

LUÍS FERNANDO TOFFANO JARDIM

Aplicações Radiológicas na Engenharia de Materiais

São Paulo

2022

LUÍS FERNANDO TOFFANO JARDIM

Aplicações Radiológicas na Engenharia de Materiais

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Metalúrgica e
de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Franco de
Monlevade

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Declaração de Aprovação:

Eduardo Franco de Monlevade

Prof. Dr. Eduardo Franco de Monlevade

Ficha Catalográfica:

T. Jardim, Luís Fernando

Aplicações Radiológicas em Engenharia de Materiais / Luís Fernando T. Jardim
– São Paulo, 2022.

113 f. il. coloridas.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Curso de Engenharia de Materiais, São Paulo, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Franco de Monlevade

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais, Fernando e Patrícia, que sempre me incentivaram em minhas jornadas. Foram eles a fonte de inspiração deste tema, já que são estudiosos das ciências radiológicas, e é a eles que dedico este trabalho.

Às minhas avós Manira e Nice, que foram minhas primeiras professoras, que me ensinaram o valor do conhecimento e me forneceram toda a base que tenho de matemática e língua portuguesa, respectivamente, ferramentas essenciais à construção deste e de toda minha carreira acadêmica.

Aos meus colegas, que estiveram comigo em todos os momentos, que sempre me ampararam e se dispuseram a ler as dezenas de versões deste documento antes de sua finalização.

A todos os professores e profissionais do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que tanto me ensinaram. Especialmente ao Prof. Dr. Eduardo Franco de Monlevade, que sempre me apoiou durante minha graduação e, agora, está ao meu lado na conclusão deste ciclo, sendo professor orientador deste estudo. Também agradeço a disponibilidade e interesse dos membros da banca de avaliação, Dr. Christiano GIANESI Bastos da Fonseca e Dr. Victor Caso Moreira.

Finalmente, agradeço a todos os cientistas, engenheiros e pesquisadores que cito neste trabalho que permitiram que houvesse tanto conhecimento a ser explorado de maneira acessível à comunidade acadêmica.

“Nada na vida deve ser temido, somente compreendido.

Agora é hora de compreender mais para temer menos”

(Marie Curie)

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	10
1. OBJETIVOS.....	18
2. METODOLOGIA	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Pesquisa de interesse	20
3.2. Origem	24
3.3. Principais Técnicas Radiológicas	27
3.3.1. Interações com a matéria	27
3.3.2. Técnicas de radiografia para análise de Materiais.....	29
3.3.3. Técnicas de Tomografia computadorizada	33
3.3.4. Técnicas de Radiologia de Nêutrons	36
3.3.5. Técnicas radiológicas por Síncrotron.....	39
3.3.6. Comparação de Técnicas	41
3.4. Metodologia de caracterização radiológica	42
4. APLICAÇÕES EM ENGENHARIA DE MATERIAIS.....	45
4.1. Análise Prática por raio X de defeitos em soldas de Cobre.....	45
4.2. Análise Prática por tomografia em amostra de ferro após redução aluminotérmica 49	
4.3. Aplicações em Estruturas.....	52
4.3.1. Aplicações em interfaces metálicas.....	52

4.3.2. Aplicações em Cimentos	56
4.3.2.1. Polímeros Superabsorventes em Cimentos	57
4.3.2.2. Quantificação de presença de água em interface cimento-cerâmica	61
4.3.3. Caracterização de defeitos em soldas e dutos de transmissão subaquáticos	
63	
4.3.3.1. Soldas	64
4.3.3.2. Dutos	66
4.4. Aplicações referentes ao estudo da complementaridade de fótons e nêutrons	69
4.4.1. Análise sobre carga de bateria ao longo do tempo.....	69
4.4.2. Análise de fases em espuma metálica	71
4.5. Aplicações Médicas.....	72
4.5.1. Ciência Forense.....	72
4.5.2. Implantes Médicos.....	74
4.5.2.1. Implantes Cerâmicos.....	76
4.5.2.2. Deposição metálica em implantes	78
4.6. Aplicações em Polímeros.....	80
4.6.1. Copolímeros em bloco	81
4.6.2. Ionômeros.....	82
4.6.3. Polímeros de Cristal Líquido.....	83
4.6.4. Biopolímeros.....	84
4.7. Materiais Naturais	85
4.7.1. Materiais à Base de Celulose	85
4.7.2. Materiais em Paleontologia Moderna	87
4.8. Cerâmicos	89
4.8.1. Argilas.....	89

4.8.2. Resistência de Cerâmicos de Al ₂ O ₃ Fabricado Aditivados por Estereolitografia	91
4.9. Metais.....	93
4.9.1. Metais Líquidos.....	93
4.9.2. Estudo Não Destrutivo de Meteoritos	95
5. DISCUSSÃO.....	99
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
8. APÊNDICE 1 – FORMULÁRIO.....	111

RESUMO

Embora estabelecida como uma técnica não destrutiva de alta eficiência e precisão, com diversas aplicações em Engenharia de Metalúrgica e de Materiais, a radiologia ainda é muitas vezes subutilizada nesta ciência e grande parte dos aspirantes a engenheiros da área tem pouco conhecimento sobre ela.

Este trabalho visa a revisão bibliográfica de técnicas radiográficas com aplicações na ciência de materiais e o funcionamento dos equipamentos em questão, por meio de análise de pesquisas produzidas por cientistas de materiais utilizando tais técnicas. Deste modo, tem o objetivo de discutir a utilização da radiologia em análises mais refinadas e menos invasivas fornecendo uma base teórica ao engenheiro de metalurgia e materiais de possibilidades de aplicação de tais dispositivos em seus próprios estudos.

A abordagem é feita visando estudos de casos disponibilizados por estudiosos do assunto em suas pesquisas e tenta abordar de maneira ampla, assuntos que permeiam as áreas principais da ciência dos materiais: metais, polímeros, cerâmicos, materiais naturais e compósitos, trazendo casos que datam a origem da ciência radiológica a casos mais recentes com aplicações de dispositivos modernos.

Palavras-chave: Radiologia, Análise Não Destrutiva, Raio X, Radiografia por Nêutrons, Síncrotron, Revisão Bibliográfica, Estudo de Caso.

ABSTRACT

Although established as a non-destructive technique of efficiency and precision, with several applications in Metallurgical and Materials Engineering, radiology is still often underused in this science and most aspiring engineers in the area have little knowledge about it.

This work is a literature review of radiographic techniques with applications in materials science and equipment operation, through the analysis of research conducted by materials scientists using such techniques. In this way, it aims to discuss the use of radiology in more refined and less invasive analyzes providing a theoretical basis to the metallurgy and materials engineer of possibilities of application of such devices in their own studies.

The approach is made aiming at case studies made available by scholars of the subject in their research and tries to broadly address issues that permeate the main areas of materials science: metals, polymers, ceramics, natural materials and composites, bringing cases that date back to origin of radiological science to more recent cases with applications of modern devices.

Keywords: Radiology, Non-Destructive Analysis, X-Ray, Neutron Radiography, Synchrotron, Bibliographic Review, Case Study.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Gráfico de respostas da pergunta: " Você já ouviu falar de técnicas radiográficas de análise de materiais?"	20
Figura 2: Gráfico de respostas da pergunta: "Quais destes materiais você acredita que poderiam ser estudados por técnicas radiográficas?"	21
Figura 3: Gráfico de respostas da pergunta: " Como você classificaria seu conhecimento em técnicas radiográficas em análise de materiais?"	21
Figura 4: Gráfico de respostas da pergunta: "Quais das técnicas abaixo você conhece?"	22
Figura 5: Gráfico de respostas da pergunta: "Quão relevante você acredita que seja estudar este campo de conhecimento para sua formação?"	23
Figura 6: Radiografia de uma mão de Sebastian Gilbert Scott 1895. (Columbia Surgery, 2015).	24
Figura 7: Difração de raios X apresentado no trigésimo quarto simpósio Silvanus Thompson Memorial, 1959. (Thirty-fourth Silvanus Thompson Memorial Lecture - The Diffraction of X Rays, 1959).....	26
Figura 8: Layout de um experimento baseado em um raio em “lápis”. (YAN ET AL., 2021).	27
Figura 9: Coeficiente de atenuação em função do do núcleo atômico de todos os elementos. (BAHNHART ET AL., 2010)	28
Figura 10: Esquema de difração de radiação de fluorescência por raio X. (REBOLLO ET AL., 2020)	31
Figura 11: Esquema de indução de partículas por raio X em técnica PIXE. (SERA ET AL., 2018).....	32
Figura 12: Esquema de diferentes movimentos de equipamento tomográfico conforme finalidade. (IMAGING PHYSICS IN PRIMER OF DIAGNOSTIC IMAGING (FIFTH EDITION), 2011)	34

Figura 13: Scanner tomográfico em movimento concêntrico circular em torno de um paciente. (BECKMANN ET AL., 2006)	35
Figura 14: Esquema de equipamentos tomográficos conforme escala de observação de amostra. (WFU SCHOOL OF BIOMEDICAL ENGINEERING AND SCIENCES, 2017) .	36
Figura 15: Ilustração de um set-up esquemático de radiografia por nêutrons. (HASSANEIN ET AL., 2005).	37
Figura 16: Esquema de atenuação comparativa entre raio X e radiografia por nêutrons conforme número atômico (PHOENIX, 2022).	37
Figura 17: À esquerda uma radiografia por raio X onde é possível identificar principalmente materiais mais densos, à direita uma radiografia por nêutrons, onde é possível identificar regiões de menor densidade. (PHOENIX, 2022).	38
Figura 18: esquema de montagem de radiografia síncrotron com espelho e detector (JAVAHERI ET AL., 2020).....	40
Figura 19: Esquema de imã de mudança de rota em colimador de partículas, com saída para raios de síncrotron (EUROPEAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY, 2022).	
.....	41
Figura 20: Escala de cores relacionadas a diferentes tecidos orgânicos em radiologia médica. (BURBRIDGE ET AL., 2017).	43
Figura 21: Corte tomográfico de crânio com projétil de chumbo depositado. (FACULDADE DE ODONTOLOGIA DE RIBEIRÃO PRETO - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2006).	43
Figura 22: Exemplo de tubo de cobre com solda em Y. (ALIEXPRESS, 2022).	46
Figura 23: Radiografia por raio X da amostra 13 de soldas em tubos de cobre. (MONLEVADE, 2022).....	46
Figura 24: Radiografia por raio X da amostra 9 de soldas em tubos de cobre. (MONLEVADE, 2022).....	47
Figura 25: (a) Forças atuando na poça líquida da solda (b) forças atuando na bolha de gás dentro da poça de solda. (CHEN ET AL., 2020).....	48
Figura 26: Forças atuantes sobre uma bolha de gás em poça de solda conforme ângulo da tocha de solda. (CHEN ET AL., 2020).....	49

Figura 27: (a) Amostra durante processo de aluminotermia. (b) Amostra de Ferro após a reação. (Acervo pessoal, 2022).....	50
Figura 28: Especificações do equipamento tomográfico utilizado. (Acervo pessoal, 2022).	51
Figura 29: Identificação de bolhas na amostra em 3 diferentes eixos tomográficos e reconstrução digital da amostra. (Acervo pessoal, 2022).....	51
Figura 30: Identificação de bolhas na amostra em planos perpendiculares à base, em reconstrução tomográfica. (Acervo pessoal, 2022)	52
Figura 31: Diagramas de simulações de formatos da interface alumínio-aço e distribuição de intensidade relativa simulada (NIKULIN ET AL., 2008).....	54
Figura 32: Diagrama esquemático da relação da geometria da interface aço-alumínio com o perfil reconstruído da relação refrativa (NIKULIN ET AL., 2008)	55
Figura 33: Perfil de espessura de uma folha de alumínio sob tensão externa reconstruída por dados experimentais. (NIKULIN ET AL., 2008)	56
Figura 34: Polímero Superabsorvente (a) sem hidratação, (b) hidratado. (WONG, 2018).	57
Figura 35: Distribuição horizontal e vertical da umidade através de uma amostra trincada sem adição de SAP (0 — CRA) com visualização em 5 s, 1 min, 15 min, 1 h e 4 h após o contato com a água. O retângulo branco é usado para quantificação da distribuição de umidade horizontal média e o retângulo preto para distribuição de umidade vertical média. Os pontos na parte superior são os pontos de inflexão utilizados, os círculos na parte inferior são os locais dos reforços (SNOECK ET AL., 2012).	59
Figura 36: Teor de água obtido por radiografia de nêutrons após 4 h de contato com água para amostras trincadas sem adição de SAP, 1 m% SAP B, 1 m% SAP C, 2 m% amostras SAP C e amostras não trincadas sem SAP e não trincadas com 1 m % de SAP C. (SNOECK ET AL., 2012).	61
Figura 37: Vista da seção transversal de uma célula de amostra: (1) amostra de cimento, (2) amostra de argila, (3) O-rings, (4) suporte de amostra de PTFE, (5) fritas de PEEK, (6) reservatórios de solução dentro de tampas de PEEK, (7) suporte de alumínio.	

A parte emoldurada em preto representa a parte exposta aos nêutrons.	
(SHAFIZADEH ET AL, 2015).	62
Figura 38: Radiografias de nêutrons de uma interface cimento-argila em t = 64 dias (esquerda) e t = 104 dias (direita), e seus perfis de teor de água corrigidos (médias ao longo da horizontal da seleção retangular amarela, cimento está localizado à esquerda, argila à direita). O quadrado vermelho representa a parte da imagem selecionada para correção da janela de dose. (SHAFIZADEH ET AL., 2014).	63
Figura 39: Visão 3D de trincas segmentadas mostradas em (a) plano x-y, (b) plano x-z, (c) depois de uma inclinação de 6° no plano y-z. Na última imagem, os espaços periódicos entre as regiões trincadas podem ser claramente vistos e estão todos orientados no plano da imagem. (BRACARENSE ET AL., 2008).	65
Figura 40: Esquerda: Um exemplo de configuração para radiografia de um tubo contendo um defeito de furo de fundo plano. Direita: Cone de possíveis localizações de defeitos calculado por meio do traçado de raios, usando apenas as posições da fonte e do detector. (HAITH ET AL., 2017).	67
Figura 41: À esquerda, a imagem radiográfica original, com defeito em destaque. À direita, a mesma imagem após subtração da média de fundo, com isso a variação de fundo foi removida e o defeito fica mais aparente. (HAITH ET AL., 2017).	68
Figura 42: Imagem experimental do duto de 25,4 cm de diâmetro com 28% de descontinuidade na região de solda. (a) Região de defeito. (b) Pixels utilizados na análise. (HAITH ET AL., 2017).	69
Figura 43: Seções transversais de radiografias de baterias alcalinas. (a) e (b), Tomografia síncrotron de bateria AAA. (c) e (d), tomografia por nêutrons de bateria do tipo Bloco-C. (a) E (c) antes da descarga, (b) e (d) após descarga. (BANHART ET AL., 2013).	70
Figura 44: Bateria de iodeto de Lítio. (a) radiografia por raio X que mostra principalmente a distribuição de iodeto. (b) radiografia por nêutrons que mostra distribuição de Lítio na mesma bateria. (c) tomografia por nêutrons da bateria com observação da distribuição de Lítio na mesma bateria. (c) tomografia por nêutrons da	

bateria com observação da distribuição de Lítio em vermelho. (BANHART ET AL., 2013).	71
Figura 45: (a) Radiografia de espuma AlSi ₆ Cu ₄ . (b) Tomografia de nêutrons de espuma AlSi ₆ Cu ₄ . Aglomeração de TiH ₂ em vermelho. (BANHART ET AL., 2013).	72
Figura 46: Delineação gráfica da faixa de HU com base nos valores obtidos nos materiais restauradores investigados. O limite inferior e superior da radiopacidade da amálgamma não pode ser avaliado de forma confiável. Apenas Vitablocks (cerâmico), liners e adesivos possuem radiopacidades que estão no nível dos dentes ou inferiores. (LOOMIS ET AL., 2018).	73
Figura 47: Tomografia de fonte dupla de resolução ultra-alta para visualização odontológica forense - discriminação de obturações cerâmicas e compostas (LOOMIS, 2018).	74
Figura 48: Esquema representativo de possíveis componentes de uma prótese de quadril. (MEDACTA, 2022).	75
Figura 49: (a) A tomografia computadorizada axial do paciente 1 na janela óssea mostra que a cabeça femoral de cerâmica (seta) e a cúpula acetabular de titânio (triângulo) são igualmente hiperdensas, ocultando a cerâmica e impedindo a visualização da fratura do revestimento cerâmico. (b) A tomografia computadorizada axial, agora otimizada, mostra que o revestimento cerâmico não é tão hiperdenso quanto o titânio. Visualiza-se a interface (triângulo) entre o revestimento cerâmico e a cabeça femoral cerâmica, bem como o fino traço de fratura envolvendo o revestimento cerâmico (seta). (c) A tomografia computadorizada mostra a interface (triângulo) entre as superfícies do rolamento cerâmico e a linha de fratura circular fina (setas). (ENDO, 2014).	77
Figura 50: Fotografia intraoperatória de paciente, confirmando a fratura. (ENDO, 2014).	77
Figura 51: Radiografias de diferentes implantes e suas respectivas radiologias por sincrotron indicando exposição a metais de componentes não articulados. Abreviaturas: ATQ, artroplastia total do quadril; ATJ, artroplastia total do joelho. (SCHOON, 2020)...	79
Figura 52: Perfis de um copolímero em bloco (Poliestireno-bloco-poliestireno) por raio X conforme temperaturas. Os dois perfis superiores (177,4°C, 157,7°C) representam a	

fase esférica, enquanto as outras representam a fase cilíndrica hexagonal. (SAKAMOTO ET AL, 1998).....	82
Figura 53: Ilustração de áreas de poros com diferentes características observadas e uma radiologia de uma seção de papel de jornal. (HOLMSTAD ET AL., 2006).	86
Figura 54: Reconstrução 3D (aproximadamente 87 x 97 x 100 μm em tamanho) de uma região cortada de uma amostra de madeira, mostrando a porosidade de cada região baseada na concentração de água) (TRTIK ET AL., 2007).	87
Figura 55: Escala de contraste de minerais e rochas (PACHNEVICH, 2017).	88
Figura 56: À esquerda: características das principais técnicas de moldagem da cerâmica. À direita: características radiográficas de cerâmicos conformados. (a) e (b) visão normal do cerâmico moldado Wheel-shaping; (c) e (d) visão normal do cerâmico moldado Wheel-made; (a) e (c) são imagens radiográficas negativas aprimoradas; (b) e (d) são imagens radiográficas positivas aprimoradas (COURTY ET AL., 1995).	90
Figura 57: Evolução de trincas em cerâmicas de Al_2O_3 fabricadas com aditivos estereolitográficos em várias diferenças de temperatura (MENG ET AL, 2022).	92
Figura 58: Procedimento de processamento de imagens para obter traçado de movimento da amostra em análise (TAKENAKA, 1996).	94
Figura 59: Exemplo de vetor de campo de fluxo obtido através das análises radiográficas espaciais por modelo de correlação no experimento (TAKENAKA, 1996).	95
Figura 60: Pictografia de raios X e espectro-microscopia de absorção STXM. (A à D) Localização dos principais elementos do meteorito revelados pela divisão das imagens radiográficas nas bordas de absorção para Al, Fe, Mg e Ni. Os mapas de quociente de absorção, exibidos em escala logarítmica, mostram a presença de Fe nas veias de choque do silicato (setas vermelhas). (E e F) Mapas de quociente de espalhamento derivados de imagens pictográficas de Mg e Al, respectivamente. Esta região de interesse é uma visão ampliada do retângulo vermelho tracejado mostrado em (B). (G e H) Mapas de razão Ni-Fe de mapas de quociente de espalhamento Mg e Al, respectivamente. A barra colorida indica a relação Ni-Fe, onde 100% indicam uma região de sulfeto de níquel puro. (JEEWANDARA, 2019).....	97

Figura 61: (a) Modelo 3D da distribuição de metal Fe-Ni no meteorito Seymchan após reconstrução tomográfica. (b) Modelo 3D da distribuição de liga metálica Fe-Ni no meteorito Marjalahti. As inclusões em vermelho representam regiões mais densas na base da liga (JEEWANDARA, 2019).....98

1. OBJETIVOS

O trabalho em questão tem por objetivo fazer uma revisão bibliográfica abordando técnicas de análise não destrutiva de materiais por meio da ciência radiológica, listando técnicas radiológicas aplicáveis em diferentes situações. Para tal, utiliza do recurso de estudos de casos já realizados por pesquisadores da área, onde metais, polímeros, cerâmicos, compósitos ou outros materiais puderam ser analisados por meio de diferentes técnicas radiográficas.

Com isso, propõe-se uma revisão quanto ao conhecimento básico do engenheiro metalúrgico e de materiais em relação às técnicas não destrutivas de análise de amostras em seu trabalho, por meio da abordagem da ampla aplicabilidade das técnicas radiológicas em estudos que vão desde a descoberta da radiação a técnicas modernas como o uso de aceleradores de partículas, sendo utilizadas em materiais de composição mais simples como dutos e estruturas à mais complexos como implantes e meteoritos.

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste documento foi principalmente por meio de pesquisas na bibliografia e estudos de outros cientistas da área. Inicialmente, propôs-se uma revisão bibliográfica para a qual foi necessário estudar documentos históricos disponibilizados principalmente pelo Instituto Britânico de Radiologia, nos quais foi possível traçar os momentos em que a Engenharia de Materiais começou a se entrelaçar com a ciência radiológica, para que fosse possível não só descrever a história da radiologia, mas também fornecer um panorama do entrelaçamento entre as duas ciências.

Em seguida, são trazidas revisões quanto às técnicas mais comuns de aplicação em estudos de materiais, que puderam ser obtidas em pesquisas bibliográficas e de fornecedores/laboratórios de tais equipamentos. Para embasar ainda mais a análise que é proposta quanto à aplicabilidade da ciência radiológica no estudo de materiais, utiliza-se da análise dos resultados de 2 estudos radiográficos, o primeiro conduzido pelo Professor Dr. Eduardo Monlevade e fornecido ao estudante, e o segundo desenvolvido pelo estudante em um laboratório médico. Para tal, baseia-se nas imagens obtidas e estudos de casos semelhantes na literatura disponível em plataformas online como Web of Science e Google Acadêmico.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Pesquisa de interesse

Foi realizada uma pesquisa entre os estudantes dos Departamentos de Engenharia de Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, incluída no apêndice 1, a partir da qual foi possível traçar alguns aspectos quanto ao conhecimento dos estudantes em relação às técnicas radiográficas aplicadas em materiais e definir quais seriam os focos de análise deste estudo e discutir o conhecimento quanto a este assunto.

Você já ouviu falar de técnicas radiográficas de análise de materiais?
38 respostas

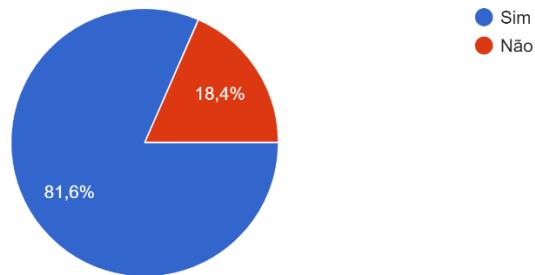


Figura 1: Gráfico de respostas da pergunta: " Você já ouviu falar de técnicas radiográficas de análise de materiais?"

Para o formulário, foram enviadas 38 respostas de alunos, sendo 28 de Engenharia de Materiais e 10 de Engenharia Metalúrgica, com 28,9% sendo do 5º ou mais anos na universidade, 23,7% no 4º, 21,1% no 3º, 13,2% no 2º e 13,2% no 1º. Dentre os alunos respondentes, 18,4% afirmam não estarem familiarizados com o assunto de técnicas radiográficas para análise de materiais, não havendo correlação aparente com o ano de graduação, como indicado na Figura 1.

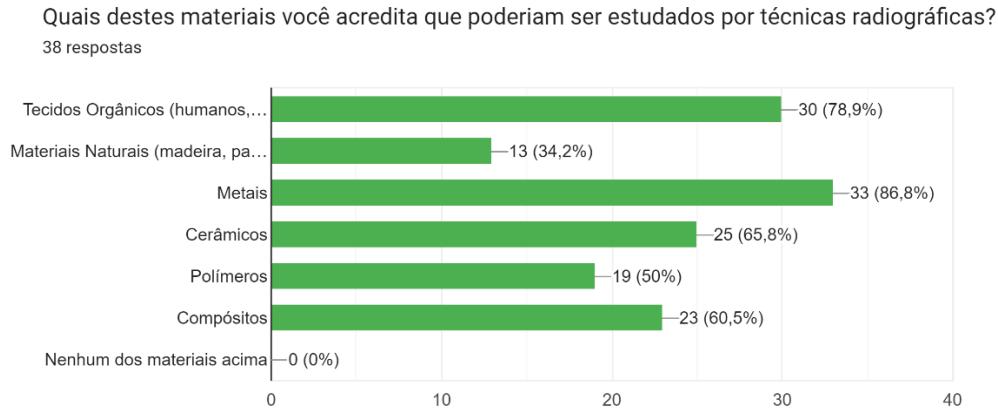


Figura 2: Gráfico de respostas da pergunta: "Quais destes materiais você acredita que poderiam ser estudados por técnicas radiográficas?"

Já, quando questionados quanto aos materiais que poderiam ser estudados por técnicas radiográficas (Figura 2), os alunos dos anos mais avançados respondem com uma visão mais ampla, enquanto os mais novos na universidade acreditam existir poucas aplicações. Ainda assim, somente 19 dos respondentes afirmaram que polímeros podem ser estudados por técnicas radiográficas.

Como você classificaria seu conhecimento em técnicas radiográficas em análise de materiais
38 respostas

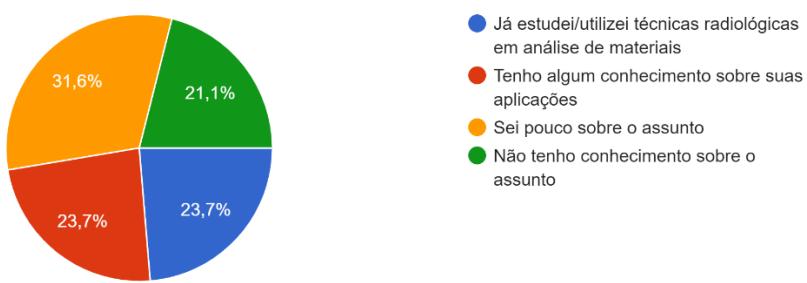


Figura 3: Gráfico de respostas da pergunta: " Como você classificaria seu conhecimento em técnicas radiográficas em análise de materiais?"

Quando questionados sobre seu conhecimento das técnicas radiográficas (Figura 3), 52,7% afirmaram saber pouco ou nada sobre o assunto, enquanto somente 23,5% afirmam já ter estudado ou utilizado tais técnicas em análise de materiais.

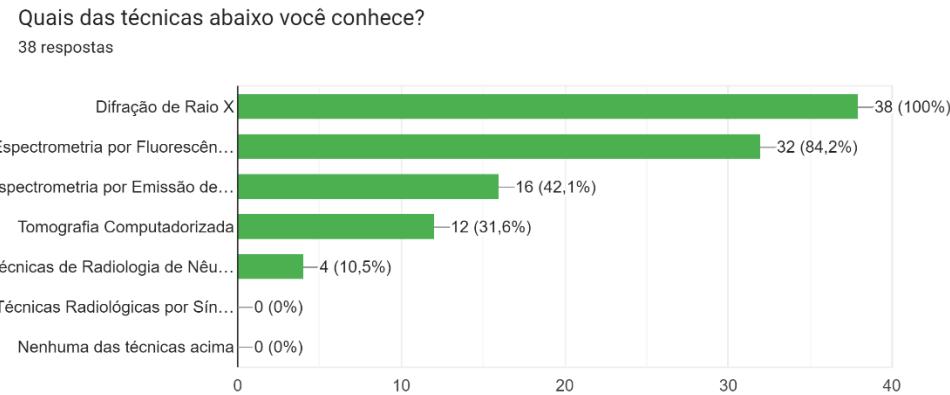


Figura 4: Gráfico de respostas da pergunta: "Quais das técnicas abaixo você conhece?"

