



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Camile Mansur Mansur

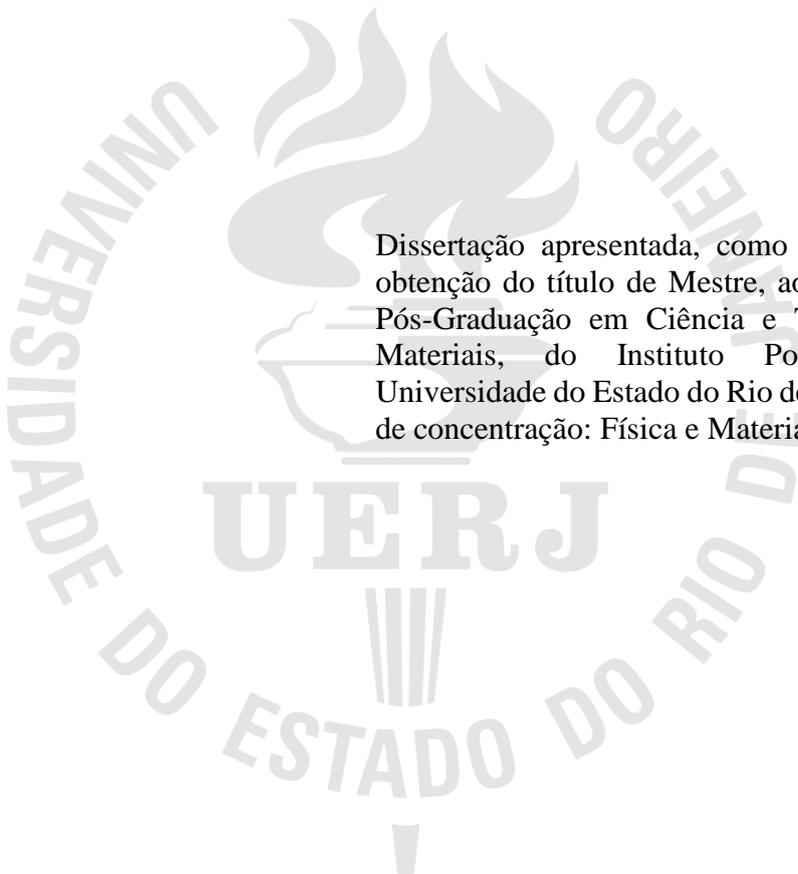
**Desenvolvimento de um microtomógrafo de raios X de baixo custo que
utiliza um sensor de imagem digital de pequenas dimensões**

Nova Friburgo

2021

Camile Mansur Mansur

Desenvolvimento de um microtomógrafo de raios X de baixo custo que utiliza um sensor de imagem digital de pequenas dimensões



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

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis

Nova Friburgo

2021

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

M289 Mansur, Camile Mansur.

Desenvolvimento de um microtomógrafo de raios X de baixo custo que utiliza um sensor de imagem digital de pequenas dimensões / Camile Mansur Mansur. – 2021.

71 f. : il.

Orientador: Joaquim Teixeira de Assis.

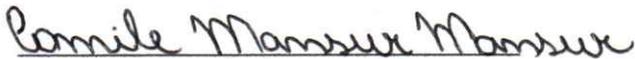
Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

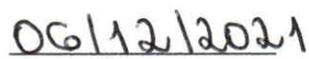
I. Tomografia computadorizada - Teses. 2. Processamento de imagens - Teses. 3. Máquinas - Projetos - Teses. I. Assis, Joaquim Teixeira de. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 004.932

Bibliotecária Cleide Sancho CRB7/5843

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


Assinatura


Data

Camile Mansur Mansur

Desenvolvimento de um microtomógrafo de raios-X de baixo custo que utiliza um sensor de imagem digital de pequenas dimensões

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Física e Mecânica dos Materiais, Linha de Pesquisa: Caracterização por Técnicas de Raios-X

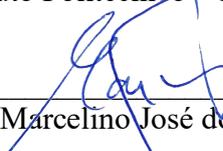
Aprovada em 27 de outubro de 2021.

Banca examinadora:



Prof. Joaquim Teixeira de Assis, D.Sc. (Orientador)

Instituto Politécnico - UERJ



Prof. Marcelino José dos Anjos, D.Sc.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ



Prof. Joel Sanchez Dominguez, D.Sc.
Instituto Politécnico - UERJ



Prof. Davi Ferreira de Oliveira, D.Sc.
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Nova Friburgo

2021

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Márcia e Luiz Jamil,
por todo incentivo, dedicação e amor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades e chegar até aqui.

À toda minha família, em especial aos meus pais, Márcia e Luiz Jamil, pelo cuidado, amor, incentivo e apoio em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Joaquim Teixeira de Assis, por toda a dedicação, interesse e paciência, me dando todo o auxílio necessário para a elaboração deste projeto.

Ao técnico, Luiz Felipe Lobato da Fonseca, que ajudou na construção do sistema do microtomógrafo e na execução dos testes.

Ao Prof. Joel Sánchez Domínguez e ao Prof. Davi Ferreira de Oliveira, pelas contribuições no processo de reconstrução de imagem microtomográfica.

Ao Laboratório de Ensaios Físicos (LEFI) – IPRJ/UERJ.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Joel Sánchez Domínguez, Prof. Marcelino José dos Anjos e Prof. Davi Ferreira de Oliveira, por aceitarem o convite e por todas as valiosas sugestões que tanto engratecem esse trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, que sempre estiveram dispostos a ajudar e contribuir para minha formação com todo o conhecimento transmitido.

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

Ao meu namorado, Edigar, por estar comigo em todos os momentos. Obrigada pela parceria de sempre.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado durante toda a minha trajetória acadêmica até aqui e que eu levo para a minha vida.

Enfim, agradeço a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista.

Aldo Novak

RESUMO

MANSUR, Camile Mansur. Desenvolvimento de um microtomógrafo de raios X de baixo custo que utiliza um sensor de imagem digital de pequenas dimensões. 2021. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2021.

A microtomografia computadorizada possui o mesmo princípio físico da tomografia computadorizada e é uma técnica de grande relevância para diversas áreas da ciência. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um microtomógrafo de raios X de baixo custo para realização de ensaios não-destrutivos no estudo de pequenas amostras de materiais. Utiliza como detector um sensor de imagem digital desenvolvido originalmente para aquisição de imagens odontológicas intraorais e um tubo de raios de baixa potência. Será abordada toda a metodologia a qual possibilitou a montagem do sistema, desde a emissão de raios X, detecção e o armazenamento de imagem, controle de rotação da amostra, a parte computacional envolvida e a proteção radiológica. São apresentados os resultados obtidos, primeiramente, o sistema de microtomografia que foi construído e as suas principais características e, os resultados preliminares de testes que foram realizados, a fim de se analisar o microtomógrafo e confirmar a sua aplicabilidade. O sistema foi capaz de produzir radiografias com boa qualidade para a realização do processo de reconstrução de imagem, permitindo posteriormente, uma análise detalhada dos objetos em estudo. O microtomógrafo cumpriu o objetivo proposto, se mostrando eficiente no estudo de amostras de pequenas dimensões.

Palavras-chave: Tomografia computadorizada. Microtomografia computadorizada. Desenvolvimento de um sistema de microtomografia.

ABSTRACT

MANSUR, Camile Mansur. Development of a low cost X-ray microtomograph using a small digital image sensor. 2021. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2021.

Computed microtomography has the same physical principle as computed tomography and is a technique of great relevance to several areas of science. This work presents the development of a low-cost X-ray microtomograph to perform non-destructive tests in the study of small samples of materials. It uses as detector a digital image sensor originally developed for the acquisition of intraoral dental images and a low-power ray tube. The entire methodology which enabled the assembly of the system will be addressed, from X-ray emission, image detection and storage, sample rotation control, the computational part involved and radiological protection. The results obtained are presented, firstly, the microtomography system that was built and its main characteristics, and, the preliminary results of tests that were carried out, in order to analyze the microtomography and confirm its applicability. The system was able to produce good quality radiographs for the image reconstruction process, subsequently allowing a detailed analysis of the objects under study. The microtomograph fulfills the proposed objective, showing itself to be efficient in the study of small samples.

Keywords: Computed tomography. Computerized microtomography. Development of a microtomography system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Registro da primeira radiografia humana publicada.....	22
Figura 2 - Funcionamento do tubo de raios X.....	24
Figura 3 - Esquemas de procedimento de Tomografia Computadorizada.	26
Figura 4 - Diagrama básico de um sistema de microtomografia.....	28
Figura 5 - Componentes básicos de um sistema de TC.....	29
Figura 6 - Esquema do passo da radiação pela matéria para diferentes casos.....	30
Figura 7 - Estudo de um corpo com TC.	31
Figura 8 - Etapas do processo de microtomografia em uma determinada amostra.	32
Figura 9 - Mecanismos de detecção de raios X.	34
Figura 10 - Tubo de raios X utilizado no sistema microtomográfico desenvolvido.	36
Figura 11 - Sensor digital Saevo.....	38
Figura 12- Goniômetro utilizado no microtomógrafo desenvolvido.....	40
Figura 13 - Microcontrolador Arduino na versão MEGA.....	41
Figura 14 - Motor de passo NEMA 17 com caixa redutora 63:1.	42
Figura 15 - Driver motor A4988.....	42
Figura 16 - Circuito de controle do motor.....	43
Figura 17 - Software de controle do tubo de raios X.....	44
Figura 18 - Interface do software do Sensor Digital Saevo.....	45
Figura 19 - Software de reconstrução NReconv.....	46
Figura 20 - Blindagem radiológica do sistema de microtomografia de raios X.....	47
Figura 21 - Monitor de radiação digital.....	48
Figura 22 - Imagem radiográfica importada no ISee!.	50
Figura 23 - Determinação da Função de Transferência de Modulação no ISee!.	50
Figura 24 - Sistema microtomográfico de raios X com a utilização do goniômetro.....	52
Figura 25 - Sistema microtomográfico de raios X com a utilização do motor de passo.	53
Figura 26 - Radiografias realizadas com distância de 70 mm entre o tubo e o detector.	54
Figura 27 - Radiografias realizadas com distância de 140 mm entre o tubo e o detector.	55
Figura 28 - Amostra de madeira com parafuso e prego.	56
Figura 29 - Visualização do processo de reconstrução da amostra.	57
Figura 30 - Imagem do objeto reconstruído.	57
Figura 31 - Amostra de madeira.....	58

Figura 32 - Média das imagens da amostra.	59
Figura 33 - Perfil de linha da média das imagens.	60
Figura 34 - Perfil de linha de apenas uma imagem.	60
Figura 35 - Amostra da madeira com o parafuso.	61
Figura 36 - Fatias de reconstrução do parafuso.	62
Figura 37 - Volume reconstruído de uma parte do parafuso.	62
Figura 38 - Visualização do processo de reconstrução do parafuso.	63
Figura 39 - Amostra do dente no sistema microtomográfico.	64
Figura 40 - Imagens radiográficas do dente.	64
Figura 41 - Fatias de reconstrução do dente.	65
Figura 42 - Imagens preliminares da reconstrução do dente utilizado.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações do tubo de raios X modelo Mini-X Controller.	36
Tabela 2 - Principais especificações do Sensor Digital Saevo.	38
Tabela 3 - Custos dos principais componentes do sistema.	51

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

CCD	Dispositivo de Carga Acoplada
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
IPRJ	Instituto Politécnico da UERJ
LEFI	Laboratório de Ensaio Físicos
MicroCT	Microtomografia Computadorizada
MTF	Função de Transferência de Modulação
RX	Raios X
RC	Radiografia Computadorizada
TC	Tomografia Computadorizada
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
keV	Quiloelétronvolts
kV	Quilovolts
kW	Quilowatts
g	Gramas
m	Metro
mm	Milímetro
mR/h	Miliroentgen/hora
mA	Miliampere
W	Watts
A	Ampere
μ A	Microampere
μ m	Micrometro

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1 REVISÃO DA LITERATURA	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 Raios X	22
2.2 Tubo de raios X	23
2.3 Tomografia Computadorizada	25
2.3.1 <u>Introdução</u>	25
2.3.2 <u>Breve histórico</u>	26
2.3.3 <u>Microtomografia Computadorizada</u>	28
2.3.4 <u>Princípios básicos da Tomografia Computadorizada</u>	29
2.4 Mecanismo de detecção de raios X	32
3 METODOLOGIA	35
3.1 Fonte de raios X	35
3.2 Sistema de detecção	37
3.2.1 <u>Sensor Digital Saevo</u>	37
3.3 Sistema de rotação da amostra	39
3.3.1 <u>Goniômetro</u>	39
3.3.2 <u>Plataforma Arduino</u>	40
3.3.3 <u>Motor de passo</u>	41
3.4 Sistema computacional	43
3.5 Proteção radiológica	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 Caracterização do detector	49
4.1.1 <u>Resolução espacial</u>	49
4.2 Sistema microtomográfico desenvolvido	51

4.3 Testes realizados no microtomógrafo	53
4.3.1 <u>Teste para verificação das melhores posições entre os componentes do sistema</u>	54
4.3.2 <u>Amostra de madeira com prego e parafuso</u>	55
4.3.3 <u>Amostra de madeira sem o prego e o parafuso</u>	58
4.3.4 <u>Amostra de madeira apenas com o parafuso</u>	61
4.3.5 <u>Amostra de um dente</u>	63
CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	68

INTRODUÇÃO

A técnica de tomografia computadorizada foi desenvolvida nos anos 70 e teve rápido uso na Medicina e, posteriormente, em ensaios não destrutivos (CHOMICKI, 1996). Nessa técnica, uma amostra é explorada por um feixe de radiação e através de um sistema de detecção é possível capturar imagens radiográficas a cada passo angular da amostra que é coordenado por um sistema de controle eletromecânico. As imagens bidimensionais que são adquiridas formam um conjunto de dados que, posteriormente, será utilizado no processo de reconstrução de imagem tomográfica. Obtendo como resultado, uma visualização tridimensional da amostra, o que possibilita uma análise detalhada da estrutura do objeto em estudo (BUZUG, 2008).

A primeira aplicação prática dessa técnica foi no campo da Medicina, trazendo grandes avanços no diagnóstico de doenças em diversas especialidades, como Neurologia, Ortopedia e Oncologia. Devido ao grande sucesso na medicina, com o passar dos anos, outras áreas também aderiram o uso da técnica em suas pesquisas, como a Odontologia, Mineralogia ((REYES et al., 2017), Arqueometria (WHITAU et al., 2016), Biologia (SCHMIDEDER et al., 2019), entre outras.

Dentre inúmeras vantagens da TC, algumas se destacam, como o fato de ser uma técnica não-destrutiva e ser capaz de diferenciar materiais de diferentes densidades. Enquanto na radiografia, as imagens são obtidas em duas dimensões com a sobreposição das diferentes estruturas internas das amostras, na TC consegue-se uma qualidade superior das imagens e em até três dimensões permitindo a diferenciação e o estudo dessas estruturas (FERNANDES; APPOLONI; FERNANDES, 2016).

A microtomografia computadorizada possui o mesmo princípio físico da TC, os diferenciais costumam ser o tamanho do foco do tubo de raios X, a resolução espacial do detector e a quantidade de magnificação. A microCT também é conhecida como tomografia computadorizada de alta resolução e tem sido amplamente aplicada para análise em microescala de materiais variados (REIS NETO et al., 2011).

Apesar da relevância e aplicabilidade dessa técnica em diversos segmentos de estudo e pesquisa, o alto custo para aquisição e manutenção de sistemas de microtomógrafos comerciais é considerado um fator que limita o acesso de estudante e pesquisadores de diversas instituições e laboratórios à essa tecnologia.

