Mehta e Monteiro (2008)

Silva *et al.* (2008) utilizaram o ensaio de penetração em comparação com o ensaio de resistência a compressão em amostras com diferentes relações a/c e em períodos de cura que variam de 24 h à 28 dias. Os resultados individuais dos ensaios de penetração de pinos realizados nos CPs prismáticos confirmaram as expectativas e com o aumento da resistência no decorrer das idades, os três traços apresentaram maiores comprimentos expostos de pino.”¹³

2.6.3 Ensaio de velocidade de pulsos ultrassônicos

Este ensaio é baseado no princípio de propagação de ondas longitudinais através do concreto, onde a medida do tempo de propagação de um pulso, pela amostra, permite determinar a velocidade das ondas pela amostra. Na Figura 8 é apresentado o equipamento composto por transdutores fixados no concreto, um gerador de frequência, na faixa de kHz, um amplificador e um circuito com a finalidade de medir o tempo que o pulso gasta para percorrer a distância entre os transdutores. Para a realização do ensaio é necessário seguir a norma ASTM C 597-83 (reaprovada em 1991).

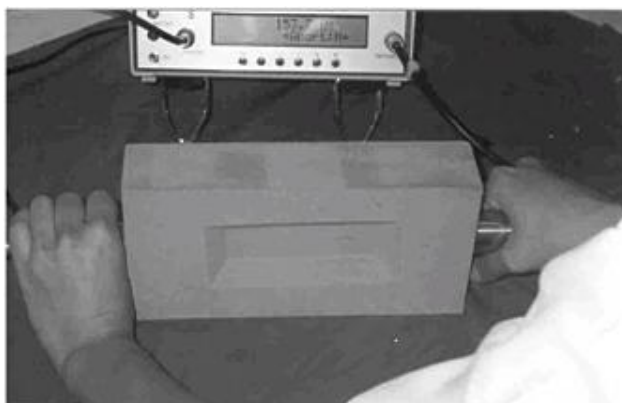


Figura 8. Teste de ultra som. FONTE Ferreira e Freire (2004)¹⁵

Segundo Neville (1997), a velocidade de onda, em um meio elástico, homogêneo e isotrópico pode ser relacionada ao módulo de elasticidade de acordo com a expressão:

$$V^2 = \frac{E_d(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad \text{Equação 1}$$

em que E_d é o módulo de elasticidade (Kg/ms^2), ρ corresponde a massa específica (kg/m^3) e μ é o coeficiente de Poisson.

Porém, o concreto não corresponde às características descritas anteriormente para o uso dessa expressão, logo, não se obtém um valor real para o módulo de elasticidade por meio da velocidade de pulsos. No entanto, alguns

autores relatam que para concretos de alta resistência a Equação 1 pode ser válida para o acompanhamento do módulo de elasticidade. Na grande maioria dos casos o coeficiente de Poisson não é apresentado com precisão e dentro da sua faixa de variação (0,16 a 0,25) o valor calculado tem uma variação relativamente pequena.⁶

Não existe nenhuma relação física entre a velocidade de pulsos e a resistência do concreto, mas, observando a Equação 1, é possível ver uma relação entre a velocidade de ondas ultrassônicas e a densidade do concreto. Como a densidade influencia diretamente na resistência então é válido o uso da velocidade de ondas ultrassônicas para avaliar a resistência do concreto, observando-se algumas limitações. É importante observar para esse ensaio que existe uma diferença considerável na velocidade de pulso para pasta de cimento endurecida, argamassa e concreto. Porém, a resistência do concreto não tem grandes variações nesses materiais.⁶

As condições de umidade da amostra no momento do ensaio afetam diretamente a velocidade dos pulsos pelo concreto, pois se deslocam mais rápido por vazios preenchidos com água do que em vazios preenchidos com ar. Porém, a resistência não se altera devido à umidade. Outros fatores que podem influenciar o valor da velocidade de pulso devem ser observados, como o caso de barras de aço da armadura, que com grande diâmetro e dispostas ao longo do trajeto dos pulsos ocasionam uma velocidade maior, fato que também não causa alteração na resistência do concreto.

Em geral, a influência da heterogeneidade do concreto é comum aos ENDS, porém, esses fatores não interferem da mesma forma a resistência do concreto. Respeitando suas limitações o ensaio de ultrassom é bastante conveniente para a averiguação de fissuras, perpendiculares à direção de propagação do pulso, identificação de vazios, deterioração de estruturas sujeitas a ação de congelamento e efeitos do fogo e, também, para o controle de qualidade de pré-moldados garantindo assim sua uniformidade. Por não causar nenhum tipo de dano à estrutura

é possível fazer um acompanhamento periódico em estruturas sujeitas a meios agressivos.⁶

No trabalho de Silva *et al.* (2008) o ensaio de velocidade de ondas ultrassônicas foi utilizado junto ao ensaio de resistência a compressão, para CPs com diferentes relações a/c e com períodos de cura também diferentes, que variam de 24 h à 28 dias. Os resultados apresentados por Silva (2008) mostraram que os valores de resistência a compressão e de velocidade de ondas ultrassônicas cresceram com o decorrer do tempo.¹³

Ferrari e Padaratz (2003) utilizaram o ensaio de velocidade de ondas ultrassônicas na detecção do início de fissuração em vigas de concreto armado e constataram que se utilizado corretamente, ou seja, os transdutores devem ser posicionados na mesma face lateral, onde apresentam melhor sensibilidade e as leituras devem ser realizadas de maneira contínua.¹⁶

2.6.4 Método de impacto

Esse é o tipo de ensaio mais antigo empregado ao concreto, pois é realizado aplicando-se golpes com um martelo na sua superfície, ouvindo-se o som emitido. Se for um tom de alta frequência então o concreto é sólido, mas se for um tom de baixa frequência existe alguma falha na estrutura. O método tem suas limitações, primeiro é necessário que o operador tenha habilidade com a técnica, mesmo assim não será possível repetir o ensaio com marteladas de mesma intensidade, além de não ser possível realizar a coleta de informação quantitativa. Para contornar essas limitações alguns métodos foram desenvolvidos, tanto para controlar a intensidade e a duração do impacto para garantir a reprodução do ensaio, quanto para caracterizar o deslocamento superficial, resultante do impacto.⁷

No momento do impacto ocorre a formação de ondas de compressão e cisalhamento esféricas em direção ao interior da amostra, enquanto as ondas

superficiais se espalham afastando-se do ponto de impacto. As ondas de compressão ou cisalhamento quando atingem as bordas da amostra ou alguma imperfeição, elas retornam a superfície. Com o auxílio de transdutores, as ondas que retornam são captadas permitindo a localização da interface refletora. Esse procedimento geralmente chamado de ecossônica ou ecossísmica vem sendo muito eficiente na análise da integridade de estacas, pois a sua forma geométrica possibilita uma diferença considerável no tempo de impacto e reflexão. O seu uso para detectar falhas em lajes e paredes se torna um tanto complicado, pois estas são estruturas muito delgadas. Para situações desse tipo é usado o método do eco-impacto, de acordo com a norma ASTM C 1383.

No ensaio de eco-impacto, as forças de impacto são oriundas de esferas de aço. É fundamental para o ensaio o uso de uma fonte confiável a qual aplicará a força que golpeia o concreto. Para estruturas longas existem diversos tipos de fontes, porém, para estruturas delgadas, o tempo de impacto deve ser reduzido para que seja possível perceber a diferença de ida e volta da onda longitudinal (P), que em estruturas desse tipo é muito curto. Segundo Mehta e Monteiro (2008) o uso de rolamentos apresenta bons resultados, no qual é possível conseguir pulsos de baixa frequência. Teorias a respeito do uso de esferas para golpear superfícies mostram que o tempo de contato é proporcional ao diâmetro da esfera. Sansalone¹ *apud* Mehta e Monteiro (2008), realizou ensaios com pequenos rolamentos de 4 mm a 15 mm de diâmetro e verificou que os mesmos resultaram impactos com o tempo de contato entre 15 μ s e 80 μ s.

A identificação da profundidade da interfase refletora (h) é feita pela análise de formas de ondas, de acordo com a frequência, com o uso da transformada de Fourier, na qual a profundidade da interfase é diretamente proporcional a velocidade

¹ SANSALONE, M., Impact-Echo: The Complete Story, *ACI Struc.*, v. 94, n. 6, pp. 777-786, 1997.

da onda P (V_P), e inversamente proporcional ao pico de frequência f , de acordo com a Equação 2.

$$h = \frac{V_P}{2f} \quad \text{Equação 2}$$

Para adquirir informações da superfície são utilizadas ondas de alta frequência com comprimento de onda curto, as quais não penetram com grande profundidade. Esse tipo de onda altera a velocidade quando se propaga em diferentes camadas da amostra, chamada de velocidade de fase. Para determinar a velocidade de fase é realizada a medida do tempo para que a onda percorra um espaço determinado por dois receptores.⁷

Grabowski, Padaratz e Pinto (2008), utilizaram o ensaio de eco-impacto (Figura 9) para a estimativa da espessura de placas de concreto, após a aplicação do método em três placas de concreto de diferentes dimensões e com a utilização de quatro impactores com diferentes diâmetros, a técnica apresentou-se muito eficaz além de que todos os impactores utilizados são confiáveis, com grande possibilidade de aplicação do método em campo, porém com atenção para os pontos de impacto com distâncias menores ou iguais a 10 cm das extremidades, as quais apresentaram valores pouco confiáveis.¹⁷



Figura 9. Equipamento usado para o ensaio de eco-impacto. FONTE Grabowski, Padaratz e Pinto (2008)

2.6.5 Emissão acústica

Quando um material se deforma ou mesmo se rompe, ele emite ruídos chamados de eventos de emissão acústica (EA). A captação desse ruído é obtida por um sensor que converte as vibrações em sinais elétricos, sendo transformado em um método não evasivo e não destrutivo de análise de materiais. Inicialmente, esse método era baseado na emissão de sons audíveis, mas a frequência dessas emissões podem chegar a MHz. Ao contrário do ultrassom em que uma fonte emite um sinal ao material que reflete para um receptor, na emissão acústica o sinal é emitido pelo próprio material (Figura 10). As ondas geradas pelo material podem ser longitudinais (P), de cisalhamento (S), ou então de superfície, refletidas, ou refratadas devido à formação ou propagação de microtrincas no concreto.

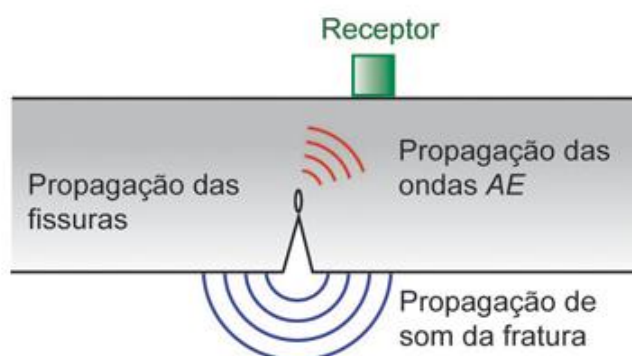
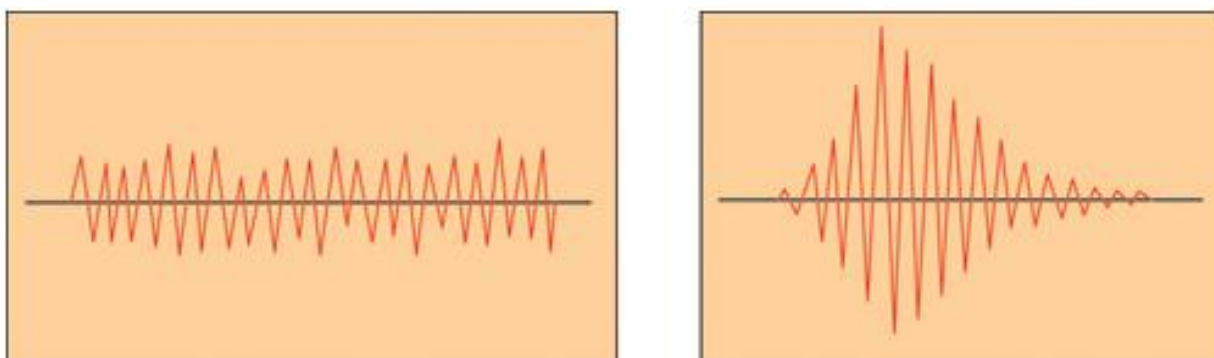


Figura 10. Representação da forma de emissão acústica. FONTE Mehta e Monteiro (2008)

As ondas provenientes da EA podem ser contínuas ou descontínuas. Em materiais de baixa atenuação como os metais, a amplitude das ondas se mantém constante. Em materiais com alta atenuação como é o caso do concreto a amplitude da onda é reduzida muito rapidamente, causando, assim, uma onda com aspecto descontínuo, conforme é apresentado na Figura 11.



(a)

(b)

Figura 11. Ondas de emissão acústica, contínuas (a) e descontínuas (b). FONTE Mehta e Monteiro (2008)

Essa técnica vem sendo muito eficiente na detecção de microfissuras descontínuas ou de fissuras contínuas, as quais são, geralmente, visíveis. Ainda é preciso realizar mais pesquisas com o uso da emissão acústica, porém, ela já é apresentada com bons resultados no estudo do processo de fraturas no concreto e para o acompanhamento de estruturas de concreto com a finalidade de manter a sua integridade.

2.7 MÉTODOS ELÉTRICOS

A corrosão em estruturas de concreto armado está diretamente relacionada à resistividade do concreto. Para diagnósticos externos a determinação da resistividade é feita pela medida de diferenças de potenciais na superfície da amostras geradas por uma corrente elétrica. As relações entre corrente, potencial e resistividade são extraídas pela lei de Ohm. O fluxo de corrente elétrica no concreto é um processo eletrolítico, logo, um aumento na atividade iônica resulta em uma resistividade baixa. Dessa forma, uma relação água cimento muito alta ou um alto grau de saturação e uma concentração de sais dissolvidos alta demais resultam em uma resistividade baixa, que não é favorável a estrutura.⁷

2.7.1 Métodos eletroquímicos

Este é um método que apresenta certa simplicidade em seu manuseio e baixo custo operacional, pois pode ser realizado com voltímetro de alta impedância e um eletrodo de referência padrão de cobre-sulfato de cobre, para a medida do potencial de corrosão nas barras de aço do concreto armado (Figura 12). Os valores medidos para o potencial de corrosão são comparados com valores tabelados de acordo com a norma ASTM C 876, que estabelece valores (Tabela 1) para identificar a probabilidade de corrosão da armadura.

Tabela 1. Valores do potencial de corrosão do aço no concreto.

Potencial medido (mV X CSE)	Probabilidade de corrosão
> - 200	Menos de 10% de probabilidade de corrosão
- 200 a - 350	Incerteza
< - 350	Mais de 90% de probabilidade de corrosão

FONTE : ASTM 876

O método de potencial de corrosão vem sendo amplamente utilizado para o planejamento de reparos e no monitoramento da proteção catódica. Porém, devem ser observados alguns detalhes que podem influenciar as medidas, como: grau de umidade do concreto, teor de oxigênio próximo da armadura, microfissuras e correntes parasitas.



Figura 12. Conexão dos eletrodos para medida de potencial de correção nas barras de aço do concreto.

2.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Tem-se no MEV (Figura 13) uma técnica apropriada para observar, analisar e explicar fenômenos que ocorrem em escala micrométrica, pois possibilita aumento muito superior ao microscópio óptico, podendo chegar a 900.000 vezes de acordo com o material, para a análise de materiais é utilizado um aumento da ordem 10.000 vezes. Nesta técnica a amostra a ser analisada é irradiada por um feixe de elétrons, como resultado dessa interação várias radiações são emitidas, como elétrons secundários (ES), elétrons retroespalhados (ERE), raios X característicos, elétrons Auger, etc. As radiações capturadas fornecem informações das características da amostra, como topografia da superfície, composição, etc.¹⁸

Quando os elétrons primários varrem a amostra os sinais se modificam em função de variações na superfície. As imagens de topografia da superfície da amostra são provenientes dos elétrons secundários obtendo imagens de alta resolução, quanto à imagem característica de variação de composição é feita por elétrons retroespalhados. A análise química da amostra fica por conta dos detectores de raios X característicos emitidos pela amostra, devido à interação dos

elétrons primários com a superfície, as informações obtidas podem ser qualitativas e quantitativas.¹⁸



Figura 13. Visão geral do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Os elétrons retroespalhados são provenientes de colisões elásticas e inelásticas, onde a mudança de direção é suficiente para ejetá-los da amostra. A energia dos ERE varia de 50 eV até a energia do elétron primário. A maioria dos sinais é proveniente do espalhamento elástico com energia próxima a dos elétrons primários, já, os EREs de alta energia, resultam de uma colisão elástica e são provenientes da camada superficial da amostra. Os sinais resultantes de interações que acontecem no interior da amostra geram imagens com menor resolução que a imagem correspondente dos ES. Mas a resolução também depende do material da amostra, ou seja, quanto maior o Z do material, maior a resolução.¹⁸

A microanálise é um instrumento para a análise química de materiais orgânicos e inorgânicos, pela identificação dos raios X emitidos pela amostra, é possível fazer a análise de regiões de até 1 μm de diâmetro. A detecção dos raios X pode ser feita pela medida da energia (EDS) ou pelo comprimento de onda (WDS). A microanálise é uma ferramenta muito importante para a análise de amostras de concreto, pois com ela é possível obter um mapa composicional da região observada. Os raios X gerados na interação do feixe com a amostra são de duas formas, raios X contínuos e raios X característicos.¹⁸

Na radiação contínua quando um elétron com determinada energia é desacelerado na interação com a amostra a energia perdida aparece na forma de radiação como um fóton de raios X.

Para a radiação característica o elétron do feixe incidente interage com os elétrons das camadas mais internas ocasionando a ejeção do mesmo e deixando uma vacância na camada, sendo esta diferença de energia, na transição entre as camadas, característica de cada átomo sendo liberada de duas formas: processo Auger, sendo uma transição não radioativa causando a emissão de um elétron com energia cinética específica, no processo de raios X característicos, a transição é radioativa e a diferença de energia surge como um fóton de radiação eletromagnética com energia altamente específica. A energia do fóton de raios X é específica de cada elemento e contém as informações sobre a composição química de cada espécie, onde a radiação característica fornece informações sobre a composição da amostra.¹⁸

No trabalho de Freitas et. al (2009) o MEV foi usado na análise micrográfica da superfície de fraturas de CPs extraídos de UHE, na qual foi identificada a presença de cristais de etringita, tanto nas micrografias quanto na análise por EDS.¹⁹

2.9 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA, TC

Pela TC são obtidas imagens do interior de um objeto resultante de um conjunto de fatias. A origem do nome, da palavra grega *tomos* significa fatia e *graphein* → grafia. Logo, a tomografia é uma técnica de análise interna não evasiva, pois não há necessidade de abrir o objeto a ser estudado.

