



ESTUDO DOS PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA NA **INSPEÇÃO DIMENSIONAL E** **INTEGRIDADE ESTRUTURAL**

Rubens Gabriel Rezende Nunes
Thiago Gomes Cardoso
Thiago Ferreira Querino

Atena
Editora
Ano 2022



ESTUDO DOS PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA NA **INSPEÇÃO DIMENSIONAL E** **INTEGRIDADE ESTRUTURAL**

Rubens Gabriel Rezende Nunes
Thiago Gomes Cardoso
Thiago Ferreira Querino


Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Estudo dos princípios e aplicações da tomografia computadorizada na inspeção dimensional e integridade estrutural

Diagramação: Natália Sandrini de Azevedo
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Autores: Rubens Gabriel Rezende Nunes
Thiago Gomes Cardoso
Thiago Ferreira Querino

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

N972 Nunes, Rubens Gabriel Rezende
Estudo dos princípios e aplicações da tomografia
computadorizada na inspeção dimensional e
integridade estrutural / Rubens Gabriel Rezende
Nunes, Thiago Gomes Cardoso, Thiago Ferreira
Querino. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-738-0

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.380221301>

1. Tomografia computadorizada. 2. Ensaio não
destrutivo. 3. Metrologia. I. Nunes, Rubens Gabriel Rezende.
II. Cardoso, Thiago Gomes. III. Querino, Thiago Ferreira. IV.
Título.

CDD 616.0757

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



AGRADECIMENTOS

À minha família e amigos pelo apoio e companheirismo durante esse momento de elevadas dificuldades durante a pandemia de Covid-19.

Ao Professor Me. Thiago Gomes Cardoso e ao Professor Me. Thiago Ferreira Querino, pela oportunidade, apoio e ensinamentos que me foram fornecidos antes e durante a realização deste trabalho. É uma honra poder trabalhar com os senhores e jamais me esquecerei dos momentos lúdicos e árduos.

À professora Dra. Catarina e Professora Dra. Érica pelos ótimos momentos durante as aulas de filosofia e redação, respectivamente, além dos incentivos que me foram dados.

Por fim, sou grato a todos os docentes com quem convivi ao longo de todos esses anos, que causaram, direta ou indiretamente, impacto na minha formação acadêmica. Espero que vosso trabalho se torne mais valorizado no futuro do nosso país.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	1
RESUMO	3
ABSTRACT	4
CAPÍTULO 1.....	5
INTRODUÇÃO	
CAPÍTULO 2.....	8
ESTADO DA TÉCNICA	
Histórico da Tomografia	8
Modalidades da Tomografia Computadorizada.....	11
Tomografia por Capacitância Elétrica	11
Tomografia de Impedância Elétrica.....	13
Tomografia de Indução Magnética.....	14
Tomografia de Transmissão de Ultrassom	15
Imagem Por Ressonância Magnética.....	17
Tomografia Computadorizada de Raios X ou Gama.....	19
Fonte de Raios X.....	21
Detectores de Raios X	26
Sistema Cinemático	28
Processamento das Imagens Pelo Computador	29
Exemplos de Aplicações da Tomografia Computadorizada de Raios X.....	30
CAPÍTULO 3.....	34
AVALIAÇÃO DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA QUANTO AO USO NOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	
Falhas e Imperfeições.....	34
Principais Descontinuidades Em Processos de Soldagem	35
Porosidade	35
Inclusão de Escória	35
Trincas	36

Respingos.....	37
Falta de Fusão.....	38
Falta de Penetração.....	38
Fundição e Suas Principais Descontinuidades.....	39
Bolhas Gasosas.....	39
Inclusões.....	40
Vazios de Contração.....	40
Porosidade.....	41
Mordeduras.....	41
Trincas de Contração.....	42
Peça incompleta.....	43
Gotas Frias.....	43
Segregação.....	43
Chapelins Não Fundidos.....	43
Interrupção de Vazamento.....	43
Forjamento e Suas Principais Descontinuidades.....	43
Trincas Superficiais.....	44
Trincas nas Rebarbas.....	44
Trincas Internas.....	44
Incrustações de Óxidos.....	44
Descarbonetação.....	44
Queima.....	44
Gotas Frias.....	44
Conceituando os Ensaios Não Destrutivos.....	45
Inspeção Visual.....	45
Líquido Penetrante.....	46
Partículas Magnéticas.....	47
Radiografia.....	48
Ultrassom.....	49
Aplicações da Técnica TC.....	51
Primeiro Exemplo de aplicação da TC em END.....	54