Já na pergunta quanto ao conhecimento de técnicas de radiografia (Figura 4), todos os respondentes afirmaram conhecer Difração de Raio X e 84,2% Espectrometria por Fluorescência de Raio X, entretanto, técnicas como tomografia computadorizada, radiografia por nêutrons ou síncrotron tiveram menos de 50% de respondentes que as

conheciam, sendo que os respondentes que conheciam, eram principalmente dos últimos anos da graduação.



Figura 5: Gráfico de respostas da pergunta: "Quão relevante você acredita que seja estudar este campo de conhecimento para sua formação?"

Finalmente, quando questionados quanto à relevância que atribuíam às aplicações radiológicas na Engenharia de Metalúrgica e de Materiais (Figura 5), 94,8% dos respondentes consideraram que o assunto é “relevante” ou “muito relevante” para sua formação. A partir destes dados, foi possível traçar de maneira mais clara qual seria a abordagem do trabalho, em forma de revisão e estudos de caso.

Para a seção de aplicações, com a maior parte do conteúdo deste documento, foi utilizada a pesquisa nas plataformas Web of Science e Google Acadêmico, bibliografia disponível online e na biblioteca do PMT da Universidade de São Paulo. Foram definidos temas principais baseados na grade determinada de estudos de um bacharel em Engenharia de Materiais pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, a partir dos quais foram propostos os principais tipos de materiais a terem casos discutidos. Deste modo, foram pesquisados estudos relevantes que utilizassem de técnicas radiológicas variadas para o estudo e caracterização de materiais para com isso tratar a aplicabilidade e reproduzibilidade destes métodos em estudos futuros.

3.2. Origem

A radiografia, desde o seu início, foi intrinsecamente ligada à ciência dos materiais. Ela teve sua origem como conceito em 1895 (BRITISH INSTITUTE OF RADIOLOGY, 2022), quando Wilhelm Roentgen, Professor de Física em Wurzburg, Baviera, accidentalmente descobriu o Raio X enquanto testava a capacidade de raios catódicos atravessarem vidro. O tubo catódico que estava coberto por um grosso papel preto do qual era possível observar uma luz verde incandescente sendo projetada em uma tela fluorescente próxima. Através de experimentação, Roentgen descobriu que a luz era capaz de passar através da maioria das substâncias, mas deixava “sombras” quando atravessava materiais sólidos. Como o cientista descreve em seu manuscrito da descoberta, “On A New Kind of Rays”: “Água e diversos outros fluidos são bem transparentes. Hidrogênio não é teoricamente mais permeável que o ar. Chapas de cobre, prata, chumbo, ouro e platina também permitem o raio passar, mas somente quando o metal é fino. Platina 0.2mm. de espessura permite alguns raios passar; prata e cobre são mais transparentes. Chumbo 1,5mm de espessura é praticamente opaco”. (ROENTGEN, 1895). Ainda sem conhecimento para determinar o que eram os raios em questão, Roentgen os nomeou “X” (como no conceito matemático de variável desconhecida), de onde vem o nome “Raio X”. (COLUMBIA SURGERY, 2015).



Figura 6: Radiografia de uma mão de Sebastian Gilbert Scott 1895. (Columbia Surgery, 2015).

Pouco tempo depois, Roentgen entendeu que os raios X poderiam passar por tecido orgânico também. Isso abriu portas para uma nova área da ciência médica, uma vez que agora era possível analisar tecidos com maior densidade, como ossos ou cartilagens, sem a necessidade de cortes ou cirurgias mais invasivas, como era feito até então (BRITISH INSTITUTE OF RADIOLOGY, 2022). Médicos do mundo todo começaram a utilizar a técnica em menos de um ano, para localizar balas metálicas de tiro, fraturas ósseas, pedras nos rins e até objetos engolidos. A descoberta de Roentgen foi tão grandiosa que levou a ele o prêmio do primeiro Nobel de Física em 1901 (THE NOBEL PRIZE ACADEMY, 2022).

Nos anos 1920, Seymour Cochrane Shanks desenvolveu métodos mais sofisticados de se utilizar a tecnologia radiológica. O que até então eram tubos de gás, foram substituídos por tubos de vácuo de cátodos aquecidos de Coolidge, muito mais previsíveis e seguros (BRITISH INSTITUTE OF RADIOLOGY, 2022). Já nos anos 1930, houve a publicação do artigo “A Text-Book of X-ray Diagnosis by British Authors”, texto influente com diversos autores que cobria todos os aspectos conhecidos até então da radiologia médica e possibilitou o avanço da tecnologia no período em questão; foi também quando começaram a ser estudadas aplicações radiológicas fora da medicina, como foi o caso de Ian Rawlins que escreveu um estudo sobre as obras da Galeria Nacional Inglesa, no qual descrevia a possibilidade de estudo de materiais em pinturas históricas, sem afetá-las, por meio do Raio X e também da identificação de pinturas falsificadas. A tecnologia da radiografia começava a mostrar aplicações nos mais diversos meios e levantar perguntas que até então não existiam, ou como Rawlins propõe de maneira satírica: “(...) a radiografia criou mais problemas do que os resolveu” (RAWLINS, 1938).

Avançando para os anos 1940, a radiologia médica foi essencial em um período de guerra, com a necessidade de equipamentos que pudessem ser levados para o campo de batalha. Surgiram, desta forma, investimentos e novas tecnologias que possibilitaram anos de avanço nos dispositivos (BRITISH INSTITUTE OF RADIOLOGY, 2022). Após a 2ª Guerra Mundial, entre os anos 1950 e 1960, houve descobertas cruciais à radiologia,

dentre elas, a física nuclear. Ao mesmo tempo, Sir Lawrence Bragg fez descobertas fundamentais em relação à estrutura da matéria, utilizando cristalografia de Raio X, as quais ele apresentou no “Silvanus Thompson Memorial Lecture” de 1959, como ele cita: “A difração de Raios X, e a análise de cristais com sua ajuda, são assuntos extraordinários. O princípio físico é extremamente simples. Os raios X atingem os átomos do padrão cristalino e são dispersados por ele. As ondas dispersas interferem umas com as outras, com isso, em algumas direções existe um forte raio difratado e em outras ele vai ser mais fraco.” (BRAGG, 1959).

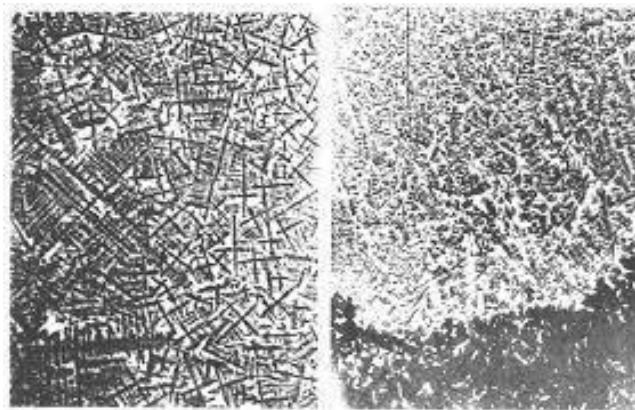


Figura 7: Difração de raios X apresentado no trigésimo quarto simpósio Silvanus Thompson Memorial, 1959. (Thirty-fourth Silvanus Thompson Memorial Lecture - The Diffraction of X Rays, 1959)

Os anos 1970, por sua vez, são chamados de os “anos dourados da radiologia” (BURNETTE, 2013), com os avanços na tecnologia, surgiram novas técnicas e novos equipamentos. Dentre eles, o mais importante é o Tomógrafo moderno (BRITISH INSTITUTE OF RADIOLOGY, 2022). Entre os anos 1980 e 1990, com acidentes como o de Chernobyl na Ucrânia e estudos sobre causas e tratamentos do câncer, aumentou o estigma acerca dos equipamentos que utilizam radiação para seu funcionamento. Porém, aos poucos, foram surgindo técnicas digitais e computadorizadas de radiologia, que foram fundamentais para atingir o ponto tecnológico em que se encontra a ciência moderna, e que possibilitam o estudo de materiais, tema do texto em questão.

3.3. Principais Técnicas Radiológicas

3.3.1. Interações com a matéria

A maioria dos experimentos de radiologia funciona com um raio (normalmente com formato de lápis) de intensidade I_0 , que penetra em uma amostra. Uma parte do raio em questão é absorvido (I_a), uma parte é transmitida na direção original e uma terceira parte é refletida ($I_{s,out}$). Essencialmente, o detector mede a redução da intensidade $I_t = I_0 - I_a - I_{s,out}$. Normalmente, são utilizados raios X e raios gamma para penetrar os materiais, sendo que a penetração depende da espessura e densidade do material analisado e do tamanho da fonte sendo aplicada (YAN ET AL., 2021).

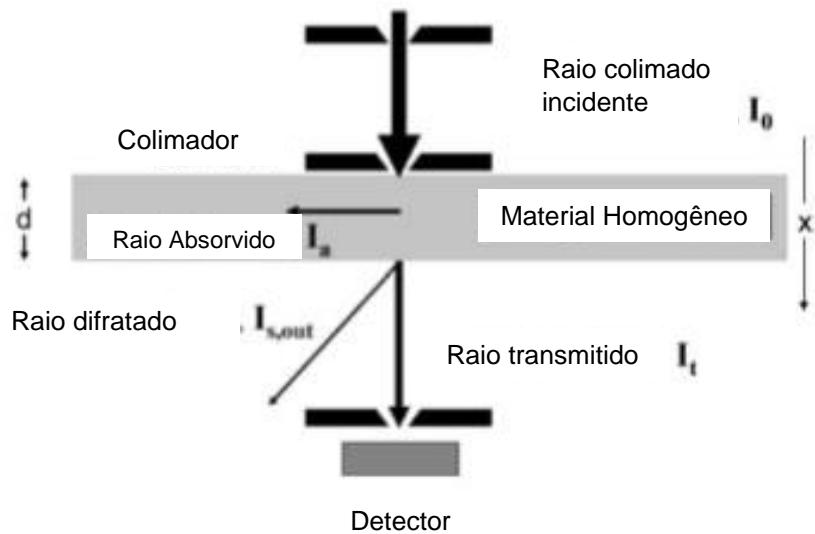


Figura 8: Layout de um experimento baseado em um raio em “lápis”. (YAN ET AL., 2021).

I_t/I_0 é normalmente conhecido e pode ser escrito como $1 - (I_a + I_{s,out})$. Deste modo, absorção e difração produzem o mesmo efeito atenuador e, em meios homogêneos com espessura d , a lei de Beer-Lambert pode ser aplicada: $I_t/I_0 = e^{-\mu d}$, onde μ é o coeficiente de atenuação linear do material. Neste caso simplificado, a figura abaixo ilustra o

coeficiente de atenuação μ em função do número atômico dos elementos representados (densidade específica ρ dos elementos), indo de $Z=1$ (Hidrogênio) à $Z=92$ (Urânio). Os valores que estão representados por diamantes se referem a Raios X de energia 100 keV. O μd varia com o Z , pois a interação é governada pelo número de elétrons em um átomo. Assim, existem 3 mecanismos dos fótons que afetam os Raios X, são eles o efeito fotoelétrico, a difração elástica e a difração inelástica (YAN ET AL., 2021).

Também é possível identificar o coeficiente de atenuação para nêutrons termais, um espectro comum com energia de nêutron em torno de 25 meV, representados por triângulos. A tendência, em função de Z , no caso de Raios X. Isso é porque a interação nuclear depende muito mais da configuração interna do núcleo que somente do número de prótons Z . Nas técnicas radiológicas, vários mecanismos podem remover nêutrons de um raio incidente, a chamada absorção nuclear, difração semi-elástica, inelástica e magnética. Em resumo, os Raios X interagem com os elétrons, enquanto os nêutrons interagem com os núcleos dos átomos. Com isso, pode-se utilizar os métodos de maneira complementar no estudo por imagens. (BAHNHART ET AL., 2010).

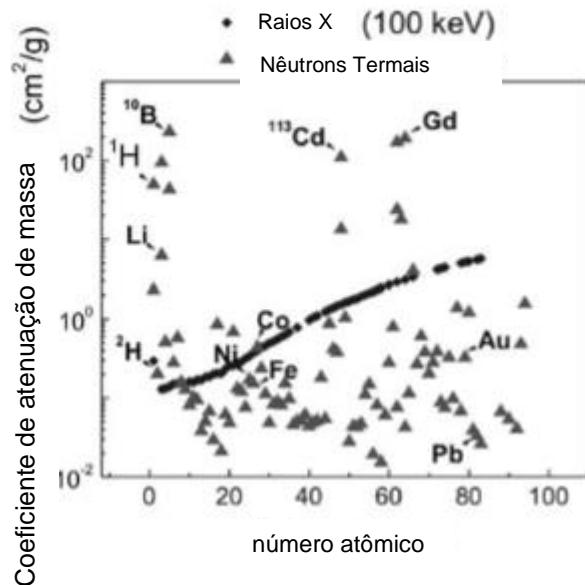


Figura 9: Coeficiente de atenuação em função do número atômico de todos os elementos. (BAHNHART ET AL., 2010).

3.3.2. Técnicas de radiografia para análise de Materiais

Entretanto, a radiografia por raio X, como descrito na seção anterior, descreve uma versão moderna do primeiro modelo descoberto por Wilhelm Roentgen em 1895. Desde então, a ciência radiográfica modernizou-se trazendo inovações técnicas que possibilitam uma gama ainda maior de aplicações, que serão exploradas nesta tese.

Difração de Raios X (XRD)

Na configuração do equipamento radiográfico, o dispositivo mais comumente usado para geração de raios X é um tubo de raios X, que consiste em um cátodo que emite elétrons e um ânodo. Quando os elétrons do cátodo são acelerados por uma alta tensão e bombardeiam um alvo, os raios X são gerados. Deste modo, quando os raios X irradiam uma amostra de material ocorre o espalhamento na forma cilíndrica ou de pellets.

Tal dispersão dos raios X pela amostra é determinada pela morfologia da amostra e pode ser coerente ou incoerente, sendo regida principalmente pela cristalinidade e característica de ser ou não amorfia. No espalhamento coerente, também conhecido como difração de raios X, não há mudança no comprimento de onda ou na fase entre os raios incidente e espalhado (MALCOLM ET AL., 1990). Por isso, amostras cristalinas causam um espalhamento coerente, enquanto amostras amorfas e semicristalinas causam um espalhamento incoerente, também chamado espalhamento difuso, no qual há mudança no comprimento de onda e na fase.

Deste modo, pode-se dizer que todo material cristalino espalha raios X em um padrão de difração exclusivo devido às diferenças em espaçamento cristalográfico planar, que configura algo semelhante a uma identidade única à cada substância (EPP ET AL., 2016). O padrão de difração de materiais cristalinos pode ser identificado por uma série de cones concêntricos que surgem do espalhamento pelos planos cristalinos e, quanto maior o grau de cristalinidade, mais nitidamente definidos tornam-se os anéis

concêntricos. Contrariamente, no caso de materiais predominantemente amorfos, o padrão de difração de raios X é comparativamente considerado difuso e um aspecto de halo pode ser observado, definido por uma região sombreada no centro do anel difratado.

Com isso, muitas informações sobre a morfologia e estrutura dos materiais amostrados podem ser obtidas utilizando de inspeção visual e interpretação matemática dos padrões e intensidades da radiação espalhadas sob a difração de raio X. Dentre elas, as dimensões dos domínios cristalinos, grau de cristalinidade da amostra, conformações de regiões cristalinas, distâncias e ângulos de ligação. Nos casos de falha mecânica de um material, que serão mencionados algumas vezes nas próximas seções, a morfologia pode envolver uma transformação de um alto grau de cristalinidade para um grau reduzido ou mesmo uma configuração amorfa, fato que será evidente nos padrões de difração de raios X do material antes e depois da falha.

Na análise de difração de raio X, as larguras dos picos em um padrão de fase particular fornecem indicação quanto ao tamanho médio do cristal. Cristais maiores resultam em picos nítidos, enquanto a largura do pico aumenta à medida que o tamanho do cristal diminui.

As técnicas de XRD podem ser usadas para obter informações sobre os defeitos e imperfeições na rede cristalina de sólidos, naturais ou resultantes de falhas. Isso porque, redes cristalinas tem uma estrutura regular com distribuição tridimensional de átomos no espaço (cúbico, rômbico, entre outros). Os átomos estão dispostos de tal forma que formam uma série de planos paralelos separados uns dos outros por uma distância específica, que varia de acordo com a natureza do material (EPP ET AL., 2016) Desta forma, defeitos nas estruturas de rede de sólidos cristalinos têm uma influência importante e podem ser determinantes nas propriedades mecânicas, elétricas e ópticas de materiais sólidos. Portanto, pode-se definir o XRD como uma técnica bastante eficaz na análise de uma ampla variedade de materiais, desde pós e filmes finos até nano materiais e amostras sólidas, orgânicas e inorgânicas. Em amostras de pós, as fases químicas são identificadas qualitativa e quantitativamente. Em filmes finos

semicondutores, a difração de raios X de alta resolução revela os parâmetros da camada, como composição, espessura, rugosidade e densidade.

Espectrometria por Fluorescência de Raio X (XRF)

É a técnica utilizada para a identificação de elementos e determinação de suas concentrações em amostras sólidas, em pó e líquidas (BROUWNER ET AL., 2010). Os elementos presentes nas amostras são detectáveis por XRF em até 100% e, também, abaixo de 1 parte por milhão (ppm) (MALVERN PANALYTICAL, 2022). Os elementos detectáveis por XRF variam de sódio a urânio. O XRF possui a limitação de que sua sensibilidade a elementos de número atômico mais baixo é menor, tornando-o incapaz de detectar elementos mais leves que o sódio.

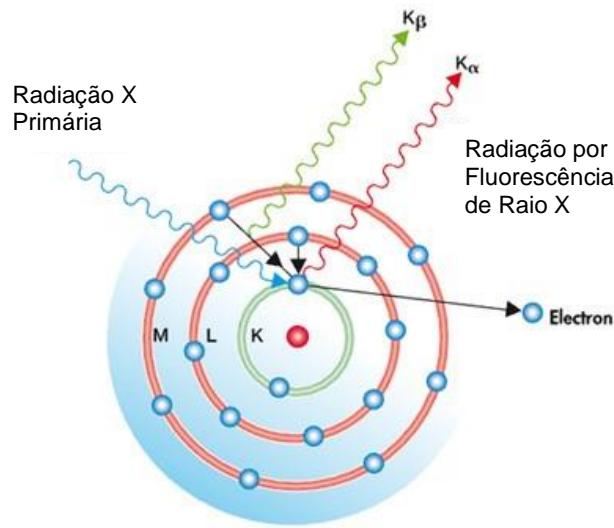


Figura 10: Esquema de difração de radiação de fluorescência por raio X. (REBOLLO ET AL., 2020)

A Espectrometria por Fluorescência de Raio X é muito utilizada na indústria e na pesquisa devido a capacidade de realizar análises precisas e reproduzíveis em alta velocidade, utilizando de sistemas modernos controlados por computador (MALVERN PANALYTICAL, 2022). Os detectores de XRF são capazes de detectar os elementos presentes em uma amostra medindo os raios X refletidos emitidos de uma amostra

irradiada como fonte. Como uma amostra contém vários elementos, cada um desses elementos produz um conjunto único de linhas que é usado na identificação do elemento. Por tais razões, a XRF é interessante para análise de composição elementar de materiais (THERMOFISHER SCIENTIFIC, 2017).

Espectrometria por Emissão de Raio X por Indução de Partícula (PIXE)

A Espectrometria por Emissão de Raio X por Indução de Partícula ou Espectrometria por Emissão de Raio X por Indução de Prótons é uma técnica analítica não destrutiva usada para determinar a composição elementar de um sólido, líquido, filme fino e amostras de filtro de aerossol (JOHANSSEN ET AL., 1995). Utilizando de PIXE pode-se detectar todos os elementos de sódio a urânio, totalizando 72 elementos detectáveis usando este método, com exceção de Po, At, Fr, Ra, Ac, Pa e os gases inertes (ELEMENTAL ANALYSIS INC., 2017). A técnica PIXE baseia-se na análise dos espectros de energia de raios X característicos emitidos pela desexcitação dos átomos na amostra bombardeada com prótons de alta energia (1-3 MeV) com o auxílio de um detector dispersivo de energia adequado.

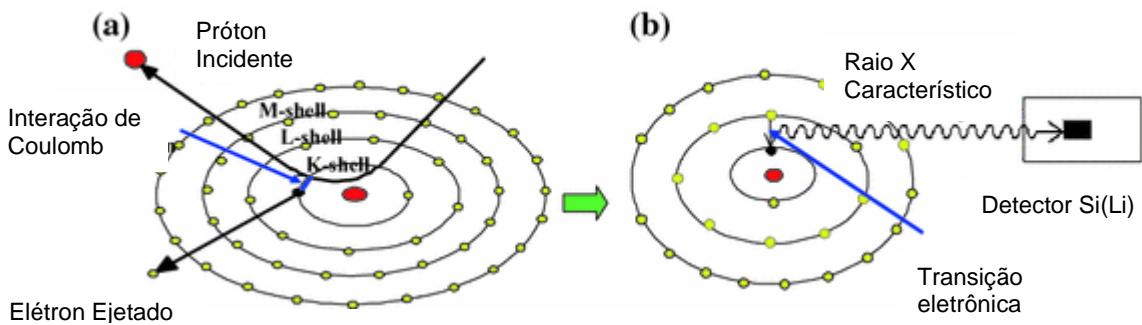


Figura 11: Esquema de indução de partículas por raio X em técnica PIXE. (SERA ET AL., 2018).

O PIXE é semelhante a outras técnicas espetrométricas usadas em análise elementar, pois se baseia na excitação de elétrons nos átomos dos elementos e nas transições eletrônicas que produzem raios X característicos que, pela medição de suas intensidades, os elementos podem ser identificados e suas concentrações quantificadas

(MALVERN PANALYTICAL, 2022). A análise em raios X é iniciada por prótons energéticos que excitam os elétrons da camada interna dos átomos alvo. A expulsão desses elétrons da camada interna e o preenchimento de suas posições vagas resulta na emissão de raios X. As energias destes raios X emitidos são características únicas dos elementos de onde se originam, e o número de raios X emitidos será proporcional à massa/concentração desse elemento correspondente na amostra analisada (ELDEK ET AL., 2013).

Esta técnica tem algumas vantagens em relação às outras, dentre elas, a maior sensibilidade a oligoelementos e análise mais rápida devido à maior taxa de acumulação de dados em todo o espectro, além de uma melhor capacidade de análise, especialmente para os elementos de menor número atômico.

Com a modernização das técnicas radiográficas, também surgiu a necessidade de análise elementar de amostras muito pequenas (0,1 a 1 mg), isso fez com que esta técnica ganhasse ampla aceitação como uma valiosa ferramenta analítica (ELDEK ET AL., 2013). Amostras cuja composição elementar pode ser determinada usando a técnica PIXE incluem óleos e combustíveis, plásticos, borrachas, têxteis, produtos farmacêuticos, alimentos, cosméticos, fertilizantes, minerais, minérios, carvões, rochas e sedimentos, cimentos, cerâmicas, polímeros, tintas, resinas, papéis, solos, cinzas, folhas, filmes, tecidos, amostras forenses, catalisadores, entre outros. (ELEMENTAL ANALYSIS INC., 2017). Entretanto, o uso mais significativo da técnica hoje é em análises de amostras de aerossóis atmosféricos, de poeira e cinzas volantes, diferentes materiais biológicos e artefatos arqueológicos e artísticos.

3.3.3. Técnicas de Tomografia computadorizada

A tomografia é uma técnica de raios X na qual as sombras de estruturas sobrepostas são conjugadas por um tubo de raios X em movimento. Existem 2 tipos básicos de tomografia: linear e não linear. Em ambas as técnicas, o tubo se move em

uma direção enquanto o filme de incidência de raios se move na direção oposta, com ambos os movimentos centrados em torno de um fulcro.

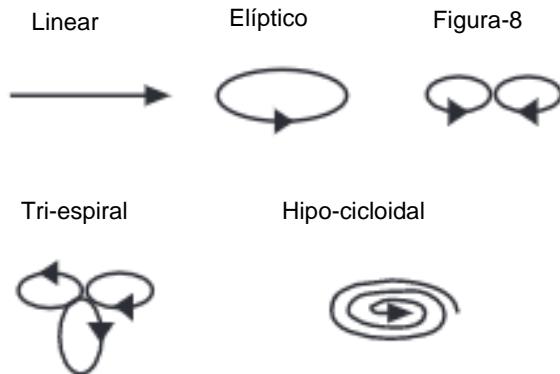


Figura 12: Esquema de diferentes movimentos de equipamento tomográfico conforme finalidade.
(IMAGING PHYSICS IN PRIMER OF DIAGNOSTIC IMAGING (FIFTH EDITION), 2011)

A técnica elíptica é a mais utilizada, pois permite a reconstrução de imagens em 3D para análise. Neste caso, ao contrário de um raio X convencional, no qual se usa um tubo de raios X fixo, uma máquina de tomografia computadorizada usa uma fonte de raios X motorizada que gira em torno de um eixo circular (na maior parte dos casos). Durante uma tomografia computadorizada, a amostra ou pessoa é colocada no eixo central do equipamento que se move lentamente pelo linear e radialmente no eixo, enquanto o tubo de raios X gira em torno, disparando feixes estreitos de raios X. Em vez de filme, os scanners de tomografia computadorizada usam detectores de raios X digitais, localizados diretamente em frente à fonte de raios X. À medida que os raios X são captados pelos detectores, eles são imediatamente transmitidos para um computador.

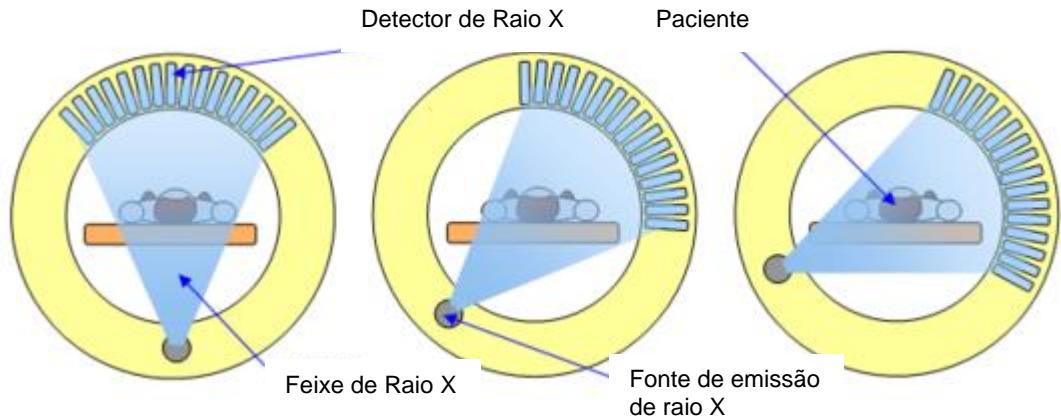


Figura 13: Scanner tomográfico em movimento concêntrico circular em torno de um paciente.
(BECKMANN ET AL., 2006).

Cada vez que a fonte de raios X completa uma rotação, o computador utiliza de fórmulas matriciais para construir uma fatia de imagem bidimensional do paciente. A espessura do tecido representado em cada corte da imagem pode variar dependendo da máquina usada, variando entre de 1 e 10 milímetros. Quando um corte completo é concluído (uma rotação completa do equipamento), a imagem é armazenada e o leito motorizado é movido para a frente no eixo. O processo de varredura de raios X é então repetido para produzir outra fatia de imagem. Este processo continua até que o número desejado de fatias seja coletado, sendo, portanto, necessário um número maior de rotações conforme a extensão da amostra ao longo do eixo.