A visualização interna de uma amostra de concreto por tomografia é importante para a análise de imperfeições, fissuras, falta de homogeneidade e anisotropias.

Existem novas técnicas em desenvolvimento, muito promissoras, para avaliar internamente estruturas de concreto:⁷

- tomografia computadorizada com raios X;
- tomografia computadorizada com raios γ ;
- tomografia por impedância elétrica;
- técnica de imagem por retroespalhamento de microondas;
- tomografia por meio de emissão única de fóton;
- tomografia por meio de emissão de pósitron.

Neste trabalho, está sendo analisada a tomografia computadorizada por raios X em amostras de concreto. Esta, se baseia no princípio de atenuação de um feixe de raios X que atravessa a amostra em cada projeção. Após a reconstrução, o resultado corresponde a uma imagem bidimensional (2D) de uma determinada secção transversal ou tridimensional (3D) de toda a amostra.

2.9.1 Tomografia computadorizada, TC, como END

A TC foi desenvolvida, originalmente, para produzir imagens de seções transversais do corpo humano mas, atualmente, sua aplicação na área de ENDS tem alcançado importante relevância. Por exemplo, a TC vem demonstrando ser em diversas áreas da Engenharia e Ciência dos Materiais uma poderosa ferramenta de análise e determinação do volume interno dos objetos, sem a necessidade de qualquer incursão em seu interior e com a vantagem de promover o registro gráfico das imagens 2D e 3D. Os métodos empregados pela TC têm sido usados, nos últimos anos, em diversas áreas, como em aplicações na determinação de volumes de defeitos em componentes elétricos,²⁰ na Ciência dos Solos, nos estudos sobre idade de árvores por meio da medição de seus anéis de crescimento ou na investigação de defeitos estruturais e outras heterogeneidades em amostras de concreto.²⁰ O uso da TC como ensaio não destrutivo em amostras de concreto tem a

desvantagem em relação a maioria dos ensaios de ter o custo mais elevado. O valor para a realização dos ensaios custam cerca de 2 mil Reais devido ao alto valor de aquisição do equipamento que varia de 100 mil Reais para um microtomógrafo, até 1 milhão de Reais para um equipamento que possa ser aplicado em amostras maiores, porém a qualidade das imagens geradas, a quantidade de informações que podem ser adquiridas do interior da amostra são muito importantes, visto que com estas informações serão realizados reparos adequados a estrutura podendo-se assim economizar muito mais com os reparos, além da prevenção de acidentes que podem afetar diretamente as pessoas e o ambiente.

Os outros métodos de END abordados neste trabalho são, também, eficazes, porém, não dão informação quanto ao tipo e ao tamanho do defeito interno, quando existente (um dos fatores está associado à resolução dos equipamentos). Outras técnicas, como a microscopia óptica, fornecem tais informações visuais, mas com pequena profundidade de foco, sendo direcionadas para a análise superficial e em CPs normalmente já fragmentados por outros testes experimentais.²¹

2.9.2 Tomografia de raios X

➤ **Princípio da técnica TC**

A inspeção tomográfica industrial difere um pouco da empregada em medicina, mas, o princípio matemático de reconstrução tomográfico, é o mesmo. Na tomografia industrial o ensaio, em geral, consiste em colocar o objeto a ser analisado entre uma fonte de raios X e um detector sobre uma mesa giratória (Figura 14). Para a formação das fatias tomográficas (tomografias 2D) é necessário realizar a aquisição de projeções, rotacionando o objeto a um dado ângulo. Para o leitor interessado em mais detalhes da tomografia industrial sugere-se a leitura do trabalho

de Godoi *et al.*, no qual é mostrado o princípio de reconstrução tomográfica industrial aplicado ao cálculo de volumes de defeitos em isoladores poliméricos.²⁰

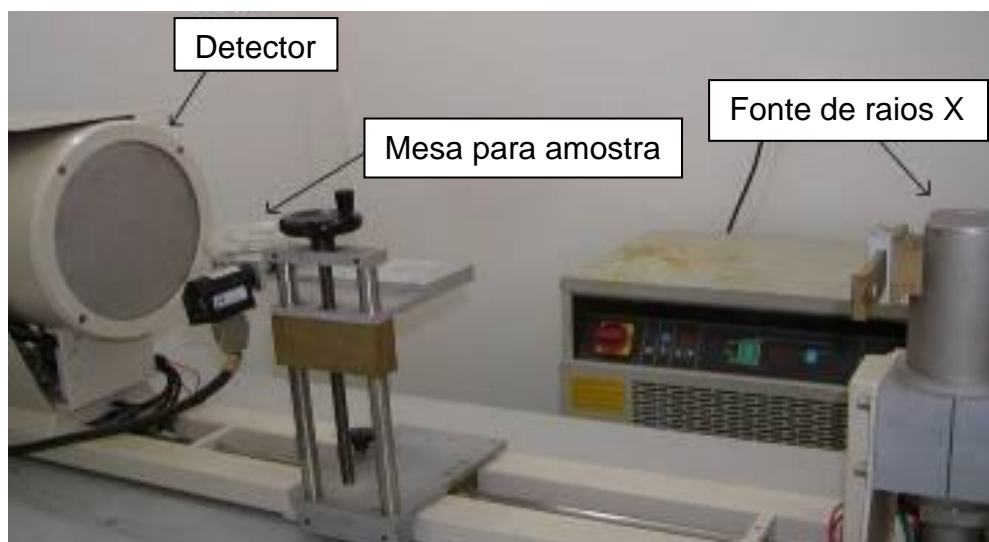


Figura 14. Equipamento de tomografia industrial. A amostra é posicionada sobre mesa giratória, entre o detector e a fonte de raios X.

A popularização e os benefícios da TC receberam contribuição significativa da computação gráfica e, particularmente, da visualização científica. Pelas técnicas oriundas da computação gráfica e do processamento de imagens, explora-se a análise visual e a investigação de dados decorrentes da natureza ou do processamento científico. Seu intuito maior é proporcionar recursos para o tratamento de grandes volumes de dados procurando organizá-los visualmente, de modo que o observador possa deles apreender informações científicas relevantes. Os problemas levantados vão desde a representação dos dados, normalmente complexos e volumosos, até os aspectos de interatividade entre o usuário e as imagens geradas. Hoje, a visualização científica tem aplicação em várias áreas, a saber: cartografia, geologia, bioquímica, meteorologia e medicina.²²

A visualização volumétrica é um conjunto de técnicas apropriadas para se representar em um plano de projeção bidimensional os dados provenientes de um espaço tridimensional. Tais técnicas auxiliam no entendimento de estruturas

pertinentes ao volume e, portanto, colaboram para a extração de informações significativas.²³

Scanners de TC são capazes de compor um volume, gerando uma série de imagens 2D oriundas de cortes transversais (fatias) feitos no objeto de interesse. Infelizmente, é difícil perceber com exatidão a estrutura tridimensional contida no interior de um volume pela simples observação de cada uma das fatias. Para se visualizar, efetivamente, um volume, é necessário imaginá-lo de diferentes pontos de observação e, também, sombreá-lo de modo a salientar suas superfícies e variações sutis de densidade ou opacidade.²⁴

➤ **Comportamento do feixe na amostra**

O comportamento de um feixe de raios X ao atravessar uma amostra é determinado pela lei de Beer-Lambert, de acordo com a Equação (3).

$$\int_0^L \mu(x,y) ds = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

Equação 3

Em que μ , corresponde ao coeficiente de atenuação da amostra em um determinado ponto de acordo com a energia do feixe; e I_0 é a intensidade do feixe de raios X que atinge a amostra, que após atravessá-la terá a intensidade I . Tal situação pode ser observada na Figura 15.

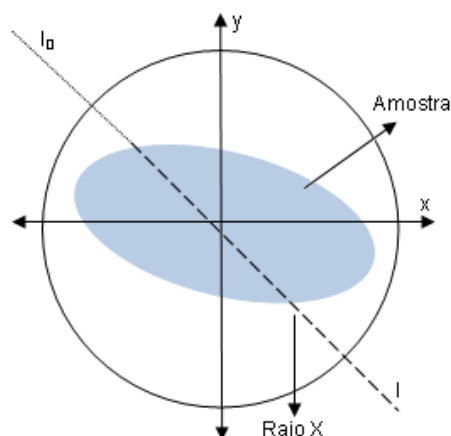


Figura 15. Imagem representativa dos efeitos da interação do feixe de raios X com a amostra.

Para a aplicação da lei de Beer-Lambert o feixe deve ser monocromático, devido à variação do índice de atenuação em função da energia. Em feixes compostos com diferentes energias, as radiografias resultantes apresentam distorções para amostras não homogêneas, como é o caso do concreto. As distorções ocasionam a formação de artefatos na reconstrução tomográfica, chamado de “endurecimento do feixe”.

Na interação de um elétron energético com o átomo do alvo um elétron é arrancado de camadas mais internas, então o nível fica com uma vacância. Logo um elétron mais externo se move para preencher a vacância, emitindo assim um fóton de raios X. O fóton é chamado de raios X característicos e em geral ocorrem devido às transições orbitais entre as camadas K, L e M. Se o elétron que preenche o buraco é oriundo do nível energético L, tem-se a linha $K\alpha$ e quando era do nível M, resulta a linha $K\beta$. Na Figura 16 é apresentado o espectro final da radiação, no qual é o conjunto da radiação contínua e de raios X característicos.²⁵

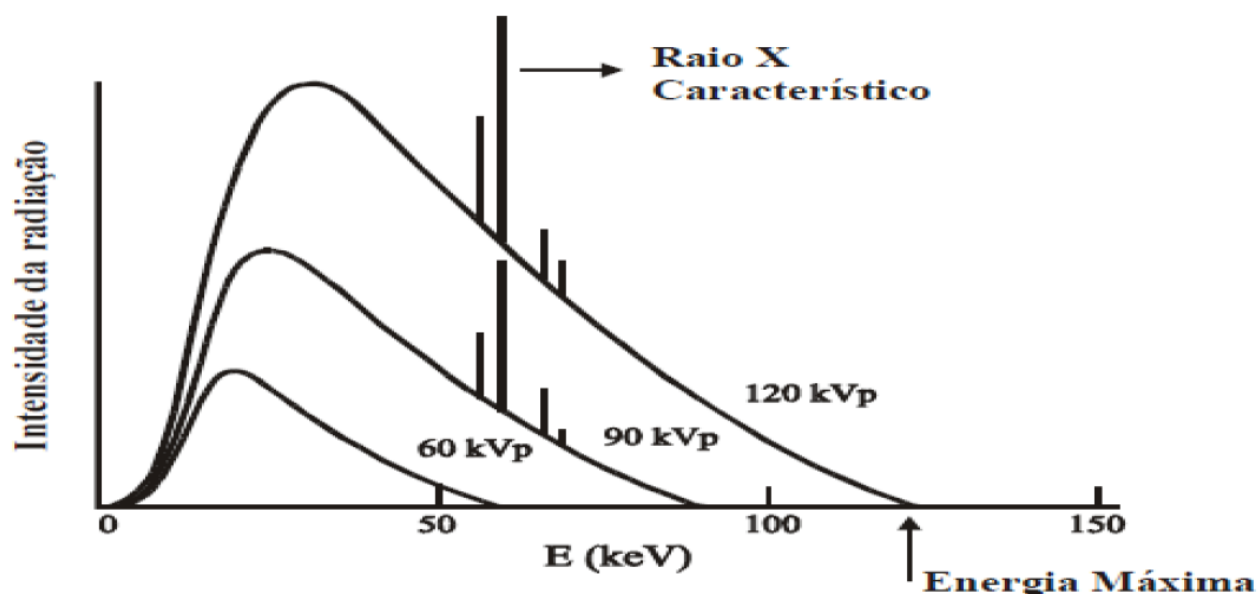


Figura 16. Espectro de radiação contínua em função da energia, com os respectivos raios X. FONTE Teixeira (2010)

Esse efeito pode ser observado na Figura 17, onde os feixes que apresentam baixa energia são absorvidos facilmente pelos elementos mais densos

da amostra, conseqüentemente, a intensidade do feixe é reduzida significativamente.²⁶ As falhas visíveis na imagem podem ser corrigidas durante o processamento da mesma.

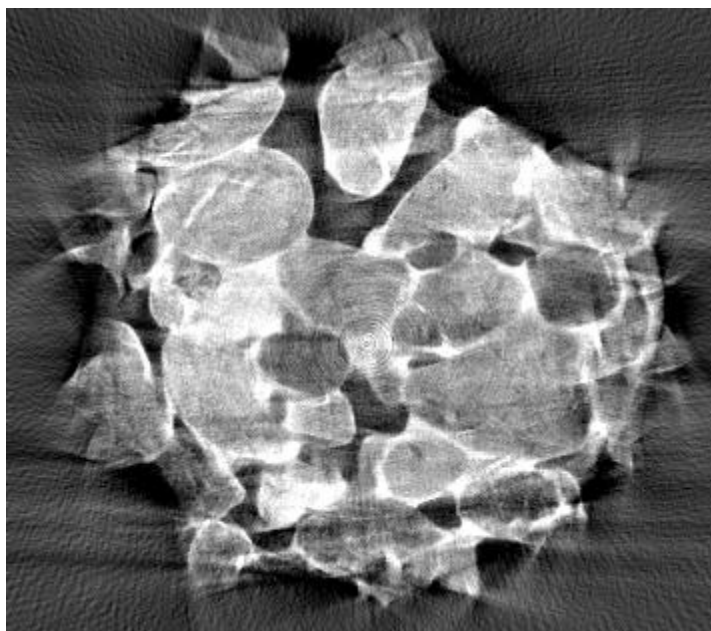


Figura 17. Tomografia de uma amostra de concreto de argila expandida que sofreu o efeito de “endurecimento do feixe”.

➤ **Projeções radiográficas**

A reconstrução da imagem na TC é feita com a utilização de projeções do objeto. A imagem formada do interior da amostra é o resultado da representação bidimensional do seu coeficiente de atenuação.

Existem basicamente três tipos de projeções do feixe de raios X: a geometria de raios paralelos; a geometria em forma de leque; e a geometria em forma de cone.

Na Figura 18, está apresentada a projeção de um feixe de raios X em paralelo, em que a fonte é deslocada linearmente ao longo da amostra. Tal projeção é pouco usada nos equipamentos de tomografia.

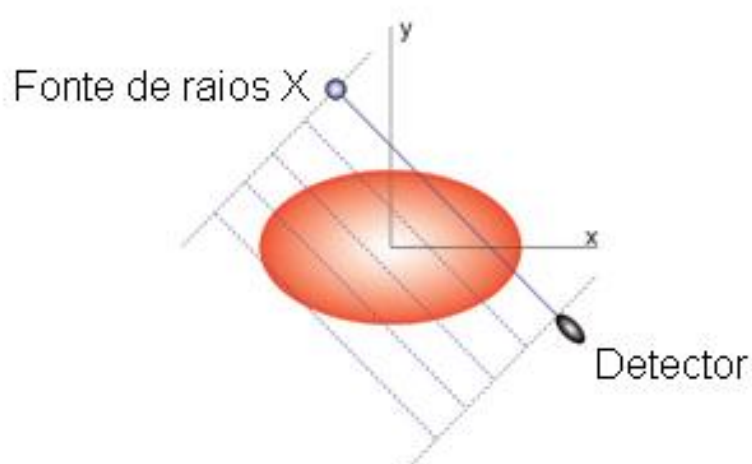


Figura 18. Projeção de feixes de raios X, em paralelo. FONTE Mehta e Monteiro (2008)

No caso da projeção em forma de leque, apresentada na Figura 19, o feixe tem origem em um único ponto, então é espalhado em forma de leque durante a projeção.

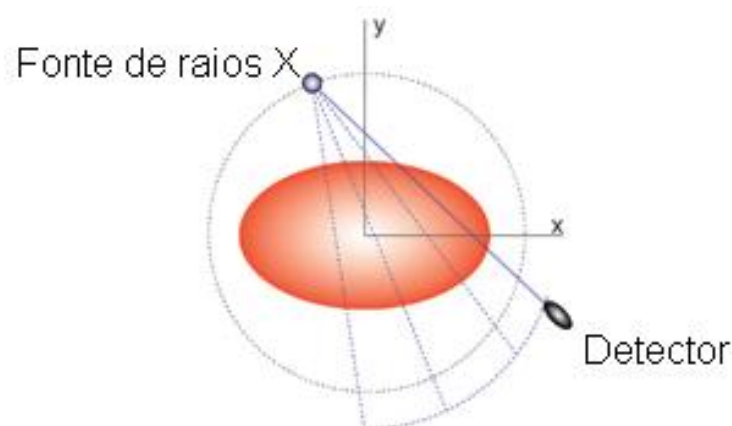


Figura 19. Projeção de feixes de raios X, em forma de leque. FONTE Mehta e Monteiro (2008)

Na projeção em forma de cone o feixe é oriundo de uma fonte pontual com a projeção em leque, porém, neste caso, há uma divergência tridimensional formando um cone, conforme está apresentado na Figura 20. Neste princípio de projeção, o detector usado deve ser plano, que corresponde ao equipamento usado nas projeções que seguem ao longo deste trabalho. Representando de outra maneira o equipamento usado, também pode ser chamado de “tomógrafo de terceira geração”.²⁶

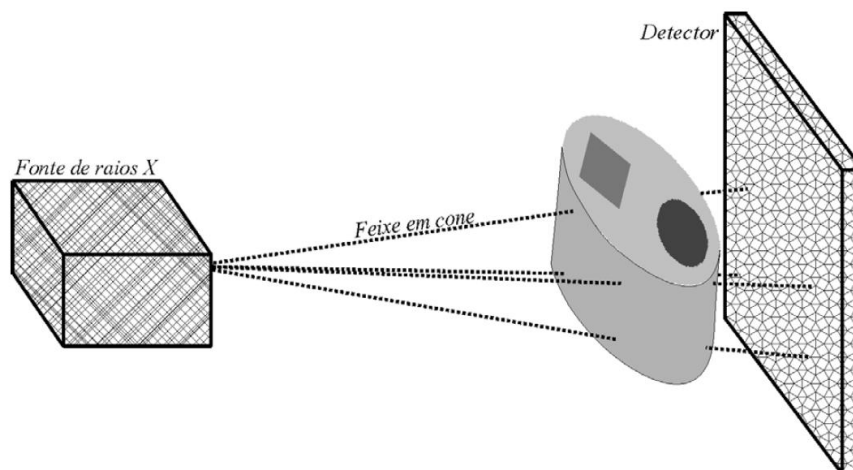


Figura 20. Esquema representativo da projeção em forma de cone. FONTE Piekarz (2006)

➤ **Retroprojeção**

A retroprojeção é uma técnica utilizada para fazer a reconstrução tomográfica que utiliza operador de retroprojeção. No processo de reconstrução é feita a integração de cada projeção por todo o caminho percorrido pelo feixe durante o processo de aquisição.²⁶ Na Figura 21 são apresentadas inicialmente 2 projeções formando um ângulo de 90° , em seguida com 4 projeções formando um ângulo 45° entre elas, até chegar a 64 projeções na qual é possível observar com clareza um objeto simples, porém é visível a necessidade de filtrar a imagem. Neste trabalho foram usadas 180 projeções devido a heterogeneidade do material de estudo.