Com isso, levando em consideração a demanda por sistemas de microtomografia eficientes e mais acessíveis financeiramente, será apresentado neste trabalho o desenvolvimento de um microtomógrafo de raios X de baixo custo. Abordando toda a metodologia a qual possibilitou a montagem do sistema e resultados obtidos para algumas amostras de materiais.

Objetivo

Tendo em vista a relevância da técnica de microtomografia de raios X em diversas áreas da ciência e em contraponto os altos custos de equipamentos comerciais, este trabalho tem como objetivo, construir um microtomógrafo de raios X de baixo custo, para realização de ensaios não-destrutivos no estudo de pequenas amostras de materiais. Através da montagem de um sistema que utiliza como detector um sensor de imagem digital desenvolvido originalmente para aquisição de imagens odontológicas intra-orais, um sistema mecânico baseado num motor de passo e um tubo de raios X de baixa potência. Podem ser citados como objetivos específicos, a proteção radiológica utilizada no sistema e a análise da resolução espacial do detector através da curva de MTF.

Organização do trabalho

O desenvolvimento desse trabalho se divide em 5 capítulos.

O primeiro capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre trabalhos que desenvolveram sistemas de microtomógrafos e que utilizam a técnica de microtomografia computadorizada em aplicações diversas.

O segundo capítulo traz a fundamentação teórica utilizada na elaboração deste trabalho relacionada à técnica de microtomografia computadorizada e seu princípio de funcionamento.

O terceiro capítulo relata os materiais utilizados no estudo, bem como toda a metodologia de construção do microtomógrafo, descrevendo todos os elementos que compõem o sistema.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos no estudo e as discussões dos mesmos, mostra a caracterização do detector, o sistema microtomográfico desenvolvido e os testes que foram realizados.

Por fim, o quinto capítulo traz as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros. Posteriormente, são apresentadas as referências bibliográficas.

1 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados alguns trabalhos encontrados na literatura que foram elaborados no desenvolvimento de sistemas de microtomógrafos e na utilização da técnica de microtomografia computadorizada com aplicações em diversas áreas, como por exemplo, na arqueometria, mineralogia, biologia e medicina.

Coles et al. (1998) desenvolveram um microtomógrafo de raios X utilizando radiação síncrotron para aplicações em fluxos em meios porosos, obtendo imagens de poros usados no transporte de fluidos. O procedimento experimental foi realizado em uma gaiola blindada, foi usado um feixe de raios X produzido por um supercondutor para criar imagens e detector CCD, Kodak KAF-1400. A resolução espacial resultante foi de 30 μm . Posteriormente, as imagens foram reconstruídas e depois transferidas para visualização e processamento.

Lima et al. (2009) analisaram estruturas internas ósseas através da técnica de microtomografia computadorizada. As microtomografias foram obtidas por meio de um sistema radiográfico em tempo real, que possuía um tubo de raios X microfoco. Foram analisadas amostras ósseas de calcâneo humano e fêmur de rato Wistar. Esse estudo avaliou a razão entre o volume de tecido ósseo e o volume total da amostra, o número de trabéculas existente na amostra, a razão entre a superfície óssea e o volume do osso, a espessura das trabéculas e a separação trabecular. Foi utilizado um programa para reconstruções 3D e gerou-se uma tabela de dados contendo as quantificações desejadas. Os resultados do trabalho mostram que a técnica de microtomografia 3D por raios X pode ser potencialmente empregada para análise de microestruturas ósseas, auxiliando no entendimento da morfologia das amostras analisadas, permitindo um levantamento de toda estrutura inspecionada.

Mizuno et al. (2010) caracterizaram uma antiga máscara de madeira que foi descoberta na cidade de Yatsushiro, na província de Kumamoto no Japão, por meio da técnica de microtomografia computadorizada. Pelo que se sabia, essa peça seria do final do século XVI. Havia algumas preocupações quanto a origem do artefato, já que está poderia ser uma das máscaras Hahoe. As máscaras Hahoe, confeccionadas na Coreia, foram todas feitas de amieiros. Neste trabalho, a identificação da madeira tornou-se uma questão fundamental para responder às preocupações mencionadas. Foi realizada uma microtomografia por raios X síncrotron para identificação da madeira. A configuração experimental criou imagens da amostra com uma resolução especial de 0,5 μm , essa resolução permite explorar a maioria dos

atributos anatômicos para identificação de madeira, com isso, foi possível identificar a madeira utilizada e verificar que provavelmente a máscara não tem uma origem japonesa, já que a madeira utilizada não era utilizada no Japão, e sim na Coreia.

Sodini et al. (2012) executaram a análise microestrutural não-invasiva de instrumentos de cordas históricos através da técnica de microtomografia de raios X. Ensaio não-destrutivo são importantes, já que essas peças apresentam valor histórico e comercial. Essa técnica permite avaliar a estrutura interna, defeitos, espessura e densidade do material que está sendo analisado. Utilizaram um detector de alta resolução desenvolvido pelo Instituto Nacional de Física Nuclear da Itália (INFN) e um detector microfaixas de silício. Esse estudo avaliou aspectos estruturais como características morfológicas desses instrumentos, foi possível detectar danos internos e reparos e determinar questões quanto a autenticidade desses valiosos objetos. A aplicação dessa técnica foi de fundamental relevância na avaliação e definição de protocolos de restauração e conservação de instrumentos de importância histórica, artística e econômica.

Pessoa et al. (2014) compararam dados de porosidade do concreto obtidos utilizando a técnica de microtomografia de raios X e também utilizando um scanner comercial. Nos dois testes, as imagens foram processadas utilizando técnicas de morfologia matemática e processamento de pixels. Os resultados do estudo foram comparados com os resultados do teste padrão propostos pela norma brasileira NBR 9778 (2005), o que mostra a compatibilidade entre os dois métodos. A microCT de raios X revelou imagens digitais da estrutura interna dos corpos de prova. Para realização dessa técnica foi usado um equipamento de alta resolução da SkyScan, modelo 1172. Com base nos resultados, concluiu-se que é possível utilizar tanto a microCT de raios X quanto um scanner, com posteriores técnicas de processamento de imagens, para estimar a porosidade do concreto.

Valente et al. (2016) relataram o projeto, construção, caracterização e aplicação de um sistema de microtomografia que foi elaborado no Instituto de Física E. Gaviola – CONICET, Argentina. Foram obtidos resultados satisfatórios para caracterização de amostras orgânicas e inorgânicas. No sistema foi utilizado um tubo de raios X convencional com tensão de até 60 kV e corrente entre 20 mA e 50 mA, utilizaram também um detector flat panel modelo PaxScan 2020+. São apresentados estudos de aplicações em amostras biológicas, como em tecidos ósseos de crânios de coelhos.

Arzilli et al. (2016) realizaram um trabalho de caracterização de rochas carbonáticas utilizando a técnica de microtomografia computadorizada de raios X síncronon para coletar os dados e a análise quantitativa foi realizada pelo software Pore3D. O objetivo foi de se obter

a porosidade e a conectividade, parâmetros essenciais para o entendimento dessas rochas. O uso da microCT possibilitou conhecer características morfológicas e texturais das amostras. A aquisição foi realizada com tamanho de pixel de 9 μm e rotação total de 180°, gerando no total 1440 projeções, usando um feixe de raios X monocromático paralelo. As reconstruções tomográficas foram realizadas usando o software SYRMEP_Tomo_Project 4.0 personalizado. A microCT mostrou-se uma técnica importante na quantificação de porosidade e conectividade de poros e estudos de processos mecânicos responsáveis pela permeabilidade de rochas reservatórios.

Leite et al. (2016) analisaram microestruturalmente o concreto reciclado por meio da técnica de microtomografia de raios X. Foi avaliada no estudo a influência de 50% do agregado de concreto reciclado e sua compensação de absorção de água na microestrutura no concreto reciclado. A microCT de raios X foi usada especialmente para visualizar a distribuição espacial da rede de poros do concreto reciclado que pode possuir maior porosidade do que o concreto convencional. Essa é uma importante ferramenta na caracterização de cimentos e concretos. Nesse trabalho, o feixe transmitido foi detectado por um cintilador que converte raios X em luz visível. O programa Fiji foi usado para obter as imagens reconstruídas, posteriormente, foram processadas pelo software Avizo Fire.

Withau et al. (2016) estudaram artefatos australianos históricos de madeira através da técnica de microtomografia computadorizada. Algumas técnicas de microscopia necessitam de que a peça seja cortada fisicamente, a grande vantagem da microtomografia computadorizada é ser um método não invasivo e rápido. Essa técnica foi usada para caracterizar dois instrumentos de madeira, os táxons de madeira precisam ser identificados, e os elementos microscópicos da estrutura precisam ser observados para que se possa fazer a caracterização de cada artefato.

Machado et al. (2017) utilizaram microtomografia computadorizada para analisar a microestrutura de quatro fragmentos cerâmicos encontrado em dois sítios arqueológicos brasileiros. Essa técnica evita que danos sejam causados as amostras, a não destrutividade é um requisito fundamental neste campo de pesquisa. Através da microtomografia computadorizada é possível diferenciar materiais quanto a sua densidade, diferenciando os componentes da amostra. Permite a análise quantitativa da porosidade total e medição do comprimento das inclusões das peças, permitindo uma comparação a fim de tentar mensurar a origem das mesmas. As imagens de microCT foram obtidas usando o equipamento Skyscan / Bruker, modelo 1173.

Reyes et al. (2017) avaliaram a quantificação de minério através da técnica de microtomografia de raios X. Essa avaliação é comumente feita através de microscopia eletrônica de varredura, porém, o estudo mostra a utilização de microCT como uma nova ferramenta para a mineralogia, se mostrando capaz de avaliar tridimensionalmente propriedades como liberação mineral, tamanho de grão e características texturais. Essa técnica apresenta ainda vantagens de ser não-destrutiva. A técnica se mostrou capaz de distinguir pirita e calcopirita em imagens de microCT e produzir mapas 3D simplificados de minerais. Um scanner Nikon XTH 225 foi usado para realizar a técnica de microtomografia e o detector permitiu resolução linear de aproximadamente 10 μm .

Beaugnon et al. (2019) utilizaram a técnica de microtomografia de raios X para estudar estuques de gesso, que possuem relevante importância na arquitetura histórica. O trabalho apresenta uma análise estrutural dessas peças de gesso, é realizada uma medição da relação água/gesso e é analisada a morfologia do pó usado para fazer o gesso. Dessa forma, consegue-se até mesmo identificar a técnica utilizada pelo artista na criação da peça, obtendo uma visão sobre a matéria prima e a técnica usada. Os resultados foram promissores na aplicação da microtomografia de raios X no estudo dessas peças. Foi utilizada uma câmera sCMOS PCO Edge para adquirir as radiografias e posteriormente, foi usado o algoritmo para processá-las.

Machado et al. (2019) analisaram artefatos metálicos através da técnica de microtomografia computadorizada. Esses artefatos apresentam características específicas que os diferenciam das outras classes de materiais. A corrosão começa na superfície dos artefatos, alterando os metais em óxidos, sulfatos, carbonatos ou outros compostos que podem resultar em modificações em sua morfologia. Esse é um processo natural de deterioração. Através técnica de microtomografia computadorizada foi possível avaliar a estrutura e texturas dos artefatos sob crostas, além de quantificar a perda de material causada pela corrosão. Os resultados obtidos forneceram dados importantes sobre essas peças, proporcionando um diagnóstico preciso sobre seu estado de conservação. As imagens de microCT foram obtidas com um sistema de tomografia Phoenix Vtomex/m GE, um tubo de raios X com tensão máxima de 300 kV e um detector digital.

Schmideder et al. (2019) utilizaram um método baseado em microtomografia de raios X para analisar a morfologia tridimensional de pelotas fúngicas. O estudo da morfologia de fungos filamentosos é fundamental na biotecnologia industrial. Porém, faltam métodos apropriados para esse estudo, esse trabalho torna-se relevante por permitir caracterizar detalhadamente esses materiais. As imagens tridimensionais localizaram e quantificaram hifas, pontas, ramos e todos os aspectos morfológicos de duas pelotas de fungos, o que validou

o novo método. A microCT se mostrou uma ferramenta eficaz para estudar a estrutura tridimensional de microorganismos.

Asadchikov et al. (2019) apresentaram resultados de investigações *in vitro* de cálculos biliares usando a técnica de microtomografia de raios X. O estudo mostra a possibilidade do uso de microCT em investigações de estruturas morfológicas de cálculos biliares, o objetivo é diferenciar pedras de colesterol. Neste trabalho, foi possível diferenciar cálculos puramente de colesterol de cálculos com composição de fase diferente, através de coeficientes de absorção linear. Utilizou-se como fonte um tubo de raios X padrão e um detector CCD de alta resolução.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Raios X

Em 1895, Wilhelm Conrad Roentgen, alemão e até então professor de física, descobre um novo tipo de radiação, os raios X. Roentgen fez essa descoberta através da passagem de corrente elétrica por um tubo de vidro sob vácuo, e que possuía uma característica singular de produzir fluorescência ao incidir sobre chapas fotográficas cobertas com papel escuro. O cientista começou então a realizar diversos experimentos para estudar ainda mais a respeito dessa descoberta, os novos raios que até então se desconhecia. O que mais impressionava era a capacidade desses raios atravessarem corpos sólidos, com mais ou menos intensidade, dependendo do material em estudo. A primeira radiografia publicada foi tirada de forma inesperada e correspondia a mão de sua esposa, que havia lhe auxiliado no momento de um experimento. Na radiografia, apareciam os ossos de sua mão e um anel que ela usava, figura 1 (ARRUDA, 1996).

Figura 1 - Registro da primeira radiografia humana publicada



Fonte: ARRUDA, 1996.

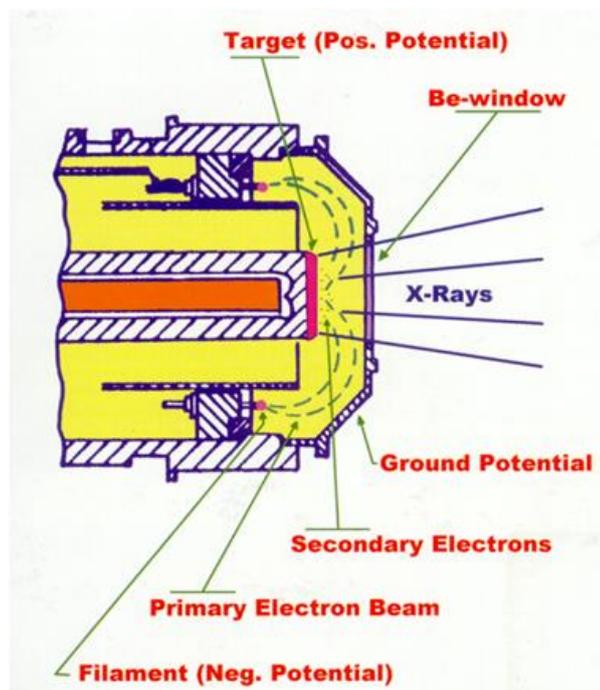
Assim que Roentgen divulgou seus estudos, por todo o mundo, pesquisadores acadêmicos e amadores começaram a reproduzir seus experimentos, buscando entender como essa nova radiação interagia com os mais diversos materiais e todas as informações a seu respeito. Dessa forma, rapidamente se entendeu a importante utilidade médica ao ser possível visualizar corpos estranhos e ossos com detalhes. Com isso, a primeira aplicação dessa nova radiação foi na área da medicina, seguindo posteriormente para outras importantes utilizações, na indústria e na área científica. Na indústria, utilizados na inspeção de amostras de materiais, como por exemplo, aço e alumínio, no que diz respeito a possíveis rachaduras e outros defeitos não visíveis a olho nu. Essa descoberta também revolucionou a pesquisa científica, os raios X são utilizados em diversas linhas de pesquisas, exemplos disso, são as técnicas de radiografia computadorizada e tomografia computadorizada (ARRUDA, 1996; SILVA, 2002).