Segundo Exemplo de aplicação da TC em END.....	55
Vantagens e Desvantagens Gerais da Tomografia Computadorizada.....	57
Conclusão Quanto ao Uso da TC em END's	58
CAPÍTULO 4.....	59
ANÁLISE DA TC QUANTO AO USO COMO SISTEMA DE MEDIÇÃO DIMENSIONAL	
Introdução a Conceitos Fundamentais da Metrologia.....	59
Compreendendo as Tolerâncias Dimensionais e os Ajustes.....	59
Compreendendo as Tolerâncias Geométricas.....	62
Apresentando as Capacidades de Medições Dimensionais da Tomografia Computadorizada.....	66
Resolução da TC.....	66
Tempo de Varredura da TC v.s. Tempo de varredura da MMC.....	68
Espessura Máxima de Material Penetrável	70
Capacidades da TC em Medir Produtos Multimateriais	70
Avaliação de Tolerâncias Dimensionais com a Tecnologia da TC.....	73
Apresentando Estudos de Casos e Exemplos da Literatura.....	75
Avaliação de Tolerância Geométricas com a Tecnologia da TC.....	87
Apresentando Estudos de Casos e Exemplos da Literatura.....	87
Conclusão	93
CAPÍTULO 5.....	95
PROPOSIÇÃO DE FONTES DE INCERTEZA NO RESULTADO DE MEDIÇÃO COM USO DA TC	
Revisão Bibliográfica – Aspectos Importantes da Metrologia	95
Metrologia.....	95
Precisão de medição v.s. Exatidão de Medição	95
Grandezas e Mensurando.....	96
Sistema Internacional de Unidades	96
Instrumento de Medição e Sistema de Medição.....	97
Erros Sistemático e Erro Aleatório	97
Revisão Bibliográfica – Incerteza de Medição	98
Definição de Medição e do Mensurando	98

Identificando as Grandezas de Influência	99
Obtenção do Modelo Matemático	101
Avaliação da Incerteza-Padrão	103
Incerteza-Padrão Tipo A	103
Incerteza-Padrão do Tipo B.....	104
Incerteza-Padrão Combinada.....	105
Incerteza Expandida e o Resultado de Medição	105
Fontes de Erro e Fontes de Incerteza da Tomografia Computadorizada	107
Sistema da TC.....	108
Fonte de Raios X	108
Detectores de Raios X	109
Sistema de Posicionamento.....	109
Peças de Trabalho.....	110
Condições do Meio Ambiente	112
Software e Processamento de Dados	112
Operador.....	115
Considerações Finais	117
REFERÊNCIAS	119
SOBRE OS AUTORES	126

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	Manufatura Aditiva
As	Arsênio
CAD	Desenho Assistido por Computador
Cd	Cádmio
DB	Espécime de Osso de Cachorro Miniaturizado
DTU	<i>Danmarks Tekniske Universitet</i> (Universidade Técnica da Dinamarca)
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
END's	Ensaio Não Destrutivo
FBP	Algoritmos de Retroprojeção Filtrado
FDM	Modelagem de Deposição Fundida
Ga	Gálio
GPU	Unidades de Processamento Gráfico
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i> – (Guia para a Expressão de Incerteza de Medição)
IMR	Imagem por Ressonância Magnética
LCP	Polímero de Cristal Líquido
microCT	Micro Tomógrafo de Raios X
MMC	Máquinas de Medição por Coordenadas
MMCO	MMC óptico equipado com sensor de processamento de imagem de vídeo
mTC	Tomografia computadorizada com tamanho de foco no nível de micrometro
nCT	Tomografia Computadorizada com Tamanho de Foco no Nível de Nanômetro
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i> (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia)
POM	Acetal de Polioximetileno
QE	Eficiência Quântica
RF	Radiofrequência
RM	Ressonância Magnética
Si	Silício
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
SMC	Sistema de Medição de Coordenadas Tátil
SNR	Relação Sinal Ruído
TC	Tomografia Computadorizada
TCE	Tomografia por Capacitância Elétrica
TCR	Tomografia Computadorizada de Raios X ou Gama
Te	Telúrio
TEM	Tomografia Eletromagnética

TIE	Tomografia de Impedância Elétrica
TIM	Tomografia de Indutância Mútua
TTU	Tomografia de Transmissão de Ultrassom
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
VS	Tamanho do Voxel Resultante
Zn	Zinco

RESUMO

O setor industrial é essencial para a economia, assim como a necessidade que ele seja eficiente e fabrique itens de qualidade. Para isso, esse setor utiliza-se de diversos sistemas de medição visando garantir a qualidade e conformidade dos produtos criados. Entretanto, à medida que os procedimentos de fabricação evoluem, como o advento da manufatura aditiva, novas formas de controle da qualidade e técnicas de inspeção são empregadas, objetivando aumento de performance, o nível de satisfação do cliente e, por conseguinte, a competitividade da empresa. Uma das formas para se garantir a qualidade e intercambiabilidade dos componentes manufaturados é a aplicação de normas relacionadas ao estabelecimento de tolerâncias dimensionais e geométricas, as quais por meios tradicionais podem ser de difícil medição, principalmente quando se trata das tolerâncias geométricas do produto. Nesse sentido, a aplicação por parte da indústria de novas tecnologias não convencionais se demonstra necessária. A tomografia computadorizada, que possui raízes e aplicações mais comuns na medicina, tem demonstrado grande potencial como sistema de medição a ser utilizado na avaliação não destrutiva de peças visando detectar defeitos e descontinuidades, como poros e inclusões. Deste modo, este projeto propõe-se a aprofundar os conhecimentos nesse novo método, desvendando seus princípios físicos de funcionamento, principais componentes desse sistema de medição, sua aplicação para avaliação de tolerâncias dimensionais e geométricas, sua interface com outras aplicações na mecânica, assim como buscar na literatura quais são as principais fontes de incerteza para a determinação do resultado de medição com essa técnica de acordo com as normas vigentes. Além disso, averiguar-se-á quais são, caso existam, as normas que atualmente se aplicam às medições com tal técnica formatando-se uma revisão bibliográfica condensada acerca dessa tecnologia uma vez que as informações se encontram dispersas na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Tomografia computadorizada, Ensaio não destrutivo, Metrologia.