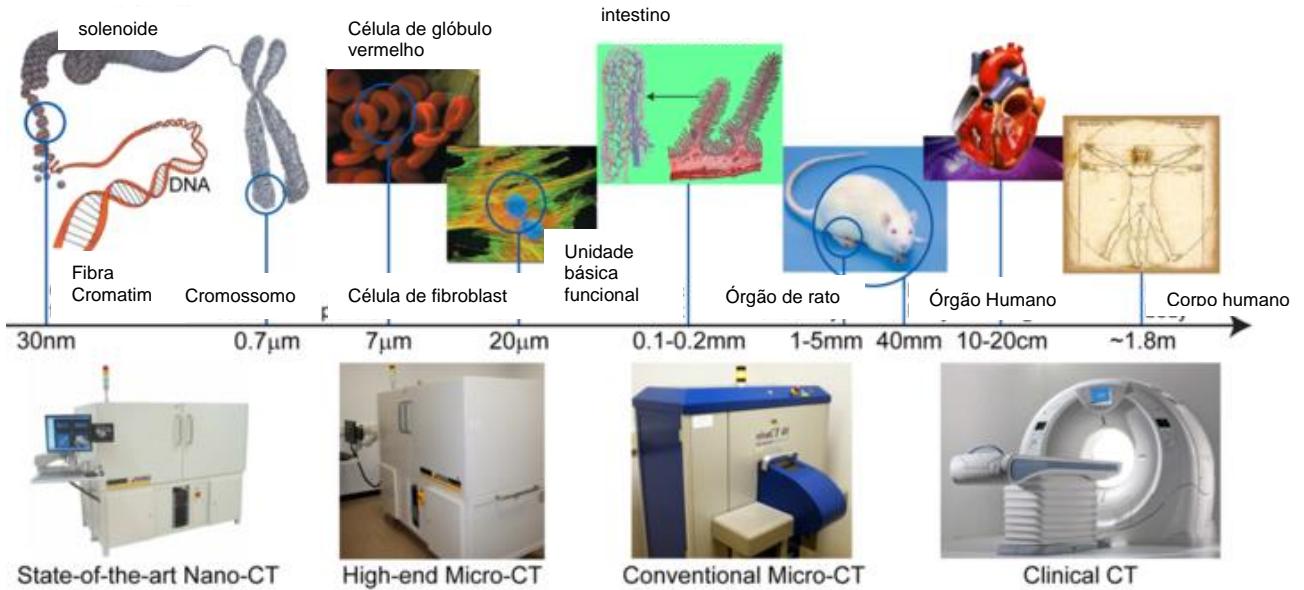


Figura 14: Esquema de equipamentos tomográficos conforme escala de observação de amostra. (WFU SCHOOL OF BIOMEDICAL ENGINEERING AND SCIENCES, 2017).

As fatias de imagem podem ser exibidas individualmente ou empilhadas pelo computador para gerar uma imagem 3D da amostra ou paciente, podendo mostrar bolhas, trincas, falhas internas à estrutura e até a análise de amostras de construção complexa que não poderiam ser analisadas de forma não destrutiva. Este método tem numerosas vantagens, incluindo a capacidade de girar a imagem 3D no espaço ou visualizar fatias em sucessão, tornando mais fácil encontrar o local exato onde um problema pode estar localizado.

3.3.4. Técnicas de Radiologia de Nêutrons

A radiografia de nêutrons é um método de imagem não destrutivo que revela a estrutura interna de uma amostra ao submetê-la a um feixe de nêutrons (HASSANEIN ET AL., 2005). A radiografia de nêutrons foi desenvolvida como uma técnica de imagem há algumas décadas, mas ainda não foi totalmente adotada pela comunidade científica

devido à dependência excessiva de instalações de reatores nucleares antigos, este fator hoje está solucionado pelo surgimento de novos equipamentos.

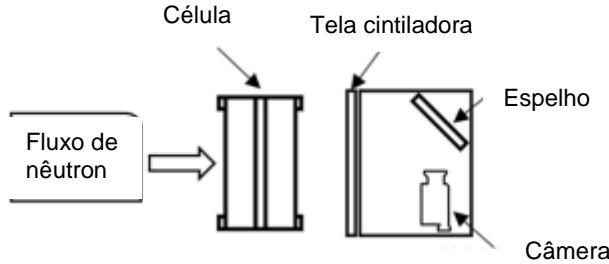


Figura 15: Ilustração de um set-up esquemático de radiografia por nêutrons. (HASSANEIN ET AL., 2005).

A radiografia de nêutrons é baseada nos mesmos princípios da radiografia de raios X, mas os nêutrons interagem com os núcleos dos átomos e não com seus elétrons. Ao contrário dos raios X, no entanto, os nêutrons podem ser atenuados por alguns materiais menos pesados, como hidrogênio, carbono, boro e lítio, e penetram em muitos materiais mais pesados, como titânio e chumbo. Essa característica dá à imagem de nêutrons uma vantagem sobre a imagem de raios X quando se trata de visualizações 2D e 3D, em casos que tais visualizações sejam interessantes (PODURETS ET AL., 2021).

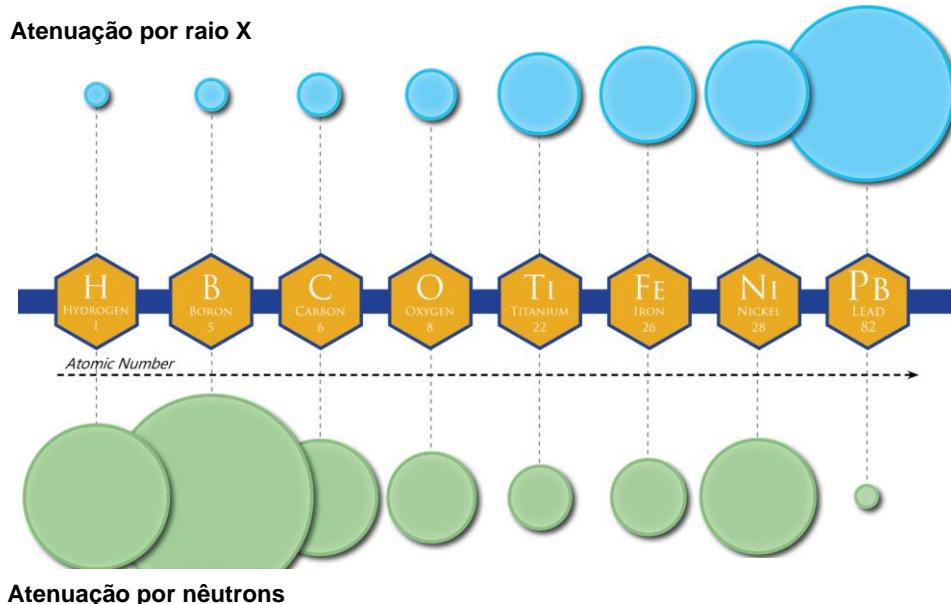


Figura 16: Esquema de atenuação comparativa entre raio X e radiografia por nêutrons conforme número atômico (PHOENIX, 2022).

Embora a capacidade da radiografia de raios X e gamma de fornecer informações sobre materiais de baixa densidade, em particular quando na presença de materiais de densidade mais alta, seja muito baixa, a radiografia de nêutrons não sofre dessa limitação. Os raios X interagem fracamente com elementos de baixo número atômico, como gases nobres, e fortemente com elementos de alto número atômico, como metais. Por outro lado, enquanto os raios X seguem uma atenuação quase linear com a densidade, os nêutrons não seguem essa tendência. Os nêutrons interagem fortemente com alguns elementos leves com um número atômico baixo, enquanto passam facilmente por muitos dos elementos densos de alto número atômico que afetariam a radiação. Deste modo, as técnicas são complementares para identificação de diferentes aspectos das mesmas amostras.

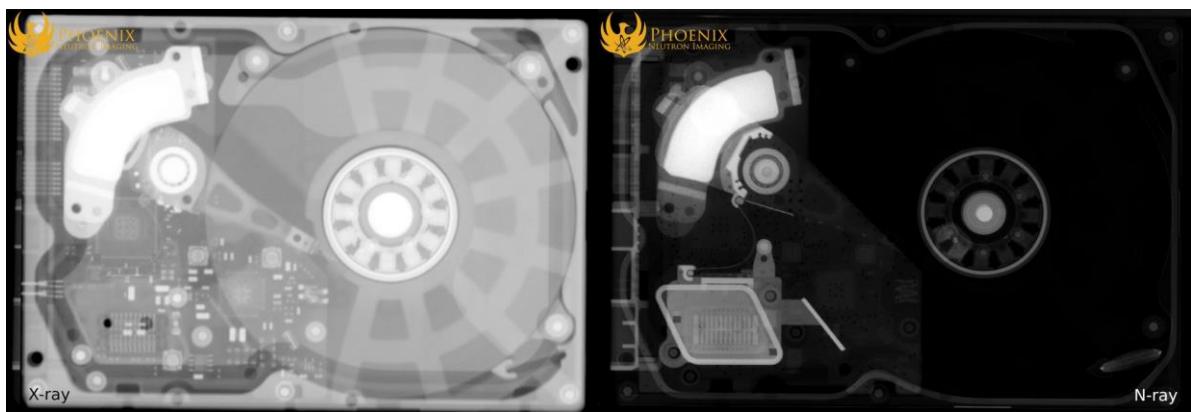


Figura 17: À esquerda uma radiografia por raio X onde é possível identificar principalmente materiais mais densos, à direita uma radiografia por nêutrons, onde é possível identificar regiões de menor densidade. (PHOENIX, 2022).

Existem fártas aplicações na indústria de testes não destrutivos para as quais a radiografia de nêutrons pode ser utilizada. Como os nêutrons podem penetrar em material de alta densidade de uma maneira que os raios X não podem, os nêutrons são amplamente utilizados para componentes aeroespaciais com estruturas externas espessas, como lâminas de turbina e fusíveis energéticos, que são difíceis de inspecionar usando radiografia de raios X. Também podem ser usados para detectar água e umidade dentro de componentes e verificar a integridade estrutural de construções, como será abordado mais à frente no texto. Além disso, é aplicável para espécimes arqueológicos

encapsulados em material que a radiografia de raios X não pode penetrar, encontrar defeitos em cerâmicos de nitreto de silício e soldas metálicas.

3.3.5. Técnicas radiológicas por Síncrotron

A tomografia síncrotron fornece uma maneira de visualizar a estrutura tridimensional no interior de amostras de forma não destrutiva com alta resolução espacial. (MARGARITONDO ET AL., 2021) Este fator permite a análise microestrutural detalhada de diversos materiais, desde pequenos componentes metálicos à compósitos de uso médico. A tomografia em questão baseia-se na detecção da atenuação ou mudança de fase do feixe transmitido através de uma amostra; enquanto a radiografia comum mede imagens para uma única orientação de amostra, a tomografia por síncrotron mede imagens para muitas posições angulares diferentes. Isso resulta em um conjunto de projeções, que podem ser usadas para reconstruir camadas ou fatias (imagens) bidimensionais no objeto. Ao empilhar essas fatias, é possível visualizar a estrutura em três dimensões.

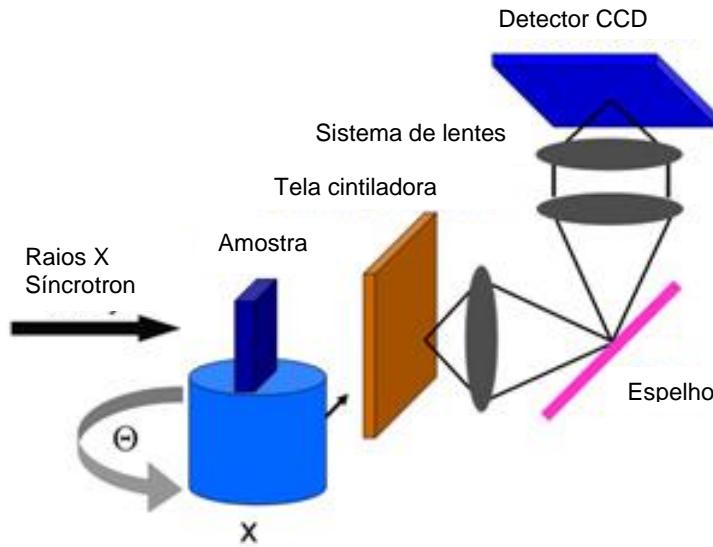


Figura 18: esquema de montagem de radiografia síncrotron com espelho e detector (JAVAHERI ET AL., 2020).

As vantagens desta técnica são principalmente a intensidade da fonte que, por ser muito alta, produz imagens com menor ruído em escalas de tempo curtas, o que permite investigações radiográficas rápidas. Além disso, o feixe em questão pode ser facilmente aplicado como monocromático, permitindo correlações entre os valores de atenuação e os constituintes químicos da amostra. Também permite variar a energia da radiação, facilitando a investigação de objetos com coeficientes de absorção muito diferentes dentro do mesmo ambiente de medição. Por fim, a coerência do alto feixe pode ser usada para imagens de contraste de fase e tomografia, que fornecem contraste de imagem muito maior.

Infelizmente, a possibilidade do uso de síncrotron ainda é bastante limitada, isso porque a radiação síncrotron depende do seguinte fenômeno: um elétron em movimento que muda de direção e emite energia. Quando o elétron está se movendo rápido o suficiente, a energia emitida está no comprimento de onda dos raios X. (EUROPEAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY, 2022). A máquina síncrotron existe com fins científicos para acelerar os elétrons a uma energia extremamente alta e depois fazê-los mudar de direção periodicamente através de indução magnética para que não colidam

com as paredes ou entre si. Os raios X resultantes são emitidos como feixes finos, cada um direcionado para uma linha de luz próxima ao acelerador.

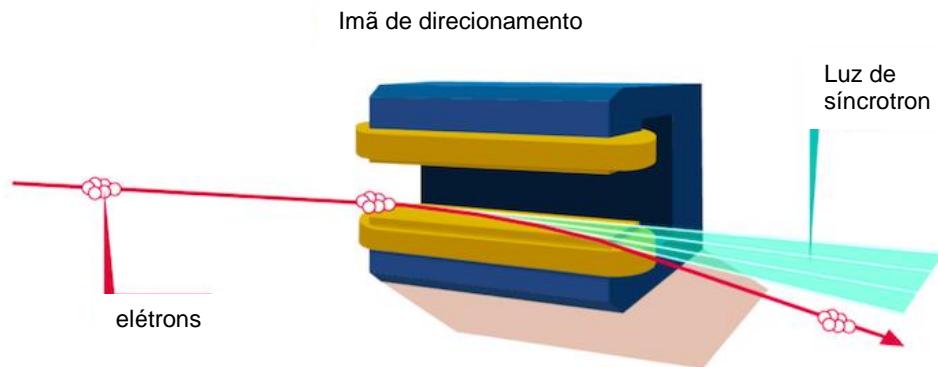


Figura 19: Esquema de imã de mudança de rota em colimador de partículas, com saída para raios de sincrotron (EUROPEAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY, 2022).

Isso ocorre quando, ao passar por esses imãs, os elétrons são desviados de seu caminho inicialmente reto devido à inércia. Assim, eles emitem um spray de raios X tangenciais ao plano do feixe de elétrons, a chamada luz síncrotron. Esta luz cobre um espectro amplo e contínuo, de microondas a raios X rígidos, e é muito menos focada, ou brilhante, do que o feixe fino de raios X de um dispositivo de inserção (EUROPEAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY, 2022).

3.3.6. Comparação de Técnicas

A partir das informações fornecidas anteriormente, é possível traçar uma base de comparação quanto às vantagens e desvantagens das técnicas:

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Difração de Raios X (XRD)	Fornece informações para a identificação e determinação quantitativa das várias formas cristalinas de um material, por isso é útil na detecção de alterações morfológicas que	Menor sensibilidade em relação ao PIXE.

	ocorreram em um material após a falha, se a estrutura da rede cristalina foi afetada	
Espectrometria por Fluorescência de Raio X (XRF)	Útil na determinação dos componentes elementares de um material e suas concentrações. Maior facilidade de transporte e utilização do equipamento.	Menor sensibilidade em relação ao PIXE.
Espectrometria por Emissão de Raio X por Indução de Partícula (PIXE)	Útil na determinação dos componentes elementares de um material e suas concentrações. Maior sensibilidade a oligoelementos e elementos de menor número atômico, bem como sua análise mais rápida	Dificuldade de transporte e utilização em campo.
Técnicas de Radiologia de Nêutrons	Maior capacidade de identificação de elementos de menor densidade atômica e amostras de ligas metálicas.	Necessidade de reatores nucleares para emissão da radiação
Técnicas radiológicas por Síncrotron	Técnica mais avançada, permite a maior sensibilidade e detalhamento de amostras dentre as técnicas comparadas.	Alto custo associado, incapacidade de transporte e acesso limitado.

3.4. Metodologia de caracterização radiológica

A identificação e caracterização de amostras através de técnicas radiológicas é realizada de forma visual, em imagens 2D ou 3D. O responsável pela análise em questão utiliza da imagem formada por contrastes dos raios difratados, normalmente montados em aspectos que utilizam do espectro preto ao branco, como visto na figura 15 abaixo

Escala de cinza resultante de imagens de raio X



Figura 20: Escala de cores relacionadas a diferentes tecidos orgânicos em radiologia médica.
(BURBRIDGE ET AL., 2017).

A área médica, que utiliza de uma intensidade de radiação relativamente mais baixa que na caracterização de metais, por exemplo, é o caso mais comum para se utilizar classificação por contraste de raio X. Neste caso, o gás do ar nos pulmões e nas vias aéreas superiores aparece em com coloração próxima ao preto, chamada imagem hipodensa, em uma radiografia porque a matéria é mais dispersa, ou seja, menos capaz de atenuar os feixes de raios X. A gordura, por outro lado, é apenas um ou dois tons mais clara que o gás; por fim, o tecido com maior densidade de água inclui músculos e órgãos e tem uma aparência mais uniforme, como um tom mais claro de cinza.



Figura 21: Corte tomográfico de crânio com projétil de chumbo depositado. (FACULDADE DE ODONTOLOGIA DE RIBEIRÃO PRETO - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2006).

Por sua vez, a composição vista no osso aparenta ser mais clara, chamada de imagem hiperdensa, nas imagens, assim como metais, devido a sua maior capacidade de refração dos raios. Por outro lado, metais pesados como Chumbo aparecem em branco, imagem mais hiperdensa que dos ossos, e podem até distorcer imagens de equipamentos radiográficos de baixa intensidade - aqueles focados em amostras menos densas, tecidos humanos e animais -, como indicado na imagem acima de um crânio perfurado por um projétil de chumbo, o qual distorce os raios capturados para formação da imagem de contraste.

É através dos contrastes que podem ser identificados os aspectos das imagens radiográficas, independente de qual das técnicas abordadas anteriormente deseje-se aplicar. A aplicação da radiologia em engenharia de materiais não é diferente: para que seja possível obter resultados definitivos quanto a amostras - de maneira não invasiva - é necessário construir imagens de contraste por radiografias.

4. APLICAÇÕES EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Como descrito na introdução histórica, as aplicações das técnicas radiográficas em engenharia de materiais são diversas, desde estudos cristalográficos à análise não invasiva de metais e cerâmicos. Nesta seção abordar-se-á uma gama de aplicações e estudos de caso de uso de técnicas de raio X e tomografia na área de ciência de materiais.

4.1. Análise Prática por raio X de defeitos em soldas de Cobre

Com o objetivo de determinar a razão da fragilidade de amostras de tubos de cobre em suas soldas, Prof. Dr. Eduardo Franco Monlevade, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, conduziu uma consultoria quanto às amostras em questão e caracterização do estudo de falhas. Por se tratar de dezenas de amostras com potenciais falhas internas não lineares, métodos comuns de análise não seriam práticos, uma vez que, se as amostras fossem cortadas sem saber onde se posicionaram as falhas, tais locais de estudo poderiam ser danificados. Assim, optou-se pelo uso de técnicas radiológicas, que são não invasivas e altamente recomendadas para o estudo de falhas em metais.

Ao se utilizar de uma intensidade superior à utilizada nos exames médicos, para que fosse possível o contraste em metal, foi possível realizar a construção de imagens 2D de contraste das amostras de tubos de cobre em Y, semelhantes à figura abaixo:



Figura 22: Exemplo de tubo de cobre com solda em Y. (ALIEXPRESS, 2022).

Através das imagens geradas pelo equipamento radiográfico, puderam ser identificadas bolhas geradas internamente na linha de solda, durante o processo de soldagem. Tais bolhas podem ser identificadas pela coloração (tom de cinza) mais clara em relação à região metálica, que indica uma bolsa de gás. A presença de tais bolhas configura a razão principal da fragilidade do tubo, uma vez que o torna menos denso, com paredes mais finas, e gera linhas de crescimento de trincas.

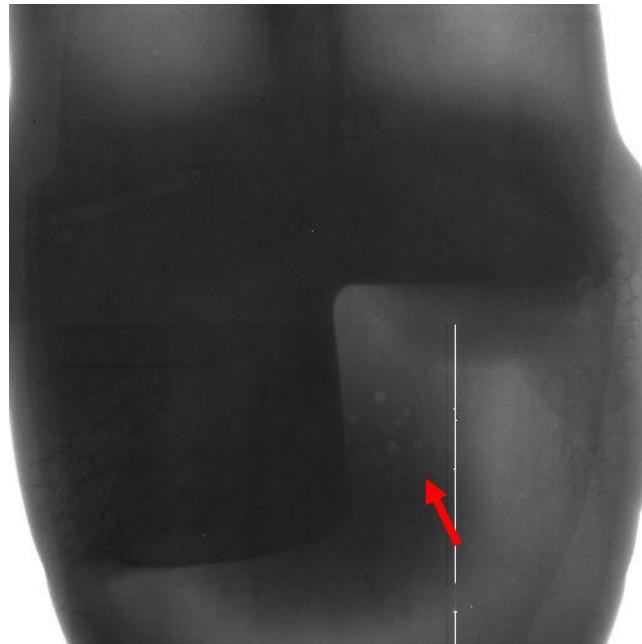


Figura 23: Radiografia por raio X da amostra 13 de soldas em tubos de cobre. (MONLEVADE, 2022).

Nas regiões das margens esquerda e direita das imagens podemos perceber o que se parece uma formação bolhosa que, na realidade, são manchas geradas pelo processo de radiografia no detector ou na construção da imagem - fato que se confirma pela mesma formação aparecer nas radiografias das 32 amostras.

Na verdade, as bolhas ocorrem na região mais centralizada, apontada pela seta, e regiões mais próximas às soldas externas, o que confirma a teoria de que a formação de bolhas estaria relacionada ao aquecimento da região de solda.

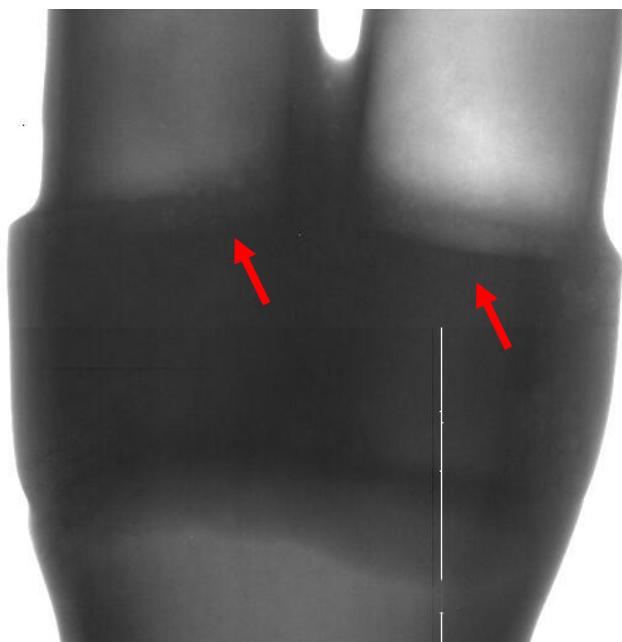


Figura 24: Radiografia por raio X da amostra 9 de soldas em tubos de cobre. (MONLEVADE, 2022).

O mesmo ocorre na amostra 9 (lado A), na qual é possível identificar bolhas formadas nas regiões de solda mais próximas ao final do tubo largo e início dos tubos menores

Chen et al, 2020, em estudo, determinaram quais forças são determinantes para a formação de bolhas em solda através de técnicas de raio X por análise dos diferentes ângulos de tocha de solda. Através deste processo, determinaram que o metal base e o material de solda, quando submetidos ao calor, são fundidos para formar uma poça fundida, enquanto o hidrogênio da base e dos materiais de soldagem entra na poça

fundida devido à proteção inadequada que pode ter ocorrido durante o processo de soldagem. Tal processo ocorre principalmente na frente e no meio da poça de fusão. Em metais com maior solubilidade de hidrogênio, ele se dissolve em grande quantidade na poça, mas após a solidificação, como mencionado anteriormente, o gás tomará forma de dendritos, com maior concentração conforme a velocidade de resfriamento do metal.

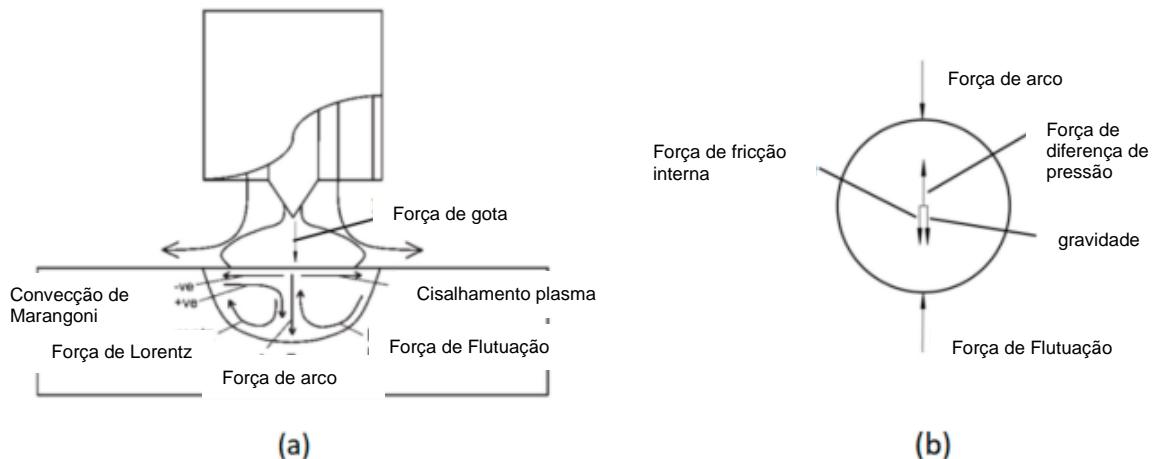


Figura 25: (a) Forças atuando na poça líquida da solda (b) forças atuando na bolha de gás dentro da poça de solda. (CHEN ET AL., 2020).

Deste modo, os átomos de hidrogênio precipitados se combinam e formam moléculas de gás hidrogênio, que se agregam formando as bolhas, que, por sua vez, crescem na estrutura por nucleação e flutuam para fora da poça. Entretanto, devido ao resfriamento rápido de metais como Cobre e Alumínio, tais bolhas não têm tempo de serem expelidas e permanecem solidificadas na estrutura - fato ainda mais agravado se a solda é feita em água, como será abordado mais adiante no texto. Devido à física dos fluidos em questão, na poça de soldagem, Cheng et al. determinaram que quanto maior a inclinação da tocha de soldagem (ângulo α), menor a formação de bolhas e poros:

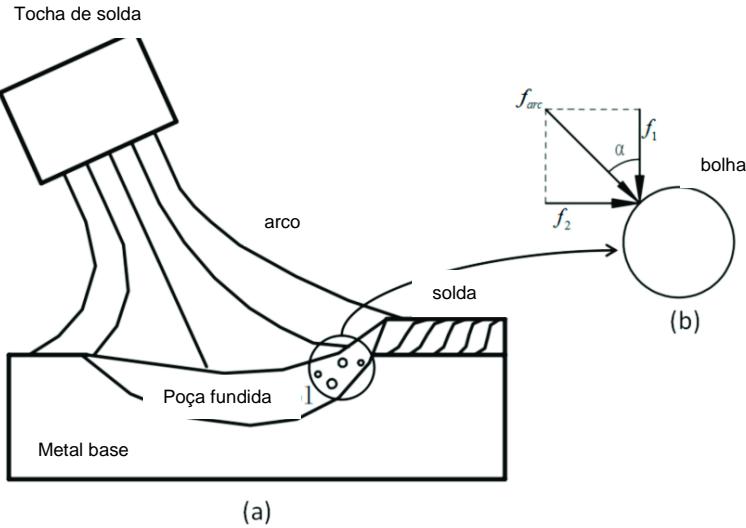


Figura 26: Forças atuantes sobre uma bolha de gás em poça de solda conforme ângulo da tocha de solda. (CHEN ET AL., 2020).