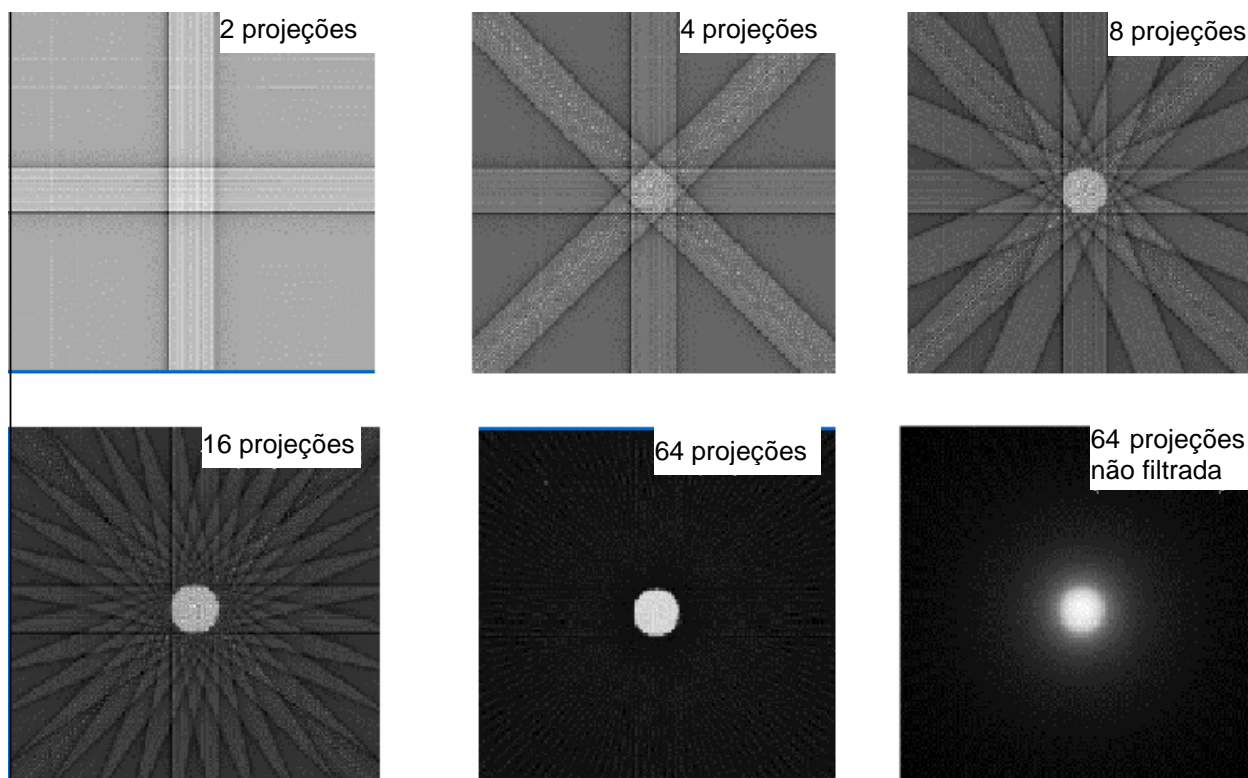


Figura 21. Reconstrução tomográfica com diferentes quantidades de projeções.¹

➤ **Modelamento de objetos em 3D ou “Rendering”**

“Rendering” é um modelo composto por superfícies delgadas suspensas em um ambiente transparente de ar expressando precisamente o volume original.²⁷ A técnica de visualização de volumes por meio de superfícies reduz os dados volumétricos aos limites existentes entre os materiais. As superfícies são representadas por meio de primitivas geométricas, como malhas poligonais ou linhas de contorno. As primitivas geralmente são iso-superfícies extraídas automaticamente do volume que podem ser exibidas por técnicas convencionais de computação gráfica. Exemplos de algoritmos que empregam esta abordagem são: conexão de contornos (“*contour connecting*”)²⁸ e cubos marchantes (“*marching cubes*”).^{20,28} Suas vantagens são a velocidade e o pouco espaço de armazenamento requerido.

¹ http://genex.hgu.mrc.ac.uk/OPT_Microscopy/optwebsite/how_it_works/hiwtheory.htm

O algoritmo “*marching cubes*”²⁸ requer a especificação de um limiar “*threshold*”, o qual indica um valor de densidade que restringe a região de interesse no volume. Tendo o valor de limiarização, as fatias 2D que compõem o volume são então processadas. Os “*pixels*” das fatias são considerados isoladamente. Oito deles formam um cubo, quatro de cada fatia adjacente. Posteriormente, os cubos são percorridos em seqüência para determinar a forma de intersecção da sua superfície, fato este que justifica o próprio nome, cubos marchantes.

Na seqüência, o valor de cada vértice é confrontado com o valor de limiar para ser classificado. Os vértices com valores superiores ao limiar são assinalados com um, aos inferiores é atribuído zero. A intersecção da superfície com o cubo ocorre nas arestas cujos vértices têm as marcas zero e um. Neste ponto, já é possível obter uma aproximação da superfície no seu interior. Como cada um dos oito vértices do cubo pode assumir dois valores (zero ou um), existem 256²⁹ casos possíveis de aproximações de superfície. Se os valores nos vértices forem invertidos, a intersecção da superfície com o cubo não se altera, diminuindo os casos possíveis em 50%. Por meio de simetrias, os 128 casos restantes podem ser reduzidos para 16 casos básicos. Se todos os vértices indicarem zero, a superfície não intercepta o cubo. No caso oposto, onde todos os vértices têm o número um, a superfície está contida dentro do objeto.²⁸

Neste trabalho, para a reconstrução das tomografias 3D foram utilizadas imagens das fatias bi-dimensionais adquiridas (formato *Bitmap*), aplicando-se o algoritmo de “*marching cubes*”²⁰ com a biblioteca “*Open Source VTK (Visualisation Toolkit)*” em linguagem Java, plataforma Linux 64 Bits.

➤ **Processamento de imagens digitais**

O processamento de imagens digitais (PID) tem como principais finalidades duas categorias, sendo, a primeira, para melhorar a interpretação humana da informação visual e, a segunda, o processamento de dados de imagens para a

detecção automática. Os primeiros processos de melhoria de qualidade de imagens digitais estavam relacionados apenas aos graus de brilho, diante do grande desenvolvimento do processamento de imagens, atualmente, essa técnica, é aplicada na solução de diversos problemas na ciência.³⁰

A aquisição da imagem digital pode ser realizada com o uso de diversos equipamentos, como: câmeras, equipamentos de radiografia, microscópios eletrônicos, magnéticos e de força atômica, radares, equipamentos de ultrassom, etc. As imagens são utilizadas nas mais diversas áreas de automação, como no reconhecimento de caracteres, inspeção de produtos, reconhecimento militar, processamento de impressões digitais, análise de imagens de raios X, imagens aéreas e de satélites.³⁰

➤ **Imagem digital**

Uma imagem digital monocromática corresponde a uma função bidimensional da intensidade de luz, ou seja, $f(x,y)$, em que x e y correspondem às coordenadas espaciais, no qual o valor de f de um ponto da imagem indica o seu brilho, logo, uma imagem digital corresponde a uma matriz na qual os índices de linhas e colunas fazem referência a um ponto da imagem e o valor do elemento da matriz indica a tonalidade de cinza do respectivo ponto. Esses elementos da matriz são chamados elementos da imagem, ou “pixels”.

Na Figura 22(a) está apresentada a representação de uma imagem digital com 256 tons de cinza, com os eixos de representação de imagens digitais. Na Figura 22(b) está apresentada uma projeção da imagem mostrada na Figura 22(a), na qual é possível visualizar os elementos de imagem (*pixels*).

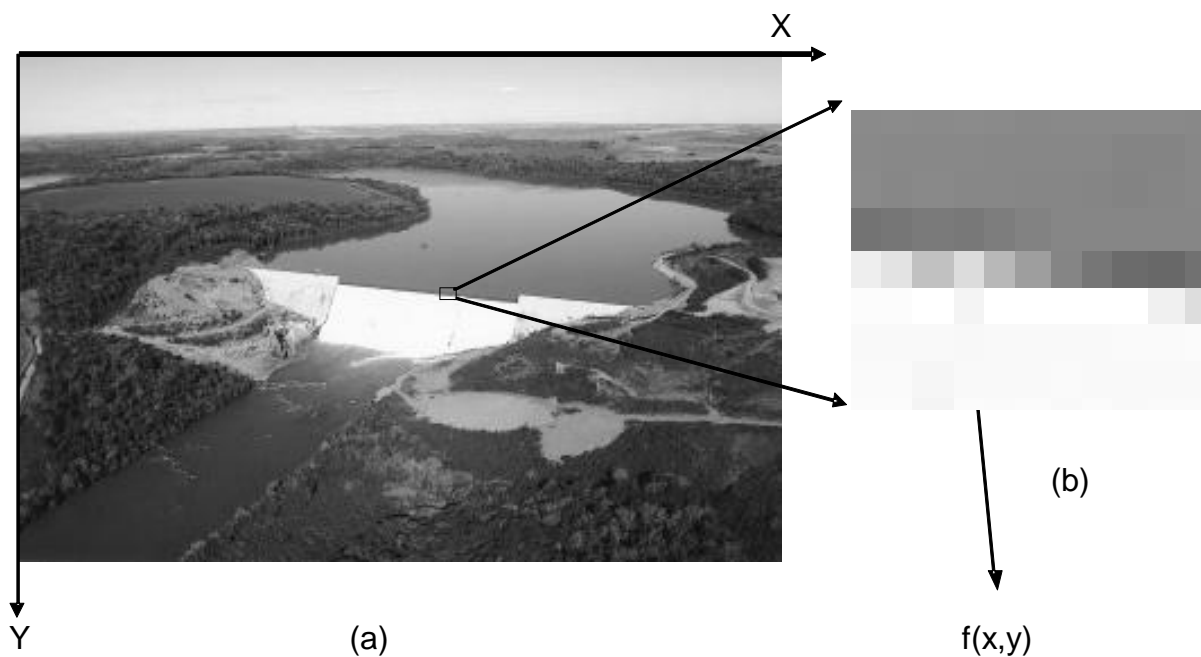


Figura 22. (a) Representação de uma imagem digital, (b) visualização dos elementos da imagem (pixels).

As diversas coordenadas espaciais de uma imagem podem ser representadas em forma de uma matriz. Os valores das linhas e colunas representam um ponto na imagem. Na Figura 23, está apresentada a representação matricial de uma imagem de tamanho 5 x 5.

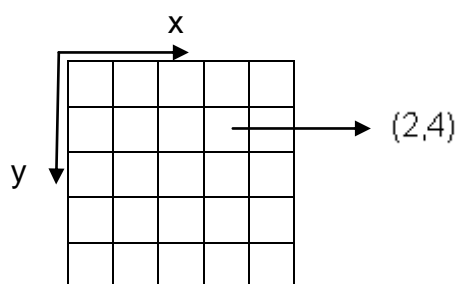


Figura 23. Representação matricial de uma imagem digital.

Como pode ser observado, na figura, os “pixels” estão representados na forma quadrada, essa geometria facilita a implementação eletrônica, tanto para a aquisição quanto para visualização da imagem. Porém, ao organizar esses “pixels” em uma matriz quadrada, surgem algumas dificuldades no processamento da imagem. Primeiramente, um “pixel” não tem as mesmas características em todas as direções, pois apresenta quatro vizinhos de borda e quatro vizinhos diagonais

(Figura 24). Devido a isso é necessário fazer uma escolha em relação ao tipo de conectividade usada, podendo ser considerado os vizinhos de borda (B4) ou os vizinhos de borda e os vizinhos de diagonal (B8). Esse fato tem como consequência uma segunda problemática, na qual a distância dos vizinhos é diferente, ou seja, os vizinhos de borda apresentam distância igual a 1 e aos vizinhos de diagonal a distância corresponde a $2^{1/2}$.³¹

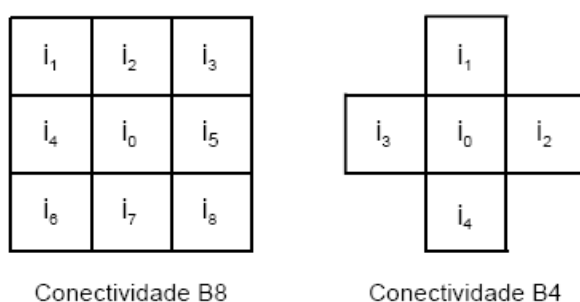


Figura 24. Possibilidades de conectividade dos “pixels” vizinhos ao “pixel” central i_0 .
 FONTE Albuquerque *et al.* (2004)

Em imagens monocromáticas, como a apresentada da Figura 22(a), de 8 bits, o valor 0 (zero) representa uma intensidade luminosa nula, ou seja, preto. No entanto, o maior valor possível corresponde a 256 e que indica a maior luminosidade, branco.³⁰ Na Figura 25, está apresentada uma imagem monocromática com a indicação de elementos com diferentes tonalidades de cinza.

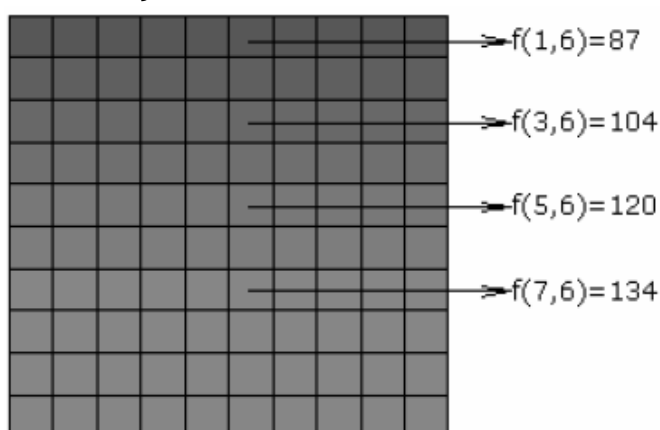


Figura 25. Imagem monocromática com indicação das tonalidades de cinza de alguns “pixels”. FONTE Quiorin (2004)

Imagens digitais também podem ser representadas com uma perspectiva tridimensional (3D), são as chamadas imagens tridimensionais, em que sua representação é feita por uma matriz com três dimensões. Em imagens tridimensionais (Figura 26) os elementos da matriz são chamados de “voxel”, pois representam um elemento de volume da imagem.

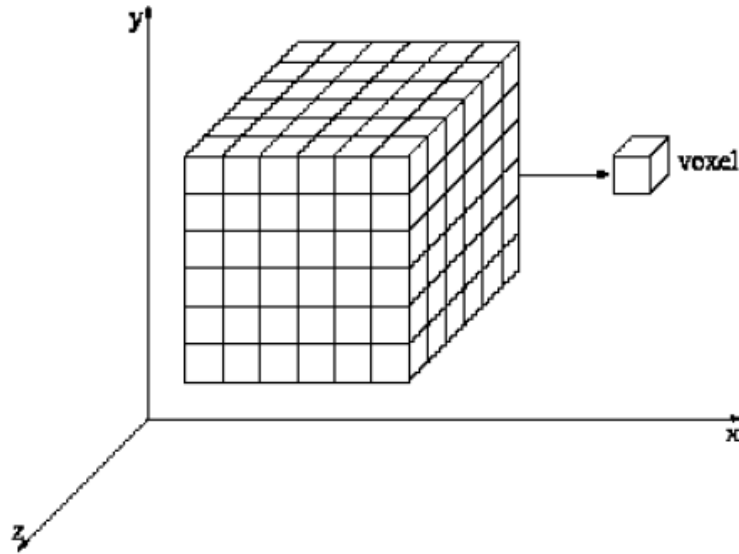


Figura 26. Representação matricial de uma imagem com perspectiva tridimensional. FONTE Piekarz (2006)

O conceito de vizinhança também é aplicado a imagens tridimensionais, com a definição dos vizinhos de acordo com “voxels” que compartilha as faces ou arestas ou vértices. Para esse tipo de imagens as vizinhanças correspondem a 6, 18 e 26, como podem ser vistos nas Figura 27 (a), (b) e (c).²⁶

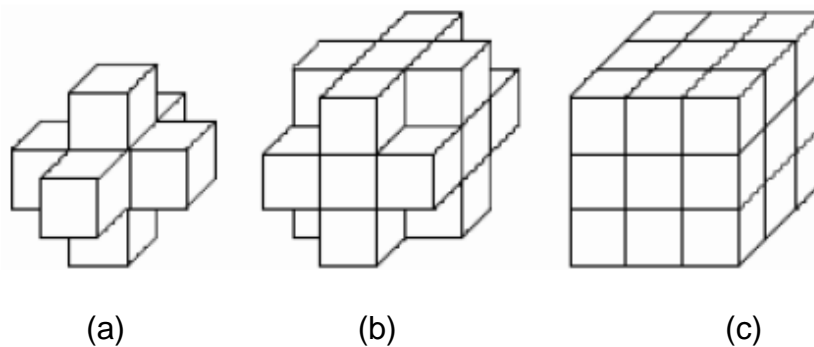


Figura 27. Vizinhanças tridimensionais. (a) vizinhança 6 de um “voxel” (b) vizinhança 18 de um “voxel” (c) vizinhança 26 de um “voxel”. FONTE Piekarz (2006)

Imagens monocromáticas, oriundas da tomografia de raios X, correspondem à distribuição bidimensional do coeficiente de atenuação da amostra. Neste caso, as regiões com maior intensidade luminosa correspondem às áreas mais densas, com coeficientes de atenuação maiores, já, as regiões com densidades menores apresentam-se mais escuras em consequência de coeficientes de atenuação maiores.²⁹

➤ ***Etapas do processamento de imagens***

A metodologia do processamento de imagens digitais é composta por algumas etapas, sendo: aquisição, pré processamento, segmentação e extração de características.³¹

No caso de imagens tomográficas como as utilizadas neste trabalho, as etapas de processamento, são:

- ✓ aquisição de radiografias;
- ✓ obtenção do senograma;
- ✓ pré processamento das radiografias;
- ✓ reconstrução da imagem tomográfica;
- ✓ pré-processamento da tomografia;
- ✓ segmentação; e
- ✓ extração de características.