ABSTRACT

The industrial sector is essential for the economy, as well as the need for it to be efficient and manufacture quality items. For this, this sector uses several measurement systems to ensure the quality and conformity of the products created. However, as manufacturing procedures evolve, with the advent of additive manufacturing, new forms of quality control and inspection techniques are employed, aiming to increase performance, the level of customer satisfaction and, therefore, the competitiveness of the company. One of the ways to guarantee the quality and interchangeability of manufactured components is the application of standards related to the establishment of dimensional and geometric tolerances, which by traditional means can be difficult to measure, especially when it comes to the product's geometric tolerances. In this sense, the application by the industry of new unconventional technologies is shown to be necessary. Computed tomography, which has more common roots and applications in medicine, has shown great potential as a measurement system to be used in the non-destructive evaluation of parts to detect defects and discontinuities, such as pore and inclusions. Thus, this project proposes to deepen the knowledge of this new method, unveiling its physical operating principles, the main components of this measurement system, its application to the evaluation of dimensional and geometric tolerances, its interface with other applications in mechanics, as well as seeking in the literature what are the main sources of uncertainty for determining the measurement result with this technique in accordance with current standards. In addition, it will be investigated which, if any, are the standards that currently apply to measurements with this technique, formatting a condensed bibliographic review about this technology since the information is dispersed in the literature.

KEYWORDS: Computed Tomography, Non-Destructive Testing, Metrology.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Sendo apresentada em 1971, a tomografia computadorizada (TC) se tornou uma das mais importantes tecnologias desde a descoberta dos raios X pelo físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen em 1895 (CARVALHO, 2007; FREITAS, 2014). Sua aplicação se dá inicialmente na área médica, pois a TC permitiu observar o interior do corpo humano de forma não invasiva, possibilitando a análise de tecidos menos densos, sem que houvesse a superposição das estruturas anatômicas como ocorre com as radiografias (NARDELLI, 2012; SILVA, 2018). Entretanto, tal tecnologia não teve sua aplicação limitada a medicina e atualmente está ganhando cada vez mais espaço dentro da indústria, principalmente no que diz respeito à metrologia e ensaios não destrutivos.

Inicialmente, entender-se-á que o substantivo “tomografia” deriva do grego “tomos”, que significa corte, e “grafia”, que significa imagem. Dessa forma, pode-se designar que tomografia é uma tecnologia capaz de reconstruir a imagem de um determinado objeto a partir de suas projeções (NARDELLI, 2012; SILVA, 2018).

A tomografia computadorizada (TC) pode ser descrita como um processo onde há, na grande maioria dos equipamentos, uma fonte de radiação que emite raios X. Esses são impostos a travessia de um determinado objeto (o objeto será irradiado por todas as direções) e chegam a um conjunto de detectores. Tendo ciência da intensidade inicial dos raios X (quando esse é utilizado) e medindo a intensidade dos mesmos na chegada aos detectores é possível reconstruir a estrutura/forma do objeto que foi sujeito a irradiação, tendo-se auxílio dos computadores para efetuar esse processo. Na FIG. 1 é apresentado alguns dos componentes básicos da TC. (HARAGUCHI; KIM; MACHADO, 2015; NARDELLI, 2012; SILVA, 2018; SOUSA; VERÍSSIMO; MACEDO, 2012).

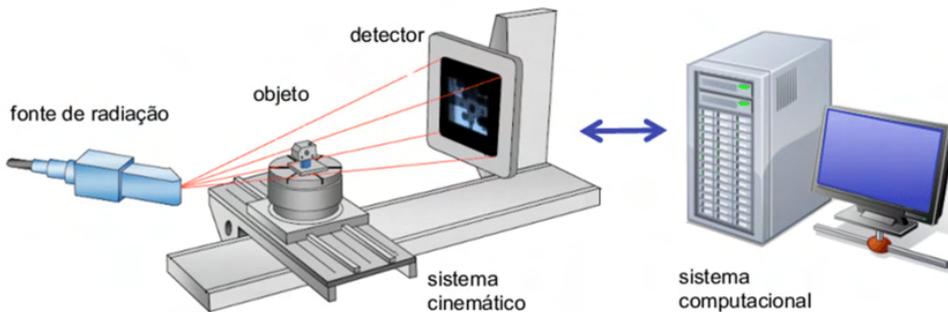


Figura 1 – Componentes básicos de um sistema de tomografia computadorizada.