Isso ocorre porque a força perpendicular à superfície da poça de soldagem (f_1), causa a convecção do metal fundido. Deste modo, a convecção causa uma força contrária à flutuação das bolhas, forçando-as na direção oposta à sua flutuação (para baixo) e impedindo que sejam expelidas da poça.

4.2. Análise Prática por tomografia em amostra de ferro após redução aluminotérmica

Para que fosse possível identificar potenciais bolhas formadas por processo de redução por aluminotermia, foi realizada tomografia sobre uma amostra sólida de Ferro tratada em outubro de 2022. Para formar a amostra, foi preenchido um cadiño com 100,3g de Minério de Ferro e 37,3g de Alumínio; em seguida, foi feita ignição do cadiño com tocha embebida de álcool, a reação neste caso segue $\frac{1}{2} \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al} \rightarrow \text{Fe} + \frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3$, na qual o objetivo é formar o Fe com a maior pureza possível, através da afinidade que o Alumínio tem pelo Oxigênio.



Figura 27: (a) Amostra durante processo de aluminotermia. (b) Amostra de Ferro após a reação. (Acervo pessoal, 2022).

Após a reação, por gravidade, o Ferro se acumula em uma amostra densa no fundo do cadinho, enquanto a escória se forma na região superior. A massa formada de Fe foi de 54,88 g, porém, devido à densidade esperada do metal pós-fusão, é possível perceber que o volume não corresponde diretamente à massa, sendo maior que o esperado. Por esta razão, estima-se a potencial formação de bolhas internas ao corpo férrico, indicado também pela formação de bolhas na superfície de outras amostras.

Para que fosse possível realizar uma avaliação não destrutiva da amostra, foi proposto realizar um diagnóstico tomográfico, uma vez que análise em raio X não seria capaz de indicar bolhas menores ou sua localização (por se tratar de imagem 2D planar). Para tal análise, foi possível utilizar um tomógrafo médico craniano de alta precisão por um laboratório radiológico em Ribeirão Preto, chamado Radiologia Jardim. O equipamento em questão trata-se de um Morita Veraview X800, e na medição realizada, as especificações seguiram os seguintes parâmetros:

Tensão do Tubo	98.0 kV
Corrente do Tubo	7.9 mA
Tempo de Exp.	17.9 s
CTDI _W	14.80mGy
DAP	1151.83mGycm ²

Figura 28: Especificações do equipamento tomográfico utilizado. (Acervo pessoal, 2022).

Uma vez obtidas as centenas de imagens radiológicas que configuram a tomografia computadorizada, é possível reconstruir a amostra em 3D no software OneVolumeViewer, do equipamento. No programa, é possível caminhar no interior da amostra em 3 eixos diferentes (XYZ), como representados na imagem abaixo e identificar contrastes de cor que indiquem irregularidades em seu interior, neste caso, bolhas de gás.

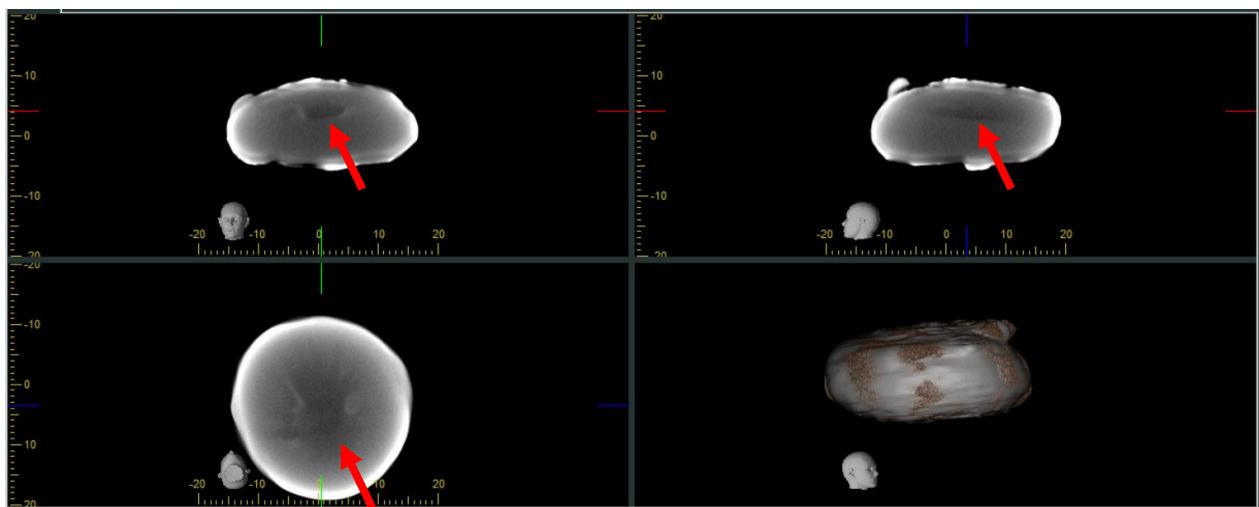


Figura 29: Identificação de bolhas na amostra em 3 diferentes eixos tomográficos e reconstrução digital da amostra. (Acervo pessoal, 2022)

Através da análise no software foi possível identificar uma bolha maior na região superior central da amostra, cercada de algumas bolhas menores. Isso indica fluxo semelhante ao da solda no caso anterior, onde a formação do gás tem a tendência a flutuar e ser expelida pela região superior, mas devido ao rápido resfriamento, fica contida

na amostra de Ferro. Tal bolha é responsável pela densidade relativa menor da amostra analisada, devido ao seu tamanho e conteúdo de gás.

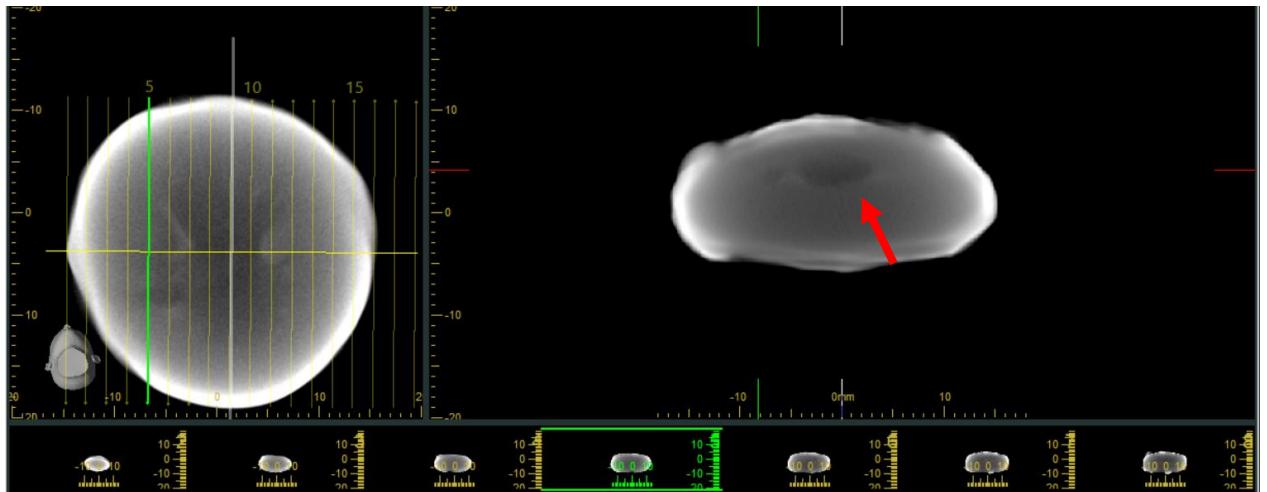


Figura 30: Identificação de bolhas na amostra em planos perpendiculares à base, em reconstrução tomográfica. (Acervo pessoal, 2022)

4.3. Aplicações em Estruturas

4.3.1. Aplicações em interfaces metálicas

As interfaces internas de um material policristalino têm o potencial de uma influência significativa sobre as propriedades físicas e mecânicas do material. Quando tais interfaces se tornam zonas heterogêneas microestruturais, ou quando a escala da microestrutura é reduzida a um nível em que essas interfaces constituem a maior proporção do volume do material, então esta estrutura e as propriedades das interfaces dominam o controle das propriedades em lugar da estrutura intrínseca e das propriedades dos cristais (NI ET AL., 2012). Da mesma forma, quando a espessura do filme em uma amostra multicamadas se aproxima da nanescala, mesmo se as heterocamadas forem homogêneas, as propriedades do conjunto são novamente dominadas pela interface.

Dada a importância na determinação das propriedades do material, a caracterização das interfaces que se formam entre agregados cristalinos ou amorfos que se diferem entre si, a compreensão dessas características de tais nanoestruturas é necessária e pode ser obtida por meio de técnicas radiológicas (SURYANARAYANA ET AL., 1995).

Embora muito trabalho experimental e teórico tenha sido feito sobre os aspectos de fraturas em interfaces nos últimos anos, o desenvolvimento e propagação de trincas ainda não são completamente compreendidos. Pela necessidade dos estudos de propagação de trincas de meios de caracterização não destrutivos e de resolução espacial muito alta, idealmente nanoscala, os métodos de difração de raios X surgem como os melhores candidatos para tais aplicações.

Na abordagem abaixo, um analisador de cristal é empregado para coletar a intensidade de difração de raios X em função de coordenadas angulares no espaço recíproco, e um formalismo de recuperação de fase direta é usado para reconstruir quantitativamente a função de transmissão complexa do objeto difratado com uma resolução espacial de até algumas dezenas de nanômetros em uma dimensão. A técnica é insensível às dimensões e coerência do feixe de raios X, tornando a abordagem adequada para instalações laboratoriais. A aplicação quantitativa bem-sucedida da técnica para reconstruir os “instantâneos” de um perfil de trinca, em função da tensão aplicada, em uma folha de Al de 15 mícrons com resolução espacial de aproximadamente 40 nm é usada para ilustrar essa nova abordagem.

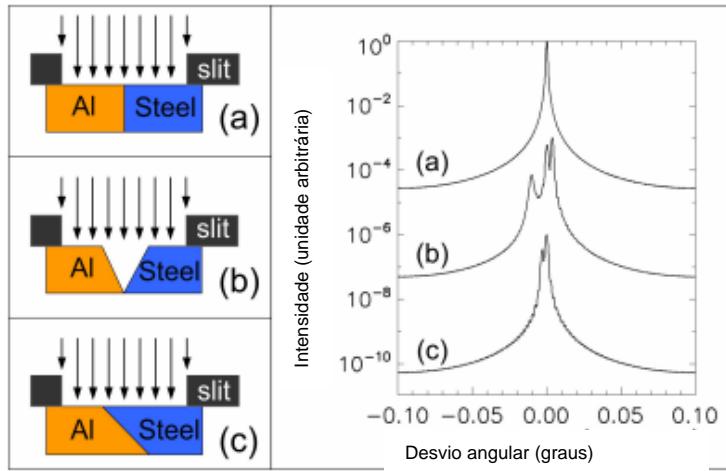


Figura 31: Diagramas de simulações de formatos da interface alumínio-aço e distribuição de intensidade relativa simulada (NIKULIN ET AL., 2008).

Simulando a diferença de raios incidentes e refletidos em interfaces de dois metais diferentes, Alumínio e Ferro, em três posicionamentos diferentes (inicialmente sem trincas), é possível construir os gráficos acima que indicam um maior índice de refração na interface dos metais. Quando a interface é paralela ao raio incidente (a), o gráfico se comporta com pico único, que indica o ponto de interface. Já no segundo (b), existe um dente em formato de “V” na interface, que causa uma queda na espessura dos metais em direção à interface; isso gera, além do pico principal no gráfico, o surgimento de picos secundários, “picos satélite” causados pela parte não refratada dos raios. Já no último (c), a interface é contínua, porém não perpendicular, com isso, o gráfico indica o que é refratado da combinação dos metais sobrepostos. Em casos semelhantes ao terceiro, independentemente do posicionamento da amostra ou do formato da interface, é possível identificá-las utilizando de raios X e um método de reconstrução gráfica através dos ângulos presentes nas interfaces e a espessura da amostra, segundo a lógica do exemplo abaixo (NIKULIN ET AL., 2008).

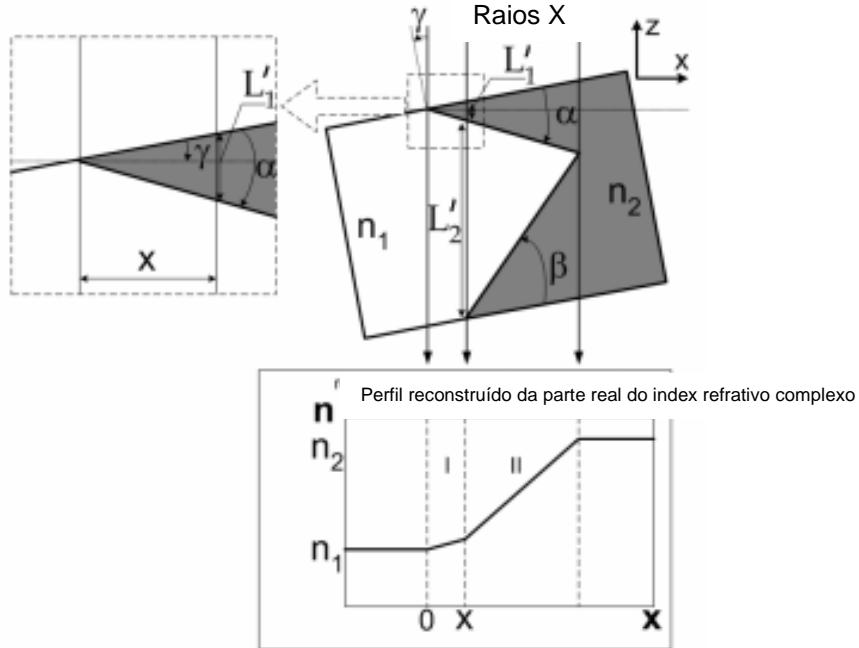


Figura 32: Diagrama esquemático da relação da geometria da interface aço-alumínio com o perfil reconstruído da relação refrativa (NIKULIN ET AL., 2008).

Aplicando o mesmo método para interfaces embarcadas de duas camadas de alumínio-cobre e silício-ouro, pode-se obter novos resultados, simulando uma configuração de interface diferente das anteriores. As amostras foram simuladas para ter duas camadas planas sobrepostas, como é o caso de muitos materiais metálicos na indústria. A superfície plana da amostra e a interface entre materiais diferentes foram assumidas como perpendiculares ao raio X incidente. Assim, assume-se que os raios X passam consecutivamente pela espessura de um material, pela interface e pela espessura de outro material. Deste modo, a difração ocorre devido à variação da espessura das camadas que formam a interface dentro da amostra.

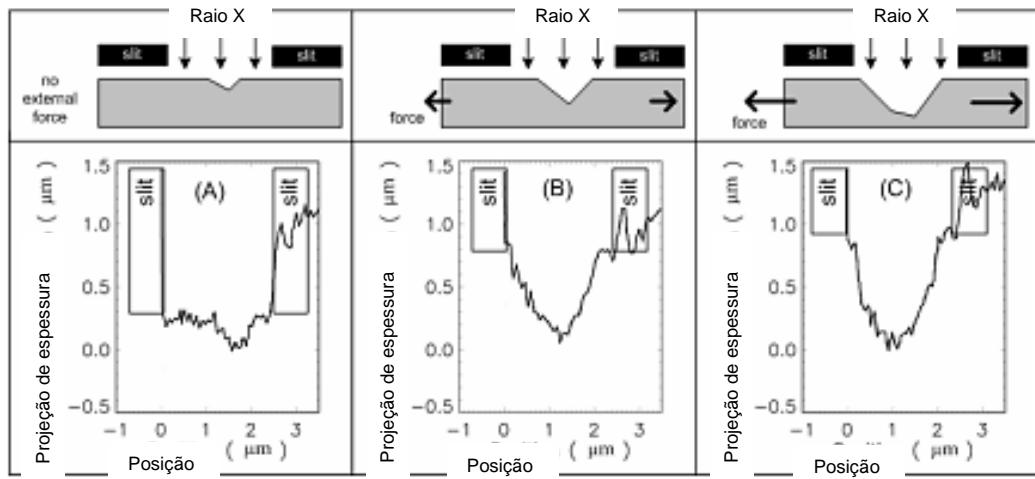


Figura 33: Perfil de espessura de uma folha de alumínio sob tensão externa reconstruída por dados experimentais. (NIKULIN ET AL., 2008).

Considerando o caso acima, unidimensional, foi simulado um corte através da amostra por um plano infinitamente fino, coincidindo com o plano de difração. As interfaces foram simuladas para ter um formato de triângulo periódico com período de 1,5 μm e amplitude variando de centenas a dezenas de nanômetros. Assim, o formato das interfaces simuladas foi semelhante ao formato das interfaces facetadas descritas quando o estresse bilateral atuava na amostra.

4.3.2. Aplicações em Cimentos

Por muitas vezes o uso de radiologia em estudos de cimentos se relaciona principalmente pelo efeito de fluidos, especialmente a água em estruturas cimentícias. Devido à alta sensibilidade de nêutrons a pequenas quantidades de água, radiografia por nêutrons é empregada como uma técnica de visualização não destrutiva (SHAFIZADEHA ET AL., 2014). Nestes casos, a água pode ser utilizada como uma variável para determinações como a da porosidade. Nos casos descritos a seguir, utiliza-se de nêutrons gerados por uma fonte de espalhamento que voam por um colimador e evacuam

por tubos de voo até as amostras. Um cintilador é utilizado para converter os nêutrons ejetados em luz, que será registrada por um sistema de câmeras CCD e salvos como uma matriz.

4.3.2.1. Polímeros Superabsorventes em Cimentos

O concreto pode trincar devido a sua fragilidade à forças de tensão e, com isso, fluidos e gases que podem ser danosos ao material e à estrutura como um todo podem adentrar a trinca. Tais materiais infiltrantes podem causar uma queda na durabilidade, custos de manutenção e declínio estrutural de edificações. Para solucionar tal questão, hoje existem aplicações de polímeros superabsorventes que conseguem reter os infiltrantes em tais estruturas. Para o estudo e comprovação da eficácia de tais polímeros em prática, D. Snoeck propôs a análise por radiografia de nêutrons (SNOECK ET AL., 2012).

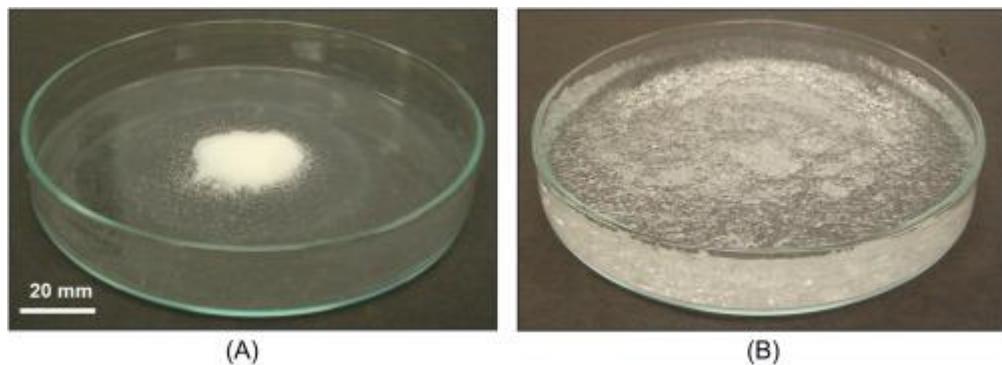


Figura 34: Polímero Superabsorvente (a) sem hidratação, (b) hidratado. (WONG, 2018).

Dentre os problemas que podem ser causados pela infiltração de substâncias em trincas de concreto, podemos destacar: a corrosão de metais, ataque por congelamento em regiões mais frias, ataque químico e expansão interna. Tudo isso pois os infiltrantes, principalmente a água, podem adentrar em diferentes estados físicos e se concentrar em poros mais internos da estrutura.

Para solucionar tal problema, são utilizados diversos polímeros superabsorventes, dentre eles o sal poliacrilato de potássio produzido pela BASF e um polímero superabsorvente a base de vinil sintético desenvolvido pelo PBM Research Group of Ghent University. Estes polímeros são misturados na composição do concreto portland e beneficiam o material com sua capacidade de absorver umidade e líquidos do ambiente (até 500 vezes o seu próprio peso), e reter a estrutura sem dissolver. (SNOECK ET AL., 2012). Este fenômeno ocorre devido à diferença de pressão osmótica que existe entre o hidrogel e a solução infectante. No caso de trincas em concreto, ao serem infiltradas por algum líquido, estes polímeros sofrerão absorção e consequente expansão, fechando a trinca e impedindo a entrada de novos fluídos, o chamado cimento “self-healing” (“auto-curável”).

Para que fosse possível determinar a capacidade relacionada a esta técnica, determinou-se que o método mais eficaz seriam as radiografias por nêutrons de trincas em cimentos enriquecidos com os polímeros. Através das imagens obtidas (abaixo) quantificou-se a penetração de água nas trincas através do ponto mais alto de penetração em cada uma das amostras cimentícias (ponto de inflexão do perfil úmido).

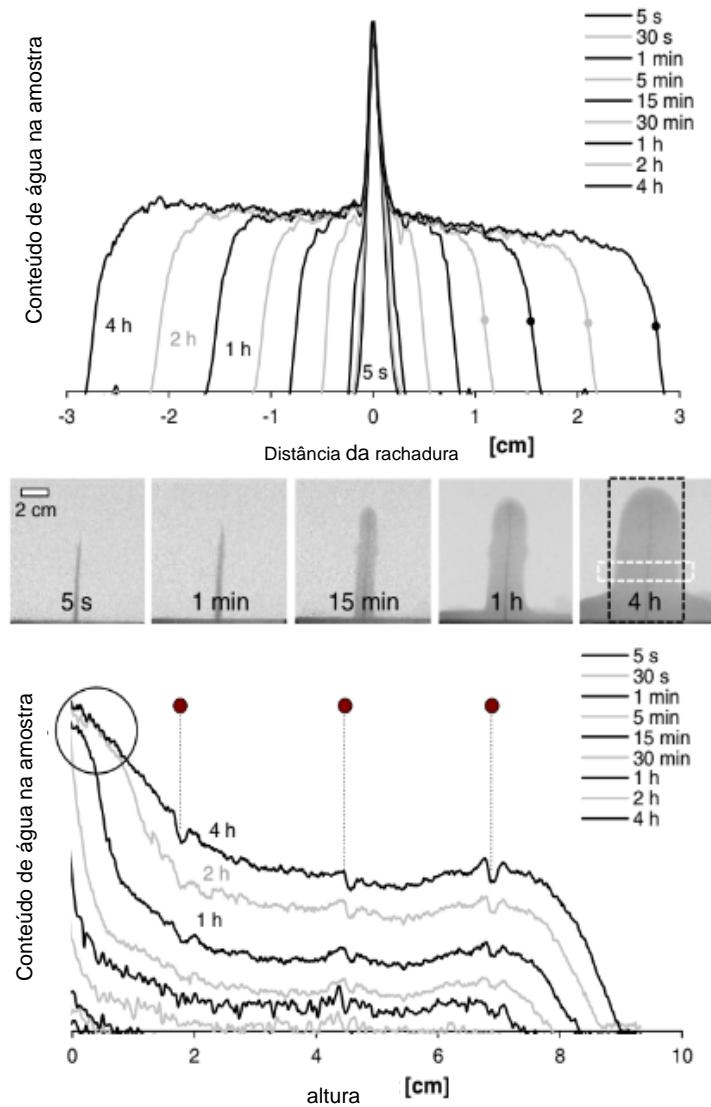


Figura 35: Distribuição horizontal e vertical da umidade através de uma amostra trincada sem adição de SAP (0 — CRA) com visualização em 5 s, 1 min, 15 min, 1 h e 4 h após o contato com a água. O retângulo branco é usado para quantificação da distribuição de umidade horizontal média e o retângulo preto para distribuição de umidade vertical média. Os pontos na parte superior são os pontos de inflexão utilizados, os círculos na parte inferior são os locais dos reforços (SNOECK ET AL., 2012).

Na imagem 35 é possível observar que, a depender da composição dos cimentos após 4 horas de exposição à água, haverá uma absorção inferior pelos capilares de cimentos com maior presença do polímero superabsorvente. Ao mesmo tempo, ocorre uma diminuição da umidade específica por terem a citada capacidade de inchar ao redor

da trinca. As amostras sem o polímero (SAP) mostraram a maior absorção de água, seguidas do cimento com 1% de SAP, B e C e por último 2% do SAP C (os dois últimos não possuem trincas).

O que ocorre é que as partículas do polímero aumentam de volume até 2,25 mm, e parte deste volume preenche os macroporos, enquanto o restante do volume serve como “tampão” para a trinca em questão, evitando a entrada da água.

Na imagem 36, podemos observar os resultados radiográficos ao longo do tempo no cimento sem o super-polímero. Com a penetração da água através da trinca, ao longo do tempo, a capilaridade do cimento faz com que ela seja agente umectante de uma região cada vez maior, danificando-o ao longo do tempo. O cálculo da penetração da água foi feito através da função do tempo $x(t)$, no qual B é o coeficiente de penetração de água na capilaridade [$m \cdot h^{-\frac{1}{2}}$]; da tendência das linhas do gráfico pode ser obtido o coeficiente de penetração por capilaridade B.

$$x(t) = B \cdot \sqrt{t}$$

A comprovação da eficácia do uso dos polímeros na formulação do cimento foi somente possível devido ao uso de técnicas radiológicas paralelamente, comprova-se a capacidade destas técnicas de determinar agentes umectantes e questões que podem afetar estruturas de maneira preventiva.

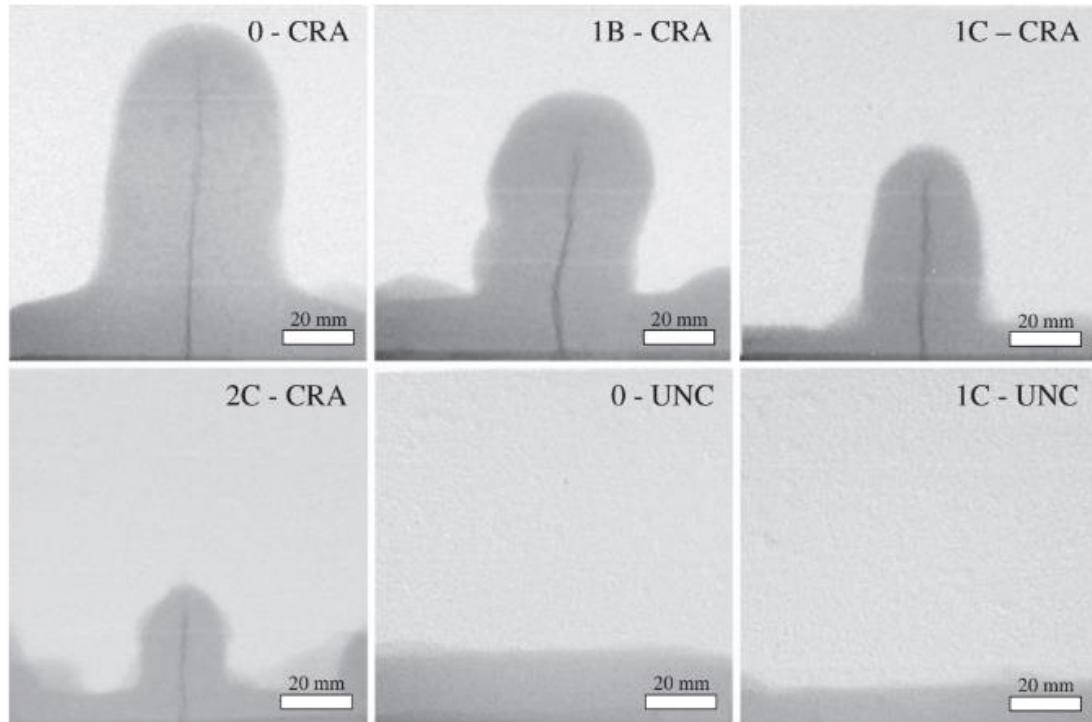


Figura 36: Teor de água obtido por radiografia de nêutrons após 4 h de contato com água para amostras trincadas sem adição de SAP, 1 m% SAP B, 1 m% SAP C, 2 m% amostras SAP C e amostras não trincadas sem SAP e não trincadas com 1 m % de SAP C. (SNOECK ET AL., 2012).