A ***aquisição da imagem*** corresponde à primeira etapa do processamento, na qual um sensor é sensível ao espectro de energia eletromagnética, como o espectro de raio X, luz ultravioleta, visível, ou infravermelha. Esse sensor pode ser uma câmera CCD, sensores planos e módulos de imagens. Em seguida, é necessário um conversor digital que vai transformar o sinal elétrico produzido na saída em um sinal digital, que neste caso é no padrão “bitmap”.^{30,31,32}

A **obtenção do senograma** é o empilhamento de uma linha de cada projeção. Dessa forma os dados das imagens que serão utilizadas são organizados, para facilitar a reconstrução tomográfica.

O **pré-processamento da imagem radiográfica** consiste em realizar uma restauração da imagem, com a finalidade de corrigir alguma degradação ou imperfeição em consequência da aquisição da radiografia. Em geral essas imperfeições ocorrem devido a ruídos resultantes de imprecisão das células fotodetectoras do *flat panel*, oscilações na tensão do sistema, radiações externas, etc. Existem diversas técnicas com a finalidade de melhorar a qualidade de imagens, porém o filtro estatístico da mediana apresenta bons resultados no seu tratamento.²⁶

Na etapa da **reconstrução tomográfica**, as imagens radiográficas adquiridas da amostra são organizadas de maneira que são formadas imagens 2D em forma de fatias. Neste processo pequenos ruídos não identificados na imagem radiográfica, podem causar falhas mais graves. Em consequência disso, surge a necessidade de realizar o **pré-processamento destas imagens tomográficas** com filtros do tipo da mediana usada na imagem radiográfica. O filtro Gaussiano é um dos filtros mais utilizados nesta reconstrução de imagem.³²

A **segmentação** de imagens corresponde a um processo de análise, na qual uma imagem é dividida em partes ou objetos que a constituem e essa divisão depende da finalidade de uso. No caso de amostras de concreto a finalidade da segmentação pode estar relacionada à separação do agregado graúdo da argamassa, ou no caso de concreto armado na separação das barras de aço do concreto ou ainda na separação de vazios da argamassa ou da pasta de cimento. Para os casos de segmentação aplicados ao concreto o algoritmo usado é baseado na descontinuidade, na qual os tons de cinza mudam bruscamente, possibilitando assim, a detecção de pontos isolados, detecção de linhas e bordas de imagem.

A etapa final do processamento de imagens corresponde à **extração de características** relevantes que podem ser extraída da segmentação realizada

anteriormente, na qual as regiões foram demarcadas pelas bordas, então, cada região selecionada, é descrita de acordo com suas características geométricas e topológicas. As características geométricas podem ser relacionadas à área, orientação e forma, já, nas características topológicas destacam-se a média do tom de cinza, textura, etc. Com essas informações é possível o reconhecimento de padrões em imagens.³²

➤ **Ruídos**

Imagens radiográficas ou tomográficas podem ter uma degradação significativa devido à presença de ruídos, que consistem em variações aleatórias dos tons de cinza ao redor do valor real do “pixel”. Os fatores que causam ruídos em imagens, em muitos casos podem estar relacionados à variação da intensidade de raios X, a variação de brilho da imagem de saída do intensificador de imagens ou pela variação de tons de cinza da imagem registrada pela câmera CCD.

Dentre as diversas maneiras de reduzir os ruídos de uma imagem destacam-se o uso de máscaras, que correspondem à filtragem de variações indesejadas. As máscaras média e mediana são as mais utilizadas para o tratamento de imagens. Essas duas técnicas consistem dos seguintes métodos: armazenamento dos “pixels” da vizinhança, com centro em (x,y) , em um vetor, em seguida a substituição do “pixel” (x,y) pelo parâmetro estatístico escolhido (média ou mediana).

No uso do filtro da média, é realizada uma substituição do “pixel” (x,y) pela média dos “pixels” vizinhos. No caso do filtro da mediana, o vetor de “pixels” é ordenado de forma crescente ou decrescente, então, este é substituído pelo valor do vetor ordenado. Na Figura 28(a), está apresentada a matriz com os valores originais dos “pixels” da região selecionada, na qual os valores 0, 2 e 21 correspondem aos pontos com ruído. Na Figura 28(b) estão apresentados os “pixels” em ordem crescente. Na Figura 28(c), está apresentado um exemplo do cálculo feito pelo filtro

da média e mediana para substituição do “pixel” central da região da máscara, na qual o tamanho escolhido foi de 3 x 3.

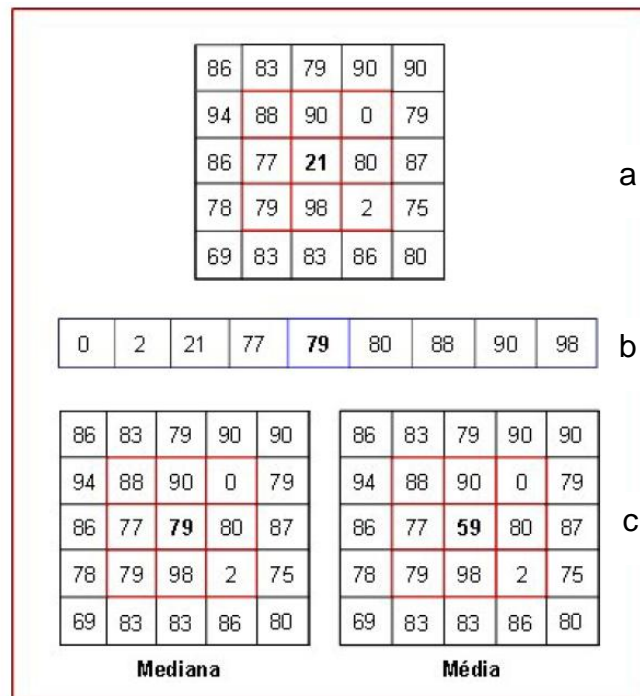


Figura 28. Aplicação dos filtros média e mediana. FONTE Quiorin (2004)

O efeito dos filtros é de eliminar o ruído e suavizar as imagens. Ao se observar o resultado numérico fornecido pelos filtros, é notável que o da mediana apresenta um resultado melhor que o da média, pois a primeira elimina os valores extremos da vizinhança, logo, o valor resultante para o “pixel” central é mais próximo dos obtidos nas vizinhanças.

➤ **Contraste da imagem**

Para a realização de um bom ensaio radiográfico é necessário conhecer: i) o coeficiente de atenuação linear da amostra a ser ensaiada, ou seja, o quanto a intensidade do feixe é reduzida como resultado de um processo de interações dos raios X – matéria; ii) o material sob análise para determinar a energia do feixe de raios X adequada; iii) identificar as limitações quanto à espessura da amostra; e iv) o tempo de integração no detector, etc. Todos estes parâmetros permitem avaliar o contraste em função da energia utilizada e espessura da amostra.

Normalmente, os sensores são capazes de discretizar os valores de uma cena em um intervalo que vai de L_{\min} a L_{\max} . O contraste (C) depende da diferença de tom entre duas regiões vizinhas de uma imagem e é determinado pela seguinte expressão.

$$C(\%) = \frac{L_2 - L_1}{L_{\max} - L_{\min}} 100\% \quad \text{Equação 4}$$

Na qual, L_1 , corresponde à intensidade da imagem na região 1, L_2 , a intensidade da imagem na região 2, L_{\max} , a intensidade máxima da imagem e, L_{\min} , a intensidade mínima da imagem. Nas imagens digitais de 8 bits existem 256 tons de cinza, sendo que $L_{\min} = 0$ corresponde ao preto e $L_{\max} = 255$, corresponde ao branco. Estes parâmetros estão relacionados à resolução em profundidade dos *pixels* e, também, pela saída digital do equipamento utilizado para adquirir as imagens.³³

➤ **Resolução de baixo contraste**

A resolução de baixo contraste determina o menor defeito detectado pelo sistema, por meio da análise dos tons de cinza da imagem.³²

2.9.3 A Tomografia Computadorizada e o Concreto

Sendo uma técnica não destrutiva, a tomografia computadorizada tem como principal vantagem a possibilidade de estudo do interior de amostras de concreto, preservando suas características físicas e mecânicas assim como o seu uso para ensaios futuros. A visualização interna de uma estrutura possibilita analisar a presença e o comportamento de defeitos (vazios, trincas, objetos estranhos, etc.) que alteram suas propriedades físicas e mecânicas. Em barragens a visualização do interior de testemunhos de concreto permite a otimização da localização de falhas e estimativa de material utilizado, para que medidas preventivas sejam tomadas a tempo e de forma adequada para evitar possível rompimento da barragem.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste tópico, estão abordados os métodos de preparação de amostras, de pasta de cimento e argamassa, produzidos em laboratório que tenham características muito próximas do material utilizado em campo. Também a escolha do local e a extração de testemunhos de concreto em barragens de UHE sob envelhecimento natural, assim como métodos de determinação do volume de amostras, do agregado graúdo e da argamassa de acordo com o Procedimento de Ensaio e Análise realizado no LacTec.

3.1 DOSAGENS E PREPARO DAS AMOSTRAS

➤ **Produção de “phantons” para as imagens em TC**

Para obter boa qualidade das imagens provenientes das amostras de concreto, foram confeccionados “phantons” que representam condições semelhantes de ensaio tomográfico dos testemunhos de concreto retirados das barragens. Os “phantons” foram construídos a partir de dois cilindros com 5,0 cm de diâmetro e 3,0 cm de altura. Sendo o “phantom” A produzido com pasta de cimento, conforme ilustrado na Figura 29(a) no qual foram feitos orifícios cilíndricos com diâmetros que variaram de 2,0 mm a 6,0 mm, diante dos bons resultados para os vazios menores o “phantom” B foi feito de argamassa Figura 29(b), com orifícios de 1,0 mm a 6,0 mm, de acordo com o tamanho das brocas disponíveis. Esses furos correspondem a vazios com tamanhos pré definidos que serão utilizados para analisar o menor defeito visível ou a resolução na TC.

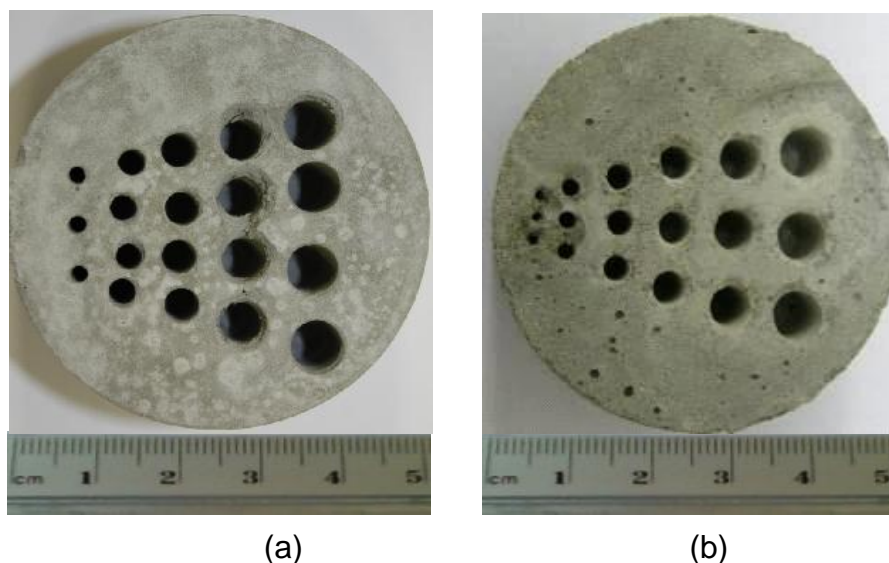


Figura 29. (a) Imagem fotográfica do “phantom” de pasta de cimento. (b) Imagem fotográfica do “phantom” de argamassa.

Para ambos, foi utilizado o cimento Portland Composto com Pozzolana (CP II Z – 32) cujas características físicas e químicas foram determinadas segundo recomendações de normas e estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2. Análise química do cimento CP II Z – 32.

Componente	Abreviatura	% (em peso)	Limite de norma
Cal	CaO	52,68	-
Sílica	SiO ₂	22,54	-
Alumina	Al ₂ O ₃	6,80	-
Oxido de ferro	Fe ₂ O ₃	3,22	-
Sulfito	SO ₃	2,77	≤ 4,0%
Magnésio	MgO	6,13	≤ 6,5%
Perda de massa ao fogo	P.F.	3,25	≤ 6,5%
Cal livre	CaO livre	6,97	≤ 2%
Resíduo insolúvel	R.I.	8,88	≤ 16%

Para a formação do agregado miúdo da amostra B foi utilizada areia natural lavada com módulo de finura de 2,22, conforme listado na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades do agregado miúdo.

Propriedades	Valores
Massa específica	2,61 g/cm ³
Módulo de finura	2,22
Teor de material pulverulento	0,3%
Teor de torrões de argila	0,2%
Absorção	0,2%

Para a amostra A foram utilizados apenas água e cimento com o objetivo de obter um “phantom” de pasta de cimento. O mesmo foi preparado com uma relação água/cimento (a/c) de 0,5. A água foi adicionada ao cimento aos poucos até adquirir uma consistência homogênea. Na amostra B, foi utilizada a relação a/c de 0,5 e a dosagem foi 1:2. Inicialmente, a areia foi misturada ao cimento então a água foi adicionada aos poucos ao material seco até a mistura adquirir consistência homogênea. Ambas as misturas foram colocadas em formas de PVC com 5,0 cm de diâmetro e 3,0 cm de altura e, em seguida, adensadas com uma haste, a cura foi realizada em câmara úmida sob temperatura de (23 ± 2) °C em umidade superior a 95% durante 28 dias.

➤ **Testemunhos de concreto**

Os testemunhos de concreto utilizados foram extraídos da barragem UHE Mourão. Inicialmente, foi realizada uma inspeção na barragem para determinar o local de extração, em seguida extração das amostras foi realizada com equipamento da marca HILTI, modelo DD160-E com coroa de corte diamantada com 100 mm de diâmetro nominal, conforme a Figura 30(a).

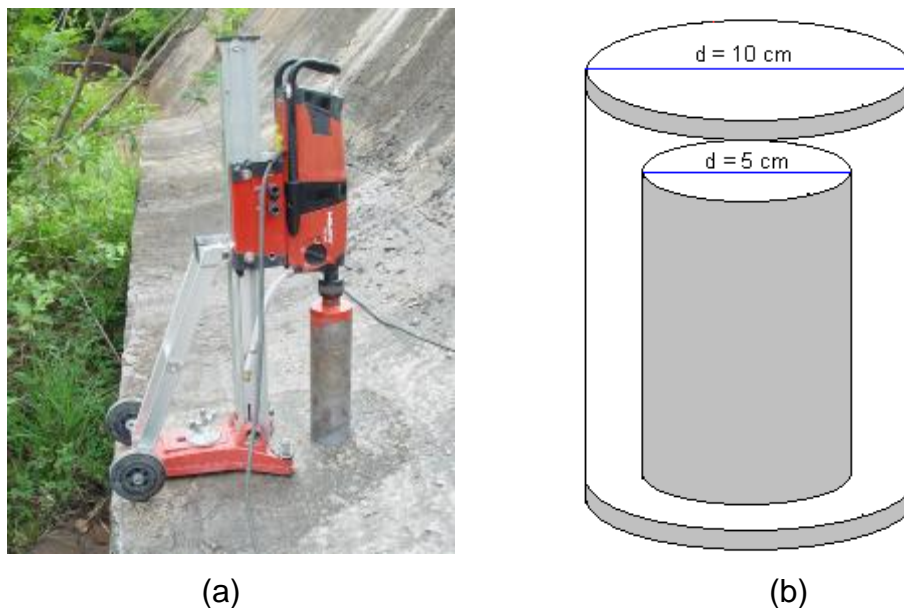


Figura 30. (a) Extração do testemunho da barragem. (b) Esquema do testemunho com tamanho reduzido.

Porém, para a análise dos testemunhos, foi necessário realizar uma redução em seus tamanhos (Figura 30(b)) de acordo com testes realizados anteriormente.³⁴ Essa redução no diâmetro foi necessária, pois no momento da extração ainda não era conhecido o tamanho das amostras possíveis de serem analisadas, a partir desse momento os testemunhos já podem ser extraídos com o tamanho suportado pelo equipamento de tomografia utilizado. Então, as amostras utilizadas para a tomografia tiveram dimensões máximas da ordem de $(5 \times 5 \times 10)$ cm ou 250 cm^3 . Na Figura 31, está apresentada a imagem da amostra.



Figura 31. Imagem fotográfica do testemunho de UHE Mourão.

Na Figura 32, está mostrada a imagem fotográfica de uma amostra de concreto leve, produzida em laboratório, constituída de pasta de cimento e agregado graúdo feito de argila expandida, que tem como característica a boa aderência com a pasta hidratada de cimento que o envolve. Esta aderência esta relacionada coma a textura áspera da superfície do agregado leve.³⁵ Estas imagens têm a finalidade de observar as condições desses materiais após a cura.



Figura 32. Imagem fotográfica da amostra de concreto leve.