Fonte: (NARDELLI, 2012, p. 27).

Importante ressaltar que a intensidade dos raios X medida inicialmente, antes de serem propagados através do objeto analisado, difere da intensidade dos raios X medida pelos detectores, após terem atravessado o objeto irradiado. Isso acontece porque a intensidade dos raios X é atenuada, dependendo do material do objeto analisado e suas dimensões. A distribuição de intensidade da radiação atenuada (remanescente) é medida e armazenada de forma digital como uma imagem com valores de cinza TC (HARAGUCHI; KIM; MACHADO, 2015; NARDELLI, 2012; SOUSA; VERÍSSIMO; MACEDO, 2012b, a).

A seguir, a FIG. 2 apresenta um exemplo de uma peça de alumínio avaliada com um tomógrafo computacional. Foram medidas as suas dimensões com intuito de demonstrar essa técnica. Deve-se ressaltar que, conforme será visto em seção posterior, existem outras modalidades de TC além da de Raios X.

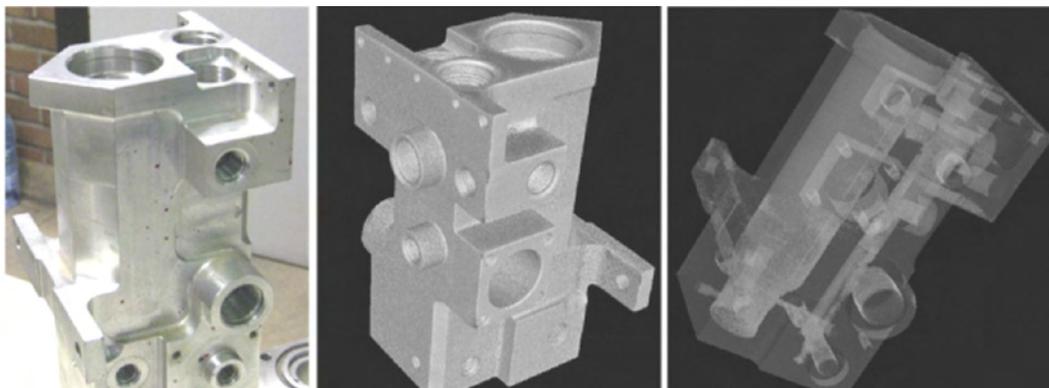


Figura 2 – Componente de Alumínio (120 mm x 120 mm x 220 mm) medido com TC.

Fonte: Adaptado de (CHIFFRE et al., 2014, p. 664).

A possibilidade de reconstruir o formato de um objeto de maneira não invasiva, como o componente de alumínio acima, pode explicar o porquê dessa tecnologia estar cada vez mais presente na indústria, principalmente dentro da área da metrologia (o estudo das medições e suas aplicações) e ensaios não destrutivos na verificação de defeitos e descontinuidades internas. Ademais, a história da Tomografia Computadorizada e sua presença na indústria serão abordados mais adiante neste presente estudo.

Este trabalho foi organizado da seguinte forma:

- Capítulo I: fez-se uma introdução ao tema do trabalho, fornecendo um contexto e apresentando algumas informações a respeito do tema desta pesquisa;
- Capítulo II: será brevemente exposto a história da TC e depois aprofundar-se-á nas diferentes modalidades de TC existentes;
- Capítulo III: Analisar-se-á o uso da tecnologia da TC em ensaios não destrutivos, mostrando alguns ensaios não destrutivos existentes, sua finalidade, entre outros;
- Capítulo IV: serão explicadas várias características da TC, com foco em aplicações industriais e em como a tecnologia da TC é capaz de avaliar tolerâncias dimensionais e geométricas;
- Capítulo V: Apresentar-se-á as principais fontes de erro da TC;
- Capítulo VI: por fim, tem-se as referências bibliográficas utilizadas.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA TÉCNICA

O presente capítulo tem como objetivo apresentar uma breve revisão bibliográfica dos conceitos fundamentais assim como a história por trás da tomografia computadorizada. Para tornar a compreensão mais eficiente, será também abordado o princípio de funcionamento das diversas modalidades de tomografia computadorizada, mantendo sempre o foco para a área industrial.

HISTÓRICO DA TOMOGRAFIA

Primeiro, entender-se-á que reconstrução de uma imagem espacial a partir de perspectivas ligeiramente distintas é o que consiste a estereoscopia, um fenômeno natural que ocorre em muitos animais com visão binocular e também no ser humano.

Segundo (RIBAS; RIBAS; RODRIGUES JR., 2006) os olhos humanos posicionados ante a face permitem que um objeto seja observado a partir de dois pontos de vista ligeiramente distintos (FIG. 3) e com essas informações visuais o sistema nervoso central nos permite perceber a profundidade.