2.2 Tubo de raios X

Um dos componentes principais da técnica de microtomografia computadorizada é o tubo de raios X. Esse equipamento é responsável por converter energia elétrica em raios X, produzindo um feixe de raios X. O interior do equipamento é mantido sob vácuo e ele possui dois eletrodos, catodo e anodo. O catodo quando atravessado por uma corrente elétrica produz calor, com isso, o filamento libera elétrons que são acelerados em direção ao anodo, devido à diferença de potencial existente entre eles. O catodo é um filamento metálico que corresponde ao eletrodo negativo. A emissão de elétrons ocorre graças ao efeito termiônico, e corresponde ao aumento do fluxo de elétrons que saem de um metal, no caso, o filamento do catodo, isso ocorre pelo aumento de temperatura, o que facilita o fluxo de elétrons (RUSSO, 2017; BUSHONG, 2010).

Ao atingirem o anodo, eletrodo positivo, o feixe de elétrons sofre uma forte desaceleração, devido a colisão com o alvo e a energia cinética produzida é convertida, em sua maioria, em calor, porém, também em raios X (OKUNO, 2010). A figura 2 mostra o esquema de funcionamento do tubo de raios X.

Figura 2 - Funcionamento do tubo de raios X.



Fonte: DE PAPE, 2016.

A produção de raios X ocorre por meio de dois processos: o fenômeno do bremsstrahlung e a emissão de raios X característicos. Os raios X característicos produzem espectros que apresentam linhas com energias características do material do alvo, o espectro não é contínuo. A emissão de raios X nesse processo ocorre devido à transição de elétrons entre camadas mais internas de um átomo. Os raios X de freamento ou bremsstrahlung se dão quando os elétrons sofrem brusca desaceleração por se aproximarem dos núcleos dos átomos que compõem o alvo, isso faz com que ondas eletromagnéticas sejam irradiadas na forma de raios X e produzem um espectro contínuo de energia (OKUNO, 2010; RUSSO, 2017). A tensão aplicada ao tubo, a corrente e o tempo de exposição são parâmetros operacionais importantes ligados a qualidade e quantidade de emissão de raios X.

2.3 Tomografia Computadorizada

2.3.1 Introdução

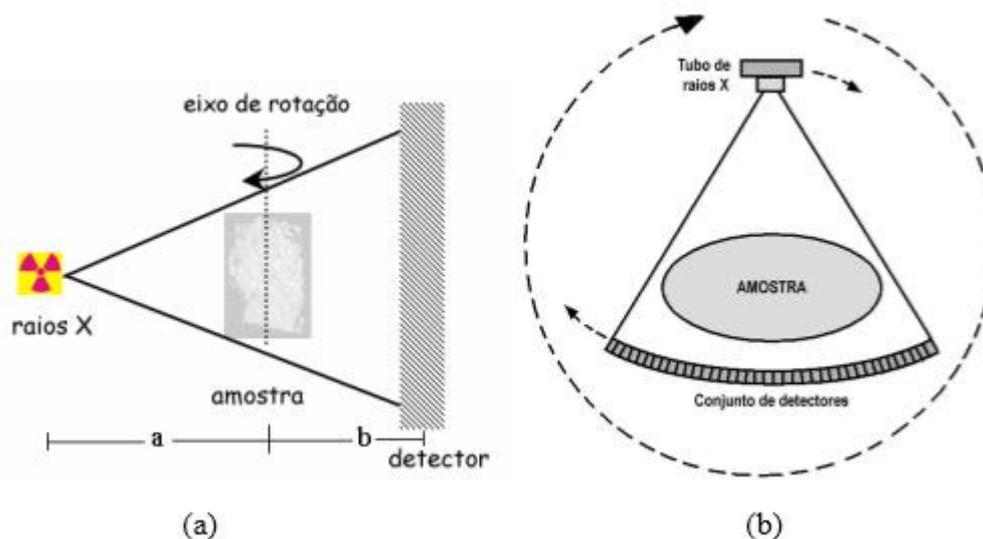
A tomografia computadorizada (TC) avançou com o uso dos raios X. Os raios X permitiram o desenvolvimento da radiografia computadorizada e anos depois a tomografia computadorizada (CHOMICKI, 1996). Nessa técnica, uma amostra é explorada usando algum tipo de radiação para obter imagens detalhadas do corpo. Normalmente, se utiliza raios X como fonte de radiação. A TC possibilita obter informações sobre o posicionamento e a forma tridimensional de um detalhe do objeto inspecionado e também, a estrutura interna do mesmo (LIMA et al., 2007).

Conforme a radiação passa através da amostra, parte dela é absorvida dependendo do coeficiente de atenuação do material. É feita a medição da radiação que chega ao detector, tornando possível calcular este coeficiente e gerar imagens bidimensionais da amostra. As imagens obtidas são armazenadas no computador e processadas por um algoritmo de reconstrução de imagens. A reconstrução matemática de imagem permite relacionar a distribuição de densidade com a atenuação dos feixes de raios X ao atravessarem diferentes estruturas anatômicas (FRIEDLAND; THURBER, 1996). O processamento cria um conjunto de fatias paralelas que representam seções transversais da amostra. A partir da soma ou empilhamento deste conjunto de fatias transversais é possível construir uma imagem tridimensional, permitindo identificar e estudar as estruturas da amostra. Sendo assim, a TC pode ser analisada como um processo de duas etapas. A exploração das amostras, que envolve um escaneamento no qual há interação dos fótons com a estrutura do objeto em estudo e o sistema de detecção e a reconstrução das imagens, que está ligada aos algoritmos matemáticos utilizados para a reconstrução dos dados possibilitando imagens tomográficas do objeto (FRIEDLAND; THURBER, 1996).

A análise de tomografia é realizada obtendo as projeções do objeto a partir de várias direções. Um dos modos é rotacionar a amostra segundo a direção da radiação medindo, em cada passo, a atenuação da radiação. Cada projeção é obtida com o objeto rotacionado com um certo ângulo em relação à posição original, dessa forma, se obtém uma projeção para cada

ângulo. Outro modo possível é girar o conjunto fonte-detector em torno do objeto (LIMA et al., 2007), esses dois esquemas são mostrados na figura 3.

Figura 3 - Esquemas de procedimento de Tomografia Computadorizada.



Legenda: (a) Amostra girando em frente à fonte. (b) Conjunto fonte-detector girando em torno da amostra.

Fonte: LIMA et al., 2007; Adaptada de GOLDMAN, 2008.

A principal vantagem da tomografia computadorizada em relação a radiografia convencional é a capacidade de diferenciar estruturas sobrepostas, essa técnica permite diferenciar tecidos com densidades similares e também qualidade superior das imagens obtidas. A TC produz imagens mais realistas por apresentar a atenuação média de cada pequeno elemento de volume do material (FERNANDES; APPOLONI; FERNANDES, 2016).

2.3.2 Breve histórico

Os primeiros passos da tomografia computadorizada começaram, em 1963, com os estudos de Allan McLeod Cormack, em aplicações médicas, insatisfeito com as imagens bidimensionais formadas pelas radiografias e buscando melhorar os resultados dos estudos em tecidos moles ou para identificar diferentes camadas de tecidos com densidades distintas,

o que não era possível com a radiografia convencional. Cormack desenvolveu um método para o cálculo da distribuição da absorção da radiação no corpo humano que utilizava medidas de transmissão de radiação para tentar identificar diferenças entre estruturas do tecido humano (CORMACK, 1963).

O desenvolvimento da tomografia computadorizada como se conhece atualmente teve início em 1972 iniciado por Godfrey Newbold Hounsfield. Hounsfield foi reconhecido como o “inventor” da tomografia computadorizada por alcançar a primeira aplicação prática da teoria. Ele desenvolveu um protótipo para cabeça com uma fonte de raios gama. O primeiro experimento utilizou um pedaço preservado de cérebro humano (HOUNSFIELD, 1973). Logo após, foi realizada a primeira tomografia da história em um paciente, utilizando raios X, esse estudo permitiu a identificação de um cisto cerebral, comprovando a eficiência do método para detecção de tumores, entre outras anomalias não associadas a ossos. Graças a todos esses avanços e esforços independentes, Hounsfield e Cormack receberam o prêmio Nobel em Medicina, em 1979.

Ao longo dos anos, a tomografia computadorizada passou a ter outras aplicações além da área da medicina. Desde o final da década de 1980, passou a ser uma excelente ferramenta na inspeção industrial e na ciências dos materiais. Passou a ter aplicações na análise de fluxos em meios porosos, obtendo imagens de poros usados no transporte de fluidos (COLES et al., 1998), na análise da porosidade de concreto (PESSOA et al., 2014), se mostrando também uma excelente técnica não-destrutiva para a caracterização de materiais históricos (WHITAU et al., 2016), e uma nova ferramenta para avaliar a quantificação de minério na mineralogia (REYES et al., 2017).

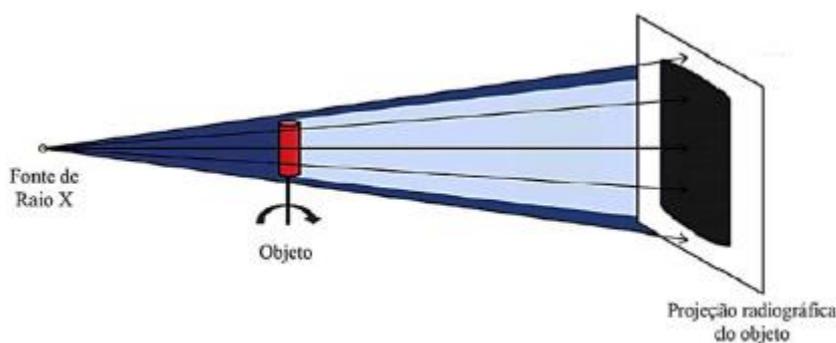
A microtomografia computadorizada avançou na década de 90 com o aumento exponencial da capacidade de processamento dos computadores e a melhoria do processo de fabricação das fontes de raios X que permitiram a obtenção de fontes com foco em escalas cada vez mais reduzidas. Ainda na década de 90, resultados significativos foram alcançados na escala micrométrica. Atualmente, os equipamentos de microCT estão disponíveis comercialmente e possuem características como portabilidade, custo reduzido, resultados rápidos e confiáveis, o que faz com que seja possível a utilização desta técnica em laboratórios, principalmente para pesquisa e análise de materiais (ALVES, 2012).

2.3.3 Microtomografia Computadorizada

A microtomografia computadorizada (microCT) possui o mesmo embasamento teórico da tomografia computadorizada. Os avanços tecnológicos trouxeram a necessidade de se trabalhar em escalas micrométricas e nanométricas, por isso alguns equipamentos foram adaptados e aprimorados para determinadas aplicações, como foi o caso dos microtomógrafos. A microtomografia possibilitou análise em microescala de materiais variados (REIS NETO et al., 2011). Os grandes diferenciais dessa técnica costumam ser o tamanho do foco do tubo de raios X, a resolução espacial do detector e a quantidade de magnificação, sem prejudicar a penumbra da imagem, fatores que contribuem para uma boa resolução espacial da amostra, em geral, da ordem de micrometros. Dessa forma, gera-se uma grande quantidade de informações permitindo a inspeção detalhada da parte interna e externa dos objetos em estudo (MACHADO, 2012). A microCT também é conhecida como tomografia computadorizada de alta resolução (REIS NETO et al., 2011).

Uma diferença em relação a TC é que o princípio de funcionamento de um microtomógrafo consiste em um sistema em que o detector e a fonte de radiação são fixos e o objeto sofre rotação entre eles, conforme mostra a figura 4.

Figura 4 - Diagrama básico de um sistema de microtomografia.



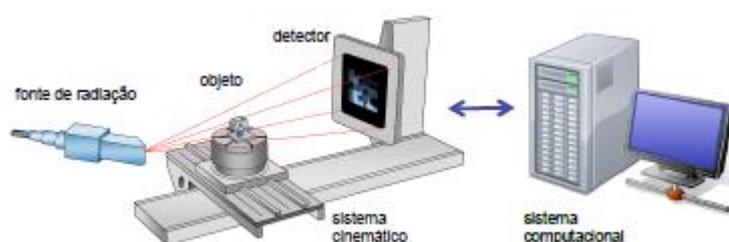
Fonte: CNUDE; BOONE, 2013.

A técnica de microCT tem sido aplicada em diversas áreas da ciência, como por exemplo na medicina, caracterização de materiais, arqueometria, aplicações estruturais e na mineralogia (REIS NETO et al., 2011).

2.3.4 Princípios básicos da Tomografia Computadorizada

Apesar das diferenças de projeto decorrentes de cada aplicação e fabricante, em geral, os tomógrafos possuem os mesmos componentes: uma fonte de raios X, um detector, um sistema cinemático e um sistema computacional para aquisição, reconstrução e processamento das imagens, figura 5.

Figura 5 - Componentes básicos de um sistema de TC.



Fonte: SCHMITT; DIETRICH; POLLMANN, 2008.

Nessa técnica, o sistema que conta com uma fonte de radiação e um detector é responsável por capturar imagens radiográficas a cada passo angular da amostra que é coordenado por um sistema de controle cinemático. As imagens bidimensionais que são adquiridas formam um conjunto de dados que, posteriormente, será utilizado no processo de reconstrução de imagem tomográfica. Obtendo como resultado, através da utilização de *softwares* específicos, uma visualização tridimensional da amostra, o que possibilita uma análise detalhada da estrutura do objeto em estudo (BUZUG, 2008).

O feixe de radiação ao penetrar um determinado material tem a sua intensidade reduzida de acordo com a distância percorrida. O princípio básico da tomografia computadorizada consiste na medição da distribuição espacial de uma quantidade física chamada de coeficiente de atenuação, o que possibilita o mapeamento da constituição interna de um objeto, fornecendo imagens digitais de seções transversais do mesmo. Nessa técnica, a intensidade da radiação I atenuada por um objeto é comparada com a intensidade original da radiação I_0 que sai da fonte de radiação. Com isso, é possível calcular a atenuação de cada “raio” da radiação que passa pelo objeto, no caminho da fonte até o detector (KAK; SLANEY, 1988).

Quando k regiões com espessuras e coeficientes de atenuação linear diferentes estiverem ao longo do caminho que será percorrido por um feixe de radiação monocromático, figura 6, pode-se calcular a intensidade da radiação que atravessa as regiões (PIRES, 2006):

$$I = I_0 e^{-\sum_{i=1}^k \mu_i \Delta x_i} \quad (1)$$

Onde:

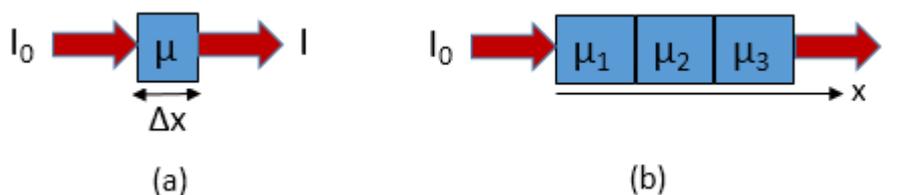
I é a intensidade da radiação medida ao chegar no detector;

I_0 é a intensidade original da radiação que sai da fonte;

μ_i é o coeficiente de atenuação linear da região i ;

Δx_i é a espessura da região i .

Figura 6 - Esquema do passo da radiação pela matéria para diferentes casos.



Legenda: (a) Material homogêneo e (b) Material não homogêneo.

Fonte: A autora, 2021.

A imagem final é obtida a partir de inúmeros valores de medições do coeficiente de atenuação, medida realizada através de detector, será proporcional à soma dos coeficientes de atenuação em questão (ROMANS, 2011).