3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TOMOGRAFIA

A aquisição das radiografias foi realizada no Laboratório de Instrumentação para Diagnóstico de Materiais do LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento). O tomógrafo utilizado foi o da marca Gilardoni denominado SISTEMA CT2000 (Figura 14) composto de:

- gerador de raios X com minifoco de $(0,4 \times 0,4) \text{ mm}^2$;
- alvo de tungstênio;
- faixa de tensão de 10 a 160 kV;
- faixa de corrente de 0 a 10 mA;
- intensificador de imagens acoplado a uma câmera CCD de resolução em profundidade (saída digital) de 8 bits.³⁶

Nesse equipamento a amostra fica posicionada em uma mesa giratória controlada por um programa de computador para obter as radiografias de diferentes ângulos. Para as amostras apresentadas foram obtidas radiografias a cada 1° (grau) totalizando 180 radiografias no testemunho para então a montagem das fatias. Para a aquisição das imagens foi utilizado um intensificador de imagens acoplado a uma câmera CCD com dimensão espacial da imagem de (640 x 480) "pixels". As radiografias são armazenadas pelo computador no padrão bitmap (8 bits), cada "pixel" com tamanho de (265 x 265) μm e um voxel com tamanho de 0,019 mm^3 . Junto a esse sistema também foi utilizado um detector digital de raios X da marca Hamamatsu modelo CT7942.

Um Sistema de Radiografia Digital Portátil (SISTEMA RDP) desenvolvido no Laboratório de instrumentação para Diagnóstico do LACTEC também foi utilizado para a obtenção das imagens. Esse equipamento tem como principal característica a portabilidade que possibilita a inspeção de amostras em campo, apresentando uma resolução de imagem superior ao do SISTEMA CT 2000.

Como os defeitos comuns em estruturas de concreto são vazios, como bolhas ou trincas, preenchidos com ar ou água e, já que se vislumbrou poder auxiliar na verificação da qualidade dos traços do concreto trabalhado, foi realizada uma simulação para verificar o limite de detecção do sistema de radiografia utilizado. Esta foi feita por meio das curvas do coeficiente de atenuação linear do ar e da argamassa, onde o contraste da imagem dependeu da diferença de intensidade entre dois feixes vizinhos, um que atravessou a região do defeito e o outro que atravessou o material na proximidade desta região. Para tanto, foi avaliado, também, o contraste da imagem do concreto em função da espessura. Amostras de pasta e argamassa de cimento Portland foram moldadas em forma de "escada", conforme mostrado na Figura 33, sendo, a primeira (a), de pasta de cimento e a segunda ou (b), de argamassa com 10,0 cm por 6,0 cm e degraus de aproximadamente 0,6 cm.

As caracterizações química e física dos materiais utilizados nestas amostras estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

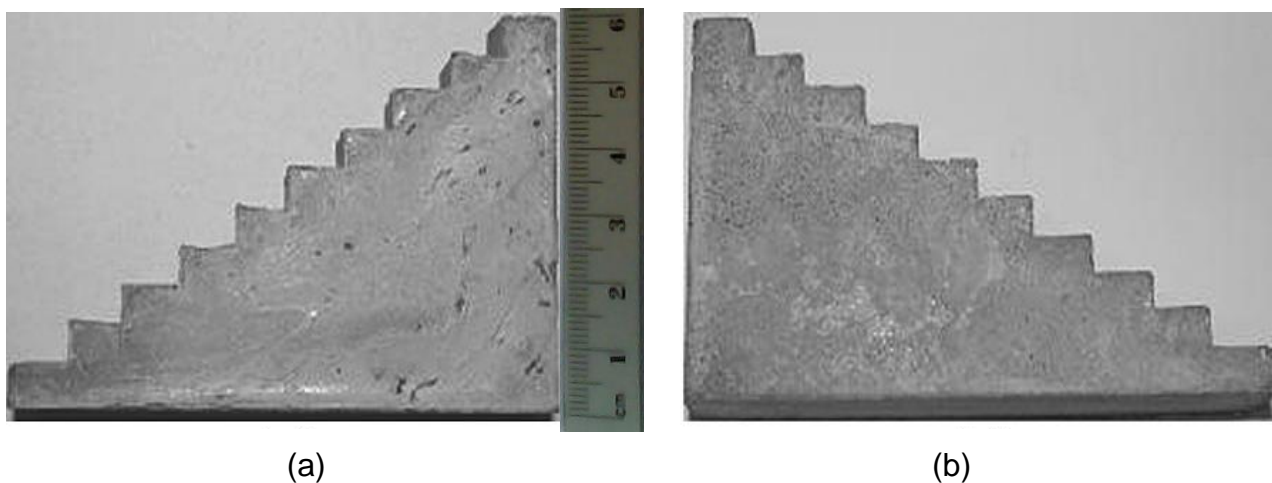


Figura 33. Imagem da amostra “phantom” em escada. (a) pasta de cimento e (b) argamassa.

Para obter o coeficiente de atenuação linear das amostras, foram medidas as intensidades dos valores médios de tons de cinza da radiografia obtida em cada degrau da escada, onde, a equação de Beer-Lambert (Equação 5), expressa a seguinte relação linear, para um feixe monoenergético:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\mu x \quad \text{Equação 5}$$

Na qual, I , corresponde à intensidade de raios X em x , I_0 , é a intensidade incidente no material, μ é definido como o coeficiente de atenuação linear em cm^{-1} , e x é o comprimento de propagação do feixe no material.

3.3 DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE AGREGADO DO CONCRETO DA UHE MOURÃO

O teste foi realizado utilizando o Procedimento de Ensaio e Análise, PEA 220, do LACTEC (método 1). O objetivo foi o de separar as quantidades de

argamassa e agregado graúdo para certificar os resultados da reconstituição via TC (método 2). No procedimento a amostra de concreto foi aquecida a 600 °C por uma hora. Após o resfriamento a temperatura ambiente, o agregado graúdo foi separado manualmente da argamassa (Figura 34). Com o material obtido da separação, foi determinado o volume de agregado graúdo e de argamassa, pelo volume de líquido deslocado após imersão do sólido no mesmo. Pretendia-se também determinar a dimensão média do agregado graúdo, mas durante o ensaio no qual a amostra foi aquecida à 600°C, ocorreu a implosão dela alterando o tamanho dos agregados e impossibilitando a determinação de suas dimensão.



Figura 34. Imagem do testemunho de UHE separado em agregado graúdo e argamassa.

Como este trabalho tem o objetivo de verificar as condições de uso da TC em concreto, foram confeccionadas amostras em laboratório com a finalidade de simular as condições reais de uso do concreto. Para os testemunhos de concreto extraídos de barragens de UHE, foi necessário fazer uma redução do tamanho das amostras, que vai contra a proposta de um ensaio não destrutivo no qual a amostra deve preservar suas características após o ensaio, porém como no momento da extração ainda não era conhecido o desempenho da técnica, os testemunhos foram extraídos com tamanhos maiores e então reduzidos ao tamanho necessário, pois o

contrário não seria possível. Agora conhecendo as limitações da técnica os próximos testemunhos devem ser extraídos com a dimensão apropriada, para evitar qualquer alteração dos mesmos para a realização dos ensaios.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESTUDO DO CONTRASTE DA IMAGEM EM RADIOGRAFIA E TOMOGRAFIA INDUSTRIAL A PARTIR DE AMOSTRAS DE CONCRETO

A radiografia digital do modelo apresentado na Figura 33(b) encontra-se mostrada na Figura 35, na qual a amostra foi posicionada de forma que a radiografia permitisse a visualização dos degraus. O sistema de obtenção da imagem foi idealizado de forma que o caminho percorrido pelo feixe de raios X revelasse cada degrau da “escada” por tonalidades de cinza diferentes. Também, foram feitas radiografias para esta mesma amostra variando-se a tensão da fonte para 115 kV, porém, o sistema ficou limitado devido ao mesmo ter um range de funcionamento de (20 a 100) kV, ou seja, as medidas foram realizadas acima do range de funcionamento do equipamento, isso resultou em imagens de baixa qualidade, e, por este motivo, não foram apresentadas neste trabalho.

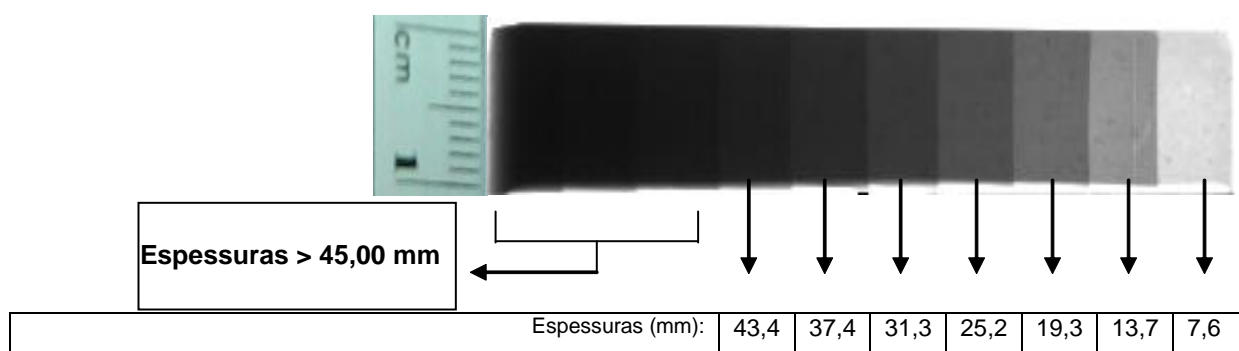


Figura 35. Radiografia digital do “phantom” na forma de “escada” (100 kV; 5,0 mAs). Fonte de raios X do sistema CT2000 e detector do sistema RDP.

Apenas com a observação da Figura 35 é possível determinar alguns parâmetros do equipamento de raios X para amostras de concreto, como a energia do feixe, tempo de integração e o tamanho da amostra que deve ser utilizado, já que espessuras maiores que 45 mm não apresentaram variação nos tons de cinza.

Na Figura 36 e Figura 37, estão apresentados os resultados das medidas de $\ln(I/I_0)$ em função da distância percorrida pelo feixe de raios X (em cm). De acordo com a Equação (5), foi feita a regressão linear dos dados, o coeficiente de atenuação linear médio das amostras para uma energia variável.

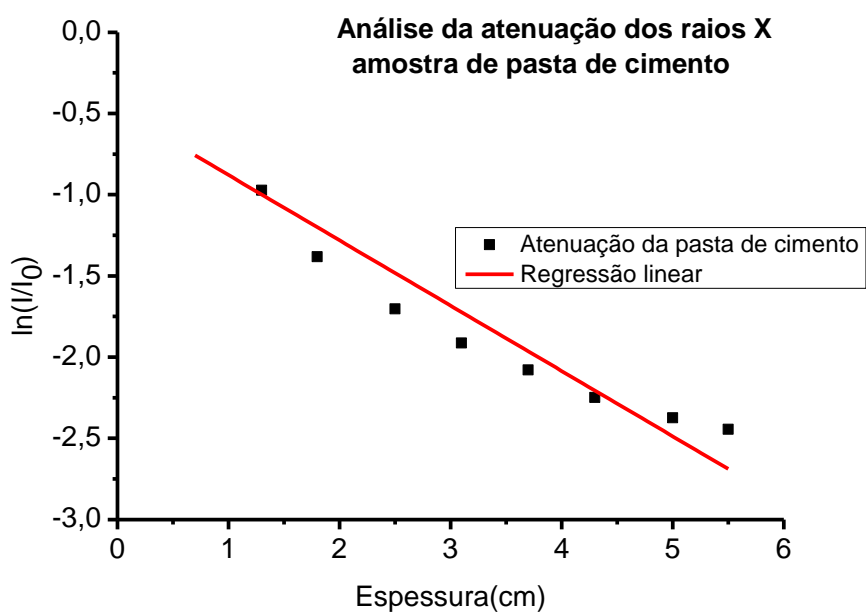


Figura 36. Gráfico utilizado para a determinação do coeficiente de atenuação linear médio da pasta de cimento.

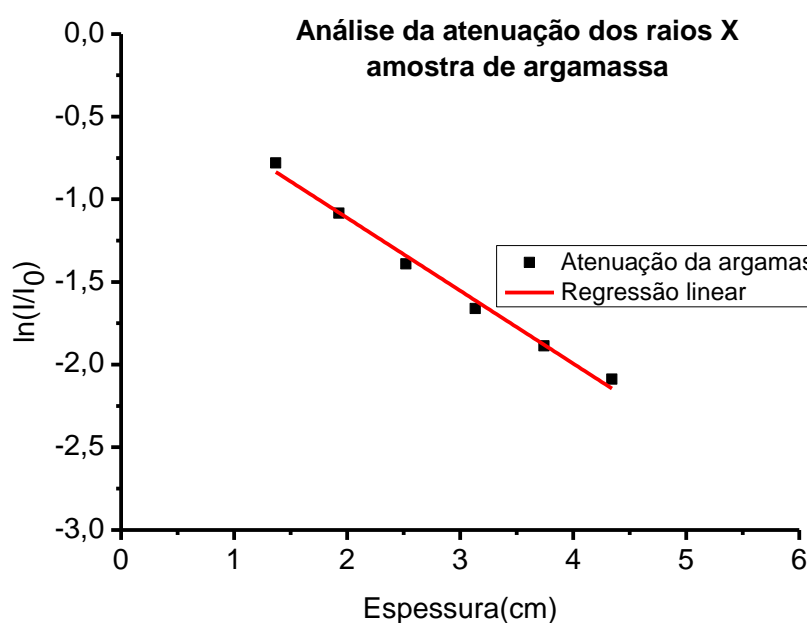


Figura 37. Gráfico utilizado para a determinação do coeficiente de atenuação linear médio da argamassa.

No Gráfico apresentado na Figura 36, os pontos correspondem a relação das intensidades dos feixes de raios X incidente I_0 e emergente I da amostra em função das espessuras dos degraus, na pasta de cimento foi observado uma variação no contraste da imagem para 8 degraus os quais são apresentados no Gráfico da Figura 36, conseqüentemente é possível observar no Gráfico, oito pontos referentes ao degraus.

Para a amostra de argamassa no Gráfico apresentado na Figura 37, tem apenas seis pontos referentes aos seis degraus com menor espessura, os quais apresentam uma variação nos tons de cinza conforme pode ser observado na Figura 35. Como cada degrau apresenta um valor diferente para a intensidade do feixe de raios X emergente e para a espessura, logo o valor do coeficiente de atenuação linear é encontrado pela média dos valores de cada degrau da amostra.

Os resultados mostram que a amostra de argamassa analisada tem um coeficiente de atenuação linear próximo a $0,4398 \text{ cm}^{-1}$. Para a amostra feita com pasta de cimento o coeficiente de atenuação linear foi de $0,3969 \text{ cm}^{-1}$. Os valores encontrados para o coeficiente de atenuação linear correspondem ao resultado de uma energia média característica. Com essas informações pode-se determinar qual a energia adequada em função da espessura da amostra que está sendo ensaiada.

Na Tabela 4 é apresentado o coeficiente de atenuação linear para diversos materiais, inclusive o concreto e para diferentes energias, na qual a primeira linha com a energia de 102 keV, o valor do coeficiente de atenuação esta na mesma ordem de grandeza do valor encontrado neste trabalho.

Tabela 4. Valores do Coeficiente de Atenuação Linear. FONTE Andreucci (2010)³⁷

Energia (KeV)	Alumínio 2,7 g/cm ³ (cm ⁻¹)	Chumbo 12 g/cm ³ (cm ⁻¹)	Concreto 2,3 g/cm ³ (cm ⁻¹)	Aço 7,8 g/cm ³ (cm ⁻¹)	Urânio 19,04 g/cm ³ (cm ⁻¹)	Tijolo (cm ⁻¹)
102	0,444	60,2	0,390	2,700	19,82	0,369
150	0,362	20,87	0,327	1,437	45,25	0,245
200	0,358	5,00	0,29	1,08	21,88	0,200
300	0,278	4,00	0,25	0,833	8,45	0,169
409	0,247	2,43	0,224	0,720	4,84	0,149
500	0,227	1,64	0,204	0,65	3,29	0,135
600	0,210	1,29	0,189	0,600	2,54	0,125
800	0,184	0,95	0,166	0,52	1,78	0,109
1022	0,165	0,772	0,150	0,460	1,42	0,098
1250	0,148	0,620	0,133	0,410	1,00	0,088
1500	0,136	0,588	0,121	0,380	0,800	0,080
2000	0,177	0,504	-	-	-	-

4.2 DETERMINAÇÃO DA RESOLUÇÃO DE BAIXO CONTRASTE

Com a finalidade de determinar a resolução de baixo contraste do tomógrafo, foram utilizados os CPs (“phantom”) feitos de argamassa e pasta de cimento em forma de cilindro, com furos de 1,0 mm a 6,0 mm.

Na Figura 38, está mostrada a tomografia bidimensional do “phantom” de pasta de cimento com 3 cm de altura e 5 cm de diâmetro, no qual foram feitos furos de 2,0 mm a 6,0 mm, onde é possível observar o contraste entre os vazios (escuro) e a pasta de cimento (claro) pela variação nos tons de cinza. Na Figura 38(b) esta apresentada a imagem tomográfica de uma fatia correspondente ao topo da amostra, na Figura 38(c) a fatia corresponde a uma região central da amostra e na Figura 38(d) a fatia é da base da amostra. As regiões circuladas nas imagens das Figura 38(b), (c) e (d) indicam vazios no interior da amostra com diâmetro menor que 2 mm. As fatias tomográficas que seguem têm a espessura de um *pixel* que corresponde a 50 µm, com essa espessura é possível a observação detalhada dos vazios no interior da amostra.