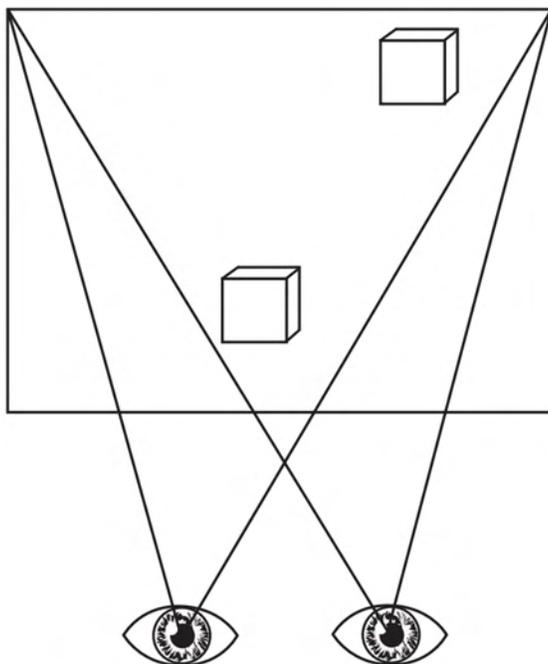


Figura 3 – Esquema da visão binocular.

Fonte: (RIBAS, RIBAS, RODRIGUES JR., 2006, p. 79).

A capacidade do cérebro humano em converter imagens bidimensionais em imagens tridimensionais é muito elevada e, por mais intuitivo que aparenta ser, o desenvolvimento de uma tecnologia capaz de efetuar uma reconstrução de imagens tão detalhadas e precisas como o tomógrafo computadorizado (TC) apenas se tornou possível após vários processos e evoluções que podem ser datados a partir do século XX (FREITAS, 2014; RIBAS; RIBAS; RODRIGUES JR., 2006). Porém, tentar-se-á de ordenar os fatos históricos em ordem cronológica.

No início do século XX Johann Radon, um matemático austríaco, demonstrou matematicamente que um objeto tridimensional poderia ser reproduzido a partir de um conjunto de projeções e desenvolveu uma equação denominada “a transformada de Radon”. Importante ressaltar que uma “transformada integral” é uma espécie particular de operadores matemáticos e a “transformada de Radon” se tornaria fundamental para a tomografia computadorizada após sua demonstração. (RIBAS; RIBAS; RODRIGUES JR., 2006; SOUSA; VERÍSSIMO; MACEDO, 2012a) .

A TC médica começou a ser desenvolvida lentamente nos anos 60 por falta de apoio matemático. William H. Oldendorf foi um médico neurologista que em 1961 construiu manualmente um sistema de reconstrução de uma seção transversal de um objeto constituído

de argolas de Ferro e Alumínio. Dessa forma, ele efetuou a mais prematura demonstração do desenvolvimento da tomografia computadorizada. Apesar de seus esforços, o seu estudo experimental utilizou um método que resultou em uma retroprojeção simples que necessitava de extensa análise. Oldendorf trabalhou sem apoio de matemáticos e sem ter noção de trabalhos matemáticos como o de Radon.

Além do Oldendorf, em 1963 o médico Kuhl e o engenheiro Edwards criaram um método de imagem para mostrar a distribuição de radionuclídeos (uma forma instável de um elemento químico que libera radiação à medida que se quebra e se torna mais estável, podendo ser natural ou feito em laboratório). Contudo, a imagem obtida, mesmo após anos de estudos clínicos, não era superior em relação aos equipamentos existentes na época. Novamente, a lacuna de uma base matemática para um mapeamento acurado não havia sido preenchida, era preciso um sistema de computador que efetuasse os cálculos e a projeção mais rapidamente (CAPELETI, 2014; CARVALHO, 2007).

A contribuição matemática fundamental para o problema foi feita entorno de 1964 pelo matemático e físico Allan Cormack quando ele desenvolveu os métodos de cálculo avançado de computador necessários para que a TC fornecesse imagens tridimensionais de elevada qualidade das secções transversais de um corpo (CAPELETI, 2014; CARVALHO, 2007). Dentre as ferramentas utilizadas para o bom funcionamento da TC, está a “transformada de Radon” citada anteriormente nesta presente seção.

A contribuição de Allan Cormack foi fundamental para o desenvolvimento da primeira tomografia computadorizada, mas ele não foi o único responsável desse feito. Godfrey N. Hounsfield foi um engenheiro eletricitista britânico que, por volta dos anos 60, já tinha ideias de estudar o interior de objetos tridimensionais a partir da reconstrução obtida pela absorção heterogênea de radiação pelos diferentes componentes (CAPELETI, 2014; CARVALHO, 2007).

O protótipo inicial usava uma fonte de amerídio-241, emissora de raios gama, e levou nove dias para processar uma imagem simples. Ao adquirir um tubo e um gerador de raios X, cujas propriedades eram bem conhecidas e assim as informações seriam confiáveis, o tempo de aquisição de imagens foi reduzido para nove horas (CAPELETI, 2014; CARVALHO, 2007).