4.3.2.2. Quantificação de presença de água em interface cimento-cerâmica

Em muitos casos de depósitos de descartes radioativos, são utilizados cimentos e cerâmicos com interface direta (uma forma de compósito, nem sempre intencional) (SHAFIZADEH ET AL., 2015). Entretanto as diferenças estruturais entre os dois materiais causam fluxos de massa através da interface, causando consequentes alterações estruturais e na capacidade de transporte de ambos os materiais, podendo finalmente afetar o sistema de múltiplas barreiras. Ao utilizar-se de técnicas de radiologia por nêutrons, é possível medir os parâmetros de transporte difusional. No caso abordado abaixo, o objetivo era de medir as mudanças no conteúdo de água da interface (porosidade) e as características espaciais.

Utilizando de cimento Portland (Tipo CEM I 52.5 N HTS, Lafarge, França) em contato com uma argila compacta de montmorilonita de sódio, foi possível posicionar as amostras em uma célula com um cilindro de politetrafluoretileno (PTFE) (No. 4) com suporte mecânico contra a pressão que poderia afetar o volume da argila em uma câmara de alumínio (No. 7). Ambos o PTFE e o alumínio têm baixa atenuação de nêutrons, o que não afeta significativamente a análise radiográfica da água. Existem dois tampões de poli(éter-éter-cetona) (PEEK) que mantêm as amostras em contato com a água (No. 6). O-rings de Elastômero de flúor (FKM) (No. 3) vedam o sistema. Finalmente, tampas de rosca de PEEK que auxiliam em manter as amostras no local, especialmente a amostra de argila expansível.

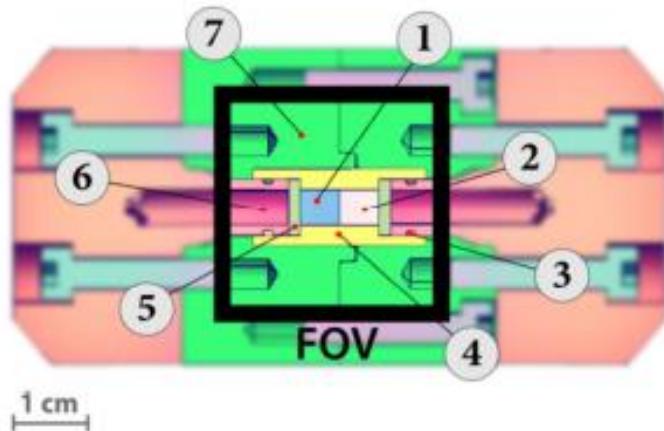


Figura 37: Vista da seção transversal de uma célula de amostra: (1) amostra de cimento, (2) amostra de argila, (3) O-rings, (4) suporte de amostra de PTFE, (5) fritas de PEEK, (6) reservatórios de solução dentro de tampas de PEEK, (7) suporte de alumínio. A parte emoldurada em preto representa a parte exposta aos nêutrons. (SHAFIZADEHET AL, 2015).

Para obter-se os melhores resultados, as amostras foram posicionadas o mais próximo possível do detector, o que possibilitou a incidência de mais nêutrons nele para que a resolução fosse melhor e fosse possibilitada uma análise de porosidade. Para análise dos resultados, as imagens $I(E,x,y,t)$ são sobrepostas e os pontos brancos de radiação gamma são filtrados por medianas em 2D e é utilizada a Lei de Beer-Lambert:

$$I(\mathbf{x},t) = I_0(\mathbf{x},t) \exp(-\mu_c d_c - \mu_s d_s - \mu_w d_w) = I_0(\mathbf{x},t) r_s(\mathbf{x},t),$$

Onde $I_0(x,t)$ é a intensidade do raio de incidência, $r_s(x,t) = \exp(-\mu_c d_c - \mu_s d_s - \mu_w d_w)$, as flutuações relativas locais causadas pela amostra, μ_c , μ_s e μ_w os coeficientes de atenuação da célula, a amostra de cimento ou argila e a água dos poros. Já d_c , d_s e d_w são as espessuras equivalentes destas mesmas camadas.

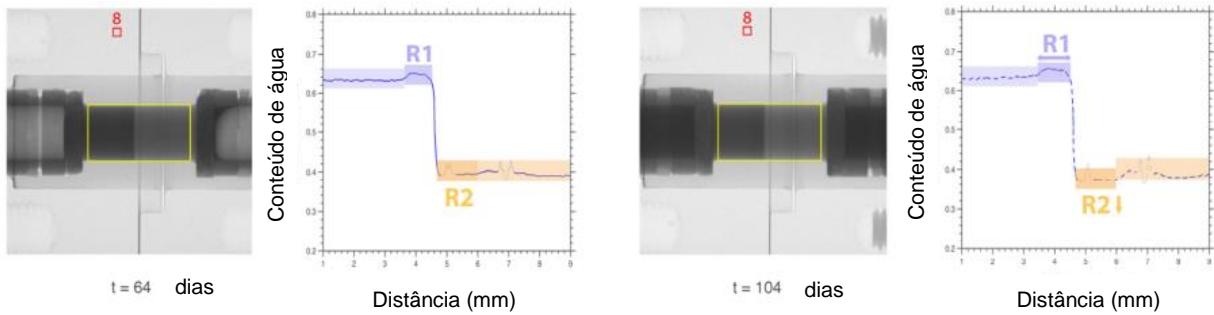


Figura 38: Radiografias de nêutrons de uma interface cimento-argila em $t = 64$ dias (esquerda) e $t = 104$ dias (direita), e seus perfis de teor de água corrigidos (médias ao longo da horizontal da seleção retangular amarela, cimento está localizado à esquerda, argila à direita). O quadrado vermelho representa a parte da imagem selecionada para correção da janela de dose. (SHAFIZADEH ET AL., 2014).

As imagens na figura 38 ilustram radiografias por nêutrons da célula com interface cimento-argila (cimento à esquerda e argila à direita), sendo a imagem à esquerda de 64 dias e à direita de 104 dias da mesma célula. Também pôde-se construir os gráficos de conteúdo de água corrigido das células utilizando da Lei de Beer-Lambert e cálculos por software do perfil da água nas amostras. Dos gráficos, pode-se evidenciar a permanência do perfil da água em espaços específicos com uma penetração inicialmente, em sua maior parte, próxima à interface cimento-argila no longo prazo (104 dias), a presença de água continua próxima à interface do cimento e menor na interface da argila, com maior umidade nesta última - mais distante do cimento. Alguns pequenos picos no gráfico se dão às geometrias específicas dos materiais.

4.3.3. Caracterização de defeitos em soldas e dutos de transmissão subaquáticos

4.3.3.1. Soldas

A soldagem em presença de água é uma técnica para reparo estrutural em plataformas e navios offshore. Entretanto, mesmo com os esforços para melhorar as propriedades mecânicas das soldas úmidas, a soldagem em contato direto com a água ainda apresenta muitos impeditivos. Soldas sólidas com qualidade estrutural semelhante às soldas feitas ao ar raramente foram alcançadas, isso devido às altas taxas de resfriamento causadas pelo contato direto com a água e a presença de hidrogênio derivado da dissociação da água. Estes fatores levam à formação de defeitos, como poros e trincas no metal de solda e na zona afetada pelo calor que afetam negativamente as propriedades mecânicas mais importantes responsáveis pela baixa ductilidade usual nas regiões de solda (ENDO ET AL., 2009).

No resfriamento da solda, os cordões se contraem nas direções transversal e longitudinal. Está bem estabelecido que as contrações longitudinais são responsáveis por maiores tensões residuais após a soldagem. Como consequência, em soldas úmidas, a baixa tenacidade associada à fragilização por hidrogênio pode levar à nucleação de trincas com orientação predominante transversal ao eixo da solda (BRACARENSE ET AL., 2008).

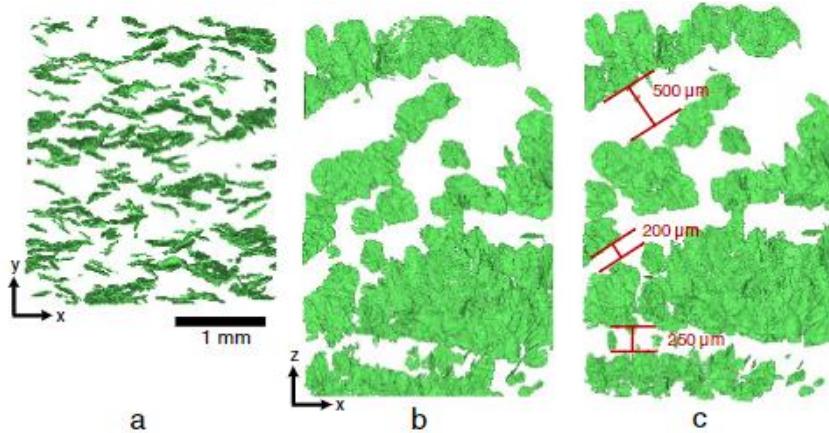


Figura 39: Visão 3D de trincas segmentadas mostradas em (a) plano x-y, (b) plano x-z, (c) depois de uma inclinação de 6° no plano y-z. Na última imagem, os espaços periódicos entre as regiões trincadas podem ser claramente vistos e estão todos orientados no plano da imagem. (BRACARENSE ET AL., 2008).

Ao se utilizar da técnica tomográfica, é possível analisar a estrutura interna de amostras de cordões de solda feitos em presença de água salgada. Para tal, é necessário realizar o processo de radiografia de diferentes ângulos da amostra e compilação em software computacional (ImageJ). Devido ao perfil da amostra (no caso da imagem acima, uma liga metálica à base de Manganês, Silício e Molibdênio), no caso do exemplo acima, uma série de filtros passa-banda teve que ser aplicada para remover o escurecimento presente nas bordas externas da amostra. O filtro passa-banda no ImageJ foi usado para filtrar as estruturas grandes (até 200 voxels), mantendo as estruturas pequenas (filtrar até 0 voxels) (DOUGHERTY ET AL., 2007). Assim, além de caracterizar a geometria da trinca, os dados da tomografia de raios X também são capazes de fornecer informações sobre a distribuição da trinca e identificar padrões na soldagem. As trincas em geral situam-se no plano x-z com faces aproximadamente normais ao eixo y que é a direção de soldagem. A densidade numérica linear das fissuras pode ser calculada contando o número de transições de aço para fissura ao longo de cada direção coordenada, no exemplo acima, identificou-se que para as direções x e z foram essencialmente iguais e cerca de metade da densidade de fissuras na direção y.

4.3.3.2. Dutos

Dutos subaquáticos são cada vez mais utilizados para transportar altas quantidades de gás e petróleo por milhares de quilômetros em diversas regiões do mundo, em especial na Europa (HONG ET AL., 2021). Para que a operação destes dutos ocorra sem problemas, é necessária constante inspeção para potenciais corrosões e defeitos. Isso porque tais dutos fornecem, em grande parte, recursos essenciais para diversas populações e qualquer acidente com eles poderia interromper o fornecimento de tais commodities, o que certamente causaria grande impacto econômico e ambiental aos países envolvidos. (KHADEMI-ZAHEDI ET AL., 2018).

A corrosão ocorre majoritariamente devido à reação eletroquímica na presença de um eletrólito em meio aquoso - neste caso, água marinha -, com a transferência de elétrons. Existem alguns tipos diferentes de corrosões que podem ser observados em dutos. A corrosão uniforme, como o nome descreve, ocorre de forma uniforme nos dutos e pode causar afinamento da camada e potenciais vazamentos. Por sua vez, a corrosão pitting, a mais comum, é severa e localizada, podendo levar a cavidades na estrutura. A cavitação, ocorre por dentro da estrutura por meio da pressão do fluido e gera bolhas internas. Ainda, a corrosão por erosão, geralmente ocorre devido ao movimento do fluido ou partículas internas. Por fim, a corrosão por corrente Stray é causada por correntes de agentes terceiros na região externa. (VANAEI ET AL., 2016).

Por tais razões, métodos de inspeção confiáveis são necessários e utilizados, como é o caso do ultrassom, vazamento por fluxo magnético e por corrente. Entretanto, tais inspeções internas nem sempre são possíveis, seja por falta de acesso externo ou questões internas ao duto. Por isso, se faz necessário o uso de radiografia na inspeção externa dos dutos. Não obstante, os equipamentos radiológicos exigem uma robustez maior ao serem utilizados em meio subaquático, não só por se tratar de dutos de

espessura considerável, mas também por questões inerentes ao ambiente submarino, como a pressão de água.

A técnica mais utilizada nestes casos é o DWSI - Double Wall Single Image (Imagen Única de Duas Paredes) (HAITH, 2017), que consiste em um detector e irradiador de raios que são colocados bem próximos ao duto, um de cada lado. Devido à configuração em leque (figura 37), o lado observado é o mais próximo ao detector, o que causa a necessidade de rotacionar o equipamento em torno do duto. As regiões com corrosão ou defeito são determinadas por uma maior irradiação no detector, uma vez que se tornam mais finas em relação às paredes do duto.

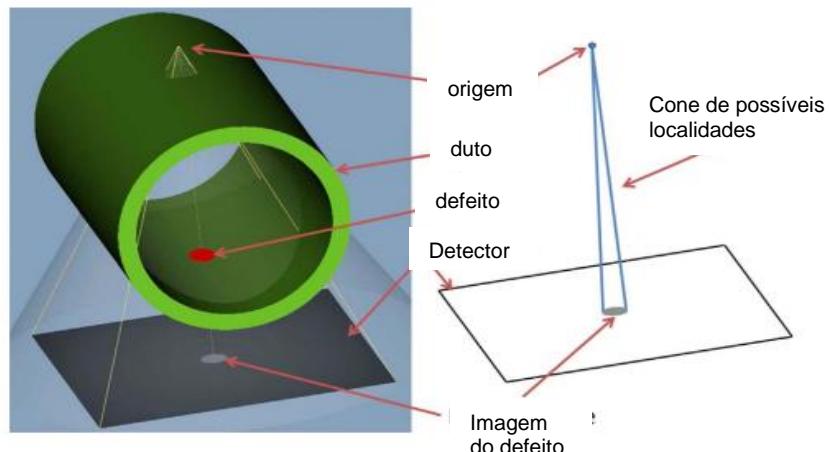


Figura 40: Esquerda: Um exemplo de configuração para radiografia de um tubo contendo um defeito de furo de fundo plano. Direita: Cone de possíveis localizações de defeitos calculado por meio do traçado de raios, usando apenas as posições da fonte e do detector. (HAITH ET AL., 2017).

Após a obtenção de imagens por diferentes ângulos, elas são sobrepostas para que se permita a identificação de defeitos ou corrosão. As imagens que não apresentarem potenciais defeitos podem ser utilizadas para subtrair o “plano de fundo” para destacar melhor os interstícios das imagens que os apresentam o método descrito tem por objetivo melhorar a visibilidade das imagens, como descrito por Haith (2017). Nas imagens abaixo, é possível perceber a diferença de um mesmo defeito quando as imagens têm um tratamento do fundo (direita) e quando não têm (esquerda).

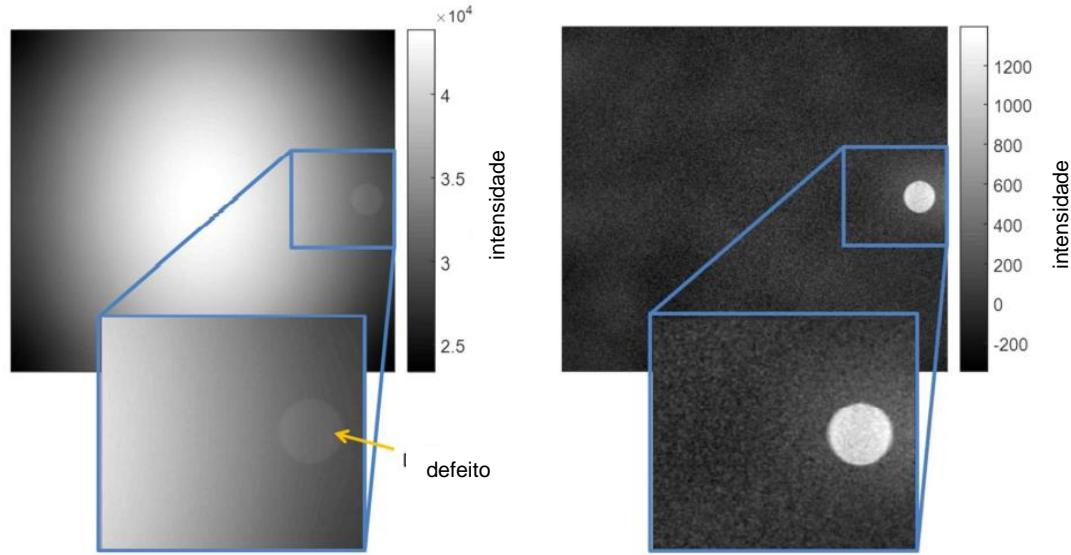


Figura 41: À esquerda, a imagem radiográfica original, com defeito em destaque. À direita, a mesma imagem após subtração da média de fundo, com isso a variação de fundo foi removida e o defeito fica mais aparente. (HAITH ET AL., 2017).

Com estas imagens, é finalmente possível identificar potenciais corrosões nos dutos, uma vez que, como mencionado anteriormente, as regiões afetadas apresentarão uma camada mais fina em relação às regiões vizinhas, o que permite uma maior penetração de raios incidentes no detector. Nos casos de dutos utilizados para gás e petróleo, o local mais comum de ocorrerem corrosões são as soldas, que acabam por perder espessura ao longo do tempo (CORREA ET AL., 2009).

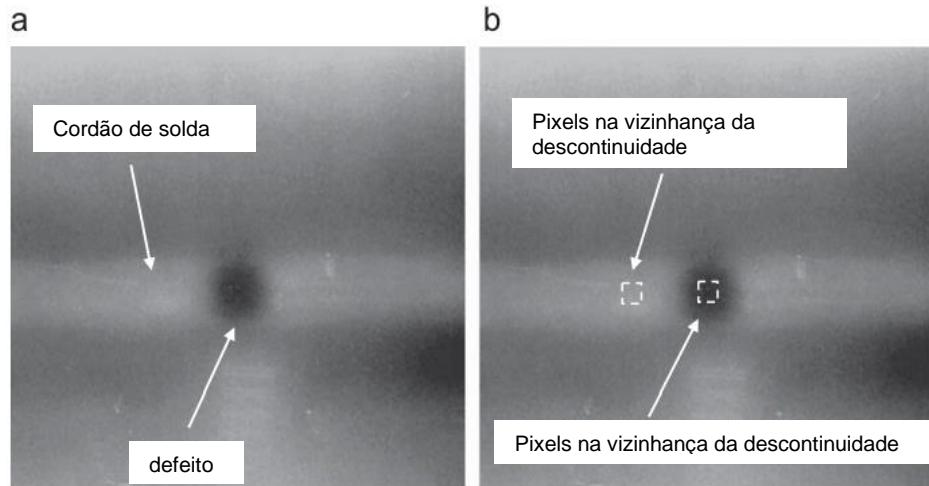


Figura 42: Imagem experimental do duto de 25,4 cm de diâmetro com 28% de descontinuidade na região de solda. (a) Região de defeito. (b) Pixels utilizados na análise. (HAITH ET AL., 2017).

4.4. Aplicações referentes ao estudo da complementaridade de fôtons e nêutrons

4.4.1. Análise sobre carga de bateria ao longo do tempo

Um uso para o estudo com raio X é representado na figura abaixo, na qual é possível identificar seções cortadas através de tomografias de uma bateria alcalina (imagens a e b com raio X de sincrotron, imagens c e d da radiografia de nêutrons), antes e depois da descarga da amostra. Pode-se, na tomografia, observar as mudanças estruturais no pó de zinco - as partículas brancas no meio - que oxidou e em parte se dissolveu no eletrólito KOH. Já o cátodo está “inchado” e rachando devido à redução do MnO_2 na área cinza, e a intercalação com hidrogênio.

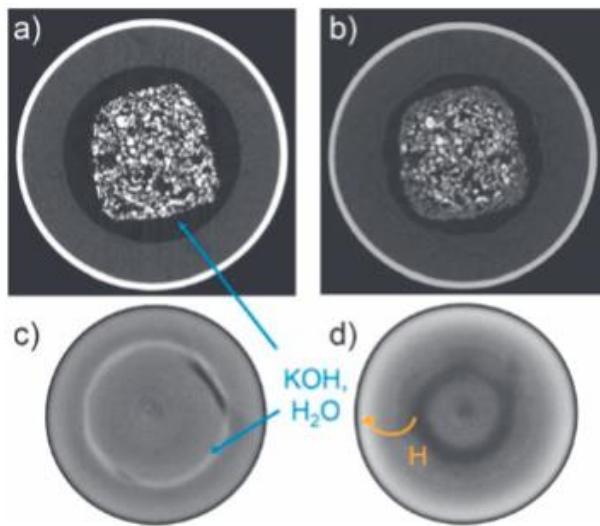


Figura 43: Seções transversais de radiografias de baterias alcalinas. (a) e (b), Tomografia síncrotron de bateria AAA. (c) e (d), tomografia por nêutrons de bateria do tipo Bloco-C. (a) E (c) antes da descarga, (b) e (d) após descarga. (BANHART ET AL., 2013).

Entretanto, percebeu-se que após a descarga, hidrogênio se movia do eletrólito (área escura) para o MnO₂ (área clara), o que demonstra como os diferentes contrastes gerados pelos raios X e nêutrons podem complementar a análise.

No caso de baterias de Lítio-iodo, como o abaixo, devido ao estado sólido do eletrólito, esta bateria consegue prover correntes contínuas e confiáveis à circuitos curtos limitados, por essa razão, é muito utilizada em aplicações médicas, como em marcapassos cardíacos. O iodo possui um contraste clássico em imagens de raio X, enquanto o lítio pode ser identificado por exame por nêutrons. Por essa razão, neste caso, as duas técnicas são complementares com a finalidade de identificar a distribuição dos componentes na amostra. Analisando a estabilidade do lítio em longos períodos, as imagens revelaram uma forte carga na distribuição de lítio, mesmo após alguns anos, o que deu aos desenvolvedores de equipamentos insights que possibilitam uma menor necessidade de cirurgias para troca de baterias em pacientes.

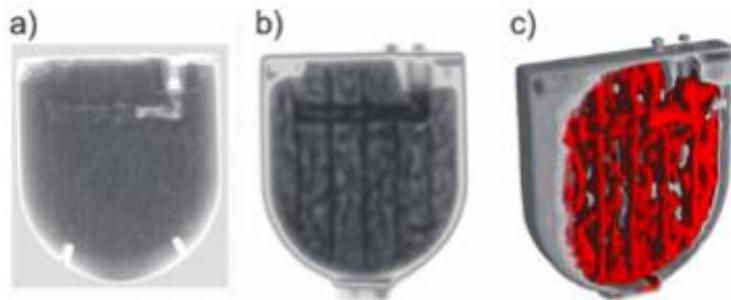


Figura 44: Bateria de iodeto de Lítio. (a) radiografia por raio X que mostra principalmente a distribuição de iodeto. (b) radiografia por nêutrons que mostra distribuição de Lítio na mesma bateria. (c) tomografia por nêutrons da bateria com observação da distribuição de Lítio na mesma bateria. (c) tomografia por nêutrons da bateria com observação da distribuição de Lítio em vermelho. (BANHART ET AL., 2013).

4.4.2. Análise de fases em espuma metálica

Devido à alta sensibilidade que a radiografia por nêutrons tem aos gases nobres, especialmente hidrogênio, a técnica é muito utilizada para identificar a distribuição de hidrogênio em diferentes materiais. É o caso de espumas de alumínio que são produzidas em primeira etapa como materiais precursores, na qual um agente soprador (normalmente TiH_2) é adicionado. (BANHART ET AL., 2013). A distribuição do agente de expansão obtida antes e depois da formação de espuma é uma questão importante em seu desenvolvimento. Enquanto as técnicas de raios X são muito úteis para exibir a microestrutura com resolução espacial adequada (imagem abaixo - a), utilizando-se das técnicas de nêutrons, pode-se identificar fases mais complexas. A imagem abaixo (b) é um exemplo deste caso, em que se pode identificar aglomerados de TiH_2 em uma amostra de espuma de AlSi_6Cu_4 ,

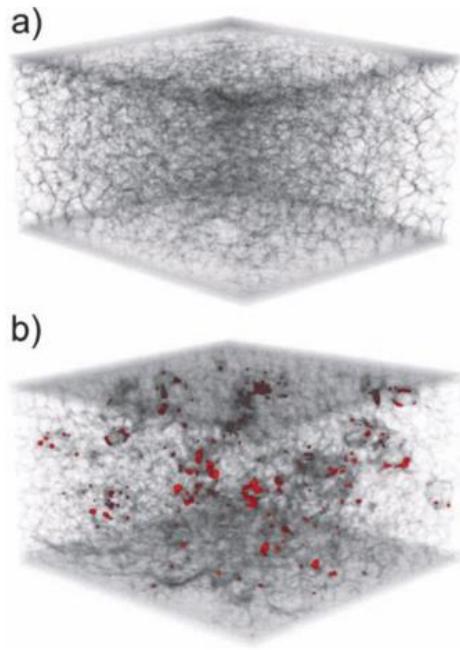


Figura 45: (a) Radiografia de espuma AlSi₆Cu₄. (b) Tomografia de nêutrons de espuma AlSi₆Cu₄. Aglomeração de TiH₂ em vermelho. (BANHART ET AL., 2013).

A estrutura de poros extraída de imagens de radiografia por nêutrons é também empregada para simular o transporte de gás em espumas metálicas sob diferentes ensaios de taxas de compressão pela conversão do fluxo de nêutrons (WU ET AL., 2021).

Especificamente no campo da visualização da água, o método por nêutrons é aplicado para caracterizar o efeito de designs de baixo fluxo, pressões de compressão e condições de operação no gerenciamento de água. Recentemente, a radiografia de nêutrons foi empregada para comparar o gerenciamento de água de espuma metálica e PEFCs baseados em campo de fluxo de serpentina (WU ET AL., 2021).

4.5. Aplicações Médicas

4.5.1. Ciência Forense

Identificação de dentição é o método mais valioso para identificação forense de restos humanos, pela praticidade e confiabilidade (LOOMIS ET AL., 2018). Para tal, são utilizadas técnicas radiológicas e tomográficas, uma vez que, além da dentição natural humana, muitas vezes são encontrados materiais de preenchimento restaurativo nos dentes, compósitos, preenchimentos temporários (IRM, Ketac Fil), cerâmicos (Teric Flow, Teric Evo, Vitablocs, Oralloy,) e adesivos (3M, Optibond, Xeno III). (JACKOWSKI ET AL., 2008). Um problema que é enfrentado pelos cientistas forenses é a capacidade de diferenciação e identificação de tais materiais na dentição já que visualmente eles são instalados com o intuito de se manterem o mais próximo possível da dentição natural. Assim, se faz necessário o conhecimento do comportamento radiológico dos materiais odontológicos.