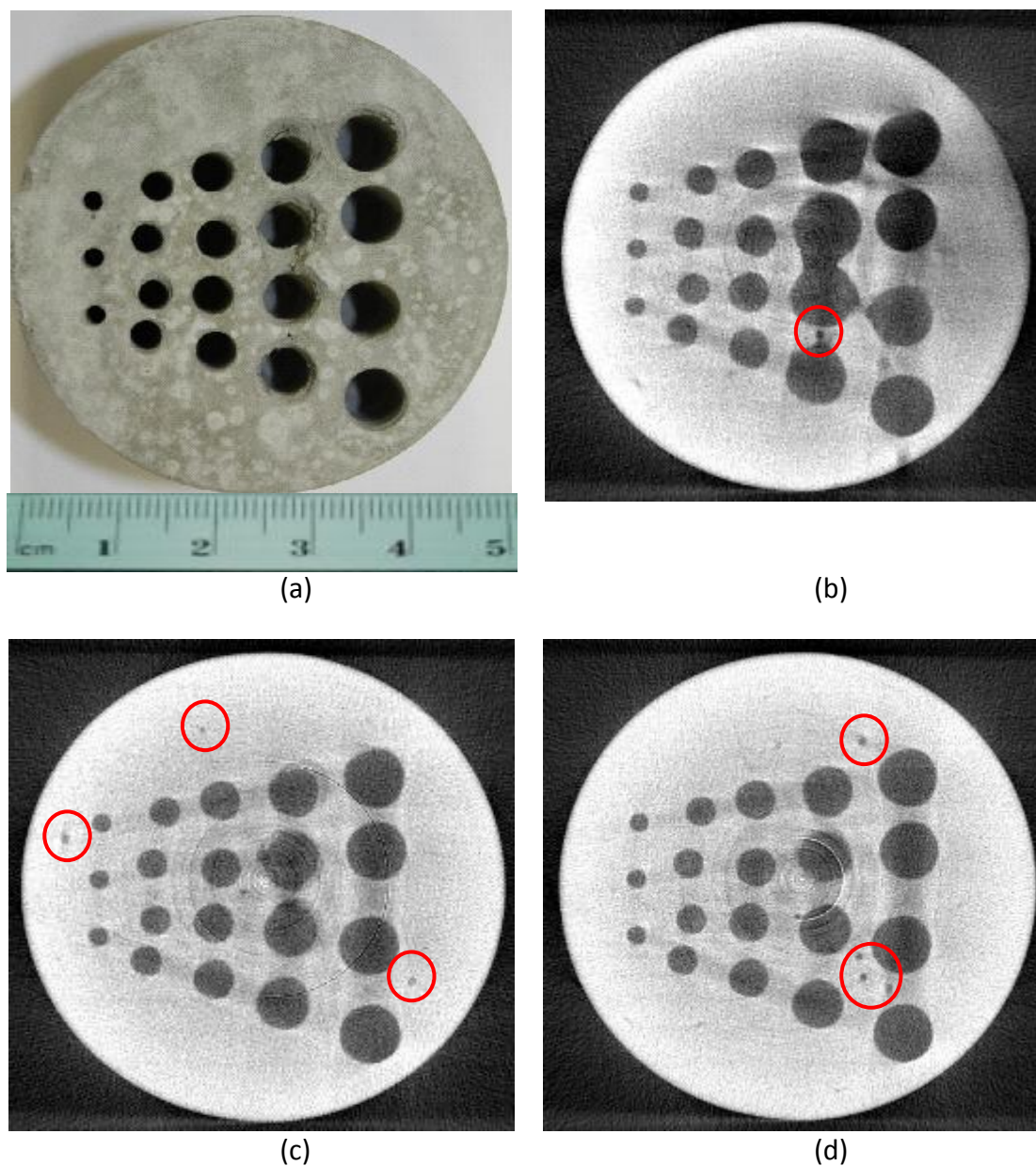


Figura 38. (a) Imagem fotográfica do phantom de pasta de cimento. Tomografia 2D do (b) topo, (c) centro e (d) base da amostra (75 kV, 1,0 mA, 3 s).

Na Figura 39(a), encontra-se apresentada a imagem fotográfica do “phantom” de argamassa, no qual foram feitos furos com brocas de 1,0 mm a 6,0 mm de diâmetro e vários vazios provenientes do excesso de água durante a mistura da argamassa.

Por meio dos furos com tamanho conhecido foi feita uma análise qualitativa dos vazios provenientes do preparo da amostra.

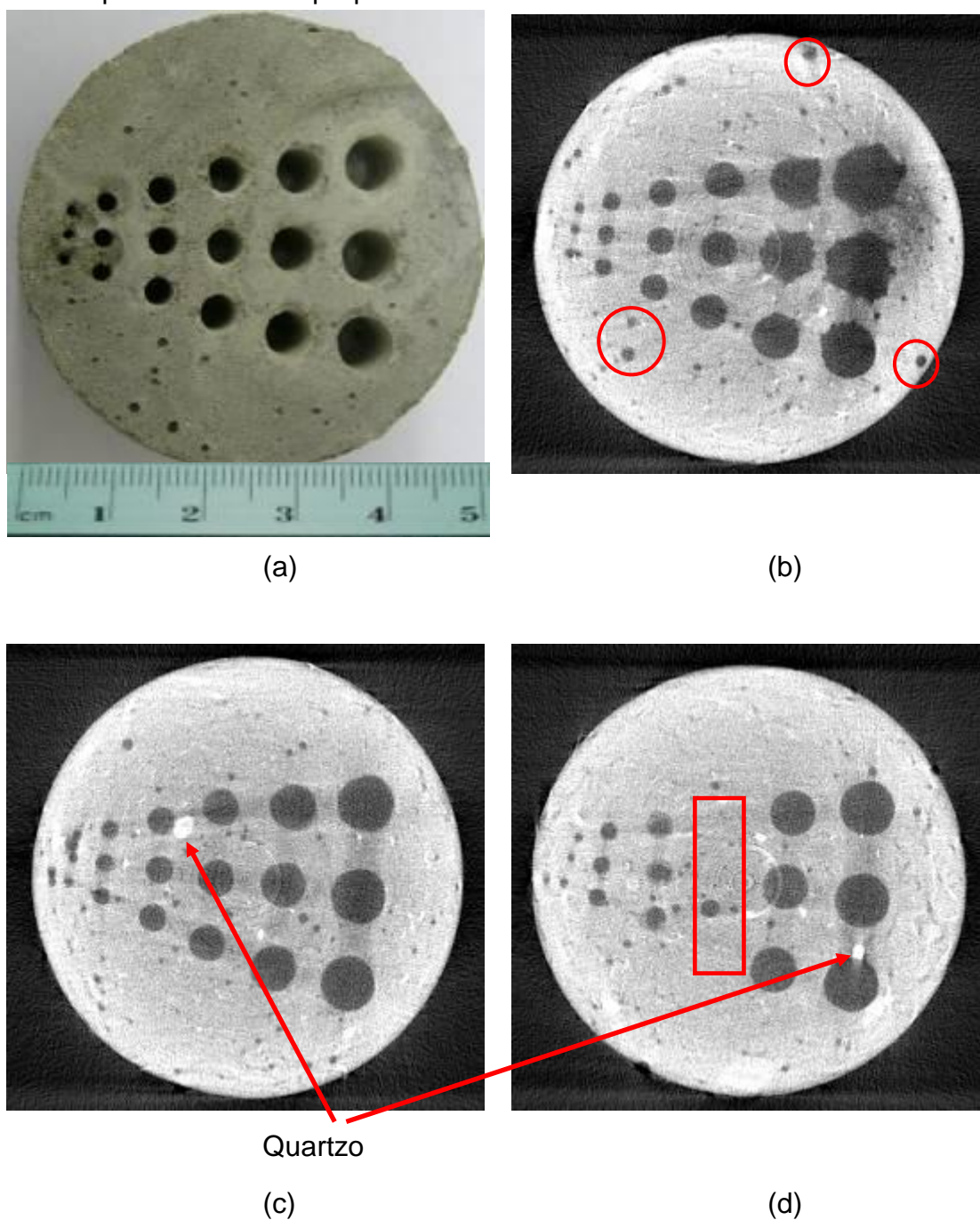


Figura 39. (a) Imagem fotográfica do phantom de argamassa. Tomografia 2D do (b) topo, (c) centro e (d) base da amostra (75 kV, 1,0 mA, 3 s).

Por este método foi possível confirmar a presença de quatro vazios com mais de 1,0 mm de diâmetro na secção transversal da amostra, apresentada na Figura 39(b) que corresponde a uma região próxima ao topo da amostra, os quais

estão marcados com círculos, e vários outros com tamanho significativo onde o limiar da imagem não pôde ser claramente definido devido à dificuldade para gerar vazios conhecidos com dimensões inferiores a 1,0 mm.²⁶

Nessa amostra também foi possível a visualização de cristais de quartzo que devido a sua alta densidade apresentou tons de cinza claro, na imagem tomográfica apresentada nas Figura 39(c) e (d). Na Figura 39(d) esta apresentada a imagem tomográfica de uma secção transversal da amostra correspondente a uma região próxima a base, conseqüentemente os vazios com diâmetro de 4 mm, região destacada com o retângulo, já não aparecem mais por terem uma profundidade menor que os demais que ainda são vistos, no local é possível observar apenas um vazio com aproximadamente 2 mm e vários outros menores que 1 mm oriundos da evaporação da água utilizada na hidratação.

As imagens tomográficas apresentadas na Figura 38 aparentam melhor qualidade que as imagens apresentadas na Figura 39, porém essa diferença é resultado do tipo de amostra utilizada, pois a amostra de argamassa (Figura 39) utiliza areia que tem uma umidade elevada no momento do uso, conseqüentemente a relação a/c é maior, resultando em uma grande quantidade de vazios resultantes da evaporação da água em excesso.

4.3 ESTUDO DA POTENCIALIDADE DO USO DA TOMOGRAFIA COMPUTACIONAL 2D E 3D EM AMOSTRAS DE CONCRETO

Para averiguar a potencialidade do uso da TC no concreto, foram utilizados alguns tipos diferentes de testemunhos de concreto. Na Figura 40, está mostrada uma radiografia da amostra de concreto com agregado leve produzido em laboratório, na qual o agregado graúdo é feito de argila expandida.



Figura 40. Imagem radiográfica da amostra de concreto leve produzido em laboratório.

Na Figura 41, é apresentada a reconstrução tomográfica 2D, (a) da região próximo ao topo da amostra, (b) e (c) da região central e (d) da região próxima a base da amostra de concreto leve, onde foi possível verificar os agregados leves, porém de densidades diferentes (pela variação de tonalidades: quanto mais claro, mais denso; quanto mais escuro, menos denso; culminando com os vazios existentes, tonalidade escura), a pasta de cimento e a aderência entre a pasta e o agregado.

Foi possível observar na própria Figura 41, o efeito de endurecimento do feixe, que corresponde às distorções devido ao tipo da amostra utilizada não ser homogênea. Estas distorções surgiram durante a reconstrução tomográfica. Como os feixes de baixa energia são absorvidos com certa facilidade por um elemento mais denso, ocorreu uma redução significativa na sua intensidade em determinadas regiões.²⁶ Devido a essas distorções perde-se a qualidade das bordas da amostra nas imagens radiográficas, sendo necessário fazer um tratamento mais detalhado nestas imagens para a correção do efeito de endurecimento de feixe.

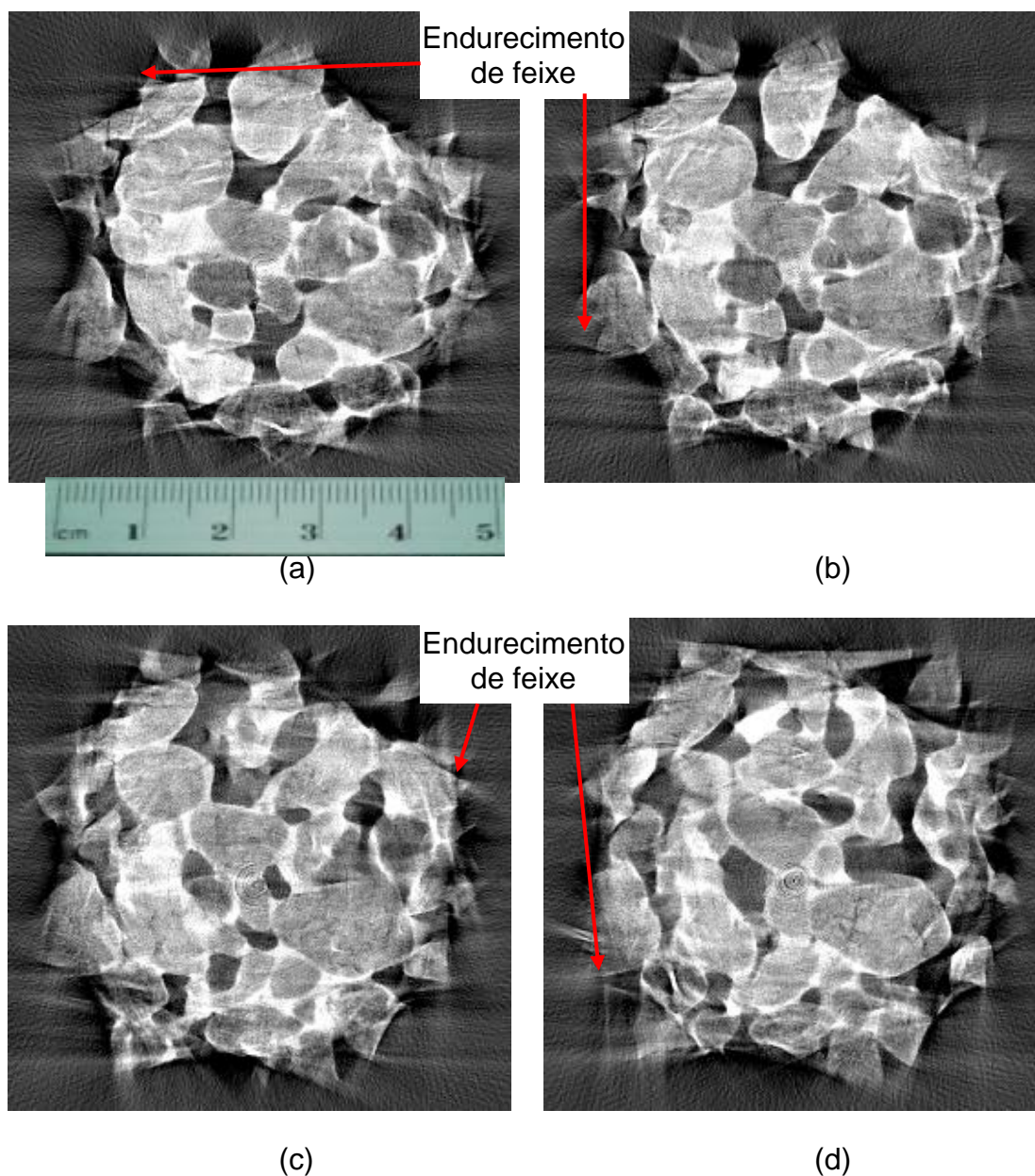


Figura 41. Imagem 2D por TC da amostra de concreto leve feito em laboratório, (a) fatia próxima ao topo, (b) e (c) região central e (d) fatia próxima a base da amostra (512 x 512) "pixels".

Na Figura 42, está mostrada a imagem radiográfica, em diferentes ângulos, de um testemunho de concreto extraído da UHE Mourão, onde foi possível observar o agregado graúdo (parte escura) e a argamassa (parte clara) conforme indicados na Figura, porém, com baixa resolução. Neste tipo de imagem os materiais mais densos apresentam tonalidades de cinza mais escuras e os materiais com menor densidade aparecem com tons de cinza mais claros.

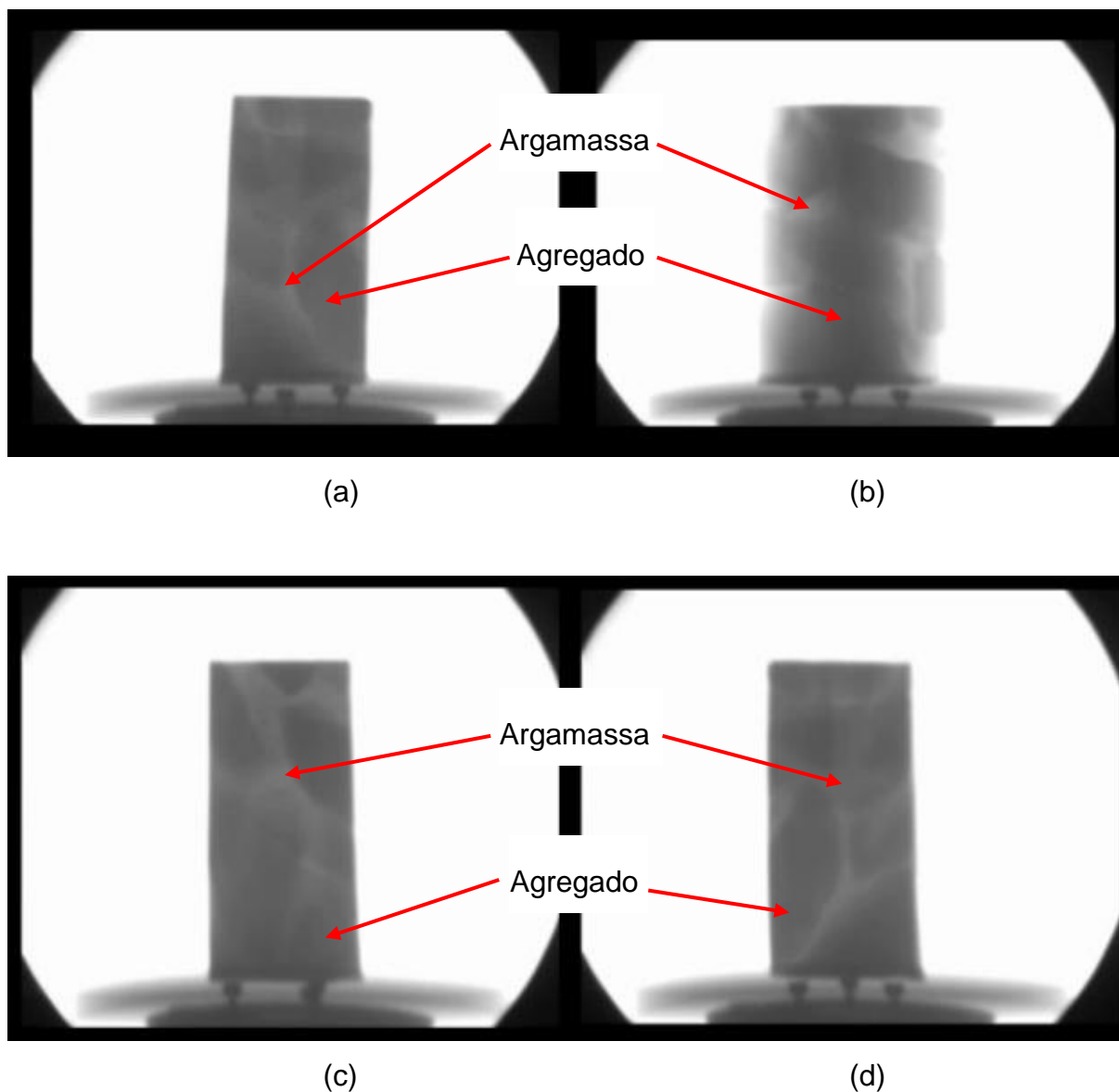


Figura 42. Radiografias do testemunho de concreto extraído de UHE (a) 0°, (b) 45°, (c) 90° e (d) 180° (80 kV, 4 mA).