Pelo trabalho de Radon, determina-se, em uma distribuição bidimensional, as características internas de um objeto se um número infinito de integrais de linha é conhecido. Na prática, existe um número finito de medidas que permite obter a distribuição do coeficiente de atenuação linear μ , reconstituindo, através de uma imagem, a composição interna das estruturas do objeto, com boa aproximação.

Para uma imagem tomográfica de um material heterogêneo, o feixe de radiação percorre uma série de direções diferentes ao longo da amostra e cruza regiões com propriedades físicas distintas, com espessuras l diferentes. Para a reconstrução da imagem com diferente distribuição do coeficiente de absorção para o plano ou corte escolhido, utiliza-

se um sistema de coordenadas (x,y) para localizar os pontos medidos. Quando uma análise tomográfica é realizada, a intensidade dos fótons emergentes é proporcional a integral de todos os coeficientes de atenuação $\mu(x, y)$ ao longo de uma determinada linha reta L , figura 7 (PIRES, 2006). Substituindo esta integral na equação (1) tem-se:

$$g(r, \theta) = \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) = \int_{r, \theta} \mu(x, y) dx dy \quad (2)$$

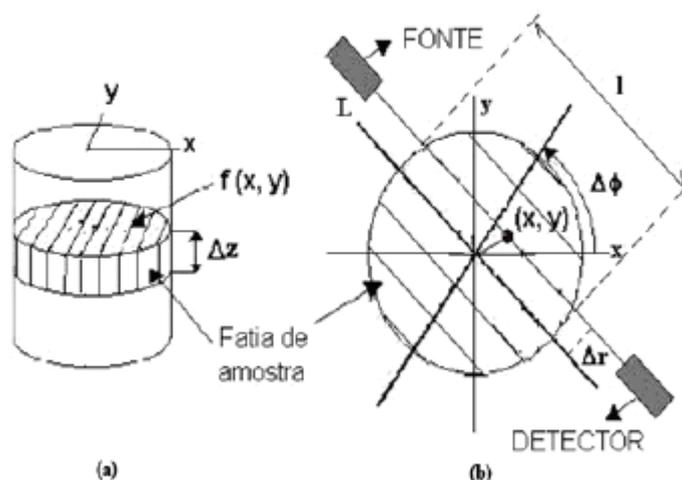
Onde:

r representa medidas feitas em diferentes posições paralelas separadas por uma distância constante Δr ;

θ é o ângulo de rotação do eixo (x,y) obtido em passos angulares de $\Delta\theta$;

$g(r,\theta)$ é conhecido como raio soma e se calcula para cada ângulo θ .

Figura 7 – Estudo de um corpo com TC.



Legenda: (a) Fatia do objeto definido como $f(x,y)$ com uma espessura uniforme Δz .

(b) Sistema de coordenadas utilizado para descrever o método.

Fonte: PIRES, 2006.

A teoria utilizada na reconstrução de imagem relata que a reprodução bi ou tridimensional de um objeto é realizada a partir da repetição em série de todas as suas projeções. São utilizados algoritmos específicos para o processo de reconstrução, mas isso não será discutido neste trabalho.

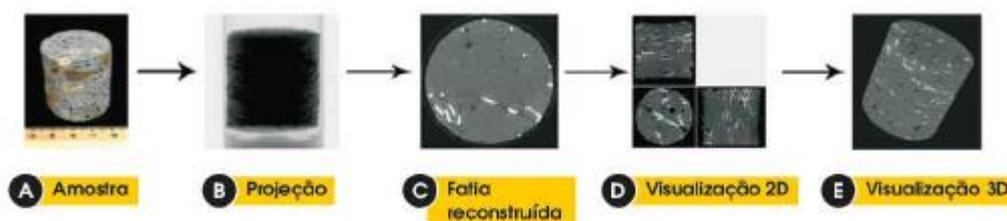
Após a reconstrução, as fatias tomográficas transversais da amostra são representadas em forma de uma matriz digital $N \times M$ *pixels*, em que N representa o número de *pixels* na vertical e M os da horizontal. As fatias são calculadas a determinada distância uma das outras,

que pode ser igual ao tamanho do *pixel*. *Pixel* é a representação básica de um elemento bidimensional em uma imagem digital. O tom da imagem é proporcional ao coeficiente de atenuação. A região mais densa aparece mais escura e a região menos densa mais clara. Na escala, 0 representa o preto e 255 representa o branco e os outros valores intermediários a estes representam os níveis de cinza (MACHADO et al., 2015).

Cada pixel da imagem representa a intensidade da cor naquele ponto e o tamanho do pixel influencia na qualidade da imagem, quanto menor o tamanho do pixel, melhor a qualidade da imagem.

As fatias tomográficas reconstruídas fornecem a visualização da amostra tanto em 2D quanto em 3D e podem ser processadas digitalmente, ou seja, pode-se executar processos úteis para ressaltar ou eliminar determinada característica da imagem procurando atingir determinado objetivo. Informações qualitativas e quantitativas podem ser analisadas a partir dessas imagens após elas serem submetidas ao processamento de imagens digitais, o que facilita a extração de informações da amostra (MACHADO et al., 2015). Esse processamento também não será abordado neste trabalho. A figura 8 mostra etapas do processo de microtomografia computadorizada em um amostra.

Figura 8 - Etapas do processo de microtomografia em uma determinada amostra.



Fonte: MACHADO et al., 2015.

2.4 Mecanismo de detecção de raios X

O mecanismo de detecção é responsável por converter a radiação que passa pelo objeto em um sinal eletrônico. Os detectores mais comuns em tomógrafos são constituídos de um painel plano e são chamados de detectores de tela plana. O elemento de detecção é formado por um cintilador acoplado a uma matriz de fotodiodos, dispositivo foto-conversor. O cintilador sofre interação fotoelétrica com os fótons de raios X e os fotoelétrons liberados

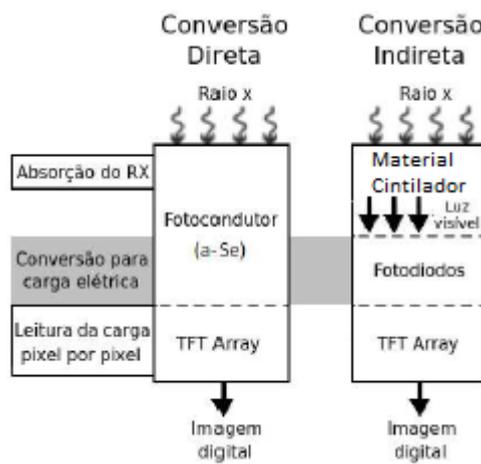
excitam outros átomos do cintilador. No momento em que a excitação cessa, é emitida uma radiação que será absorvida pelos fotodiodos e que, com isso, produzem uma carga elétrica proporcional à radiação de raios X. Durante a exposição do detector, a carga elétrica é armazenada no elemento de detecção que se comporta como um capacitor. A aquisição do sinal é acionada por um transistor de filme fino (TFT), que tem a função de ligar o detector ao sistema de aquisição de sinais. Nesse sistema, é realizada a amplificação do sinal e a conversão do sinal analógico para digital (BUZUG, 2008).

Os sistemas de detecção sofreram evoluções ao longo dos anos, os detectores com saída digital do tipo *flat panels*, resumindo, são sistemas compostos por arranjos de sensores sensíveis à radiação que produzem imagem quando a amostra é exposta a radiação, podendo ser visualizada no computador. Apresentam características importantes, como portabilidade, boa resolução e rapidez, por produzirem imagens em tempo real, dispensando o processo de revelação (VILAR, 2017).

Existem dois tipos de detectores de tela plana digitais, os que são baseados na conversão direta, que são os que possuem o fotocondutor e os de conversão indireta, que possuem material cintilador, figura 9 (RISTIĆ, 2013).

- Detectores diretos: os raios X são convertidos diretamente em carga elétrica. Esse tipo de detector usa um fotocondutor, geralmente selênio amorfo (a-Se), para produzir as cargas elétricas. Os pixels utilizam eletrodos para coletar a carga e capacitores para armazená-la. Posteriormente, o sinal analógico é encaminhado por diodos ou transistores de filmes finos para processamento (RISTIĆ, 2013).
- Detectores indiretos: converte os raios X em luz e depois em carga elétrica. É incorporado um material cintilador para a produção de fótons visíveis. Esse material é colocado em contato com a matriz de pixels para absorção dos raios X e produção de luz. A intensidade de luz emitida em um certo ponto corresponde a medida da intensidade dos raios X incidentes no detector naquele ponto. Os pixels possuem elementos fotosensíveis que geram carga elétrica proporcional a intensidade da luz produzida naquela região. Cada pixel armazena o sinal analógico que depois é encaminhado para processamento (RISTIĆ, 2013).

Figura 9 - Mecanismos de detecção de raios X.



Fonte: Adaptado de RISTIC, 2013.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada toda a metodologia utilizada para a criação do microtomógrafo de raios X, descrevendo os elementos que o compõem, com todos os recursos de equipamentos e software utilizados neste trabalho. São descritas as principais características de cada subsistema, com os procedimentos e técnicas, necessários para compor o projeto de um sistema microtomográfico. Desde a emissão de raios X, detecção e o armazenamento de imagem, controle de rotação da amostra e a parte computacional envolvida e a proteção radiológica que foi utilizada.

3.1 Fonte de raios X

Como fonte de radiação, foi utilizado um tubo de raios X modelo Mini-X Controller da fabricante Amptek, figura 10. Esse equipamento portátil e de baixo consumo de energia é muito utilizado como componente de espectrômetros de raios X de bancada, principalmente em aplicações de fluorescência de raios X. É leve, pequeno, rápido, fácil de transportar e também de fácil utilização. Por ser um equipamento bivolt, pode ser ligado diretamente na rede elétrica com tensões 127 V ou 220 V. Essa fonte de radiação inclui o tubo de raios X, a fonte de alimentação e a comunicação do USB com o computador.

A máxima potência dissipada pela fonte é de 4 W. A tensão pode variar de 10 kV a 50 kV e a corrente no tubo de 5 μ A até 200 μ A. O Mini-X tem uma interface USB para controlar a tensão e a corrente através de um software de computador.

Figura 10 - Tubo de raios X utilizado no sistema microtomográfico desenvolvido.



Fonte: A autora, 2021.

Na tabela 1, destacam-se mais algumas especificações da fonte de raios X utilizada.

Tabela 1 - Especificações do tubo de raios X modelo Mini-X Controller.

Especificações	Dados
Material do alvo	Ouro
Espessura do alvo	1 μm
Tamanho focal	2 mm
Feixe	Cônico
Ângulo de abertura do feixe	120°
Material da janela	Berílio
Espessura da janela	127 μm
Controle e comunicação	Via USB
Massa	360 g
Tensão de entrada	12 V _{DC}
Taxa de dose aproximada	2,2 Sv/h (30 cm, 50 kV e 80 μA)
Consumo de energia	9 W a 50 kV e 80 μA

Fonte: INC, 2017.

3.2 Sistema de detecção

Para compor o sistema de microtomografia de raios X que foi construído, utilizou-se como detector, um sensor de imagem digital, Sensor Digital Saevo, que foi desenvolvido originalmente para aplicações odontológicas, na aquisição de radiografias intra-orais de dentes e demais estruturas orais.

3.2.1 Sensor Digital Saevo

O Sensor Digital Saevo, figura 11, é um detector tipo *flat panel*, que funciona como digitalizador de imagens radiográficas. Este sensor utiliza tecnologias associadas do CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), fibra óptica protetora e cintilador e foi desenvolvido para adquirir imagens digitais de raios X de alta qualidade da arcada humana e suas estruturas. O material cintilador do sensor é o Iodeto de Césio dopado com Telúrio. Neste trabalho, o sensor será utilizado como detector, compondo o microtomógrafo de raios X, na análise de diversas amostras pequenas de materiais. O processo de aquisição de imagem é realizado posicionando o sensor em frente a amostra que será inspecionada. Essa estrutura é exposta ao feixe de radiação que vem da fonte de raios X. Quando exposto, o sensor realiza uma conversão dos fótons de raios X em sinal digital e transfere essa informação para um computador via conexão USB.

Esse sensor conta com um software de gerenciamento de imagem que realiza a interface do sistema do Sensor Digital Saevo com o usuário, possibilitando visualizar e armazenar as radiografias, além de diversas outras funções.

Figura 11 – Sensor digital Saevo



Fonte: ALLIAGE S/A, 2018.

O sensor não requer fonte de alimentação externa, pois sua alimentação é feita através da conexão USB do computador e possui um consumo aproximado de 300 mA. O sensor é compatível com qualquer equipamento de raios X com temporizador eletrônico. A tabela 2 apresenta outras especificações técnicas do Sensor Digital Saevo.

Tabela 2 - Principais especificações do Sensor Digital Saevo.

Especificações	Dados
Tensão de entrada	5 V _{DC}
Corrente de entrada	300 mA
Potência de consumo	1,5 W
Comprimento do cabo	3 m
Comunicação	Via USB
Dimensões exterior	30,6 x 44,2 mm
Dimensões da superfície ativa	26 x 36 mm
Dimensão da matrix	1300 x 1800 pixels
Tamanho do pixel	20 µm
Número de Pixels	2,34 megapixels
Massa	70 g

Fonte: ALLIAGE S/A, 2018.

3.3 Sistema de rotação da amostra

Uma parte fundamental para um sistema de microtomografia de raios X é o controle de rotação da amostra que está sendo inspecionada, para que se obtenha as projeções necessárias para o processo de reconstrução de imagem. É importante ter controle do passo angular de rotação segundo a direção da radiação medindo, em cada passo, a atenuação da radiação, para cada teste que for feito. Cada projeção é obtida com o objeto rotacionado com um certo ângulo em relação à posição original, dessa forma, se obtém uma projeção para cada ângulo.

A princípio, os testes no microtomógrafo que foi desenvolvido foram realizados manualmente com a utilização de um goniômetro. Porém, foi projetado um outro método de coordenação da amostra, em que foram incorporados novos equipamentos ao sistema microtomográfico.

3.3.1 Goniômetro

Em um primeiro momento, o controle de rotação para aquisição das projeções das amostras que foram testadas foi realizado de forma manual com o auxílio de um goniômetro. Este é um equipamento que mede ângulos e permite que um objeto seja girado em torno de um eixo fixo para uma posição angular precisa. O goniômetro, figura 12, permitiu guiar a rotação das amostras que foram posicionadas em seu centro, a fixação das amostras foi possível com a utilização de ímãs, já que o goniômetro é de material metálico. Foi usado um passo angular de 5° para a obtenção das imagens iniciais que permitiram os testes preliminares no microtomógrafo. Posteriormente, com a adaptação do novo mecanismo de rotação, usando o microcontrolador Arduino e o motor de passo, o passo foi reduzido para 1°, obtendo um maior número de projeções, fornecendo mais informações a respeito do objeto, logo, uma melhor qualidade tomográfica.

Apesar do goniômetro ser um método possível de ser utilizado, devido ao grande número de projeções para cada amostra, torna-se inviável quando se quer obter

microtomografias de um número maior de objetos. O tempo de exploração para cada amostra é muito elevado, além disso, exige-se um esforço muito grande do operador do microtomógrafo.

Figura 12 - Goniômetro utilizado no microtomógrafo desenvolvido.



Fonte: A autora, 2021.

3.3.2 Plataforma Arduino

Para o aprimoramento do controle de rotação da amostra foi utilizado um microcontrolador do tipo Arduino MEGA 2560, figura 13, onde o software foi todo programado de acordo com as necessidades para um sistema de microtomografia em que se é necessário adquirir imagens em 360°. Os microcontroladores são equipamentos responsáveis por controle e aquisição de dados.