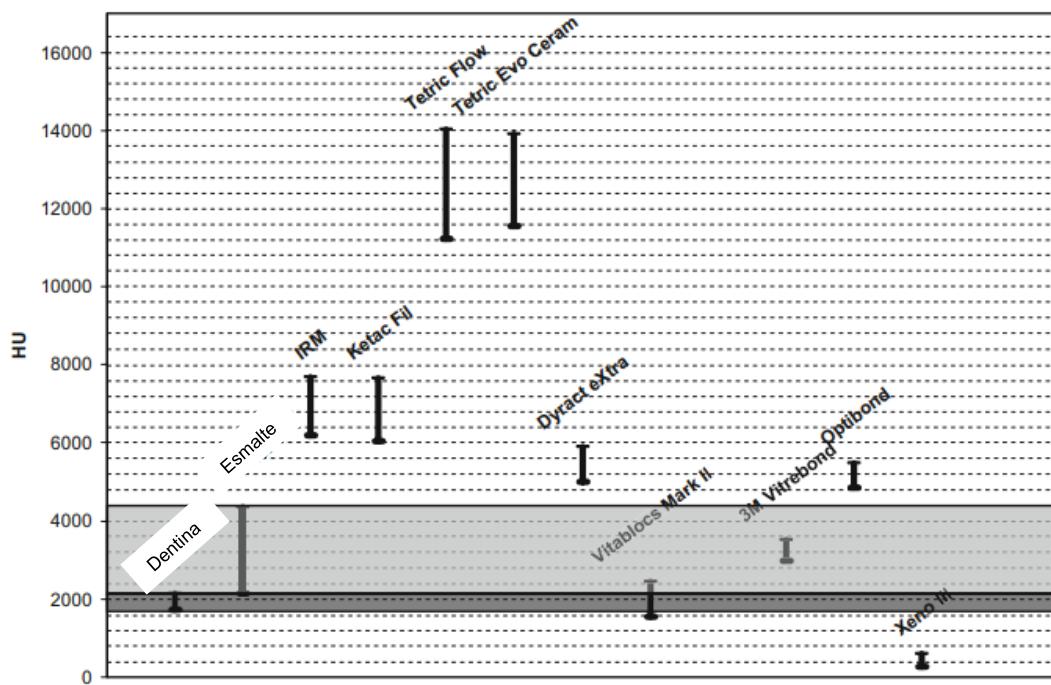


Figura 46: Delineação gráfica da faixa de HU com base nos valores obtidos nos materiais restauradores investigados. O limite inferior e superior da radiopacidade da amálgamma não pode ser avaliado de forma confiável. Apenas Vitablocks (cerâmico), liners e adesivos possuem radiopacidades que estão no nível dos dentes ou inferiores. (LOOMIS ET AL., 2018).

Em análise radiológica, foi possível identificar que os preenchimentos temporários possuíam uma atenuação de raio X entre ~6.000 e ~7.700 HU. Já os preenchimentos

permanentes, os produtos Tetric Flow e Tetric Evo Ceram tiveram os maiores valores não metálicos, ~11.200 a ~14.000 HU, enquanto o produto Dyract eXtra demonstrou ~5.000 a ~5.900 HU. Já os preenchimentos cerâmicos apresentaram muita dificuldade na análise, por possuírem uma radio-capacidade semelhante ou abaixo da dentina, como pode ser observado acima.

	Materiais de preenchimento temporário				Materiais de preenchimento permanente				Liner e adesivos		
	IRM	Ketac Fil	Tetric Flow	Tetric Evo Ceram	Dyract eXtra	Vitablocs Mark II	Oralloy Magicap S	3M Vitrebond	Optibond	Xeno III	
nome											
Média dos máximos valores de HU	7693.3	7654.2	14015.4	13899.6	5883.8	2428.8	30710.0	3516.3	5465.4	606.7	
Desvio padrão dos máximos valores de HU	307.2	267.3	430.5	437.4	209.9	134.5	0.0	355.9	213.7	48.5	
Média dos mínimos valores de HU	6177.9	6055.0	11224.6	11538.8	4997.5	1544.2	30710.0	2976.7	4840.0	277.1	
Desvio padrão dos mínimos valores de HU	310.7	174.7	396.7	372.4	271.6	143.9	0.0	449.8	181.0	55.6	
Exemplos de imagens reformatadas em 2D											

Figura 47: Tomografia de fonte dupla de resolução ultra-alta para visualização odontológica forense - discriminação de obturações cerâmicas e compostas (LOOMIS, 2018).

A diferenciação de materiais comumente utilizados na odontologia, sejam cerâmicos, compósitos ou metais, permite identificar a origem dos materiais na dentição sujeita a estudos forenses (dentições de corpos não identificados), sendo possível auxiliar a identificação vítimas, com auxílio outras técnicas de ciência de materiais e da ciência forense.

4.5.2. Implantes Médicos

Os métodos radiológicos em materiais são de suma importância no meio médico não somente pelo fato de que muitos tecidos do corpo humano possam ser considerados

biocompósitos (RAMAKRISHNA, 2016), mas também pelo uso cada vez mais comum de implantes sintéticos. Implantes são considerados os equipamentos que são colocados dentro do corpo humano temporariamente ou permanentemente para diagnóstico, monitoramento ou finalidades terapêuticas (LI, 2015).



Figura 48: Esquema representativo de possíveis componentes de uma prótese de quadril. (MEDACTA, 2022).

Como representado na imagem acima, a haste femoral é feita de metal (normalmente uma liga de titânio, cromo-cobalto ou aço inoxidável). A cabeça, por sua vez, é feita de cerâmica ou metal. O copo é composto por uma ou duas peças, dependendo do procedimento, podendo ser cimentado - normalmente apenas um componente de polietileno - ou não cimentado - concha e liner metálico. No caso de uma concha metálica, um forro de cerâmica ou polietileno articula-se contra a cabeça. Todos os materiais utilizados para artroplastia de quadril devem ser altamente biocompatíveis. (MEDACTA, 2022).

4.5.2.1. Implantes Cerâmicos

Um dos principais usos de cerâmicos em implantes, além da dentição, é em “liners” ou cabeças de próteses, em especial da prótese de quadril (chamada artroplastia de quadril). Inicialmente, próteses que utilizavam de contato cerâmico-cerâmico eram evitadas devido à maior chance de fratura ou deslocamento, entretanto, com o uso de cerâmicas modernas, muitos resultados encorajadores vêm surgindo (ENDO, 2015). As vantagens deste uso de cerâmicos é a extrema dureza, capacidade de resistência umectante, alta biocompatibilidade e resistência à corrosão, resultando em um baixo desgaste de uso (MACDONALD, 2014). Essas características fazem dos implantes cerâmica-cerâmica os mais recomendados para pacientes ativos e jovens.

Fraturas em tais estruturas podem somente ser identificadas por radiografias de maneira não invasiva. Entretanto, nem sempre a visualização da fratura é simples, visto que pode não ocorrer deslocamento da área fraturada, o que a torna dificilmente identificável em uma radiografia simples. Portanto, o uso de técnicas radiológicas em engenharia de materiais se faz necessária na análise destes cerâmicos (YONG-CHAN, 2007).

No caso das imagens na Figura 49, pode-se identificar um caso de paciente que apresentou fratura no liner cerâmico do implante, neste estudo constituído de alumina cerâmica que foi levantada como suspeita, pois apresentava rangido. As primeiras radiografias foram incapazes de identificar a fratura, pois a peça continuava alinhada em sua localidade, mesmo fraturada. Assim, utilizou-se de um tomógrafo que identificou a fratura circular demonstrada na imagem 43. Foi possível identificar esta fratura somente quando a amplitude da janela de análise foi aumentada a 7.000 HU, pois só então foi possível diferenciar a densidade do cerâmico e do titânio adjacente.

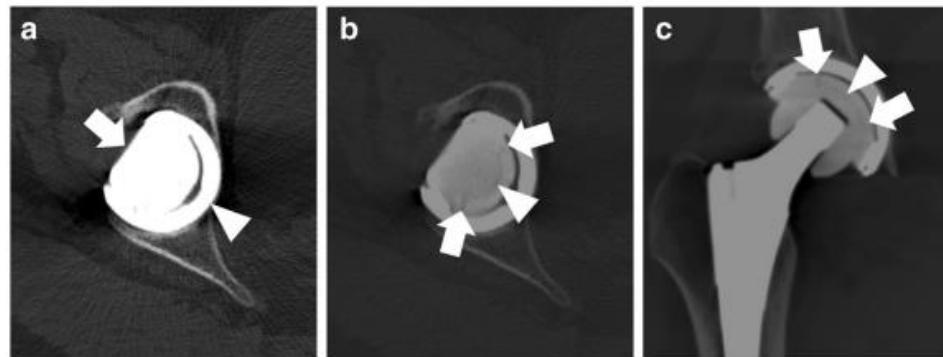


Figura 49: (a) A tomografia computadorizada axial do paciente 1 na janela óssea mostra que a cabeça femoral de cerâmica (seta) e a cúpula acetabular de titânio (triângulo) são igualmente hiperdensas, ocultando a cerâmica e impedindo a visualização da fratura do revestimento cerâmico. (b) A tomografia computadorizada axial, agora otimizada, mostra que o revestimento cerâmico não é tão hiperdenso quanto o titânio. Visualiza-se a interface (triângulo) entre o revestimento cerâmico e a cabeça femoral cerâmica, bem como o fino traço de fratura envolvendo o revestimento cerâmico (seta). (c) A tomografia computadorizada mostra a interface (triângulo) entre as superfícies do rolamento cerâmico e a linha de fratura circular fina (setas). (ENDO, 2014).

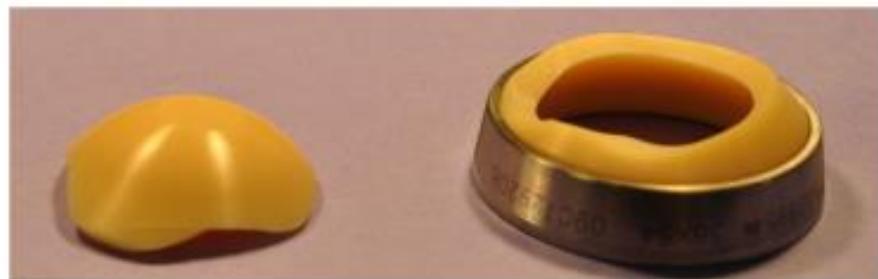


Figura 50: Fotografia intraoperatória de paciente, confirmando a fratura. (ENDO, 2014).

Os autores das radiografias acima afirmam que o método de análise de fratura em radiologias por médicos ainda é muito precário devido à inexperiência em questão de análise de tecidos não ósseos, neste caso, de cerâmicos. Mas com as técnicas corretas, em saber quais as janelas tomográficas de análise de cada material e de saber onde olhar, pode-se obter resultados muito mais precisos (Endo et al., 2014).

4.5.2.2. Deposição metálica em implantes

Implantes metálicos são os biomateriais primários utilizados para substituição de articulações e implantes, e se tornam cada vez mais importantes. Os implantes metálicos utilizados para aplicações ortopédicas podem ser caracterizados em aço inox, ligas CoCr, Ti e ligas de Ti (KATTI, 2008). Eles são muitas vezes utilizados em implantes devido a sua superioridade sobre cerâmica tradicional e biomateriais poliméricos. Implantes ortopédicos de base metálica passam por uma multidão de manufaturas e modificações de superfície para melhorar suas atividades biológicas no local de uso (ADHIKARI, 2018).

Entretanto, o afrouxamento em implantes causado por exposição de partículas ainda é uma grande causa de artroplastia de revisão (cirurgia de substituição do implante). O papel do implante metálico nestes casos ainda não é completamente certo uma vez que ainda não é definitivo como os metais se alteram quimicamente diante de membranas de peri-implante (alteração patológica dos tecidos ao redor dos implantes osseointegrados, (OLIVEIRA, 2015)) nos ossos e medula de ossos adjacentes. Investigações recentes sugerem que a complexa composição de células imunes da medula, e sua capacidade de hospedar células imunes adaptativas, desempenha um papel crucial no desenvolvimento da inflamação induzida pela exposição a metais. (SCHOON, 2020).

Considerando a escala dessa ocorrência, se faz necessário o uso de Raio X síncrotron para analisar espacialmente a composição multielementar dos tecidos da camada de peri-implante. Nesta região, metais particulados e dissolvidos liberados dos implantes de artroplastia não são totalmente isolados pela membrana peri-implantar, mas estão abundantemente presentes no osso esponjoso peri-implantar. As análises elementares resolvidas espacialmente, realizadas neste estudo, na faixa de micron e nano, fornecem informações únicas sobre concentração, distribuição, localização e acúmulo de produtos de degradação metálicos em osso peri-implantar.

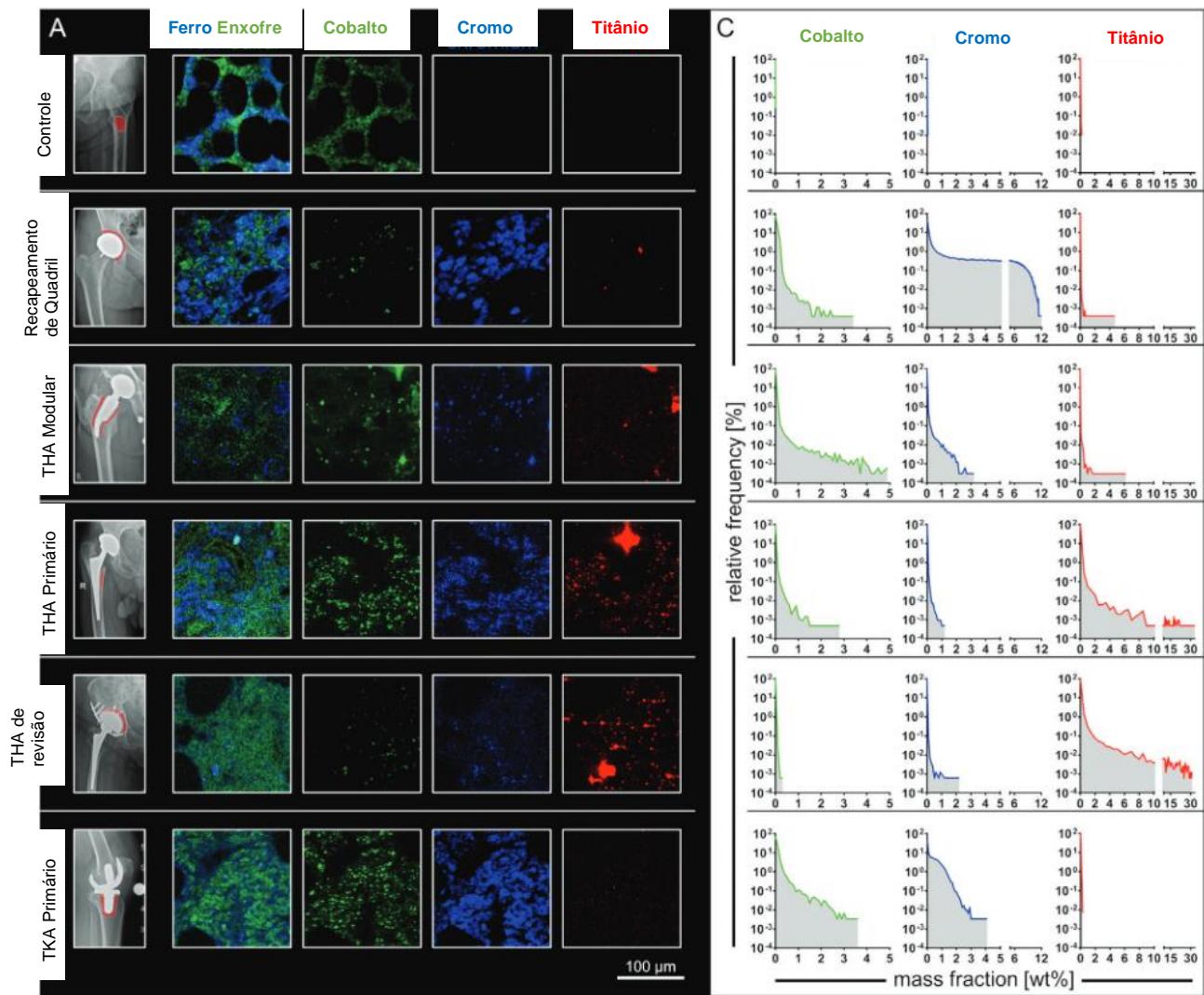


Figura 51: Radiografias de diferentes implantes e suas respectivas radiologias por sincrotron indicando exposição a metais de componentes não articulados. Abreviaturas: ATQ, artroplastia total do quadril; ATJ, artroplastia total do joelho. (SCHOON, 2020).

Na imagem, é possível identificar que Co, Cr e Ti foram abundantemente detectados na medula óssea peri-implantar de vários tipos e locais de implante. Em “A” Radiografias pré-operatórias, as áreas vermelhas indicam o local de extração da amostra. Em “B”, seções de mapas micro-XRF com resolução de 2 μm , em que Ferro e Enxofre indicam estruturas da matriz da medula. O mapeamento de Co, Cr e Ti indica a ampla disseminação desses metais na medula peri-implantar. Em “C” são identificadas

distribuições de frequência de frações de massa quantificadas de cada mapa e elementos individuais indicam sinais de Co, Cr e Ti se comparados ao controle. (SCHOON, 2020).

4.6. Aplicações em Polímeros

As propriedades de polímeros são determinadas principalmente pelo grau de cristalização e pelo tipo de polímero utilizado na amostra. Sendo que os polímeros são compostos por longas cadeias moleculares, que podem ser estruturas altamente cristalinas a estruturas amorfas com bobinas altamente emaranhadas. Os polímeros vêm em muitas formas, incluindo altamente cristalino, semicristalino, microcristalino ou amorfos, e é possível que em uma única amostra de polímero, todos os três possam ser observados (INTERSEK, 2022).

As características de cristalinidade observadas em uma amostra polimérica definem suas propriedades ópticas, mecânicas, térmicas e químicas; essenciais para alcançar as métricas desejadas nas aplicações de interesse. A exemplo da rigidez dos polímeros altamente cristalinos, com altos pontos de fusão e menos afetados pela penetração de solventes, enquanto os polímeros amorfos são mais flexíveis, com fusão mais lenta quando aquecidos e mais suscetíveis à penetração de solventes.

Recentemente, percebeu-se que técnicas radiológicas de difração de raio X poderiam ser utilizadas para analisar tipos e cristalinidades de polímeros, além da quantificação das fases cristalinas (polimorfismo), politipos e todos os tipos de arranjos moleculares em estado sólido, tornando-se as ferramentas principais para fazê-lo. Se o polímero é cristalino, então o padrão de difração de raio X é resultado de uma estrutura cristalina (conforme relacionado pela lei de Bragg); o padrão pode ser indexado e representado por um padrão de posições e intensidades. Sabendo que os polímeros podem ser processados em fibras e filmes, podendo ser moldados e extrudados (THERMOFISHER, 2021), cada um desses processos pode orientar as moléculas. Deste

modo, a difração de raio X pode ser usada para medir a orientação, tanto em materiais cristalinos quanto não cristalinos.

4.6.1. Copolímeros em bloco

Copolímeros podem ser estudados por técnicas radiológicas tanto em sua forma sólida quanto em solução. As estruturas e morfologias complexas dos copolímeros em bloco geralmente apresentam dimensão na faixa de 1 a 100 nm, ideal para ser estudada pela difração de raio X a baixos ângulos. Um copolímero em bloco pode exibir picos de intensidade relativa no teste de difração de raio X devido à sua estrutura periódica de microdomínios com uma ordem de longo alcance. Com isso, informações sobre a morfologia do microdomínio podem ser obtidas a partir das posições relativas desses picos, que exibem relações espaciais específicas, a depender da forma da estrutura do microdomínio em questão.

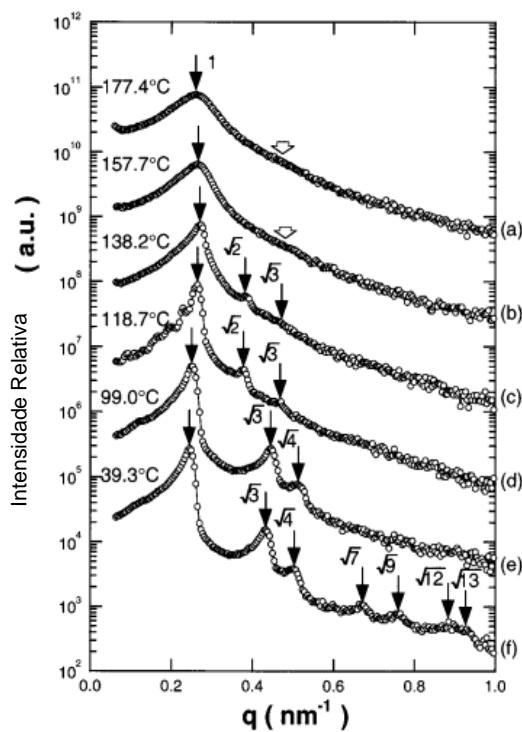


Figura 52: Perfis de um copolímero em bloco (Poliestireno-bloco-poliestireno) por raio X conforme temperaturas. Os dois perfis superiores ($177,4^{\circ}\text{C}$, $157,7^{\circ}\text{C}$) representam a fase esférica, enquanto as outras representam a fase cilíndrica hexagonal. (SAKAMOTO ET AL, 1998).

Ao se utilizar do método síncrotron a baixos ângulos, pode-se obter ainda mais detalhamento na análise de copolímeros. É o caso da cinética rápida da transição de fase, que pode, neste caso, ser acompanhada em tempo real. Floudas et al. (2000), por exemplo, estudaram várias transições de ordem a ordem em um copolímero dibloco de poli(isopreno-b-óxido de etileno) com fase lamelar cristalina, mesofase hexagonal e fase cúbica bicontínua. Os cientistas concluíram que as transições seguiram comportamento típico de nucleação e crescimento. Kim et al. combinou a caracterização reológica com o equipamento de síncrotron em difração de raio X a baixos ângulos para investigar as transições entre as fases hexagonal e cúbica de corpo centrado em sistemas de poliestireno PS-block-PI e PS-block-PI-block-PS, no qual descobriram que a transição entre hexagonal e cúbica de corpo centrado era termicamente reversível. (SAKAMOTO ET AL, 1998). Não só as transições de fases de copolímeros em blocos podem ser estudadas na literatura, já existem pesquisas envolvendo o uso de raio X para estudo de deformação por tração, processo de cristalização, separação de microfases e até estruturas supramoleculares (CHU, 2001).

4.6.2. Ionômeros

São polímeros ionômeros aqueles que se apresentam em aglomerados ou domínios gerados por interações iônicas dos segmentos carregados nas cadeias poliméricas. (KEENAN, 2012). Tais polímeros caracterizam uma dimensão na faixa de 1 a 4 nm que, assim como os copolímeros em bloco, permite ser estudada pela difração de raio X a baixos ângulos.

Assim como no caso anterior, por se tratar de uma faixa de dimensão nanométrica, o SAXS de síncrotron pode ser utilizado para se obter vários dados quanto aos polímeros

Ionômeros. Em sua pesquisa de Macromoléculas, Jiang et al. (1997) determinaram que curvas síncrotron em difração de raio X a baixos ângulos de sais de Na e Zn de poliestireno sulfonado podem ser construídas de forma precisa, utilizando de um sistema de colimação de blocos Kratky modificado. Os resultados levantados por Chu (2001), apoiaram a ideia de formação de fases ricas em íons, pela amostragem de uma temperatura de transição vítreia correspondente.

Outros cientistas também já citam na literatura diversas outras aplicações de análise com SAXS de síncrotron em polímeros Ionômeros. A cristalização, fusão e dissolução do estearato de zinco em ionômeros poliméricos com concentração de ZnSt (SEPDM) são exemplos em que pode ser observada uma dissolução após fusão do ZnSt (ROCHE, 1980). Também há pesquisas acerca do uso de ionômeros como membranas de troca de prótons, que podem ter sua estrutura cristalina alterada no processo.

4.6.3. Polímeros de Cristal Líquido

São denominados polímeros de cristal líquido (LCPs) um tipo de termoplásticos que exibem propriedades entre materiais cristalinos sólidos altamente ordenados e líquidos amorfos desordenados em uma faixa de temperatura bem definida. São caracterizados por serem resinas de elevado desempenho com estruturas moleculares longas, além de rígidas e altamente orientadas. As propriedades intrínsecas a estes polímeros são influenciadas por sua estrutura líquido-cristalina. Suas moléculas rígidas orientam-se no fluxo de trabalho quando colocadas em processo de injeção e/ou extrusão. (KEENAN, 2012).

A técnica de síncrotron de difração de raio X pode ser utilizada para analisar alguns fenômenos destes polímeros, como as mudanças da estrutura mesomórfica deles em soluções e em fundidos. Um caso de estudo, estabelecido por Perez-Mendez et al. (1999) utiliza a técnica síncrotron SAXS para determinar o comportamento de poliésteres colesterolícos em solução aquosa e como interagem com uma membrana lipídica para

aplicações em drogas. Foi estudada a estrutura de um polímero cristalino líquido de cadeia principal ligado a hidrogênio auto-montado misturando dois componentes complementares, A e B, que em seus estados individuais não exibiam cristalinidade líquida. Nos resultados da análise síncrotron SAXS, foi possível identificar que o sal polimérico tinha uma estrutura de cadeia AABB e formou uma camada esmética com um comprimento da unidade de repetição A-B (PEREZ-MENDEZ, 1999).

Além deste caso, já é possível identificar na literatura menções de estudos destes polímeros com difração de raio X em outros estudos, ao caso de ordenação molecular, transições de fase e mobilidade da cadeia em cristal líquido; e de transformações polimórficas que podem ocorrer conforme o aumento da temperatura e quais as mudanças estruturais em blendas de polímeros de cristal líquido.

4.6.4. Biopolímeros

Nos últimos anos, os biopolímeros têm tomado grande notoriedade pela descoberta de novas aplicações e pelo menor impacto ambiental se comparado aos polímeros de produção industrial. Estes polímeros são no geral produzidos por organismos vivos, em sua grande parte derivados de amido, sendo que são compostos de unidades monoméricas (MACGREGOR, 2003). Pode-se afirmar que a maioria dos biopolímeros exibe propriedades mesoscópicas em soluções aquosas, razão pela qual o contraste de densidade eletrônica no ambiente *in vitro* é fraco e a estrutura mesoscópica pode ser complexa. Estas razões fazem com que os biopolímeros sejam ideais para serem estudados por SAXS síncrotron com feixes de alta intensidade bem definidos.

As técnicas radiológicas são muito utilizadas e indicadas para este tipo de polímero, não obstante de tal fato, diversos estudos envolvendo difração de raio X em biopolímeros estão sendo produzidos. É o caso de Sanfinya et al. (1998) que usaram SAXS síncrotron para estudar as estruturas mutiladas e automontadas de misturas de DNA e lipossomas catiônicos; nessas misturas, o DNA foi confinado entre bicamadas

lipídicas carregadas e formou um ordenamento emético bidimensional que foi analisado. (SANFINYA ET AL., 1998). Já Schreier et al. conseguiram estudar as alterações estruturais dos lipídios no estrato córneo de camundongos e humanos após o aquecimento do estrato córneo a várias temperaturas usando o método de sincrotron SAXS (SCHREIER ET AL., 1994). No caso de estruturas menos complexas, os perfis de difração de raio X podem ser detectados, Jenkins et al. (1997) estudaram os efeitos da hidrólise sobre a estrutura de três tipos de amido e seu comportamento de gelificação subsequente; ao ajustar completamente as curvas SAXS de diferentes regiões dentro de um grânulo de amido, foi possível identificar a destruição preferencial da fase amorfa durante o processo de hidrólise.