Ao lado do radiologista Dr. Ambrose, Hounsfield fez imagens experimentais com peças e animais até que o Dr. Ambrose selecionou um paciente com suspeitas de ter um tumor no lobo frontal esquerdo do cérebro para fazer a primeira imagem diagnóstica. As imagens obtidas foram apresentadas no congresso anual do *British Institute of Radiology*, em 20 de abril de 1972. Em 1973, após 18 meses de uso do primeiro equipamento construído para uso clínico, Hounsfield ao lado do Dr. Ambrose apresentaram os resultados e experiências em artigos publicados (CAPELETI, 2014; CARVALHO, 2007).

Essa tecnologia não parou de evoluir, sendo criados a primeira, segunda, terceira e quarta geração, os modelos helicoidais, cada vez mais rápidos e baratos de se produzir. Segundo (CARVALHO, 2007), o Brasil recebeu o seu primeiro tomógrafo na cidade de São Paulo no “Hospital da Real e Benemérita Sociedade Portuguesa de Beneficência, em 1977. Logo depois, o primeiro aparelho do Rio de Janeiro iniciou seu funcionamento, em 28 de julho de 1977, na Santa Casa de Misericórdia.”

Em 1979, Godfrey N. Hounsfield e Allan Cormack receberam o prêmio Nobel de Medicina, tendo como motivação do prêmio “o desenvolvimento da tomografia assistida por computador” (CARVALHO, 2007; NOBELPRIZE.ORG, 2020).

MODALIDADES DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

No mercado existem diversos tipos de Tomógrafos Computadorizados, no entanto, cada modelo apresenta características próprias em virtude de seu mecanismo, processo de funcionamento e aplicação. Apresentar-se-á, de maneira simplificada, as características gerais das diversas modalidades da tomografia computadorizada. Importante apontar que as seções a seguir seguem a mesma ordem presente em (WANG, 2015).

Tomografia por Capacitância Elétrica

A Tomografia por Capacitância Elétrica (TCE) é altamente difundida e utilizada para o monitoramento de escoamentos multifásicos em processos industriais. Isso se dá em virtude da sua característica não invasiva, não necessita de movimentar suas peças e sua facilidade em obter imagens em tempo real desse tipo de escoamento (RANGHETTI, 2016; WANG, 2015).

A TCE faz suas medições através das capacitâncias de um sistema com eletrodos montados ao redor de um tubo não condutor. Geralmente, a tomografia por capacitância elétrica é constituída por: sensores de capacitância, sistema de aquisição de dados eletrônica e sistema de imagem ou computador (FIG. 4), (BARROS, 2011; WANG, 2015).

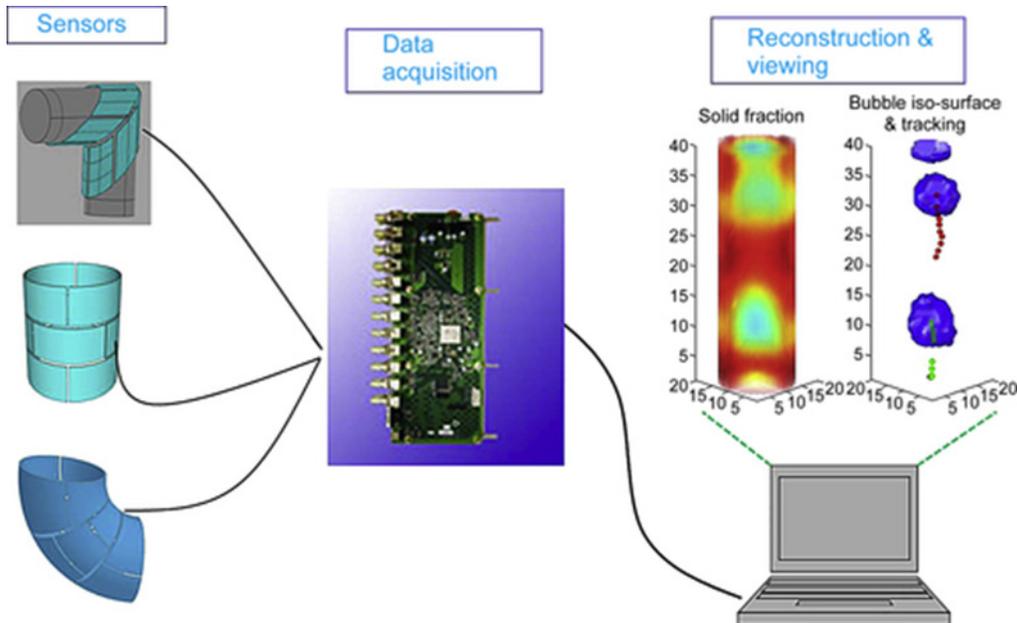


Figura 4 – Os sistemas básicos da tomografia por capacitância elétrica (TCE).

Fonte: Adaptado de (WANG, 2015, p. 5).