Figura 13 - Microcontrolador Arduino na versão MEGA.



Fonte: ISKANDAR, 2017.

Dessa forma, é possível controlar o passo angular da amostra por meio do software através do computador, sem que seja necessário um deslocamento até o microtomógrafo para que a amostra seja girada de forma manual, otimizando o tempo dos testes e a precisão dos mesmos. O sistema que utiliza o goniômetro pode ser todo realizado de forma manual apresenta uma tendência de erro humano na medição de grau por imagem, diferentemente do processo eletromecânico, o que implica em uma maior qualidade das imagens das tomografias obtidas.

3.3.3 Motor de passo

A implementação do controle eletromecânico no sistema de microtomografia proposto nesse trabalho, foi possível com a utilização de um motor de passo coordenado pelo software Arduino. Essa opção apresenta características como baixo custo, alta estabilidade e movimento preciso. Foi usado um motor de passo NEMA 17 com caixa redutora 63:1, como é apresentado na figura 14.

Figura 14 - Motor de passo NEMA 17
com caixa redutora 63:1.



Fonte: A autora, 2021.

O motor funciona com tensão contínua entre 3 V e 20 V, com passo angular de $1,8^\circ$ e torque de 3,5 kgf.cm.

Para controle do motor de passo, foi acoplado à plataforma Arduino um driver motor do tipo A4988, figura 15. Este driver foi especialmente desenvolvido para controle de pequenos passos em motores de passo bipolares, e permite controlar velocidade e sentido de rotação. Ele possui duas pontes H integradas no próprio chip, tensão lógica de 3,3 a 5 V podendo controlar motores na faixa de tensão de 8 a 35 V, tendo uma corrente nominal de 2 A. Através do software Arduino, é possível ajustar o passo de rotação de acordo com a necessidade de cada teste realizado no sistema microtomográfico.

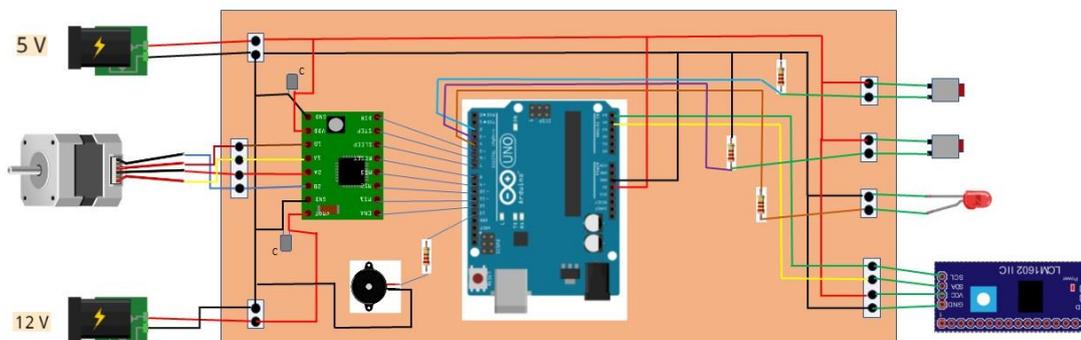
Figura 15 - Driver motor A4988.



Fonte: CONTROLE, 2019.

A figura 16 apresenta o esquema de circuito para controle do motor.

Figura 16 - Circuito de controle do motor.



Fonte: A autora, 2021.

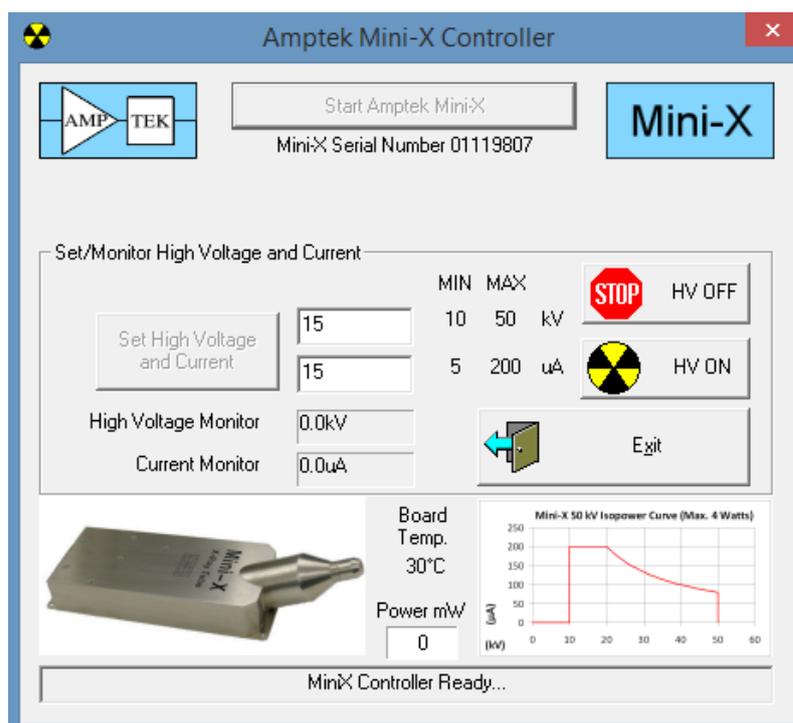
Nesse circuito, foi utilizada uma fonte de 12 V para energizar o motor e uma fonte de 5V para energizar o restante dos elementos (StepDrv, Arduino e LCD). Os botões possibilitam a movimentação em ambos sentidos do motor e a amostra de grau em grau e o LED indica quando o motor está em movimento.

3.4 Sistema computacional

O sistema computacional implementado no desenvolvimento do microtomógrafo de raios X conta com o software para controle da fonte de raios X, o de gerenciamento de imagem do detector e o que foi utilizado no processo de reconstrução microtomográfica.

O software da fonte de raios X Mini-X, figura 17, apresenta uma interface onde é possível controlar parâmetros operacionais como tensão, corrente, além de controlar o início e término do feixe de radiação.

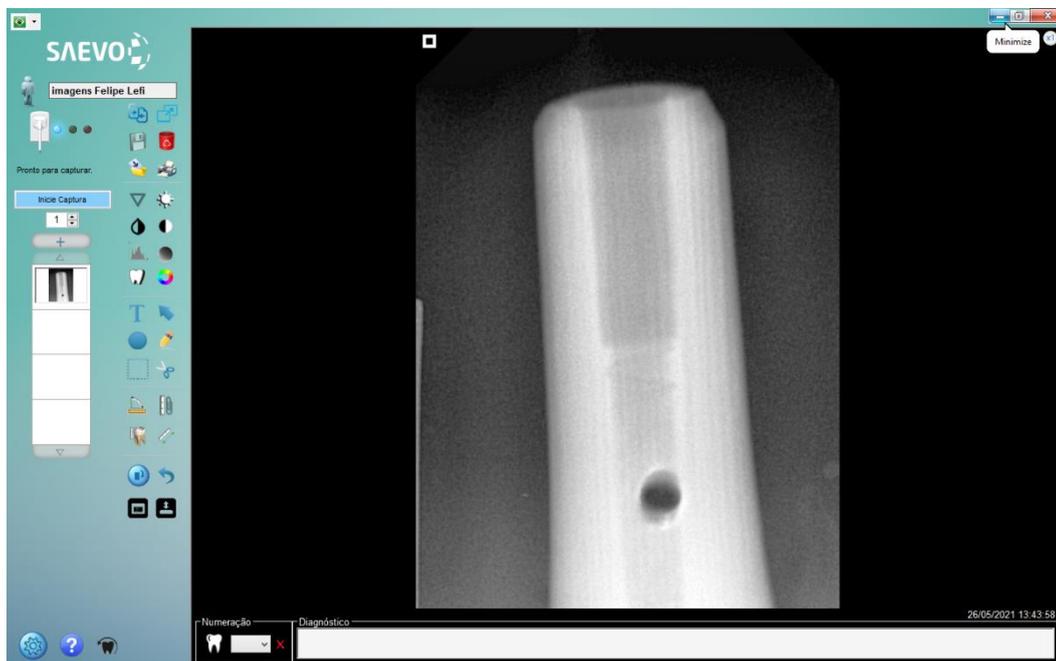
Figura 17 - Software de controle do tubo de raios X.



Fonte: INC, 2017.

O software do Sensor Digital Saevo, figura 18, permite iniciar a captura da imagem radiográfica, possibilitando visualização e armazenamento das imagens, que depois serão utilizadas no processo de reconstrução.

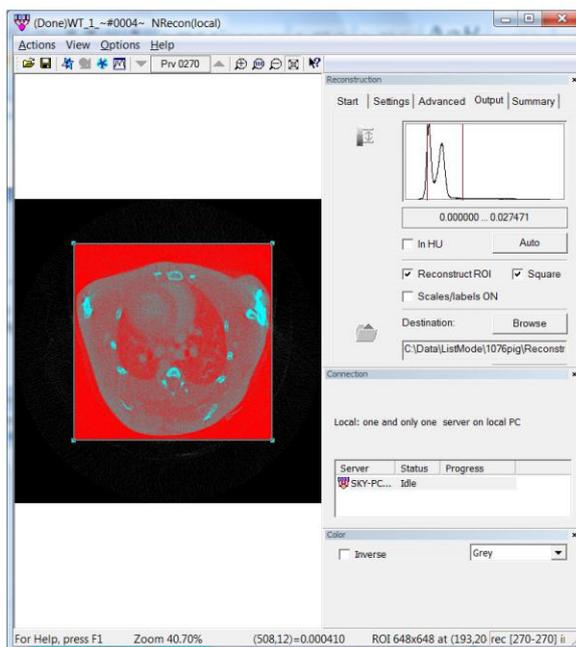
Figura 18 - Interface do software do Sensor Digital Saevo.



Fonte: A autora, 2021.

E por fim, para implementação do processo de reconstrução de imagem microtomográfica, foi usado o programa NReconv da SkyScan, a sua interface pode ser visualizada na figura 19. Esse software possibilita a obtenção de imagens tridimensionais das amostras estudadas. Permite visualizações prévias e ajustes de parâmetros com o objetivo de obter uma melhor imagem reconstruída.

Figura 19 - Software de reconstrução NReconv.



Fonte: SKYSCAN NV, 2011.

3.5 Proteção radiológica

Recomenda-se cautela e algumas medidas de segurança quando se trabalha com raios X. Para que fosse possível construir o sistema de microtomografia de forma segura para quem o utiliza, foi projetada e construída uma blindagem radiológica feita com folhas de chumbo, figura 20. O chumbo é o material mais comumente usado para a proteção contra emissão de raios X, por ser um metal de alta densidade e de baixo custo comparado aos demais.

Figura 20 - Blindagem radiológica do sistema de microtomografia de raios X.



Fonte: A autora, 2021.

A caixa de blindagem foi construída com folhas de chumbo de 1 mm de espessura pregadas a chapas de aço 1020 galvanizado, de espessura de 0,80 mm. A parte inferior também foi forrada com chumbo, vedando assim, todos os lados da caixa. Como o chumbo é um material pesado, optou-se por fazer o esquema de uma tampa na superfície da caixa para que não fosse necessário retirar toda a caixa a cada novo teste no microtomógrafo.

A fim de se analisar a proteção da blindagem radiológica, foi usado um monitor de radiação digital da marca Medcom Internacional, modelo CRM-100, figura 21. O monitor foi calibrado pelo Laboratório de Metrologia LCR/DBB/IBRAG/UERJ, com número do certificado de calibração 0061/2020. O equipamento permitiu realizar medições da radiação na sala de testes para diferentes valores de tensão do tubo de raios X. Mesmo para 50 kV com o monitor de radiação a uma distância aproximada de 10 cm da caixa de blindagem, ou seja, bem próximo ao tubo de raios X, a taxa de exposição variou entre 0,038 a 0,089 mR/h, dependendo da região da caixa, o maior valor corresponde a região frontal, ou seja, em frente ao feixe de radiação. O operador do sistema desenvolvido se posiciona a uma distância maior, cerca de 1 m da caixa e em posição contrária à direção do feixe, com isso, o valor no medidor é ainda menor, cerca de 0,029 mR/h o que comprova a segurança e eficiência da proteção radiológica, já que o valor do *background* na sala de teste é de 0,028 mR/h.

Figura 21 - Monitor de radiação digital.



Fonte: A autora, 2021.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os principais resultados obtidos no estudo, traz a caracterização do sistema de detecção, o sistema microtomográfico que foi desenvolvido e os testes em amostras de materiais que foram analisadas.

4.1 Caracterização do detector

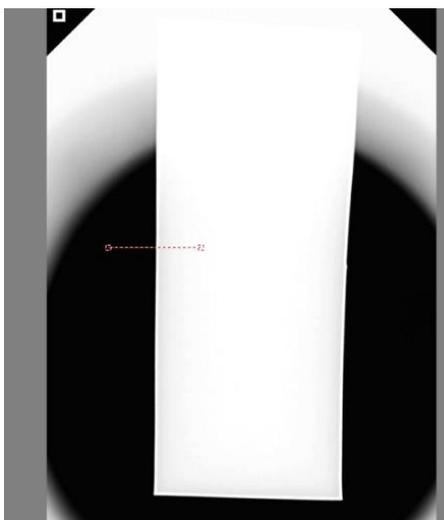
O sistema de detecção Sensor Digital Saevo foi projetado originalmente para aplicações odontológicas intraorais, sendo assim, o usuário encontra uma interface já apropriada para essa utilização e não precisa se atentar à ajustes e caracterizações. Porém, para que o detector fosse usado em um sistema de microtomografia foi necessário avaliar uma importante característica, que é a sua resolução espacial.

4.1.1 Resolução espacial

A determinação da resolução espacial do detector foi realizada por meio da Função de Transferência de Modulação (MTF) obtida através da versão *open source* do software ISee! que foi utilizado na análise da imagem radiográfica do sistema.

Nesta abordagem, os parâmetros de tensão e corrente aplicados ao tubo de raios X foram 50 kV e 50 μ A, com uma distância de 6 cm entre a fonte e o detector. Inicialmente, realizou-se a aquisição da imagem radiográfica de uma placa de chumbo justaposta ao sensor, foi importada a imagem radiográfica para dentro do software ISee! e delimitada a região de interesse para obtenção da Função de Transferência de Modulação, como pode ser observado na figura 22.

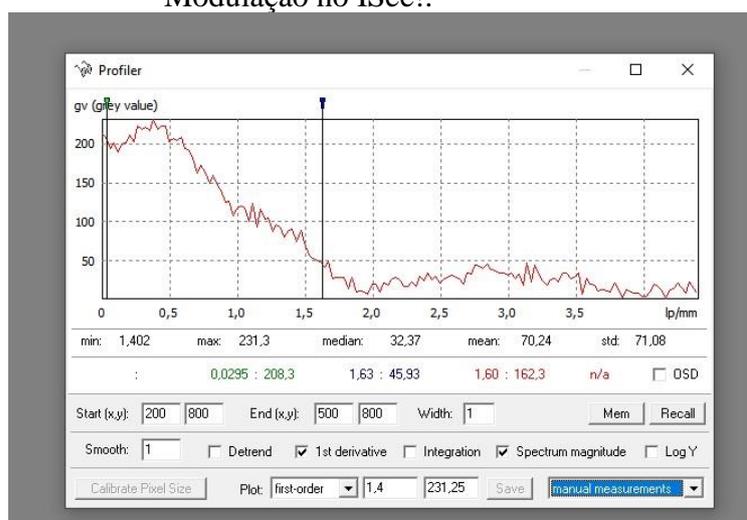
Figura 22 - Imagem radiográfica importada no ISee!.



Fonte: A autora, 2021.