4.7. Materiais Naturais

4.7.1. Materiais à Base de Celulose

Materiais naturais, como madeira e papel, se caracterizam como compostos de elementos de baixo número atômico, que absorvem a radiação apenas fracamente e, como não possuem presença de fase metálica significativa, a radiografia por nêutrons não é capaz de gerar contraste significativo, como em espumas metálicas (LINDGREN ET AL., 1992). As técnicas radiológicas vêm sendo cada vez mais presentes no estudo de contrastes de materiais naturais, entre eles, pode se citar a significância da análise radiográfica das características constitutivas do papel. Este material tem uma estrutura complexa na escala de micrões, e tal complexidade é resultado de uma ampla distribuição na maioria das propriedades da matéria-prima e um processo de conformação próximo ao estocástico. (HOLMSTAD ET AL., 2006). Assim, para que pudesse ser comprovada a capacidade de analisar o material por técnicas radiográficas, amostras de papel foram submetidas a uma variedade de métodos de construção de

imagem. Segundo os experimentos conduzidos por Holmstad et al. (2006), a visualização e caracterização confirmam que técnicas radiológicas modernas já possuem resolução suficiente para obter medidas razoáveis e confiáveis de características de amostras de papel. A imagem abaixo, também obtida por Holmstad, indica uma seção transversal de amostra de papel onde é possível identificar regiões de composição diferenciada, chamados poros.

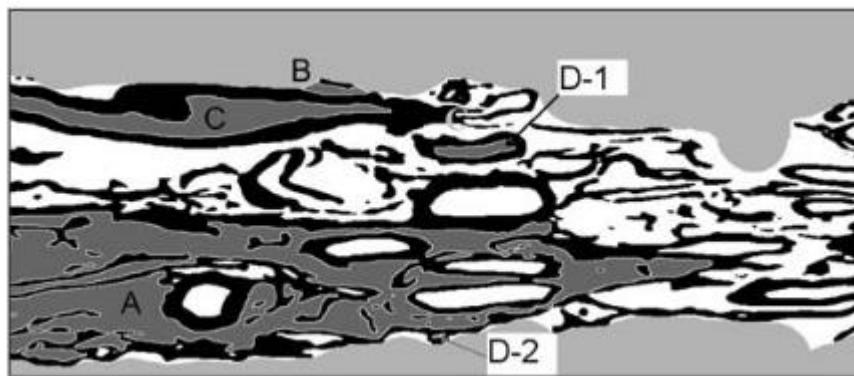


Figura 53: Ilustração de áreas de poros com diferentes características observadas e uma radiologia de uma seção de papel de jornal. (HOLMSTAD ET AL., 2006).

A área do poro A é grande e ramificada, limitada por elementos sólidos, com bordas e superfície definida. A área de poros de B é limitada por elementos sólidos e pela superfície definida. A área de poros da borda de C é limitada por elementos sólidos e pela borda da imagem. As porções fechadas D-1 e D-2 são limitadas apenas por elementos sólidos.

Com composição semelhante ao papel, a madeira que também possui uma intrincada estrutura hierárquica 3D, já pode ser fotografada usando técnicas de radiografia por sincrotron, Trtik et al. (2007) realizaram experimentos em madeira de abeto e puderam identificar suas estruturas internas e reconstruir suas seções internas através de tomografia computadorizada.

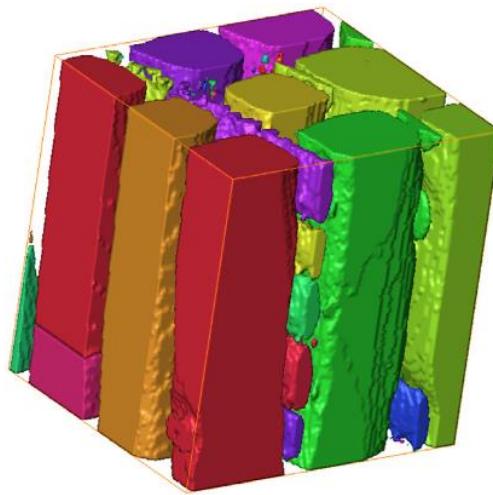


Figura 54: Reconstrução 3D (aproximadamente $87 \times 97 \times 100\mu\text{m}$ em tamanho) de uma região cortada de uma amostra de madeira, mostrando a porosidade de cada região baseada na concentração de água) (TRTIK ET AL., 2007).

No caso exemplificado acima, a equipe utilizou da densidade e presença de água em diferentes camadas da estrutura da madeira, além de medidas de porosidade que variam conforme o estado do crescimento da amostra, para gerar imagens de contraste sobrepostas. A microscopia tomográfica de raios X por radiação síncrotron mostrou-se capaz de revelar claramente a microestrutura da madeira com resolução espacial próxima a $1\mu\text{m}^3$. Características da microestrutura da madeira tão pequenas quanto $1,5\text{--}2\mu\text{m}$ de espessura foram observadas e podem ser facilmente segmentadas a partir de uma região de interesse no conjunto de dados.

4.7.2. Materiais em Paleontologia Moderna

Uma característica específica dos objetos paleontológicos é que os tecidos biológicos iniciais neles foram sendo substituídos por componentes minerais (sendo que a composição pode variar, mesmo dentro de um único objeto) devido à processos químicos que ocorrem por milhões de anos (PODURETS ET AL., 2021). Para que fosse possível prever os resultados de estudos tomográficos em objetos paleontológicos,

Pakhnevich et al. compararam o contraste entre diferentes minerais e rochas e traçaram escalas de contrastes de raios X e nêutrons.

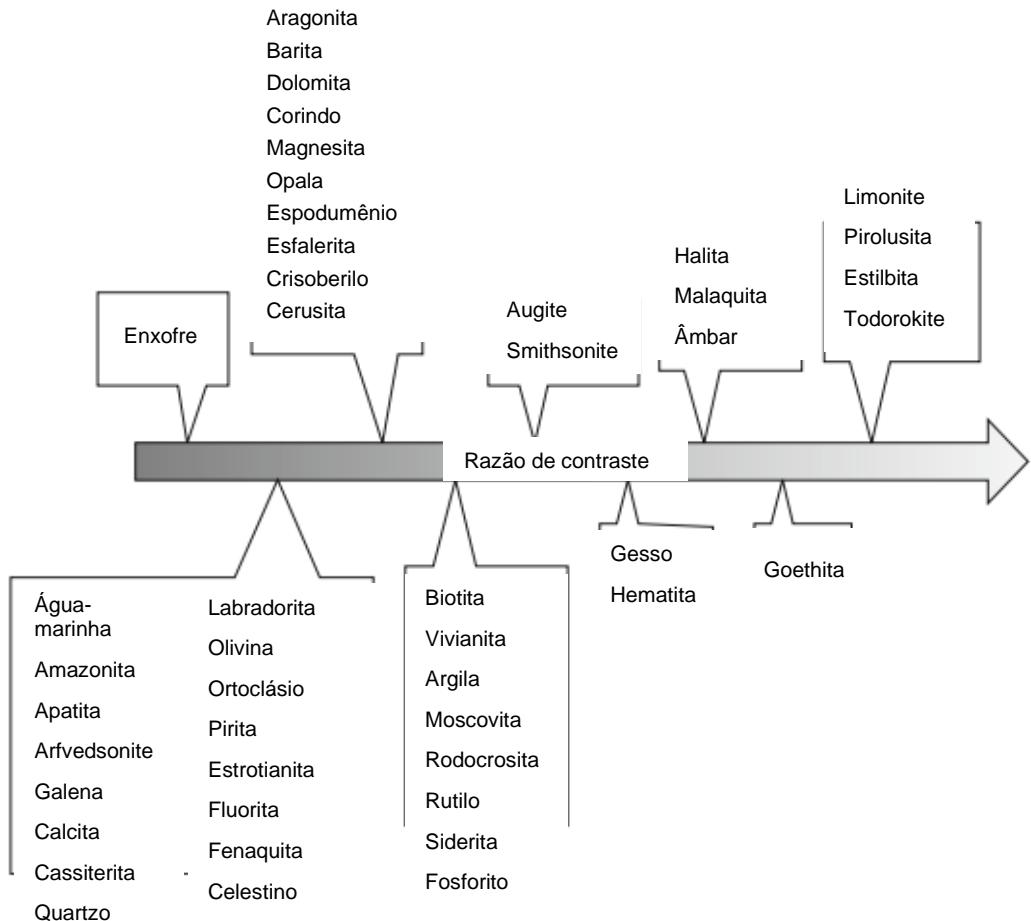


Figura 55: Escala de contraste de minerais e rochas (PACHNEVICH, 2017).

Essas escalas permitem escolher um tipo de radiação adequado para objetos específicos em estudo. Um estudo de tomografia de nêutrons de ossos petrosos de baleias fósseis foi realizado, para tal, um feixe de nêutrons foi aplicado pois as cavidades ósseas petrosas foram preenchidas com um material que absorve fortemente os raios X, gerando artefatos, com isso, a estrutura 3D da orelha interna da baleia pôde ser investigada. A aplicação desta técnica foi determinada pelo interesse em estudar a preservação de estruturas orgânicas e possibilitou a consequente reprodução do método em diferentes objetos, como estromatólitos (PACHNEVICH, 2017).

4.8. Cerâmicos

A primeira aplicação da radiografia na ciência cerâmica remonta à década de 1930, quando Titterington publicou uma radiografia de sete fragmentos de sepultamentos de índios norte-americanos para ilustrar as proporções diferenciais de inclusões (BERG, 2008). Desde então, o estudo de cerâmicos através de técnicas radiológicas avançou muito, utilizando de técnicas de identificação de meio produtivo de cerâmicos históricos à análise de falhas e estudos de cerâmicos modernos.

4.8.1. Argilas

Imagens radiográficas podem ser usadas para caracterizar amostras de argila, determinando tamanho, proporção, tipo e mineralogia geral de inclusões e/ou materiais de têmpera. É possível distinguir entre classes de minerais, como félscico, máfico e opaco, considerando a densidade radiográfica, morfologia das partículas e presença, número e ângulo das faces do cristal (BERG, 2008).

A aplicação de pressão à argila plástica faz com que partículas minerais, vazios e fragmentos orgânicos assumam uma orientação preferencial, que afetará todo o corpo da argila. O alinhamento e distribuição de inclusões resultantes, bem como a forma e orientação dos vazios, são característicos de cada método de conformação e normalmente não serão obliterados por procedimentos secundários de conformação ou decoração (RYE, 1977).

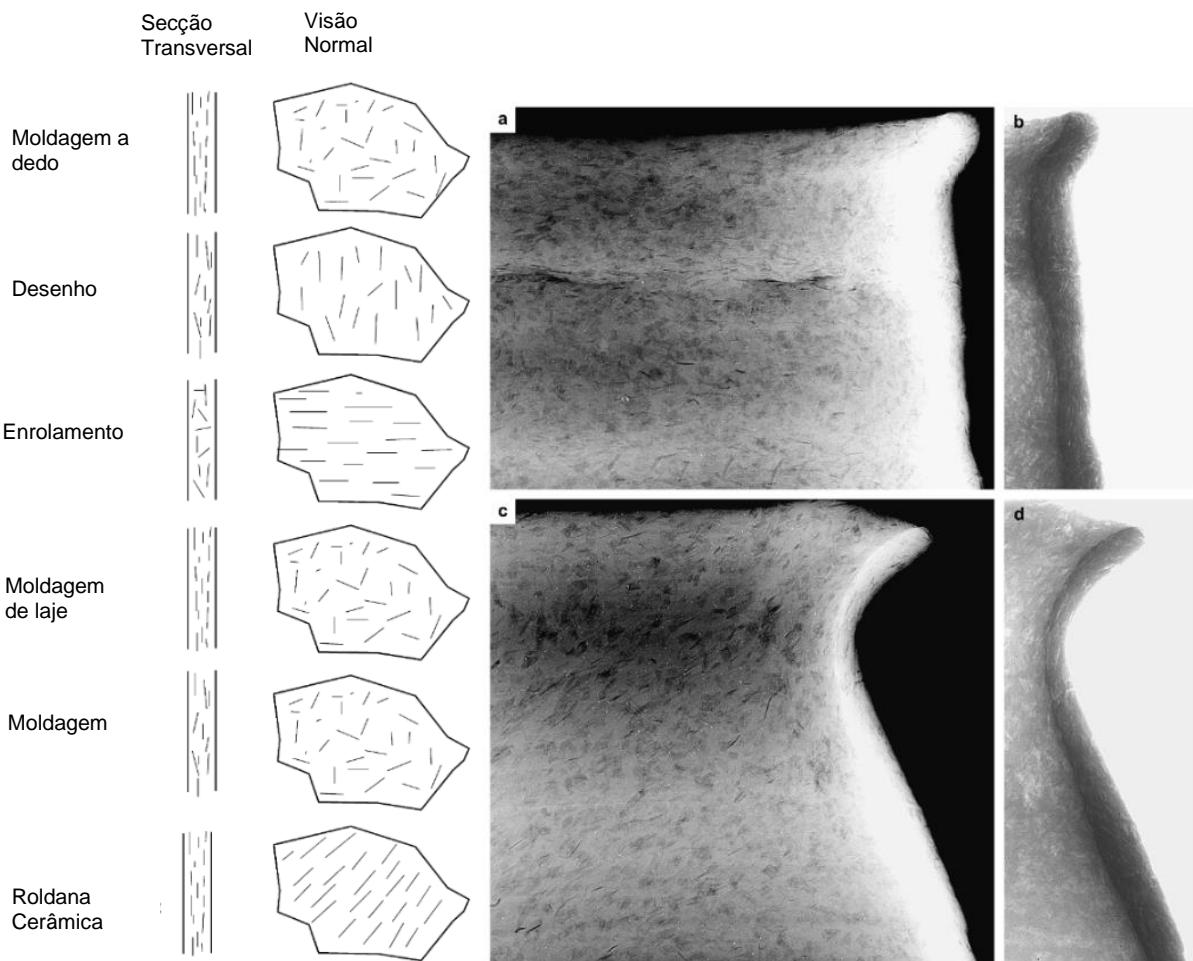


Figura 56: À esquerda: características das principais técnicas de moldagem da cerâmica. À direita: características radiográficas de cerâmicos conformados. (a) e (b) visão normal do cerâmico moldado Wheel-shaping; (c) e (d) visão normal do cerâmico moldado Wheel-made; (a) e (c) são imagens radiográficas negativas aprimoradas; (b) e (d) são imagens radiográficas positivas aprimoradas (COURTY ET AL., 1995).

Utilizando das técnicas radiológicas, como na figura acima, é possível identificar dois exemplos de como os componentes internos às amostras cerâmicas se comportam de maneira diferente conforme a técnica utilizada em sua produção. Os objetos cerâmicos históricos produzidos por uso de roda (C e D) (*Wheel-made*) é entendido como implicando o uso de uma roda que funciona a velocidades suficientemente altas para desenvolver energia cinética rotativa, que é usada para puxar e moldar a argila. Neste caso, considera-se a existência de ranhuras no corpo, estrias concêntricas na base, ondulações ao redor do pescoço, fraturas em forma de S na base e padrões verticais de

espinha de peixe como características distintas dos potes lançados pela roda. Já no caso de cerâmicos moldados por uso de roda (A e B) (*Wheel-shaping*), as velocidades não são altas o suficiente para desenvolver a energia cinética rotativa necessária, assim são usadas apenas para unir, afinar ou alisar as paredes que foram construídas com uma técnica artesanal. Neste caso, resultados podem ser distinguidos por diferentes padrões de espessura verticalmente ao longo de um fragmento em relação ao anterior (COURTY ET AL., 1995).

Não só técnicas de moldagem, mas matriz de argila, técnicas de tempera, conservação e decoração podem ser identificadas por meio de técnicas radiográficas, por meio da identificação de estruturas na superfície, espessuras e capacidade de difração conforme potência implicada na amostra. Aspectos que não poderiam ser utilizados mesmo com técnicas destrutivas da amostra, configurando a radiografia como a técnica mais recomendada em tais estudos (BERG, 2008).

4.8.2. Resistência de Cerâmicos de Al₂O₃ Fabricado Aditivados por Estereolitografia

Em cerâmicos modernos também existem diversas aplicações de técnicas radiológicas, um exemplo, é o estudo de resistência à choque térmico de cerâmicos de Al₂O₃ aditivados por estereolitografia, estudo feito por Meng et al. (2022). Cerâmicos têm sido amplamente utilizados como componentes para aplicações que envolvam altas resistências ao calor em aplicações aeroespaciais, nucleares, metalúrgicas e outras devido à sua excelente combinação de propriedades, como alta resistência, alta resistência, alta dureza e estabilidade química em alta temperatura (MENG ET AL, 2022).

Neste estudo, barras do cerâmico foram aquecidas em temperaturas variando entre 200 e 1000 °C em uma fornalha, em seguida as amostras foram postas em um banho de água à 20 °C para sofrer choque térmico por 5 segundos, em seguida, secados em um forno a 120 °C por 2 horas (MENG ET AL, 2022).

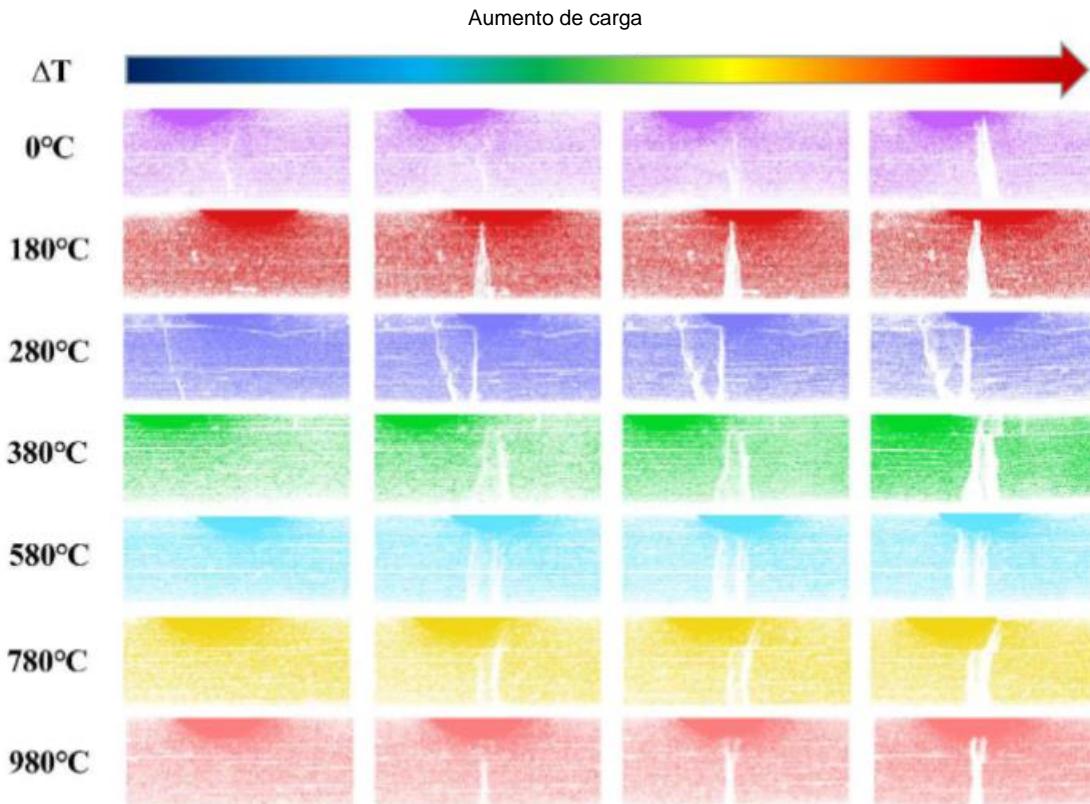


Figura 57: Evolução de trincas em cerâmicas de Al₂O₃ fabricadas com aditivos estereolitográficos em várias diferenças de temperatura (MENG ET AL, 2022).

Em seguida foram posicionadas as amostras em testes de tensão e submetidas ao Raio X para gerar imagens. A partir destas imagens foi possível determinar o comportamento do cerâmico conforme a exposição térmica do mesmo; a resistência residual diminuiu com o aumento da diferença de temperatura. A resistência residual permaneceu quase constante quando a diferença de temperatura foi inferior a 180 °C. A resistência residual diminuiu acentuadamente em diferenças de temperatura variando de 180 a 380 °C e mais lentamente de 380 a 980 °C. A diferença crítica de temperatura para essas cerâmicas de Al₂O₃ foram determinadas em 239,09 °C, que pôde ser determinada identificando pelas imagens radiográficas o comportamento de iniciação, propagação e coalescência de trincas nos corpos de prova tratados (MENG ET AL, 2022).

4.9. Metais

Além das aplicações mencionadas no início quanto à análise de falhas em metais sob processos térmicos, e todas as outras menções em estudos médicos, estruturais e compósitos, metais em suas mais diferentes formas têm uma grande necessidade de estudos não destrutivos. Na seção abaixo, são mencionados estudos de metais em estados menos comuns ao estudo na ciência metalográfica: metais em estado líquidos e metais formados em processos excepcionais, neste caso, meteoritos.

4.9.1. Metais Líquidos

Metais líquidos são usados frequentemente como fluidos de trabalho em engenharia nuclear. O eutético de chumbo-bismuto é usado como alvo líquido para um feixe de alta energia de aceleradores e fluido de trabalho em trocadores de calor em reatores. As condutividades térmicas e elétricas de um metal líquido são bastante altas em comparação com um líquido comum como a água, razão pela qual fluxos induzidos termicamente e sob campo eletromagnético de um metal líquido são bastante diferentes daqueles de um líquido comum. Sendo a visualização do fluxo e a medição do campo vetorial de fluxo são métodos importantes para estudos termo-hidráulicos e sendo os metais líquidos opacos para os raios ópticos, é impossível visualizar e medir o campo de fluxo em um metal líquido sem técnicas mais avançadas de radiologia (TAKENAKA, 1996).

Os coeficientes de atenuação dos raios de nêutrons para os metais líquidos usados na engenharia nuclear, exceto o lítio, são pequenos. Portanto, o fluxo nesses metais líquidos pode ser visto por raios de nêutrons, razão pela qual, neste estudo foi determinada a utilização de radiografia por neutros em específico, o qual foi feito por meio

de diversas imagens seguidas da amostra em operação, para que fosse possível comparar o fluxo ao longo do tempo (TAKENAKA, 1996).

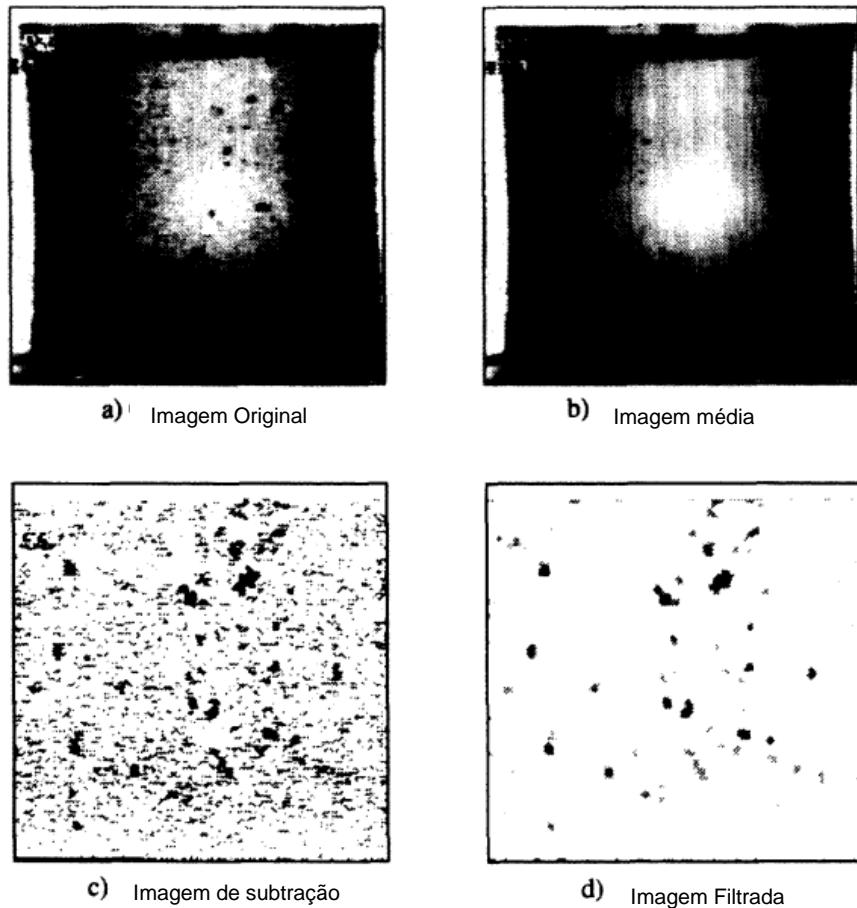


Figura 58: Procedimento de processamento de imagens para obter traçado de movimento da amostra em análise (TAKENAKA, 1996).

As imagens dos traçadores em movimento foram obtidas subtraindo a imagem média do tempo da imagem original. Com duas imagens consecutivas do traçador em movimento, foi realizado o casamento de padrões em cada ponto para obter o vetor de fluxo por meio de cálculos de correlação espacial pela equipe de pesquisadores. Em (a) e (d) na imagem acima, podem ser observados os procedimentos de processamento de imagem usados para obter a imagem dos traçadores em movimento na seção do equipamento colocado à teste. Ao calcular a média de tempo das imagens originais para 256 radiografias seguidas, a equipe conseguiu construir a imagem de média de tempo

mostrada em (b), onde os marcadores móveis (pontos em preto na imagem (a)) desaparecem e os marcadores imóveis podem ser vistos com maior clareza. Ao subtrair a imagem média do tempo da imagem original, a imagem de subtração dos traçadores em movimento com ruídos pode ser obtida como mostrado na imagem (c). Com isso, o campo vetorial de fluxo pôde ser facilmente medido a partir de imagens consecutivas como a imagem (d), deste, foi possível construir modelos do fluxo de chumbo-bismuto como o exemplificado na imagem abaixo (TAKENAKA, 1996).

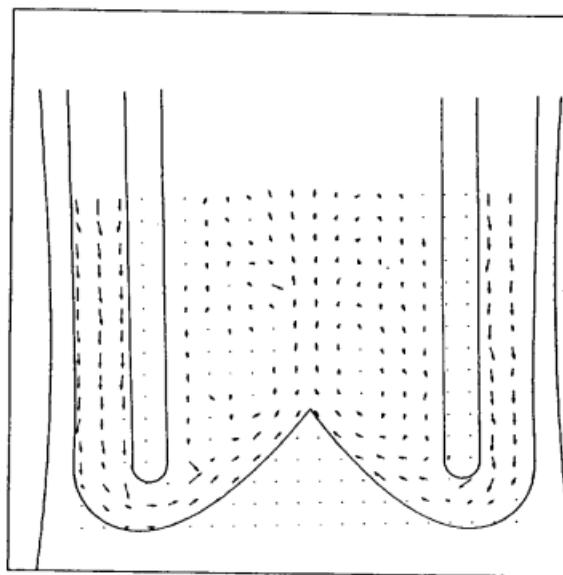


Figura 59: Exemplo de vetor de campo de fluxo obtido através das análises radiográficas espaciais por modelo de correlação no experimento (TAKENAKA, 1996).

4.9.2. Estudo Não Destrutivo de Meteoritos

Para que seja possível estudar meteoritos e outros objetos rochosos-metálicos que incidem a atmosfera terrestre, é necessário que análises (pelo menos iniciais) sejam não destrutivas. Deste modo, é possível entender as características básicas do material de forma não irreversível, e, também, localizar e determinar características internas para definir quais as regiões de corte mais interessantes de modo a não afetar estudos futuros.

(caso seja necessário). Nestes casos, pode-se utilizar da microscopia de raios X, que pode obter imagens de alta resolução de materiais a granel com contraste de orientação química, magnética, eletrônica e de ligação e da radiografia por incidência de nêutrons (JEEWANDARA, 2019).