O princípio de funcionamento da TCE, segundo (BARROS, 2011; MOURA, 2018; WANG, 2015), funciona da seguinte forma:

- Um sensor capacitivo da TCE faz uso de campos elétricos que cobrem uma região sensorial, onde ocorre o escoamento do processo que se deseja obter a imagem, com um campo energizado. Um sinal de alta frequência (vários MHz) é aplicado aos eletrodos selecionados, resultando no desenvolvimento de um campo elétrico dentro do tubo.
- O corpo submetido ao processo de medição da TCE está dentro da região sensorial e, devido a distribuição permissiva do campo elétrico e do volume do corpo, ocorrerá uma distorção no campo elétrico emitido. Os efeitos dessa distorção do campo nos eletrodos serão medidos pelo sistema de aquisição de dados. Por fim, o algoritmo de reconstrução do sistema de imagem/computador irá decodificar as informações e reconstruir a imagem do corpo.

Como dito no início desta presente seção, a TCE é altamente difundida e utilizada para o monitoramento de escoamentos multifásicos em processos industriais. Um exemplo de seu uso se dá na separação dos ingredientes básicos para a produção dos produtos finais, onde a indústria muitas vezes utiliza um sistema de fluidos multifásico. Tal separação é muito frequente na produção de petróleo e gás natural em que, ao ser explorado os

poços de petróleo, as fases constituintes do escoamento multifásico (água, óleos, gases e outros contaminantes como areia) não se misturam de forma homogênea. (MORAIS, 2013; RANGHETTI, 2016).

Devido à alta complexidade na produção de petróleo e gás natural e com intuito de aperfeiçoamento das técnicas de equipamentos envolvidas nas etapas de produção desses produtos, (RANGHETTI, 2016) no seu trabalho de conclusão do curso de Engenharia Naval dimensiona uma bancada preliminar para análise de um escoamento de duas fases dispostas em um circuito fechado, com realimentação através de bomba, sendo o escoamento composto por uma fase de óleo e outra fase de gás. Dentro desse circuito tem-se a presença de um tomógrafo da marca Tomoflow R100® para a medição de fração do vazio, sendo esse um tomógrafo por capacitância elétrica (TCE). O TCE é utilizado por permitir a caracterização do comportamento através da comparação das propriedades dielétricas do material.

Como visto acima, não apenas (RANGHETTI, 2016) utiliza TCE, mas essa modalidade está presente na indústria e tem sua importância marcante.

Tomografia de Impedância Elétrica

Uma variedade de tipos diferentes de tomografia elétrica foram desenvolvidas desde 1980 para fornecer alternativas de baixo custo para aplicação clínica, geofísica e em processos industriais (WANG, 2015). Ao focar na aplicação clínica, tem-se a Tomografia de Impedância Elétrica (TIE), cuja noção de seu funcionamento e aplicação segue adiante neste tópico.

Entender-se-á que materiais ou tecidos biológicos podem apresentar diferenças tanto na condutividade como na permissividade. Então, a princípio, é possível construir um mapa do interior de um objeto, como o corpo de um paciente, por exemplo, a partir das diferenças que essas propriedades apresentam para as diversas partes do corpo. Em virtude disso, a TIE vem sendo altamente explorada desde o início da década de 80, tornando-se uma alternativa em potencial às técnicas tradicionais de para obtenção de imagens de uma seção do corpo mediante valores de voltagem medidos em eletrodos posicionados ao redor do corpo do paciente (BARBER, 2003; DALVI-GARCIA; DE SOUZA; PINO, 2013; MENIN, Olavo H.; ARTIOLI, 2010; MENIN, Olavo Henrique, 2009).

A TIE é uma técnica que, além de ser portátil e permitir seu uso junto ao leito do paciente, não expõe a região do corpo analisada a nenhum tipo de radiação e possui um baixo custo em relação às outras técnicas de tomografia. Em estudos de (LIMA, 2006), considera-se a aplicação da TIE como “particularmente adequada para estudar a função pulmonar em virtude de as grandes variações de resistividade no pulmão induzidas pelo movimento do ar, sangue ou fluido extravascular no tórax.” Entretanto, apesar das diversas outras aplicações médicas dessa modalidade tomográfica, a mesma não se limita a

medicina, tendo presença também na área industrial como monitoramento de escoamentos multifásicos em tubulações, em ensaios não destrutivos de controle de qualidade na detecção de corrosão, etc. (DALVI-GARCIA; DE SOUZA; PINO, 2013; LIMA, 2006; MENIN; ARTIOLI, 2010; MENIN, 2009).

Tomografia de Indução Magnética

A tomografia de indução magnética, também conhecida como Tomografia Eletromagnética (TEM) ou Tomografia de Indutância Mútua (TIM), é semelhante em termos de operação as outras modalidades de tomografia elétrica, como a tomografia por capacitância elétrica (TCE) e a tomografia de impedância elétrica (TIE), já abordadas previamente neste trabalho. Entretanto, a sua técnica é mais recente, tendo seus primeiros resultados publicados em 1992-3 (KESHEH, 2011; WANG, 2015; WOLFF, 2011).