Na Figura 43, estão apresentadas as imagens tomográficas 2D de varias seções transversal do testemunho da UHE Mourão, sendo (a) referente ao topo da amostra, (b) e (c) regiões centrais onde é possível observar a presença de um vazio que se formou, possivelmente, pela água aprisionada junto ao agregado graúdo⁶ e (d) uma fatia da base.

Como a resistência de uma estrutura de concreto é bastante afetada por vazios é importante conhecer o volume de vazios para estimativa da resistência mecânica. Como resultado da imagem, pode-se atribuir que a técnica de TC

possibilita determinar o volume total de vazios da amostra, tal como já observado na literatura²⁰ e que tal parâmetro poderá ser correlacionado com os resultados da resistência mecânica.⁶ Este estudo está sendo sugerido como trabalho futuro, pela relevância do tema.

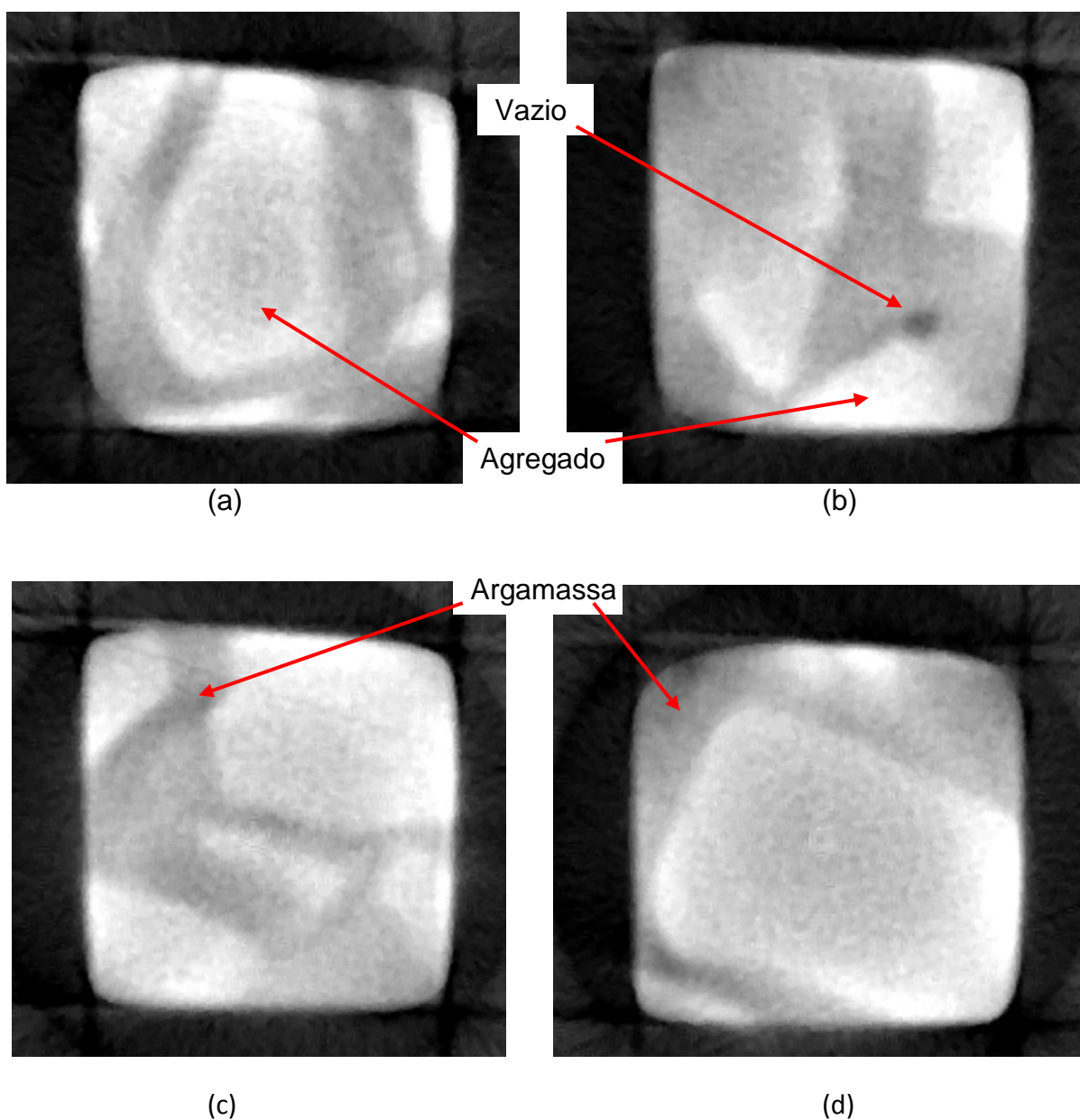


Figura 43. Tomografia 2D (a) do topo, (b) e (c) da região central e (d) da base do testemunho. (178 x 178) "pixels".

Para a reconstrução 3D dos CPs de argamassa, cuja tomografia 2D foi mostrada na Figura 39, a resolução foi reduzida devido às limitações

computacionais. As imagens desta reconstrução estão apresentadas na Figura 44, em dois ângulos diferentes, nas quais se observa a impossibilidade de visualizar os furos com diâmetros menores do que 3 mm. Essa reconstrução tomográfica foi feita com o uso do algoritmo *marching cubes*²⁰, desenvolvido no Laboratório de Análise de Materiais do LacTec, o qual permite separar a região de interesse que neste caso destaca a interfase ar e argamassa.

A reconstrução tridimensional da superfície do “phantom” possibilitou alguns diagnósticos, tais como, forma anatômica do objeto e medida de volume e área superficial.²⁰

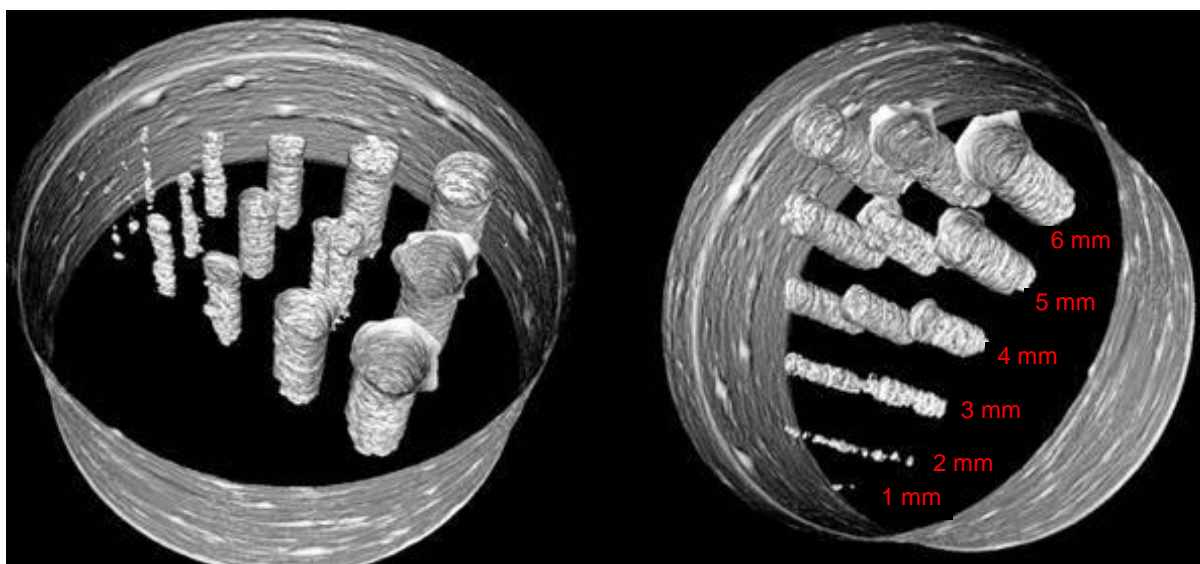


Figura 44. Tomografia 3D da amostra ilustrada na Figura 39 (duas vistas). Algoritmo “marching cubes” com limiar para renderizar a interface ar e argamassa.

Com o sistema calibrado para a determinação de volumes, a técnica foi aplicada na determinação do volume total de pedra brita do testemunho de UHE Mourão, apresentado na Figura 31.

Inicialmente foi feita a reconstrução tomográfica 3D do testemunho, como está apresentado na Figura 45, na qual é possível observar a argamassa e o agregado graúdo visto externamente em dois ângulos diferentes, onde é possível

observar o agregado graúdo, com tons de cinza mais claros, imerso na argamassa, tons de cinza mais escuros.

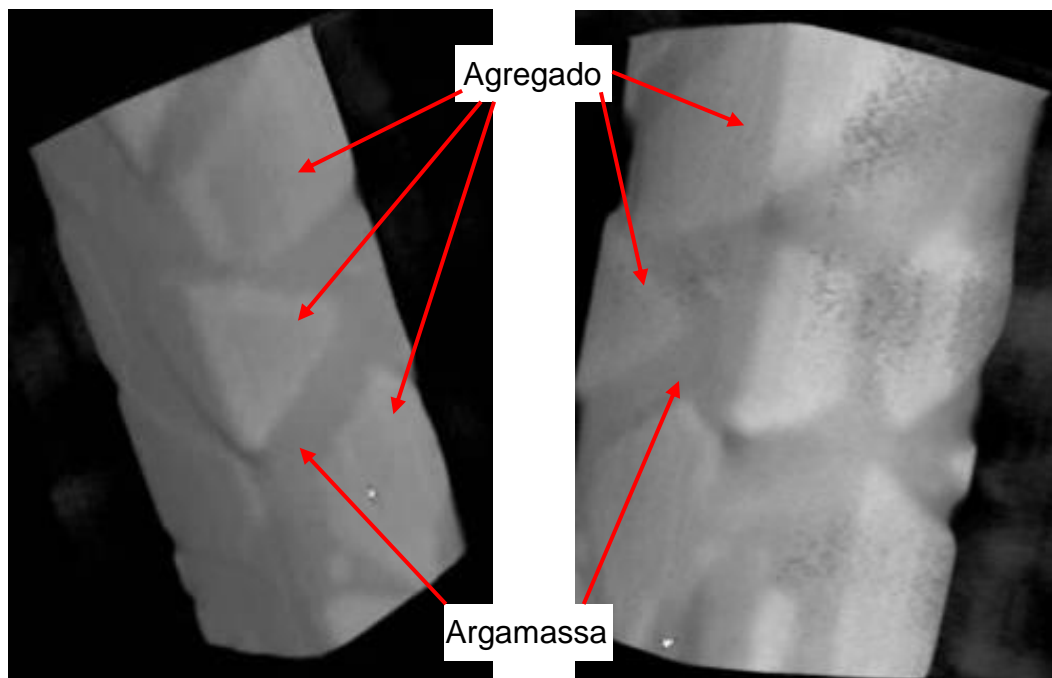


Figura 45. Reconstrução da superfície do testemunho retirado da UHE Mourão.

Na Figura 46 está mostrada a reconstrução tomográfica 3D, do testemunho apresentado na Figura 31, na qual foi extraído apenas o agregado graúdo (brita) com a utilização do Algoritmo “*marching cubes*” visto de diferentes ângulos, no qual foi escolhido um limiar para renderizar a interface brita/argamassa.

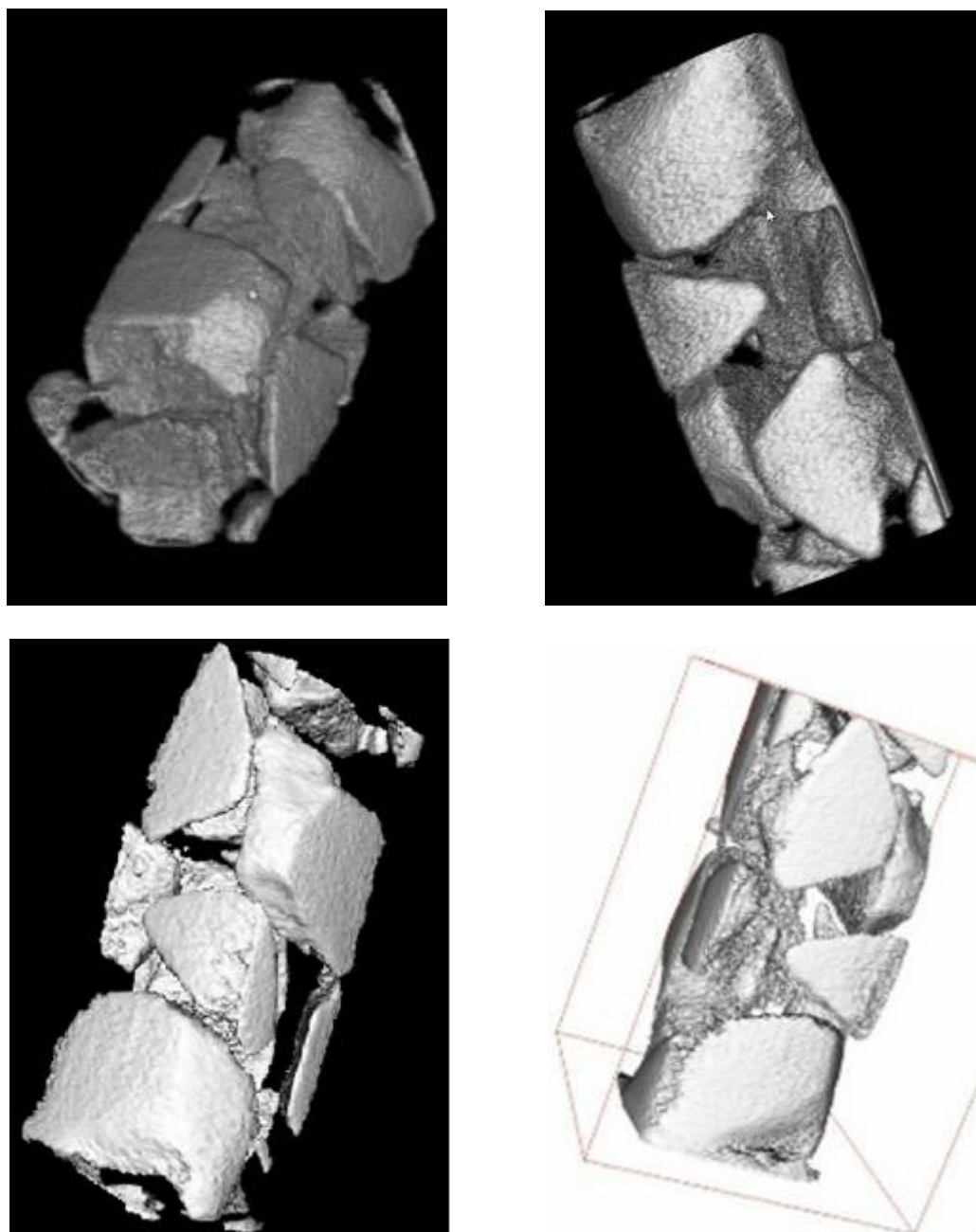


Figura 46. Reconstrução 3D da superfície do testemunho retirado da UHE Mourão em diferentes ângulos. Algoritmo “*marching cubes*”. Limiar escolhido para renderizar apenas a brita.

Em seguida foi feita a ampliação de alguns pontos do testemunho para uma análise mais precisa do agregado graúdo, o qual esta apresentado na Figura 47.

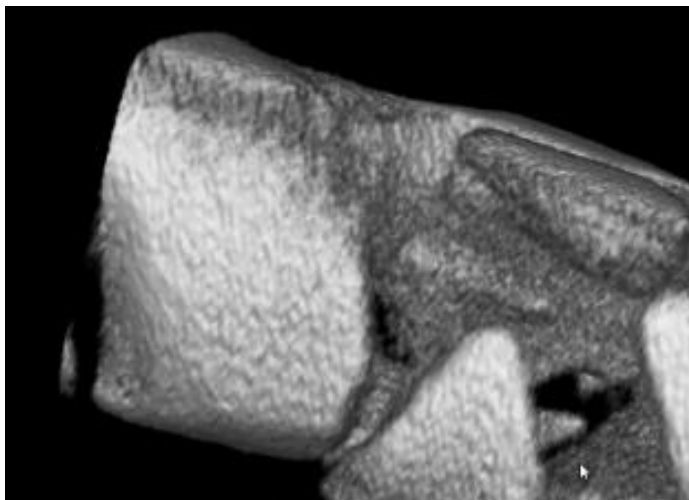


Figura 47. Reconstrução 3D da superfície do testemunho retirado da UHE Mourão com ampliação de uma região.

O filtro da mediana foi utilizado nestas imagens (máscara (5 x 5 x 3)) com a classe “vtkMedian3D do VTK”. Foram utilizadas 341 fatias para a reconstrução dessa imagem com tamanho de (178 x 178) “pixels”. Pode-se observar nessa imagem os agregados graúdos com mais detalhes, se eles apresentam ou não fissuras além da distribuição interna dos mesmos no interior do testemunho.

4.4 DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS E BRITAS

Com as informações obtidas da tomografia ilustrada na Figura 44, foi calculado o volume dos vazios feitos na amostra, porém apenas para furos com diâmetros superiores a 3,0 mm, pois vazios menores não ficaram bem definidos nas imagens tomográficas 3D. No gráfico da Figura 48, está representado este volume (m^3) analisado em 9 regiões similares (vazios) encontrados no testemunho.

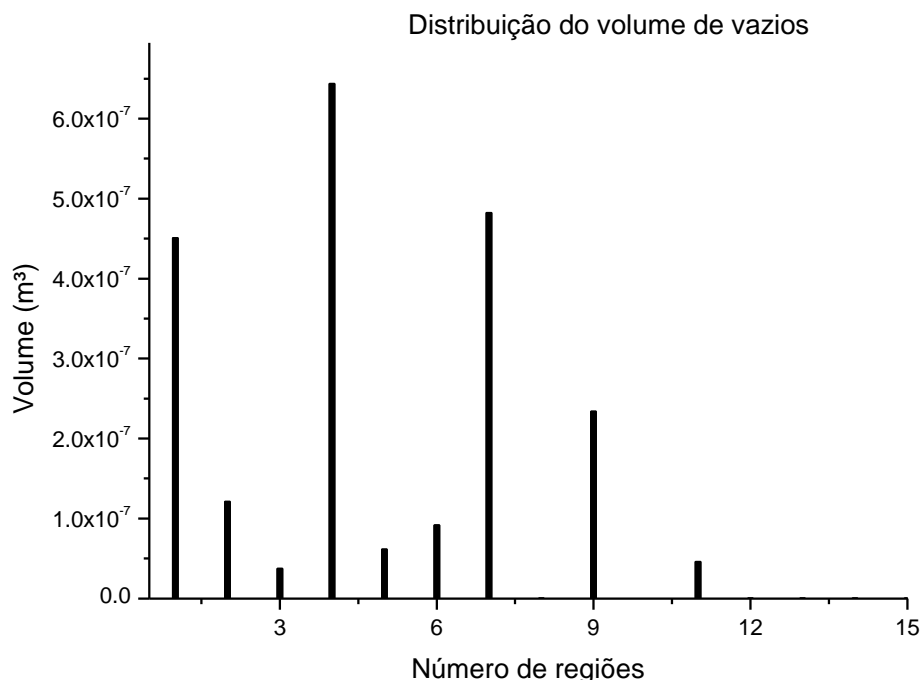


Figura 48. Gráfico da distribuição do volume de vazios da Figura 44.