Um dos principais meteoritos que já tiveram seu estudo feito de forma não destrutiva, é o meteorito de Allende, que é o maior condrito carbonáceo já encontrado na Terra, incidiu em 8 de fevereiro de 1969, caindo sobre o estado mexicano de Chihuahua (METEORETICAL BULLETIN, 2022). Por ter uma estrutura majoritariamente heterogênea, o Meteorito Allende se mostrou um ótimo candidato à estudos por imagens radiográficas e, com isso abriu caminho para entendimento de meteoritos anteriores a ele, e novos meteoritos que ainda viriam a ser estudados.

Utilizando de processos de análise radiográfica por raio X e microscopia espetrométrica, Lo et al. conseguiram alcançar uma resolução sem precedentes na amostra, que possibilitou a discussão da composição mineral e processos que precederam e vieram após a acreção do meteorito. Os resultados revelaram diversas texturas e canais internos que indicam veios de choque e agregados derretidos no meteorito. Usando as medidas espectroscópicas, foi possível que classificassem os principais componentes da amostra, como silicatos, sulfetos e óxidos. O trabalho multidimensional forneceu indícios sobre as origens e o transporte do meteorito Allende dentro da nebulosa solar primitiva (JEEWANDARA, 2019).

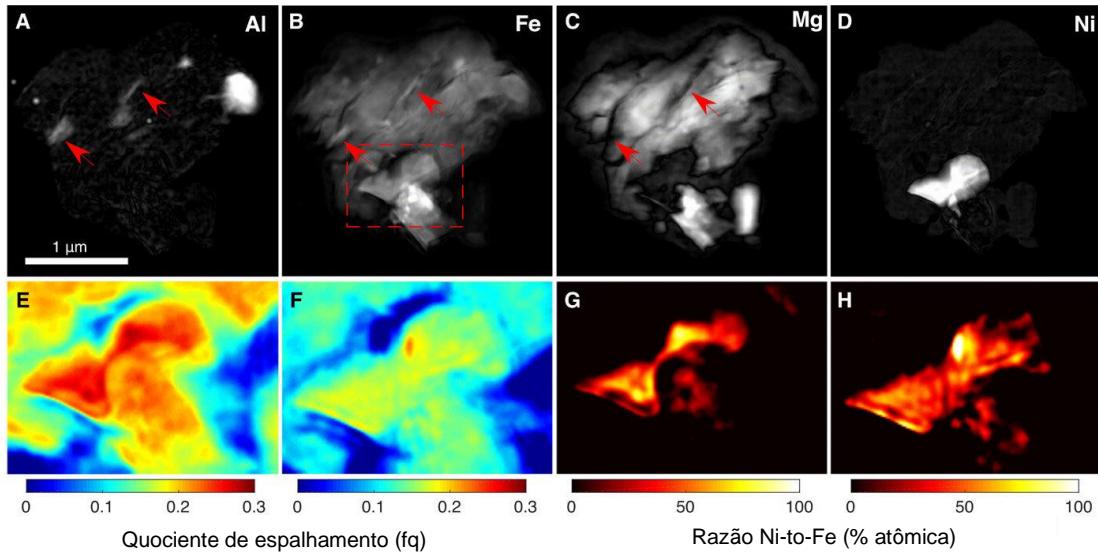


Figura 60: Pictografia de raios X e espectro-microscopia de absorção STXM. (A à D) Localização dos principais elementos do meteorito revelados pela divisão das imagens radiográficas nas bordas de absorção para Al, Fe, Mg e Ni. Os mapas de quociente de absorção, exibidos em escala logarítmica, mostram a presença de Fe nas veias de choque do silicato (setas vermelhas). (E e F) Mapas de quociente de espalhamento derivados de imagens pictográficas de Mg e Al, respectivamente. Esta região de interesse é uma visão ampliada do retângulo vermelho tracejado mostrado em (B). (G e H) Mapas de razão Ni-Fe de mapas de quociente de espalhamento Mg e Al, respectivamente. A barra colorida indica a relação Ni-Fe, onde 100% indicam uma região de sulfeto de níquel puro. (JEEWANDARA, 2019).

Em outro caso, foram estudados os meteoritos Seymchan e Marjalahti, ambos os meteoritos são palasitos e geralmente contêm grãos de olivina, liga metálica Fe-Ni e pequena quantidade de outros óxidos (BUSECK, 1969). Por meio de tomografia por incidência de nêutrons, foram feitos os estudos destes dois meteoritos. A partir das imagens geradas, foi possível construir os modelos 3D da matriz de liga metálica dos meteoritos investigados apresentados nas figuras abaixo. Utilizando destas imagens, é possível observar compactações internas distinguíveis na matéria metálica de ambos os meteoritos foram observadas, tais compactações indicam correspondência à algumas flutuações de densidade ou composição na liga de ferro-níquel (BUSECK, 1969).

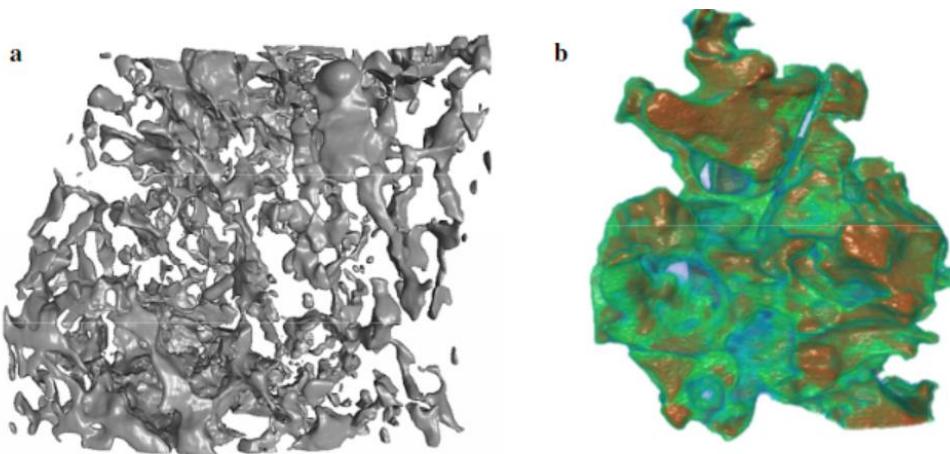


Figura 61: (a) Modelo 3D da distribuição de metal Fe-Ni no meteorito Seymchan após reconstrução tomográfica. (b) Modelo 3D da distribuição de liga metálica Fe-Ni no meteorito Marjalahti. As inclusões em vermelho representam regiões mais densas na base da liga (JEEWANDARA, 2019).

5. DISCUSSÃO

A ciência radiológica já completa mais de 100 anos de sua criação, e desde então vem expandindo sua capacidade de aplicações e refino de potencial. Apesar de ter maior popularidade como conceito nas ciências médicas, o estudo de materiais através de técnicas radiológicas permeia sua origem. Técnicas menos invasivas de estudo de metais, cerâmicos, polímeros, materiais naturais, compósitos e quaisquer outros materiais se tornam cada vez mais necessárias em um universo que muitas vezes recorre a técnicas brutalistas de estudo (cortes e deformações).

Deste modo, é necessário que técnicas não destrutivas sejam abordadas como possibilidades em mais estudos da ciência de materiais. Dentre as técnicas mais comuns de radiologia por raios X, a difração de raios X (XRD), espectrometria por fluorescência de raio X (XRF) e a espectrometria por emissão de raio X por indução de partícula (PIXE) têm maior difração de seus raios em materiais com átomos de maior número atômico, por esta razão, muitas vezes materiais com composição mais “leve” (como os polímeros) terão maior dificuldade em serem retratados, enquanto materiais com composição muito “pesada” causaram a formação de artefatos (deformações pictográficas) nas imagens (como o chumbo).

Técnicas existentes de estudo de materiais por raio X têm uma série de limitações, que em muitos casos podem ser superadas utilizando radiografia de nêutrons. No entanto, esta técnica requer instrumentação mais complexa, como um reator nuclear ou uma fonte de espalhamento de nêutrons. Radiografia de nêutrons é uma ferramenta insubstituível para algumas aplicações, como inspeção de materiais leves que acompanham materiais relativamente pesados, como líquidos dentro de pedras porosas ou metais e materiais orgânicos cercados por materiais inorgânicos. Embora a eficiência de detecção relativamente baixa, uma imagem de nêutrons pode ser obtida em poucos segundos. Tal resolução espacial é baixa em comparação com os atuais tubos de raios X micro ou nano-foco, porque é impossível atingir um foco tão pequeno da fonte de nêutrons, ao mesmo tempo, ao inspecionar materiais compostos de metal usando raios

X, artefatos fortes aparecem no material leve, originados de peças metálicas vizinhas. Consequentemente, a morfologia do material leve é difícil de observar, como o caso da imagem radiográfica de um projétil de metálico em um crânio humano (Figura 16).

De maneira menos reproduzível em pequenos laboratórios, a alta coerência longitudinal e lateral das fontes de radiográficas por sincrotron transformou radicalmente a radiografia. Antes deles, o contraste da imagem era quase apenas baseado na absorção. Fontes sincrotron coerentes transformaram a radiografia em uma ferramenta multifacetada que pode extrair informações também de efeitos de fase de amostras.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ciência radiológica é necessária e reproduzível para estudos não destrutivos em engenharia de materiais. As variadas técnicas que já existem, como as técnicas de raio X, nêutrons e sincrotron, permitem maior aplicabilidade coerente com a amostra em questão, desta maneira, considerando complexidade e composição atômica dos materiais, é possível utilizar de equipamentos que permitam estudos cada vez mais complexos.

A aplicação de radiologia em engenharia de materiais existe desde a descoberta da ciência radiológica e, existem estudos permeando uma ampla variedade de materiais, demonstrando a versatilidade do uso destas técnicas não destrutivas que incluem, mas não estão limitadas a, conformação e usinagem de metais, materiais estruturais, equipamentos modernos como baterias e espumas metálicas, estudos em implantes e técnicas forenses, polímeros de diversas aplicações, materiais celulósicos e amostras paleontológicas, cerâmicos e metais em formas desde líquida à sólidos complexos em meteoritos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADHIKARI, J.; SAHA, P.; SINHA, A. Surface modification of metallic bone implants- Polymer and polymer-assisted coating for bone in-growth. **Fundamental Biomaterials: Metals**, p. 299–321, 1 jan. 2018.
- BANHART, J. et al. X-ray and neutron imaging - Complementary techniques for materials science and engineering. **International Journal of Materials Research**, v. 101, n. 9, p. 1069–1079, 2010.
- BECKMANN, E. C. CT scanning the early days. **British Journal of Radiology**, v. 79, n. 937, p. 5–8, jan. 2006.
- BERG, I. Looking through pots: recent advances in ceramics X-radiography. **Journal of Archaeological Science**, v. 35, n. 5, p. 1177–1188, 1 maio 2008.
- BRACARENSE, A. Q. et al. Estudo comparativo de eletrodos comerciais para soldagem subaquática molhada. **Soldagem e Inspeção**, v. 15, n. 4, p. 325–335, 2010.
- BRENT BURBRIDGE, M. F. **X-rays**. University of Saskatchewan, Distance Education Unit, , 30 set. 2017. . Acesso em: 20 out. 2022
- BROCK, J. D.; SUTTON, M. Materials science and X-ray techniques. **Materials Today**, v. 11, n. 11, p. 52–55, 1 nov. 2008.
- CHEN, S. et al. Mechanism to reduce the porosity during argon arc welding of aluminum alloys by changing the arc angle. **Metals**, v. 10, n. 9, p. 1–14, 1 set. 2020.
- CHU, B.; HSIAO, B. S. Small-angle X-ray scattering of polymers. **Chemical Reviews**, v. 101, n. 6, p. 1727–1761, jun. 2001.
- CORREA, S. C. A. et al. Assessment of weld thickness loss in offshore pipelines using computed radiography and computational modeling. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 67, n. 10, p. 1824–1828, 1 out. 2009.

COURTY, M. A.; ROUX, V. Identification of wheel throwing on the basis of ceramic surface features and microfabrics. **Journal of Archaeological Science**, v. 22, n. 1, p. 17–50, 1995.

DOUGHERTY, R.; KUNZELMANN, K.-H. Computing Local Thickness of 3D Structures with ImageJ. **Microscopy and Microanalysis**, v. 13, n. S02, p. 1678–1679, ago. 2007.

ENDO, S. et al. Effects of base metal chemistry and microstructure on preferential corrosion properties of line pipe welded joints. <http://dx.doi.org/10.1080/09507119509548826>, v. 9, n. 6, p. 425–431, 2009.

ENDO, Y. et al. Imaging of ceramic liner fractures in total hip arthroplasty: the value of CT. **Skeletal Radiology**, v. 44, n. 8, p. 1189–1192, 22 ago. 2015.

EPP, J. X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization. **Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods**, p. 81–124, 1 jan. 2016.

European Synchrotron Radiation Facility (ESRF). Disponível em: <<https://www.esrf.fr/home.html>>. Acesso em: 21 out. 2022.

FLOUDAS, G. et al. Nucleation and growth in order-to-order transitions of a block copolymer. **Europhysics Letters**, v. 50, n. 2, p. 182, 15 abr. 2000.

Full ceramic implants - scientific evidence and clinical application-Coleção principal da Web of Science. Disponível em: <<https://www.webofscience.ez67.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000345958000003>>. Acesso em: 26 set. 2022.

HA, Y. C. et al. Ceramic liner fracture after cementless alumina-on-alumina total hip arthroplasty. **Clinical orthopaedics and related research**, v. 458, p. 106–110, 2007.

HAITH, M. I.; HUTHWAITE, P.; LOWE, M. J. S. Defect characterisation from limited view pipeline radiography. **NDT & E International**, v. 86, p. 186–198, 1 mar. 2017.

- HANNA, R. D.; KETCHAM, R. A. X-ray computed tomography of planetary materials: A primer and review of recent studies. **Geochemistry**, v. 77, n. 4, p. 547–572, 1 dez. 2017.
- HASSANEIN, R.; LEHMANN, E.; VONTOBEL, P. Methods of scattering corrections for quantitative neutron radiography. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 542, n. 1–3, p. 353–360, 21 abr. 2005.
- HAWKESWORTH, M. R. Neutron radiography. Equipment and methods. **Atomic Energy Review**, v. 15, n. 2, p. 169–220, 1977.
- History of Medicine: X-ray Imaging | Columbia Surgery.** Disponível em: <<https://columbiasurgery.org/news/2015/09/17/history-medicine-dr-roentgen-s-accidental-x-rays>>. Acesso em: 19 out. 2022.
- History of radiology - British Institute of Radiology.** Disponível em: <<https://www.bir.org.uk/useful-information/history-of-radiology.aspx>>. Acesso em: 21 out. 2022.
- HOLMSTAD, R. et al. Visualization and characterization of high resolution 3D images of paper samples. **Appita Journal**, v. 59, n. 5, 2006.
- HONG, X. et al. Shedding Damage Detection of Metal Underwater Pipeline External Anticorrosive Coating by Ultrasonic Imaging Based on HOG + SVM. **Journal of Marine Science and Engineering 2021, Vol. 9, Page 364**, v. 9, n. 4, p. 364, 29 mar. 2021.
- Imaging Physics. **Primer of Diagnostic Imaging**, p. 690–746, 2011.
- JACKOWSKI, C. et al. Ultra-high-resolution dual-source CT for forensic dental visualization-discrimination of ceramic and composite fillings. **International journal of legal medicine**, v. 122, n. 4, p. 301–307, jul. 2008.
- JENKINS, P. J.; DONALD, A. M. The Effect of Acid Hydrolysis on Native Starch Granule Structure. **Starch - Stärke**, v. 49, n. 7–8, p. 262–267, 1 jan. 1997.

- JIANG, M. et al. Complexation of SEBS-based ionomers with pyridine-unit-containing copolymers in solution and bulk. **Polymer**, v. 38, n. 2, p. 405–412, 1 jan. 1997.
- KALOYAN, A. A. et al. The contrast scale of minerals for neutron tomography of paleontologic and geologic objects. **Russian Geology and Geophysics**, v. 58, n. 11, p. 1435–1440, 1 nov. 2017.
- KATTI, K. S.; VERMA, D.; KATTI, D. R. Materials for joint replacement. **Joint Replacement Technology**, p. 81–104, 2008.
- KEENAN, T. R. 10.13 - Gelatin. **Polymer Science: A Comprehensive Reference**, p. 237–247, 2012.
- KHADEMI-ZAHEDI, R. Application of the finite element method for evaluating the stress distribution in buried damaged polyethylene gas pipes. **Underground Space (China)**, v. 4, n. 1, p. 59–71, 1 mar. 2019.
- KONRAD, W.; RONTGEN, R. A. On a new kind of rays. **CA: A Cancer Journal for Clinicians**, v. 22, n. 3, p. 153–157, 1 maio 1972.
- LI, J.; STACHOWSKI, M.; ZHANG, Z. Application of responsive polymers in implantable medical devices and biosensors. **Switchable and Responsive Surfaces and Materials for Biomedical Applications**, p. 259–298, 12 jan. 2015.
- LINDGREN, O. et al. Non-destructive wood density distribution measurements using computed tomography. **Holz als Roh- und Werkstoff 1992 50:7**, v. 50, n. 7, p. 295–299, 11 jan. 2018.
- LO, Y. H. et al. Multimodal x-ray and electron microscopy of the Allende meteorite. **Science Advances**, v. 5, n. 9, 20 set. 2019.
- LOOMIS, P. W. et al. Dental Identification & Radiographic Pitfalls. **Forensic Odontology: Principles and Practice**, p. 25–46, 1 jan. 2018.

MACDONALD, N.; BANKES, M. Ceramic on ceramic hip prostheses: a review of past and modern materials. **Archives of orthopaedic and trauma surgery**, v. 134, n. 9, p. 1325–1333, 2014.

MACGREGOR, E. A. Biopolymers. **Encyclopedia of Physical Science and Technology**, p. 207–245, 2003.

Malvern Panalytical | Analytical Instrumentation. Disponível em: <<https://www.malvernpanalytical.com/en>>. Acesso em: 21 out. 2022.

MARGARITONDO, G.; HWU, Y. Imaging with Coherent X-rays: From the Early Synchrotron Tests to SYNAPSE. **Journal of Imaging 2021, Vol. 7, Page 132**, v. 7, n. 8, p. 132, 4 ago. 2021.

MAYO, S. C.; STEVENSON, A. W.; WILKINS, S. W. In-Line Phase-Contrast X-ray Imaging and Tomography for Materials Science. **Materials 2012, Vol. 5, Pages 937-965**, v. 5, n. 5, p. 937–965, 24 maio 2012.

Medacta Corporate | HIP REPLACEMENT. WHY TOTAL HIP REPLACEMENT? Disponível em: <<https://www.medacta.com/EN/hip-replacement>>. Acesso em: 20 out. 2022a.

Medacta Corporate | HIP REPLACEMENT. WHY TOTAL HIP REPLACEMENT? Disponível em: <<https://www.medacta.com/EN/hip-replacement>>. Acesso em: 26 set. 2022b.

MENG, Q. et al. Thermal shock resistance study of stereolithographic additive-manufactured Al₂O₃ ceramics by in situ digital radiography. **Ceramics International**, v. 48, n. 20, p. 30086–30092, 15 out. 2022a.

MENG, Q. et al. Thermal shock resistance study of stereolithographic additive-manufactured Al₂O₃ ceramics by in situ digital radiography. **Ceramics International**, v. 48, n. 20, p. 30086–30092, 15 out. 2022b.

NI, N. et al. How the crystallography and nanoscale chemistry of the metal/oxide interface develops during the aqueous oxidation of zirconium cladding alloys. **Acta Materialia**, v. 60, n. 20, p. 7132–7149, 1 dez. 2012.

NIKULIN, A. Y. et al. In-situ x-ray diffraction profiling of cracks and metal-metal interfaces at the nanoscale. <https://doi-org.ez67.periodicos.capes.gov.br/10.1117/12.795952>, v. 7078, p. 477–488, 18 set. 2008.

PADILLA, E. et al. Image analysis of cracks in the weld metal of a wet welded steel joint by three dimensional (3D) X-ray microtomography. **Materials Characterization**, v. 83, p. 139–144, 1 set. 2013.

Peri-implantite: etiologia e tratamento. Disponível em: <http://revodontobvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-72722015000100018>. Acesso em: 27 set. 2022.

Phoenix: Transforming Nuclear Technology Since 2005. Disponível em: <<https://phoenixwi.com/>>. Acesso em: 21 out. 2022.

PIXE – EAI. Disponível em: <<https://elementalanalysis.com/pixe/>>. Acesso em: 21 out. 2022.

PODURETS, K. M. et al. Modern Methods of Neutron Radiography and Tomography in Studies of the Internal Structure of Objects. **Crystallography Reports**, v. 66, n. 2, p. 254–266, 1 mar. 2021a.

PODURETS, K. M. et al. Modern Methods of Neutron Radiography and Tomography in Studies of the Internal Structure of Objects. **Crystallography Reports**, v. 66, n. 2, p. 254–266, 1 mar. 2021b.

RAMAKRISHNA, S.; HUANG, Z.-M. Biocomposites. **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**, 2016.

RAWLINS, F. I. G. X Rays in the Study of Pictures. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-12-136-239>, v. 12, n. 136, p. 239–245, 28 jan. 2014.

ROCHE, E. J.; STEIN, R. S.; MACKNIGHT, W. J. SMALL-ANGLE X-RAY AND NEUTRON SCATTERING STUDIES OF THE MORPHOLOGY OF IONOMERS. **Journal of polymer science. Part A-2, Polymer physics**, v. 18, n. 5, p. 1035–1045, 1980.

RUDIN, A.; CHOI, P. Biopolymers. **The Elements of Polymer Science & Engineering**, p. 521–535, 2013.

RYE, O. S. POTTERY MANUFACTURING TECHNIQUES: X-RAY STUDIES. **Archaeometry**, v. 19, n. 2, p. 205–211, 1 jul. 1977.

SAFINYA, C. R.; KOLTOVER, I.; RAEDLER, J. DNA at membrane surfaces: An experimental overview. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 3, n. 1, p. 69–77, 1 fev. 1998.

SAKAMOTO, N.; HASHIMOTO, T. Ordering Dynamics of Cylindrical and Spherical Microdomains in Polystyrene-block-Polyisoprene-block-Polystyrene. 1. SAXS and TEM Observations for the Grain Formation. **Macromolecules**, v. 31, n. 24, p. 8493–8502, 1 dez. 1998.

SCHOON, J. et al. Metal-Specific Biomaterial Accumulation in Human Peri-Implant Bone and Bone Marrow. **Advanced Science**, v. 7, n. 20, p. 2000412, 1 out. 2020.

SCHREIER, H.; BOUWSTRA, J. Liposomes and niosomes as topical drug carriers: dermal and transdermal drug delivery. **Journal of Controlled Release**, v. 30, n. 1, p. 1–15, 1 abr. 1994.

SERA, K. Particle-Induced X-Ray Emission. **Compendium of Surface and Interface Analysis**, p. 425–434, 2018.

SHAFIZADEH, A. et al. Quantification of Water Content Across a Cement-clay Interface Using High Resolution Neutron Radiography. **Physics Procedia**, v. 69, p. 516–523, 1 jan. 2015.

SNOECK, D. et al. Visualization of water penetration in cementitious materials with superabsorbent polymers by means of neutron radiography. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 8, p. 1113–1121, ago. 2012.

SURYANARAYANA, C.; INOUE, A. Iron-based bulk metallic glasses. **International Materials Reviews**, v. 58, n. 3, p. 131–166, abr. 2013.

TAKENAKA, N. et al. Liquid metal flow measurement by neutron radiography. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 377, n. 1, p. 156–160, 21 jul. 1996.

The Nobel Prize in Physics 1901 - NobelPrize.org. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/summary/>>. Acesso em: 19 out. 2022.

TRTIK, P. et al. 3D imaging of microstructure of spruce wood. **Journal of Structural Biology**, v. 159, n. 1, p. 46–55, 1 jul. 2007.

VANAEI, H. R.; ESLAMI, A.; EGBEWANDE, A. A review on pipeline corrosion, in-line inspection (ILI), and corrosion growth rate models. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 149, p. 43–54, 1 jan. 2017.

WEISSLEDER, R. Chapter 13: Contrast Agents. **Primer of Diagnostic Imaging**, p. 680–689, 2011.

What is a synchrotron? Disponível em: <<https://www.esrf.fr/about/synchrotron-science/synchrotron>>. Acesso em: 2 out. 2022.

WONG, H. S. Concrete with superabsorbent polymer. **Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures**, p. 467–499, 1 jan. 2018.

WU, Y. et al. Multi-length scale characterization of compression on metal foam flow-field based fuel cells using X-ray computed tomography and neutron radiography. **Energy Conversion and Management**, v. 230, 15 fev. 2021.

X ray diff lecture 3. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/Ouniyeh/x-ray-diff-lecture-3>>. Acesso em: 21 out. 2022.

X-ray Diffraction Analysis of Polymers - Advancing Materials. Disponível em: <<https://www.thermofisher.com/blog/materials/x-ray-diffraction-analysis-of-polymers/>>. Acesso em: 4 out. 2022.

X-rays – Undergraduate Diagnostic Imaging Fundamentals. Disponível em: <<https://openpress.usask.ca/undergradimaging/chapter/x-rays/>>. Acesso em: 15 out. 2022.

XRF: X-Ray Fluorescence Spectroscopy | Hi Rel Parts | Alter Technology. Disponível em: <<https://wpo-altertechnology.com/xrf-x-ray-fluorescence-spectroscopy-hi-rel-parts/>>. Acesso em: 21 out. 2022.

YAHAGHI, E.; MADRID GARCIA, J. A.; MOVAFEGHI, A. Fracture and internal structure detection of ceramic objects using improved digital radiography images. **Journal of Cultural Heritage**, v. 44, p. 152–162, 1 jul. 2020a.

YAHAGHI, E.; MADRID GARCIA, J. A.; MOVAFEGHI, A. Fracture and internal structure detection of ceramic objects using improved digital radiography images. **Journal of Cultural Heritage**, v. 44, p. 152–162, 1 jul. 2020b.

YAN, Z. et al. An Enhancement Technology on Fluoroscopy Imaging Using Xray Fluorescence. p. 1–4, 9 set. 2022.

8. APÊNDICE 1 – FORMULÁRIO

Aplicações Radiográficas em Análise de Materiais

Este questionário faz parte da elaboração de tese de conclusão de curso intitulada "Aplicações Radiológicas em Engenharia de Materiais", elaborado por Luís Fernando Jardim sob supervisão do Prof. Dr. Eduardo Monlevade, do curso de Engenharia de Materiais na Escola Politécnica da USP.

O formulário é anônimo e não recolhe dados pessoais dos participantes, tem por objetivo traçar um panorama do conhecimento dos estudantes da Escola Politécnica quanto a técnicas radiográficas em análise de materiais.

O tempo estimado para completar o formulário é de 2 minutos.

Em qual ano de sua graduação você se encontra?

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 ou mais

Qual sua Engenharia?

- Materiais
- Metal
- Outra: _____

Você já ouviu falar de técnicas radiográficas de análise de materiais?

- Sim
- Não

Quais destes materiais você acredita que poderiam ser estudados por técnicas radiográficas?

- Tecidos Orgânicos (humanos, animais)
- Materiais Naturais (madeira, papel)
- Metais
- Cerâmicos
- Polímeros
- Compósitos
- Nenhum dos materiais acima

Como você classificaria seu conhecimento em técnicas radiográficas em análise de materiais

- Já estudei/utilizei técnicas radiológicas em análise de materiais
- Tenho algum conhecimento sobre suas aplicações
- Sei pouco sobre o assunto
- Não tenho conhecimento sobre o assunto

Quais das técnicas abaixo você conhece?

- Difração de Raio X
- Espectrometria por Fluorescência de Raio X
- Espectrometria por Emissão de Raio X por Indução de Partícula
- Tomografia Computadorizada
- Técnicas de Radiologia de Nêutrons
- Técnicas Radiológicas por Síncrotron
- Nenhuma das técnicas acima

Quão relevante você acredita que seja estudar este campo de conhecimento para sua formação?

- Muito relevante
- Relevante

- Pouco relevante
- Nada relevante
- Não sei opinar