A figura 23 apresenta parte do processo de investigação da radiografia no software ISee, denotando nesta imagem o gráfico da MTF. Essa propriedade está relacionada de forma inversamente proporcional com a resolução espacial do sistema. Trata-se da maior ou menor capacidade do detector de, através do parâmetro de contraste, diferenciar estruturas na amostra com diferentes valores de espessura ou densidade.

Figura 23 - Determinação da Função de Transferência de Modulação no ISee!.



Fonte: A autora, 2021.

Analisando os dados do software, foi obtido o valor de $MTF_{20\%} = 1,63$ $\mu\text{l}/\text{mm}$. Portanto, a resolução espacial (SR) pode ser calculada:

$$SR = \frac{1}{2MTF_{20\%}} \quad (3)$$

Assim, o valor da resolução espacial obtida para o detector foi $SR = 307$ μm .

4.2 Sistema microtomográfico desenvolvido

Nessa seção, será apresentado o sistema do microtomógrafo de raios X que foi desenvolvido no Laboratório de Ensaios Físicos (LEFI) do IPRJ/UERJ. Serão destacadas as suas principais características.

Um dos seus aspectos mais interessantes é o custo reduzido em relação a equipamentos comerciais de microtomografia computadorizada que possuem custos exorbitantes. Isso inviabiliza muitas vezes o acesso de estudantes e pesquisadores de diversas unidades de ensino e pesquisa a essa tecnologia. O custo aproximado desse sistema é de 55 mil reais, enquanto o mais barato sistema comercial é em torno de 150 mil dólares. A tabela 3 mostra os preços dos principais componentes do microtomógrafo.

Tabela 3 - Custos dos principais componentes do sistema.

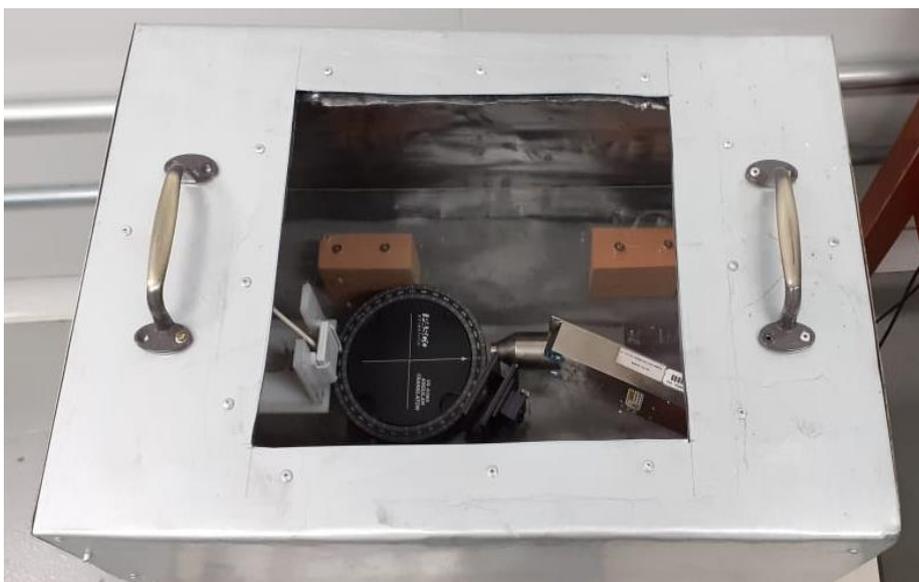
Componentes	Custo
Tubo de raios X Mini-X da Amptek (50 kV e 4W)	US\$ 7607,00 ou R\$ 39.708,54
Sensor Digital Saevo	Cerca de R\$ 14.000,00
Motor de passo Nema 17 + Driver motor A4988 + Arduino MEGA	Cerca de R\$ 250,00

Fonte: A autora, 2021.

Outro atributo importante é em relação a ser um sistema portátil, facilmente transportável, ideal para uso em laboratórios, museus, sendo útil em investigações de amostras *in loco*, já que muitas vezes o objeto precisa ser analisado em seu local de origem. Além dessas

características, é um sistema de fácil utilização e manutenção, o que favorece futuros aperfeiçoamentos. O microtomógrafo se mostrou eficiente no estudo de amostras de pequenas dimensões de diferentes tipos de materiais e seguro quanto a proteção radiológica. Pelas características citadas, pode-se dizer que este modelo de microtomógrafo de raios X é viável para ser utilizado. A figura 24 mostra o sistema ainda com o goniômetro para controle de rotação.

Figura 24 - Sistema microtomográfico de raios X com a utilização do goniômetro.



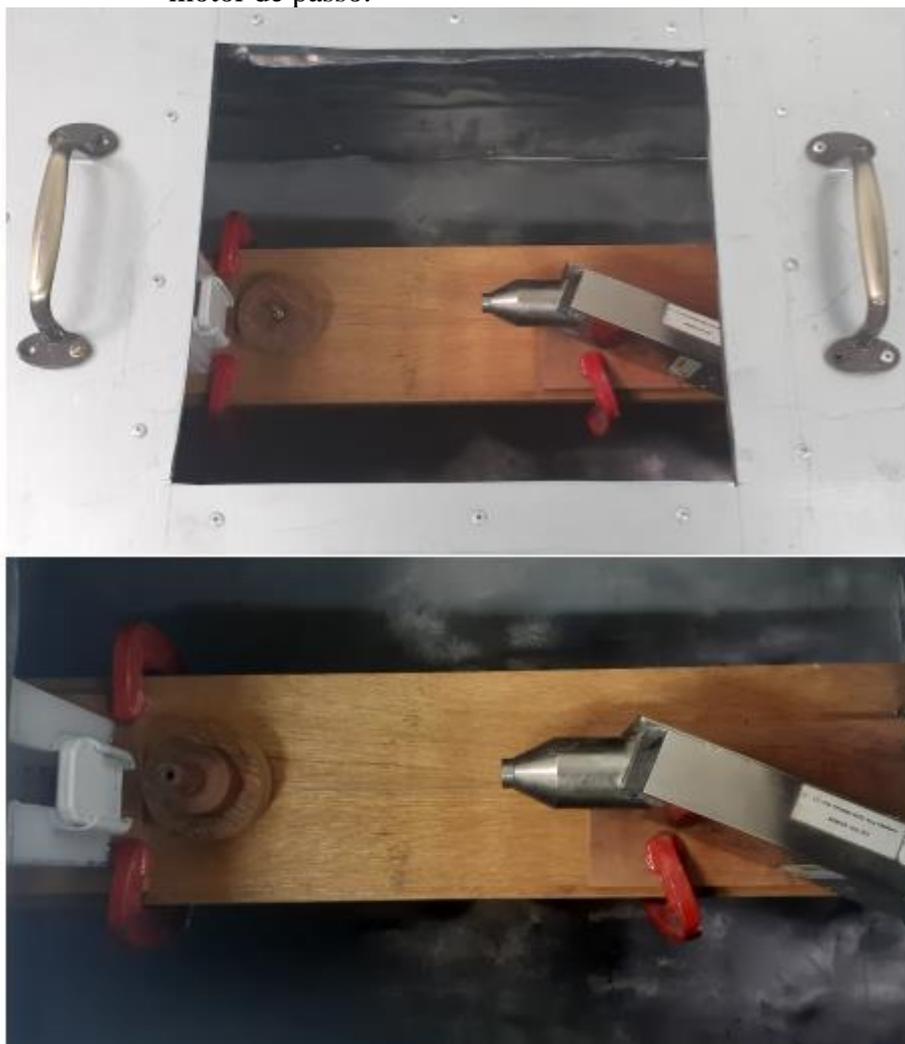
Fonte: A autora, 2021.

Em um primeiro momento do projeto, foi utilizado o goniômetro para guiar a rotação das amostras nos primeiros testes que foram realizados, de forma manual. Posteriormente, foi instalado o motor de passo, juntamente com o microcontrolador Arduino, para automatizar esse processo, otimizando o uso do microtomógrafo. O que permitiu reduzir o passo de rotação das amostras, diminuir o tempo dos testes e o esforço do operador para a execução dos mesmos, e aumentar a precisão de cada ângulo de rotação da amostra, melhorando a qualidade das imagens obtidas. O tempo de exploração de cada amostra com o processo realizado de forma manual é cerca de três vezes maior do que o tempo gasto com o sistema eletromecânico. Enquanto o sistema manual, que utilizou o goniômetro, gasta cerca de 24 horas, o sistema eletromecânico faz o processo de exploração da amostra em cerca de 8 horas.

A figura 25 apresenta os elementos do sistema que foi montado, o tubo de raios X, o sensor de detecção fixado em um suporte que permite que ele fique em posição vertical, a base

circular de madeira em que as amostras são colocadas, nos casos abaixo, um parafuso e um objeto de madeira, e a caixa de blindagem radiológica. O motor de passo está posicionado embaixo do suporte de madeira e tem a função de guiar a base circular, rotacionando a amostra.

Figura 25 – Sistema microtomográfico de raios X com a utilização do motor de passo.



Fonte: A autora, 2021.

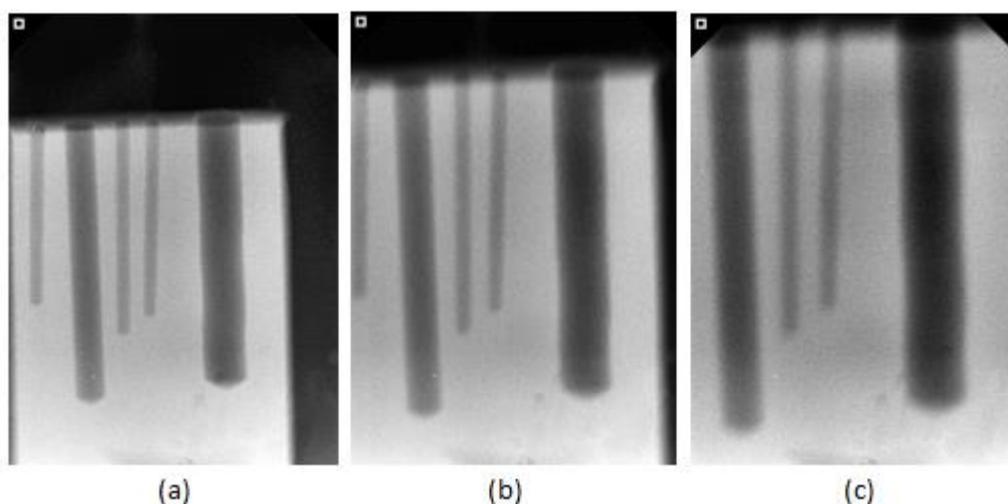
4.3 Testes realizados no microtomógrafo

Serão apresentados alguns resultados de testes que foram realizados no microtomógrafo de raios X em algumas amostras de materiais, a fim de se analisar o sistema e confirmar a sua aplicabilidade. É importante ressaltar que os primeiros testes aqui citados foram realizados com o auxílio do goniômetro para controle de rotação da amostra.

4.3.1 Teste para verificação das melhores posições entre os componentes do sistema

O primeiro teste executado foi realizado com o objetivo de analisar as melhores distâncias entre os componentes do sistema, no caso, a distância do tubo até o detector e a distância do detector à amostra. Utilizou-se uma pequena amostra de material polimérico de aproximadamente 20x30 mm com cinco furos, sendo três deles feitos com broca de 1 mm, um furo com broca de 2 mm e mais um furo com 3 mm de diâmetro. Foram obtidas radiografias variando a distância entre o tubo e o detector em 70 mm, figura 26, e 140 mm, figura 27, para cada uma dessas distâncias variou também o detector da amostra em 10 mm, 20 mm e 30 mm. Todas as imagens foram feitas utilizando a mesma combinação de valores de tensão e corrente aplicados ao tubo de raios X.

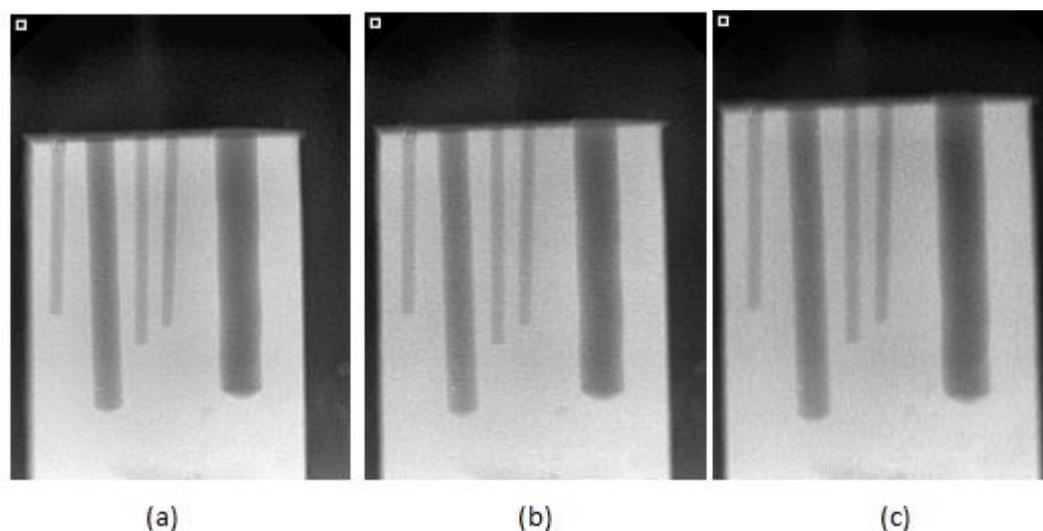
Figura 26 - Radiografias realizadas com distância de 70 mm entre o tubo e o detector.



Legenda: (a) Distância detector-amostra de 10 mm. (b) Distância detector-amostra de 20 mm. (c) Distância detector-amostra de 30 mm.

Fonte: A autora, 2021.

Figura 27 - Radiografias realizadas com distância de 140 mm entre o tubo e o detector.



Legenda: (a) Distância detector-amostra de 10 mm. (b) Distância detector-amostra de 20 mm. (c) Distância detector-amostra de 30 mm.

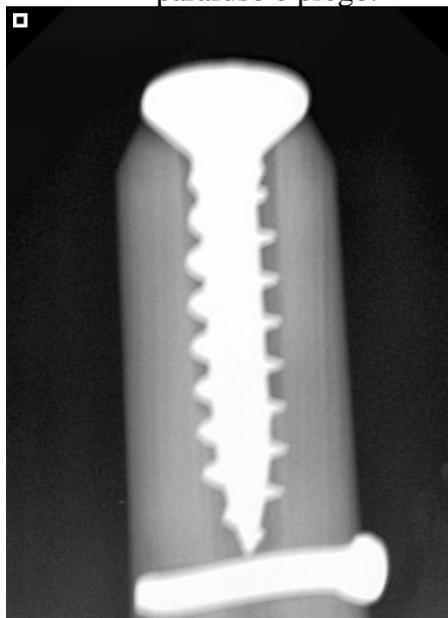
Fonte: A autora, 2021.

Comparando as figuras 26 e 27, apenas analisando visualmente, pode-se concluir que a melhor distância entre o tubo e o detector é de 140 mm, ou seja, é preciso uma certa distância mínima para posicionamento desses elementos para que se tenha a imagem completa, sem corte, da amostra. Quanto a distância entre o detector e a amostra, observa-se facilmente que quanto mais próximos eles estiverem melhor é a qualidade da imagem, em termos de nitidez e menos ruídos. Quando se afasta o detector da amostra, repara-se um efeito de ampliação da imagem e perda de qualidade.

4.3.2 Amostra de madeira com prego e parafuso

Foi utilizado como objeto de investigação um pedaço de madeira de 30 mm de comprimento, em formato cilíndrico, com objetos metálicos fixados, um parafuso e um prego. A figura 28 apresenta a sua imagem radiográfica.