Com os resultados obtidos, foi calculado o volume total de vazios detectados via TC, com o uso do Algoritmo “*marching cubes*” o qual correspondeu a $2,2 \times 10^{-6}$ m³. Para verificar se os valores encontrados para o volume via TC correspondem a realidade, foi feito um calculo desse volume com o resultado de medidas, do diâmetro e da profundidade dos furos, feitas com um paquímetro no qual o resultado encontrado para o volume foi de $2,7 \times 10^{-6}$ m³. Considerando-se ambas as medidas obteve-se uma diferença em volume de 20%, com esses resultados pode-se verificar que os valores para o volume encontrados pela TC correspondem com a realidade. Como o tamanho de um pixel é de 50 µm, ainda é possível afirmar que a técnica para determinação do volume por TC apresenta resultado mais precisos do que métodos tradicionalmente utilizados.

Utilizando a tomografia ilustrada na Figura 46 foi possível calcular o volume dos agregados graúdos presentes no testemunho. No gráfico apresentado na Figura 49, está representado o volume (m³) em função do número de (220) regiões similares (agregados graúdos).

Com o volume de cada brita, foi calculado o volume total das mesmas, que correspondeu a $19,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, comparando com o volume total da amostra ($25,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3$), foi determinado o volume da argamassa ($5,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$). Na Figura 50 é apresentado o cálculo do volume de uma das regiões (região 5) identificadas na tomografia.

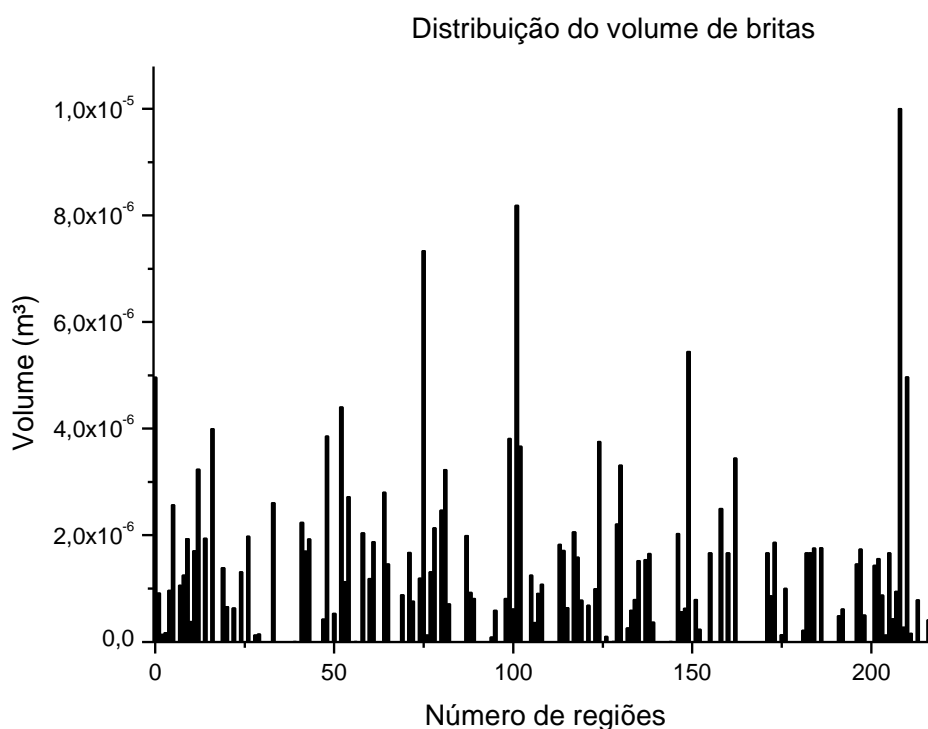


Figura 49. Gráfico da distribuição do volume de brita contida no testemunho da UHE Mourão.

Após o teste, a amostra reconstituída via PEA-220, apresentou um teor de agregado graúdo de $17,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3$. O valor obtido apresentou uma diferença de 10% do valor investigado a partir das imagens via TC.

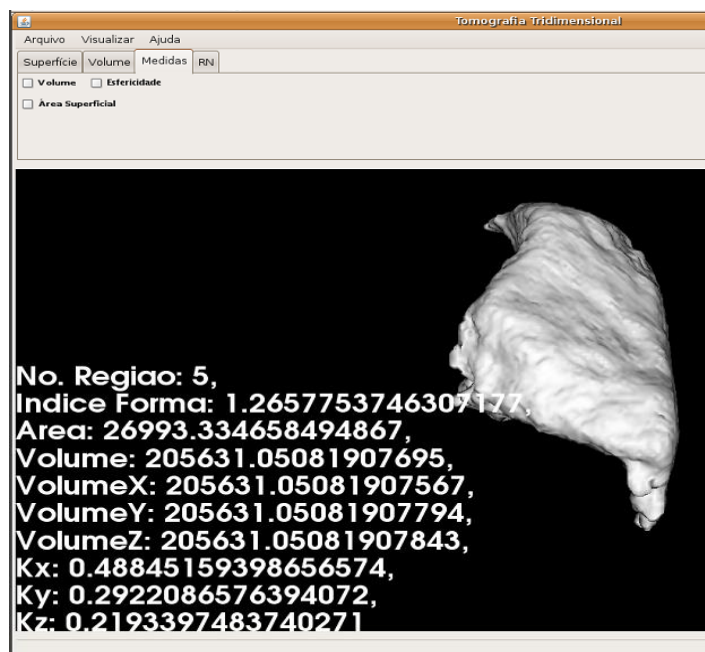


Figura 50. Tomografia 3D da região 5, com cálculo de volume.

Os volumes do agregado graúdo e da argamassa foram usados para determinar a massa específica (ρ) do testemunho da UHE. Os valores obtidos estão listados na Tabela 5. O método 1 corresponde a medida da massa específica usando o Procedimento de Ensaio e Análise (PEA 220) realizado no LacTec, o método 2 corresponde ao uso da TC aplicando o Algoritmo “*marching cubes*” para a aquisição do volume, a massa foi medida com a balança e então a massa específica foi calculada com os valores coletados.

Tabela 5. Massa específica do testemunho de UHE, obtido analiticamente e via TC

	ρ_{brita} (kg/m ³)	$\rho_{\text{argamassa}}$ (kg/m ³)	$\rho_{\text{testemunho}}$ (kg/m ³)
Método 1	2239,7	3091,2	2663,0
Método 2	1948,2	4496,4	3222,3

Os valores obtidos para a massa específica da amostra de concreto apresentam uma variação de 17%, entre o método 1 e o método 2 por imagens via TC. Como o tamanho de um pixel é menor que um milímetro, o método tomográfico para determinação do volume é mais exato que o método analítico. Portanto pode-

se concluir que a TC é uma técnica com excelentes resultados quantitativos e qualitativos para a análise de amostras de concreto, no qual os resultados obtidos permitem a construção das amostras de concreto com condições muito semelhantes aos testemunhos extraídos de barragens de UHE, além da utilização de materiais de reparo compatíveis com os materiais da obra, para que a estrutura tenha o seu tempo de vida prolongado com boas condições de segurança.

5 CONCLUSÃO

Com o uso de radiografias de um “phantom” em forma de escada, foi possível determinar o coeficiente de atenuação linear médio, com tensão aplicada no tubo de 100 kV, da pasta de cimento ($\mu = 0,3969 \text{ cm}^{-1}$) e da argamassa ($\mu = 0,4398 \text{ cm}^{-1}$). Esta informação foi fundamental para a calibração do equipamento de raios X (como tensão da fonte, corrente e tempo de integração) para se ter imagens de boa qualidade.

A visualização 3D das amostras, com a técnica de TC mostrou-se satisfatória para analisar o conteúdo volumétrico de vazios em amostras especialmente preparadas de argamassa e de agregados graúdos contidos em testemunhos de concreto extraídos da barragem da UHE Mourão com tempo de serviço superior a 40 anos, de forma não destrutiva.

A diferença no valor do volume de agregado graúdo, obtido de imagens 3D via TC apresentou uma diferença de 10% do valor obtido por métodos tradicionais. Para a massa específica calculada com valores oriundos da TC, o resultado encontrado apresentou uma diferença de 17% em relação a métodos tradicionais. Considerando que o tamanho de um pixel é de $50 \mu\text{m}$, o método tomográfico para determinação do volume apresenta resultados mais precisos que os métodos tradicionais.

A principal contribuição deste trabalho consistiu em uma nova proposta metodológica para a visualização interna, obtenção do volume de britas, de vazios e de argamassa em estruturas de concreto além da estimativa da massa específica do concreto utilizado de forma não destrutiva, utilizando a tomografia industrial como ferramenta de trabalho. Os resultados obtidos permitem a utilização de materiais de reparo compatíveis com os materiais da obra, para que a estrutura tenha o seu tempo de vida prolongado com boas condições de segurança.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolvimento de um método de segmentação de defeitos automático. Automatizar a escolha do valor de limiar ótimo.

Reconhecimento automático de defeitos em tomografias de corpos de concreto usando redes neurais artificiais. As imagens geradas pelo tomógrafo industrial poderão ser empregadas como entrada para um sistema de identificação automática de defeitos por.

Estudo da relação entre vazios e propriedades mecânicas. Relacionar o resultado da determinação do volume de vazios das tomografias com a modificação das propriedades mecânicas de amostras de concreto (resistência a esforços de tração, compressão, cisalhamento, etc.)

Aplicação da técnica para outros estudos em concreto. A tomografia computadorizada de raios X poderá ser aplicada em outras análises de concreto: visualização da distribuição do conteúdo de água poros, estudo do processo de absorção de água, visualização do surgimento e da formação de trincas internas durante o processo de cura.

6 REFERÊNCIAS

- ¹ PORTELLA, K. F. ; GALVÃO, J. C. ; JOUKOSKI, A ; FERREIRA, E. S. ; SANTI, Maria Raquel de Andrade. Patologias em concreto tipo gravidade de barragem de usina hidroelétrica com 40 anos de vida útil: UHE Mourão. In . 4º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas. Aveiro, Portugal, Universidade de Aveiro, 2008.
- ² GALVÃO, J. C. A.; PORTELLA, K. F.; FERREIRA, E. S.; JOUKOSKI, A; SANTI, M. R. A.; BRAMBILLA, K. J. C. Desempenho de Concretos com Adição de Fibras Recicladas como Material de Reparo de Superfícies Hidráulicas: Estudos para a Recuperação do Vertedouro da UHE Mourão: 1º Etapa. 50º Congresso Brasileiro do Concreto. Salvador, Brasil, 2008.
- ³ GRABOWSKI, S. L., PADARATZ, I. J., & PINTO, R. C. (2008). Avaliação de placas de concreto com o método não destrutivo do eco-impacto. **Anais... 50º Congresso Brasileiro do Concreto** . Salvador, Brasil.
- ⁴ BRAZ, D., MOTA, L. M., & LOPES, R. T. (1998). **Computed tomography in the fatigue test analysis of na asphaltic mixture**. Applied Radiation and Isotopes , 661-671.
- ⁵ ROMANO, A. (2004). **Apostila de Tecnologia do Concreto**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- ⁶ NEVILLE, A. M. (1997). **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini.
- ⁷ MEHTA, P. K., & MONTEIRO, P. J. (2008). **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON.
- ⁸ HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. Editora Pini, 1ª edição, São Paulo, 1992.
- ⁹ ANDRIOLO, F. R.; SGARBOZ, B. C. **Inspeção e Controle de Qualidade do Concreto**. Editora NEWSWORK, São Paulo, 1993.

-
- ¹⁰ Revista Fator Brasil '**Barragens mal dimensionadas e sem manutenção destroem vidas e meio ambiente**', 2009. Disponível em: <http://www.revistafatorbrasil.com.br> Acesso 26/05/09.
- ¹¹ **Construção São Paulo**, nº 2277, setembro 30/91, p. 4-21.
- ¹² ESCOBAR, C. J., CRUZ, D. A., & FABRO, G. (2008). Avaliação de Desempenho do Ensaio de Esclerometria na Determinação da Resistência do Concreto Endurecido. **Anais... 50º Congresso Brasileiro do Concreto**. Salvador: IBRACON.
- ¹³ SILVA, A. S., AZEVEDO, M. T., AZEVEDO, A. P., NEVES, J. B., SPINOLA, A. S., & CARMO, A. A. (2008). Avaliação de desempenho de concretos através dos ensaios não destrutivos de esclerometria, penetração de pinos e de ultra-som em relação à resistência à compressão produzidos em Salvador-BA. **Anais... 50º Congresso Brasileiro do Concreto**. Salvador: IBRACON.
- ¹⁴ MALHOTRA, V.M.; CARINO N.J.. **Handbook of Nondestructive Testing of Concrete**. Boca Ranton 2. ed., CRC Press, 2004.
- ¹⁵ FERREIRA, R. C.; FREIRE, W. J. Eficiência da estabilização do solo e qualidade de tijolos prensados de terra crua tratada com aditivos químicos, avaliadas pela combinação de testes destrutivos e não-destrutivos. **Eng. Agrícola** - c. vol.24 nº.3 Jaboticabal Sept./Dec. 2004.
- ¹⁶ FERRARI, V. J., & PADARATZ, I. J. (2003). Aplicação de ondas ultra-sônicas na detecção das primeiras fissuras em vigas de concreto armado e na avaliação da resistência à compressão. **Acta Scientiarum Technology** , v. 25, nº 2, p. 185-191.
- ¹⁷ GRABOWSKI, S. L., PADARATZ, I. J., & PINTO, R. C. (2008). Avaliação de placas de concreto com método não destrutivo do eco-impacto . **Anais... 50º Congresso Brasileiro do Concreto**. Salvador: IBRACON.
- ¹⁸ MALISKA A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura. Florianópolis**. 98 p. Apostila - Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC.
- ¹⁹ FREITAS, C; GALVÃO, J. C. A. G.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; GOMES FILHO, C. V.; FERREIRA, E. S. Desempenho físico-químico e mecânico de

concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. **Química Nova**, vol.32 nº.4 São Paul,o 2009.

- ²⁰ GODOI, W. C. ; de GEUS, K ; da SILVA, R R ; FILHO, V Swinka. Automated flaw detection in X-ray tomography of polymer insulators. **Insight (Northampton)**, v. 52, p. 533-539, 2010.
- ²¹ GEUS, K. 'Visualização 3D em planejamento de radioterapia usando rendering de volumes por ray casting' In: Simpósio Brasileiro De Computação Gráfica E Processamento De Imagens, **Anais...** do SIBGRAPI VI. p. 303-312, Recife, 1993.
- ²² CARNEIRO, M. M., VELHO, L. '**Um estudo de algoritmos para visualização simultânea de dados volumétricos e superfícies poligonais**' Rio de Janeiro: PUC-RJ, 2000. 54 p. Relatório técnico.
- ²³ DREBIN, R. A., CARPENTER, L., HANRAHAN, P. 'Volume Rendering. Computer Graphics', **Communications of the ACM**, New York, v. 22, n. 4, p. 65-74, aug. 1988.
- ²⁴ FUCHS, H., KEDEM, Z. M., USELTON, S. P. 'Optimal Surface Reconstruction from Planar Countours', **Communications of the ACM**, New York, v. 20, n. 10, p. 693-702, oct. 1977.
- ²⁵ TEIXEIRA, A. R. F. **Reconstrução de Funções Constantes por Partes Utilizando a Transformado do Raio X**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- ²⁶ PIEKARZ, A. H. **Determinação do Volume em Vazios em Isoladores Poliméricos por Técnicas de Tomografia Digital de Raios X e Processamento de Imagens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, 2006.
- ²⁷ GODOI, W. C., de GEUS, K., SWINKA-FILHO, V., SILVA, R. R. 'Volume and surface measurements of flaws in polymeric insulators using X-ray computed tomography', **Insight Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, vol. 50, N° 10, 2008.

-
- ²⁸ LORENSEN, W. E., CLINE, H. E. 'Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm', **Computer Graphics**, New York, v. 21, n. 4, p. 163-169, jul. 1987.
- ²⁹ QUOIRIN, N. S. R. '**Diagnóstico de Defeitos em Madeira por Tomografia de Raios X**'. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.
- ³⁰ GONZALEZ, R. C., WOODS, R. E. **Digital Image Processing**, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1992.
- ³¹ ALBUQUERQUE, M. P., CANER, E. S., MELLO, A. G., ALBUQUERQUE M. P. **Análise de Imagens e Visão Computacional**, Disponível em <http://mesonpi.cat.cbpf.br/e2004/docs/G7-marcio.pdf>
- ³² GODOI, W. C., **Deteção de Defeitos em Isoladores Poliméricos por Radiografia Digital**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- ³³ MENDES, R., PORTELLA, K. F., GALVÃO, J. C. A., GODOI, W. C., SWINKA-FILHO, V. 'Estudo da Potencialidade do Uso da Tomografia Computacional 3D em Amostras de Concreto'. **Anais...** 4º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas. Curitiba, Brasil, 2009.
- ³⁴ MENDES, R., PORTELLA, K. F., GALVÃO, J. C. A., GODOI, W. C., SWINKA-FILHO, V. Reconhecimento de patologias de concreto utilizando a técnica de Tomografia Industrial de Raios X (TRX). **Anais...** 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Curitiba PR. 2009.
- ³⁵ MORAVIA, W. G., OLIVEIRA, C. A. S., GUMIERI, A. G., VASCONCELOS, W. L. 'Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve'. **Cerâmica**, 52, 193-199, 2006.
- ³⁶ GODOI, W. C., SILVA, R. R., SWINKA-FILHO, V. 'Pattern recognition in the automatic inspection of flaws in polymeric insulator', **Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, Vol. 47, no. 10, pp 608-614, October 2005.
- ³⁷ ANDREUCCI, R. **Proteção Radiológica / Aspectos Industriais**. Ed. Jan/2010.