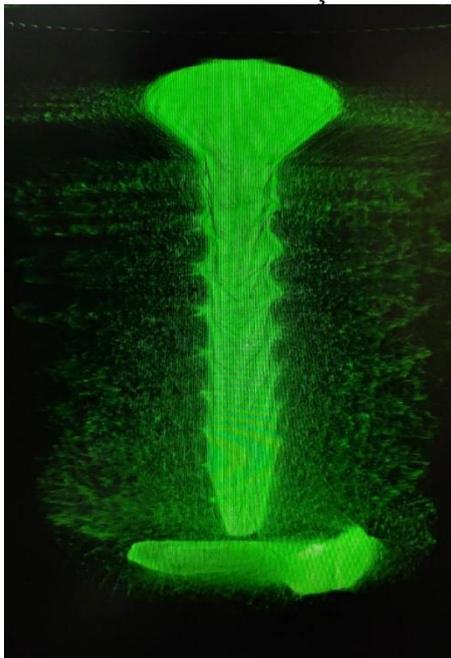
Figura 28 - Amostra de madeira com parafuso e prego.



Fonte: A autora, 2021.

Como o intuito do trabalho foi desenvolver um equipamento de microtomografia de raios X, foram obtidas as projeções necessárias para que o processo de reconstrução fosse realizado. As radiografias obtidas foram reconstruídas com o programa NReconv do sistema SkyScan. No caso desse teste inicial, o passo angular foi de 5° , ainda com a utilização do goniômetro para controle de rotação da amostra. Esse é um valor acima do ideal, já que quanto menor o passo, mais informações a respeito da amostra, porém, esse teste foi realizado apenas para se avaliar de forma preliminar as primeiras imagens obtidas no sistema. Posteriormente, o passo foi reduzido para 1° . A figura 29 mostra uma visualização do processo de reconstrução da amostra.

Figura 29 - Visualização do processo de reconstrução da amostra.



Fonte: A autora, 2021.

Por fim, na figura 30, é apresentada a imagem da reconstrução do objeto. É possível notar que a madeira some, restando apenas os objetos metálicos, o parafuso e o prego. Isso ocorre porque durante o processo de reconstrução optou-se por remover todo o ruído da imagem, o que resultou na remoção da madeira também.

Figura 30 - Imagem do objeto reconstruído.



Fonte: A autora, 2021.

4.3.3 Amostra de madeira sem o prego e o parafuso

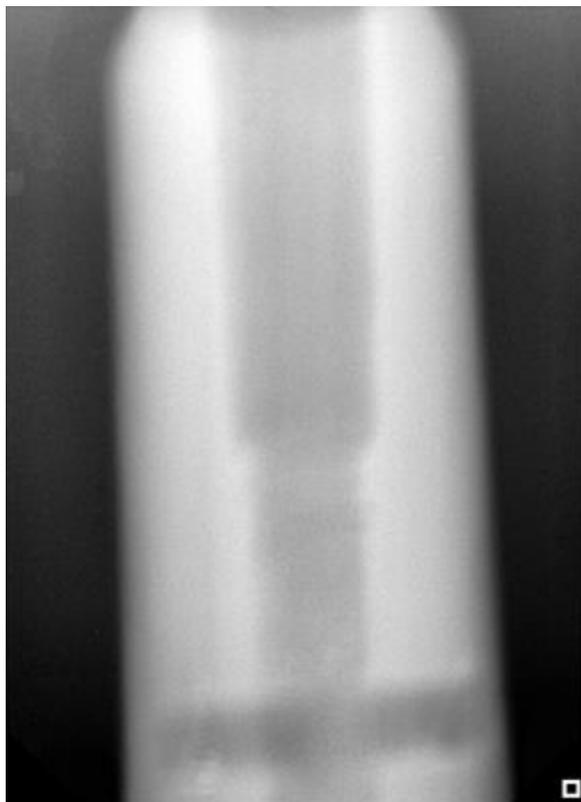
Desta vez, foram removidos o prego e o parafuso que foram visualizados no teste anterior, restando apenas a parte de madeira. A figura 31 apresenta esse objeto de estudo. Pensando em uma forma de diminuir o ruído e melhorar a qualidade da imagem, para um mesmo ângulo foram realizadas dez projeções, com a intenção de se fazer uma média das imagens, figura 32. Visualmente, a média é mais nítida do que apenas uma projeção e o seu perfil de linha também mostra menos oscilações, indicando menos ruídos, o que são pontos positivos.

Figura 31 - Amostra de madeira.



Fonte: A autora, 2021.

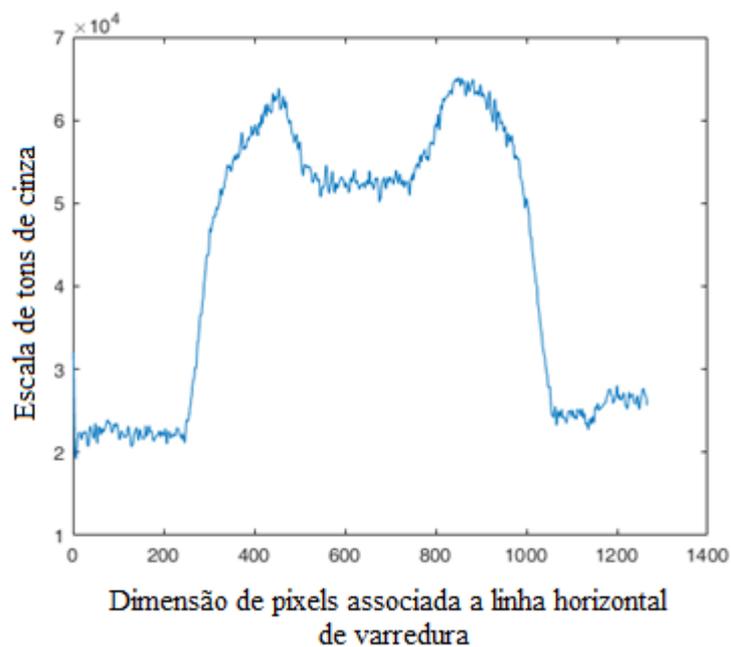
Figura 32 - Média das imagens da amostra.



Fonte: A autora, 2021.

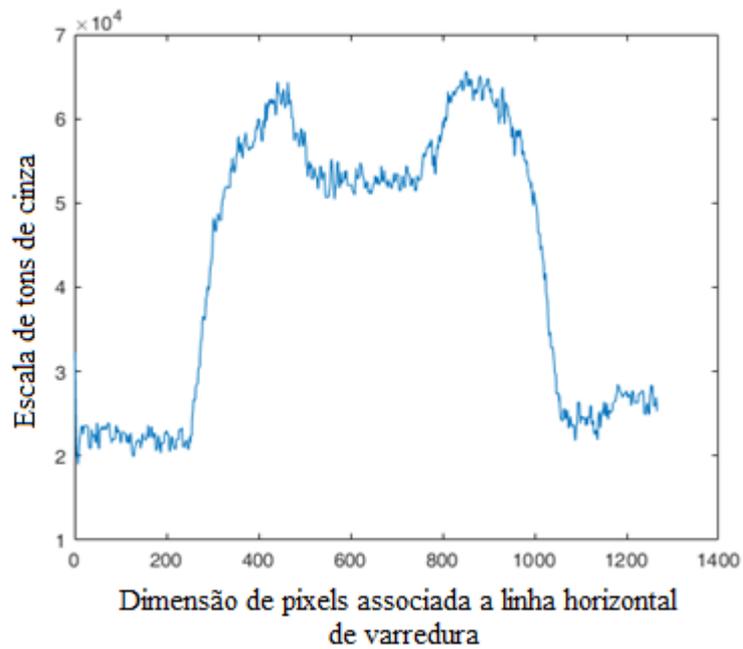
As figuras 33 e 34 apresentam os perfis de linha para a média de dez projeções e para apenas uma projeção, respectivamente. A qualidade da reconstrução depende fundamentalmente da qualidade das imagens radiográficas, por isso esse teste contribuiu para um melhor resultado da imagem 3D a ser reconstruída.

Figura 33 - Perfil de linha da média das imagens.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 34 - Perfil de linha de apenas uma imagem.

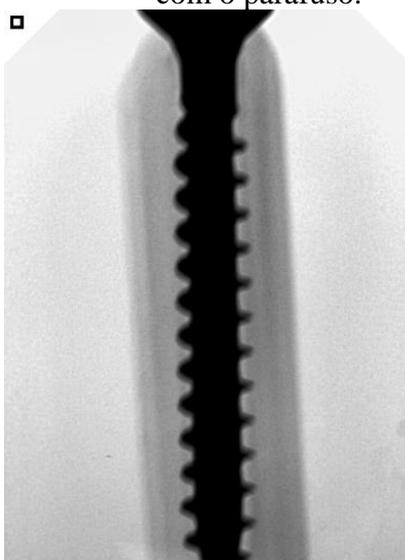


Fonte: A autora, 2021.

4.3.4 Amostra de madeira apenas com o parafuso

Por fim, foi analisado apenas o pedaço de madeira cilíndrico com um parafuso em seu interior, o objeto de interesse para reconstrução é o parafuso. Nesse processo de reconstrução foi utilizado um programa próprio que está em andamento no Laboratório de Ensaios Físicos (LEFI) do IPRJ/UERJ, por isso, não foi possível obter uma imagem 3D totalmente reconstruída. Foi programado para eliminar o ruído, eliminando também a madeira, restando apenas o objeto de interesse. A figura 35 apresenta a radiografia da amostra.

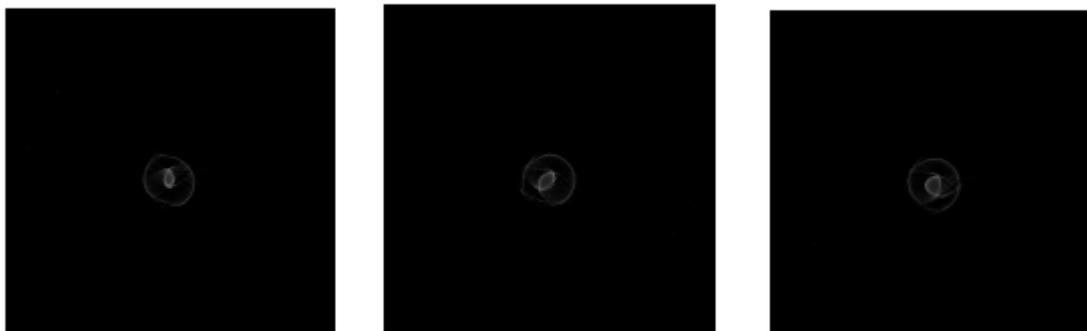
Figura 35 - Amostra da madeira com o parafuso.



Fonte: A autora, 2021.

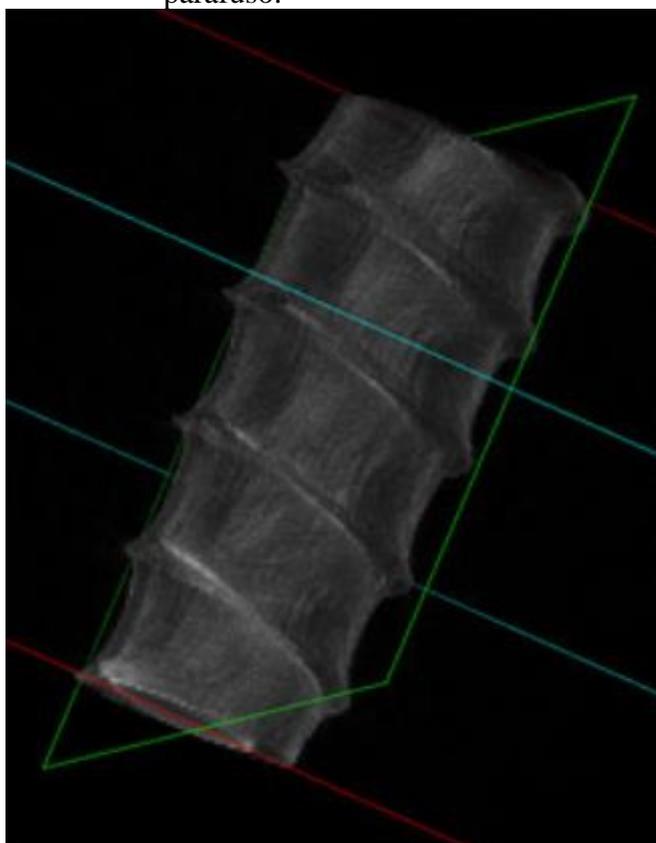
A figura 36 mostra algumas fatias de reconstrução do objeto e na figura 37 pode-se observar o volume reconstruído de uma parte do parafuso.

Figura 36 - Fatias de reconstrução do parafuso.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 37 - Volume reconstruído de uma parte do parafuso.



Fonte: A autora, 2021.

E na figura 38 apresenta-se o processo de reconstrução do parafuso inteiro.

Figura 38 - Visualização do processo de reconstrução do parafuso.



Fonte: A autora, 2021.

4.3.5 Amostra de um dente

Foram realizadas aquisições com uma amostra de um dente humano. Essas aquisições foram obtidas com o auxílio do sistema de controle de rotação da amostra que inclui o motor de passo e o microcontrolador arduino. O passo utilizado foi de 1° . A reconstrução foi feita usando o programa NReconv com todas as opções automáticas. A figura 39 apresenta a amostra já posicionada no sistema microtomográfico desenvolvido.

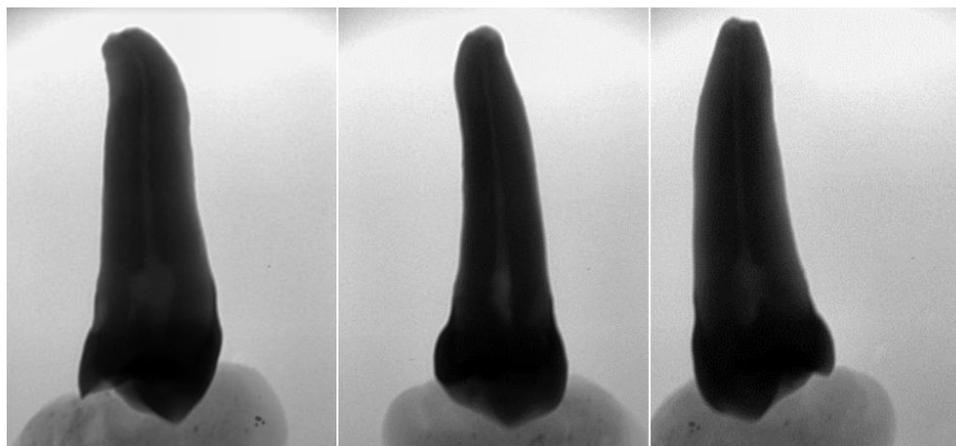
Figura 39 – Amostra do dente no sistema microtomográfico.



Fonte: A autora, 2021.

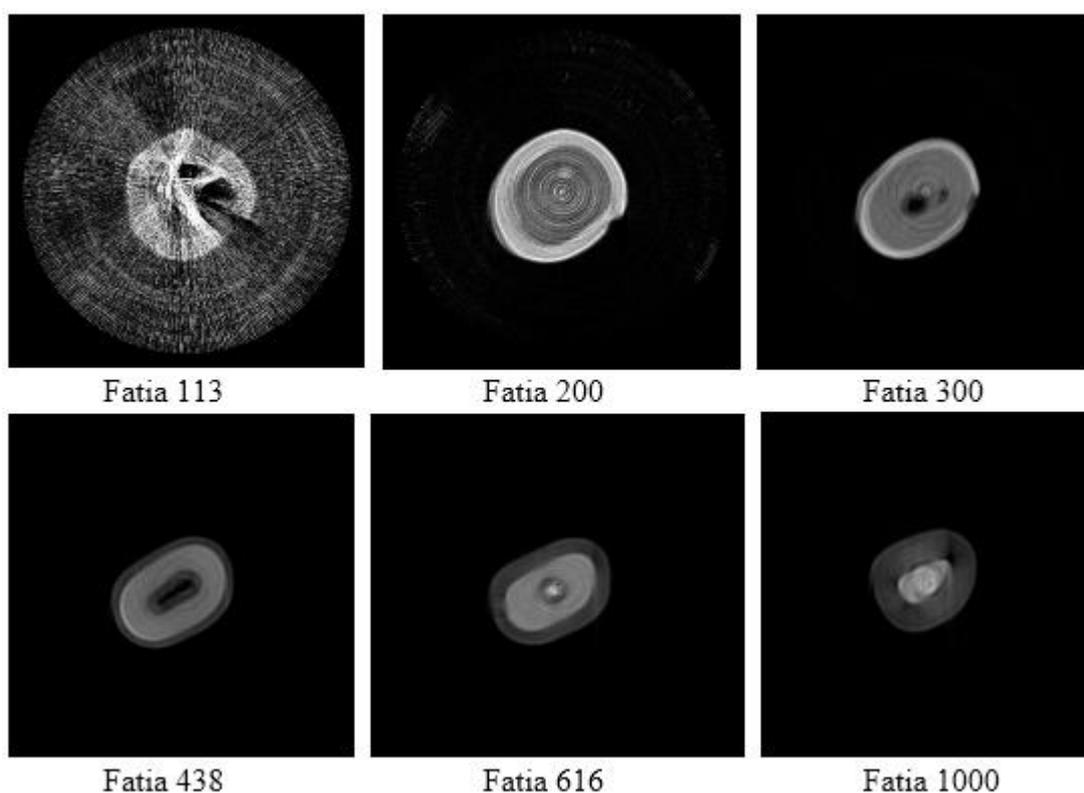
Na figura 40, é possível analisar algumas imagens radiográficas da amostra em questão e na figura 41, algumas fatias de reconstrução.

Figura 40 - Imagens radiográficas do dente.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 41 - Fatias de reconstrução do dente.

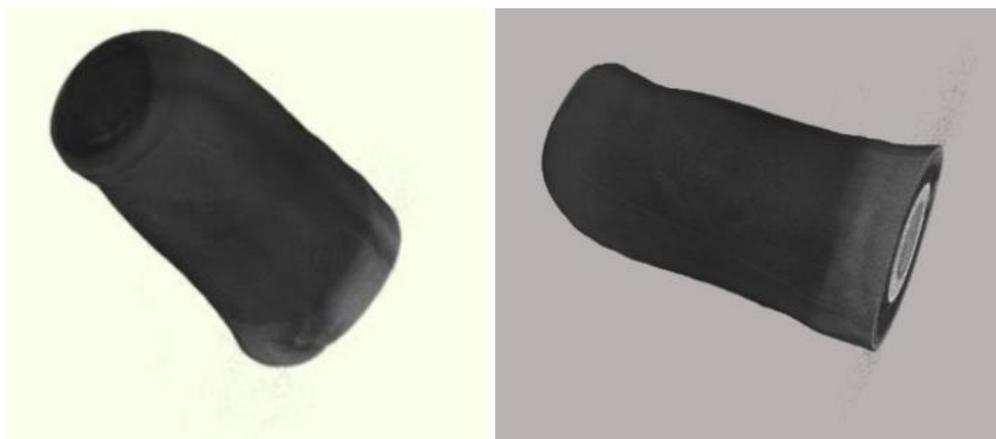


Fonte: A autora, 2021.

As fatias do extremo inferior do dente, compreendidas entre a fatia 59 e a 210, não foram utilizadas no processo de renderização, pois possuíam alguns artefatos. Foram usadas apenas as fatias sem artefatos para visualizar o volume. Provavelmente, os artefatos são produto da interface entre o material do dente e a cola da base que fixa a amostra. Através da análise das fatias de reconstrução, é possível observar as estruturas que constituem o dente, como por exemplo, a região do esmalte, da polpa e do canal.

Na figura 42, observa-se a visualização tridimensional preliminar da amostra analisada.

Figura 42 - Imagens preliminares da reconstrução do dente utilizado.



Fonte: A autora, 2021.

Com esses resultados, pode-se dizer que o sistema de microtomógrafo de raios X é eficiente e aplicável no estudo de pequenas amostras de materiais.

CONCLUSÃO

Foram apresentados nesse estudo os conceitos básicos da técnica de tomografia computadorizada e toda a parte metodológica para a construção de um sistema de microtomografia de raios X. O objetivo fundamental deste trabalho foi alcançado. Desenvolveu-se um modelo de um equipamento de microtomografia que apresenta características importantes, como baixo custo, o que facilita o acesso de estudantes e pesquisadores a essa tecnologia, portabilidade, aplicabilidade em pequenas amostras de diferentes materiais e seguro, no que diz respeito a proteção radiológica. Além disso, é um sistema simples, de fácil utilização para os usuários, também de fácil manutenção e passível de futuras modificações e aperfeiçoamentos.

Esse sistema foi capaz de produzir radiografias com boa qualidade para a realização do processo de reconstrução de imagem. Foram realizados testes com diferentes amostras e parâmetros operacionais, variando a tensão no tubo e distância entre os elementos do sistema. Com base nos testes que foram realizados, pode-se assegurar a estabilidade do sistema quanto a possíveis interrupções na execução dos ensaios, como travamentos e falhas na transferência de dados. As imagens radiográficas permitiram a análise detalhada dos objetos em estudo após o processo de reconstrução por meio do programa NReconv da SkyScan. Com a instalação do motor de passo, o sistema aprimorado permite maior agilidade e precisão nos testes, consequentemente, fornece melhores resultados quanto a qualidade de imagem microtomográfica. O valor da resolução espacial obtida para o sistema foi $SR = 307 \mu\text{m}$.

Tendo em vista os resultados obtidos, conclui-se que o sistema de microtomógrafo de raios X desenvolvido cumpri o objetivo proposto, se mostrando eficiente no estudo de pequenas amostras de materiais.

Futuramente, pode ser utilizada uma fonte de radiação que permite maiores valores de tensão e corrente, e também outros tipos de detectores *flat panels*, verificando a influência dessas modificações na qualidade da imagem. Além de outros testes, por exemplo, alterando parâmetros como o passo do motor e analisar o que isso resulta na imagem.

REFERÊNCIAS

ALLIAGE S/A. Manual do proprietário: sistema radiográfico digital intraoral Saevo Digital Sensor. **Manual de usuário**. São Paulo, 2018.

ALVES, H. D. L. **Análise da Porosidade de Sedimentos Geológicos Usando a Técnica de Microtomografia Computadorizada**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

ARRUDA, W. O. Wilhelm Conrad Röntgen: 100 years of x-rays discovery. **Arquivos de Neuro-Psiquiatria**, v. 54, n. 3, p. 525-531, 1996. FapUNIFESP (SciELO).

ARZILLI, F.; CILONA, A.; MANCINI, L.; TONDI, E. Using synchrotron X-ray microtomography to characterize the pore network of reservoir rocks: A case study on carbonates. **Advances in Water Resources**, v. 95, p. 254-263, 2016.

ASADCHIKOV, V. E.; BUZMAKOV, A. V.; DYACHKOVA, I. G.; ZOLOTOV, D. A.; IVANOVA, A. G.; KRIVONOSOV, Y. S.; PANTYUSHOV, V. V.; SAIFUTDINOV, R. G.; VOLOSHIN, A. E. Results from X-Ray Microtomography Studies of Gallbladder Stones. **Bulletin Of The Russian Academy Of Sciences: Physics**, v. 83, n. 2, p. 134-139, 2019.

BEAUGNON, F.; GARIANI, G.; GOUILLART, E.; BOUQUILLON, A.; BORMAND, M.; WALLEZ, G. Microstructure imaging of florentine stuccoes through x-ray tomography: A new insight on ancient plaster-making techniques. **Journal of Cultural Heritage**, v. 40, p. 17-24, 2019.

BUSHONG, S. C. **Ciência Radiológica para Tecnólogos: Física, Biologia e Proteção**. 9ª ed. [S.l.]: Elsevier, 2010. 123 p.

BUZUG, T. M. **Computed Tomography**. 1ª ed. Springer Verlag, 2008. 522 p.

CHOMICKI, O. Early years of röntgen's discovery. **Reports of Practical Oncology**, v. 1, n. 1, p. 1-6, 1996.

CNUDDE, V.; BOONE, M. N. Tomografia computadorizada de raios-X de alta resolução em geociências: uma revisão da tecnologia e aplicações atuais. **Earth-Science Reviews**, v. 123, p. 1-17, 2013.

COLES, M. E. et al. Developments in synchrotron X ray microtomography with applications to flow in porous media. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Richardson**, v. 1, p. 288-296, 1998.

CONTROLE de Motor de Passo Nema com Driver A4988. **Curto Circuito**, 2019. Disponível em:<<https://www.curtocircuito.com.br/blog/Categoria%20Arduino/control-de-motor-de-passo-nema-driver-a4988>> . Acesso em: 13 de nov. 2021.

CORMACK, A. M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. **Journal of Applied Physics**, v. 34, n. 9, p. 2722-2727, 1963.

DATA SHEET. **ST**, p. 1-13, 2000.

DE PAPE, P. Instrument Parameters (Part 2). **Rigaku Latin America**, p. 1-11, 2016.

FERNANDES, J.; APPOLONI, C.; FERNANDES, C. Accuracy evaluation of an x-ray microtomography system. **Micron**, v. 85, p. 34-38, 2016.

FRIEDLAND, G. W.; THURBER, B. D. The birth of CT. **American Journal Of Roentgenology**, v. 167, n. 6, p. 1365-1370, 1996.

GOLDMAN, L. W. Principles of CT: Multislice CT. **Journal of Nuclear Medicine Technology**, v. 36, n. 2, p. 57-68, 2008.

HOUNSFIELD, G. N. Computerized transverse axial scanning (tomography): part 1. description of system. **The British Journal of Radiology**, v. 46, n. 552, p. 1016-1022, 1973.

INC, A. Miniature X- Ray Source. **User Guide**. Bedford, USA, 2017.

ISKANDAR, A.; MUHAJIRIN; LISAH. Sistem keamanan pintu berbasis arduino mega. **Jurnal Informatika Upgris**, v. 3, n. 2, p. 99-104, 2017.

KAK, A. C.; SLANEY, M. **Principles of Computerized Tomographic Imaging**. IEEE Press, 1988.

LEITE, M. B.; MONTEIRO, P. J. M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, v. 81, p. 38-48, 2016.

LIMA, I.; APPOLONI, C.; OLIVEIRA, L.; LOPES, R. T. Caracterização de materiais cerâmicos através da microtomografia computadorizada 3D. **Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação**, v. 1, n. 2, p. 22-27, 2007.

LIMA, I.; LOPES, R. T.; OLIVEIRA, L. F.; ALVES, J. M. Análise de estrutura óssea a través de microtomografia computadorizada 3D. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 2, n. 1, p. 6-10, 2009.

MACHADO, A. C. **Estudo de parâmetros microestruturais de rochas-reservatório para diferentes resoluções utilizando microtomografia computadorizada 3d**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

MACHADO, A. C. et al. Investigação 3D da distribuição de fibras de aço em concreto reforçado por microtomografia de raios X. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 5, p. 707-720, 2015.

MACHADO, A. S.; OLIVEIRA, D. F.; GAMA FILHO, H. S.; LATINI, R.; BELLIDO, A. V. B.; ASSIS, J. T.; ANJOS, M. J.; LOPES, R. T. Archeological ceramic artifacts characterization through computed microtomography and x-ray fluorescence. **X-Ray Spectrometry**, v. 46, n. 5, p. 427-434, 2017.

MACHADO, A. S.; SILVA, A. S. S.; CAMPOS, G. N.; GOMES, C. S.; OLIVEIRA, D. F.; LOPES, R. T. Analysis of metallic archaeological artifacts by x-ray computed microtomography technique. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 151, p. 274-279, 2019.

MIZUNO, S.; TORIZU, R.; SUGIYAMA, J. Wood identification of a wooden mask using synchrotron x-ray microtomography. **Journal of Archaeological Science**, v. 37, n. 11, p. 2842-2845, 2010.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. **Física das Radiações**. São Paulo: Oficina de Texto, 2010. 296 p.

PESSOA, J. R. C.; DOMINGUEZ J. S.; CARVALHO, G.; ASIS J. T. Obtaining Porosity of Concrete Using X-ray Microtomography or Digital Scanner. **J. Chem. Chem. Eng**, v. 8, p. 371-377, 2014.

PIRES, F. L. **Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção de água pelo solo**. Tese de Doutorado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, 2006.

RADON, J. H. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten. *Ber. Vor Sächs. Akad. Wiss.*, 1917; 69: 262-277 (English translation available: J Radon: On determination of functions from their integral values along certain manifolds. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, v.MI-5, n. 4, p. 170-176, 1986.

REIS NETO, J. M. et al. A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 498-508, 2011.

REYES, F.; LIN, Q.; UDOUDO, O.; DODDS, C.; LEE, P. D.; NEETHLING, S. J. Calibrated X-ray micro-tomography for mineral ore quantification. **Minerals Engineering**, v. 110, p. 122-130, 2017.

RISTIĆ, G. S. The digital flat-panel x-ray detectors. **Conference on Medical Physics and Biomedical Engineering**, p. 65-71, 2013.

ROMANS, L. E. **Computed Tomography for Technologists**. USA: Wollters Kluwer Health / Lippincott Williams Wilkins, 2011. 379 p.

RUSSO, P. **Handbook of X-ray Imaging: Physics and Technology**. [S.l.]: CRC Press, 2017. 1393 p.

SCHMIDEDER, S.; BARTHEL, L.; FRIEDRICH, T.; THALHAMMER, M.; KOVAČEVIĆ, T.; NIESSEN, L.; MEYER, V.; BRIESEN, H. An X-ray microtomography-based method for detailed analysis of the three-dimensional morphology of fungal pellets. **Biotechnology And Bioengineering**, v. 116, n. 6, p. 1355-1365, 2019.

SCHMITT, R. H.; DIETRICH, B.; POLLMANN, S. Virtual flight through the workpiece: 3D quality assurance through X-ray computed tomography. **International Colloquium on Surfaces**, v. 12, p. 336-345, 2008.

SILVA, R. M. C. **Utilização da técnica de fluorescência de raios X com microsonda (m-XRF) aplicada a amostras de interesse arqueológico.** Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, 2002.

SKYSCAN NV. NRecon User Manual. **User Guide**, 2011.

SODINI, N.; DREOSSI, D.; CHEN, R.; FIORAVANTINI, M.; GIORDANO, A.; HERRESTAL, P.; RIGON, L.; ZANINI, F. Non-invasive microstructural analysis of bowed stringed instruments with synchrotron radiation x-ray microtomography. **Journal of Cultural Heritage**, v. 13, n. 3, Supplement, p. S44-S49, 2012.

VALENTE, M.; GRAÑA, D.; MALANO, F.; PÉREZ, P.; QUINTANA, C.; TIRAO, G.; VEDELAGO, J. Development and characterization of a microCT facility. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 9, p. 3967-3973, 2016.

VILAR, A. B. **Desenvolvimento de um sistema de microtomografia de raios x de baixo custo para amostras de pequenas dimensões e baixas densidades.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

WHITAU, R.; DILKES-HALL, I. E.; DOTTE-SAROUT, E.; LANGLEY, M. C.; BALME, J.; O'CONNOR, S. X-ray computed microtomography and the identification of wood taxa selected for archaeological artefact manufacture: Rare examples from australian contexts. **Journal of Archaeological Science: Reports**, v. 6, p. 536-546, 2016.