Na TIM um sistema é composto por solenoides geradores de campo magnético, denominados fonte, e por solenoides que medem os campos gerados, denominados sensores. O sistema gerador de campo injeta uma corrente alternada numa bobina fazendo surgir um campo magnético primário que, por sua vez, induz correntes “*eddy*” (corrente elétrica induzida no interior de um condutor por meio de um campo magnético variável, ou ainda, por radiação eletromagnética, e que pode formar pequenos vórtices) no objeto. Essas correntes criam um campo secundário de baixa intensidade, em comparação com o campo primário, e ambos os campos estão defasados entre si. A diferença de fase e de amplitude do campo secundário em relação ao campo primário é medida por um conjunto de sensores dispostos ao redor do objeto sob análise (KESHEH, 2011; WANG, 2015; WOLFF, 2011).

Segue abaixo um esquema de um sistema básico da TIM na FIG. 5 e um exemplo de tomógrafo de indução magnética na FIG. 6.

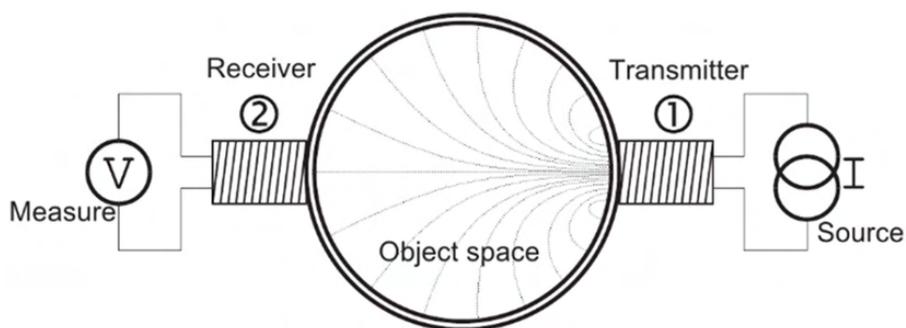


Figura 5 – Conceito simples de um sistema de tomografia de indução eletromagnética.

Fonte: (WOLFF, 2011, p. 15).

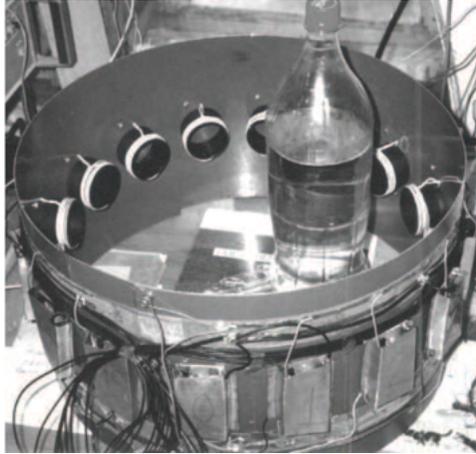


Figura 6 – Exemplo de tomógrafo de indução magnética.

Fonte: (WOLFF, 2011, p. 18).

Assim como na TCE e na TIE, as medições feitas são armazenadas e um programa utiliza esses dados para reconstruir a imagem do objeto. A maior vantagem da TIM em relação as outras modalidades apresentadas previamente é o completo isolamento elétrico do corpo em teste, não sendo necessário contato de nenhum tipo de eletrodo com o objeto em estudo. Essa modalidade de tomografia pode ser aplicada em inspeções geofísicas, na detecção de objetos metálicos nas indústrias têxtil, farmacêutica e alimentícia, e outros (KESHEH, 2011; WOLFF, 2011).

Apesar das semelhanças entre si, é perceptível como as diversas técnicas de tomografia elétrica demonstram que essa tecnologia está em constante evolução com intuito de se obter equipamentos melhores e cada vez mais baratos para aplicações industriais. Além disso, fica claro o quão abrangente são os equipamentos tomográficos, sendo os diversos tomógrafos apresentados até o momento aplicados nas mais diversas áreas. Contudo, expandir-se-á as modalidades tomográficas.

Tomografia de Transmissão de Ultrassom

Segundo (AZEVEDO JÚNIOR, 2002; CARDIN, 2011) as vibrações mecânicas e as ondas associadas a elas podem ser classificadas em três grupos, de acordo com a faixa ou espectro de frequência, sendo eles:

1. Infrassons – que apresentam baixa frequência em relação a audiodiferência, ou seja, uma frequência inferior a 20 Hz;
2. Sons – também chamado de audiodiferência, é constituído por frequências entre 20 Hz e 20 kHz, que são capazes de sensibilizar o ouvido humano;

3. Ultrassons – produzidos por frequências acima de 20 kHz.

A Tomografia de Transmissão de Ultrassom (TTU) é um método de medição que utiliza as informações contidas nos sinais de ultrassom após a passagem deles pelo ambiente. O ultrassom é mais vantajoso em relação aos infrassons e audiodfrequências devido à:

1. Sua frequência mais elevada acarreta num comprimento de onda menor, o que facilita as condições necessárias para a propagação de ondas planas no material;
2. Usualmente os coeficientes de absorção são mais altos e, conseqüentemente, muita mais fáceis de serem mensurados em altas frequências;
3. Os ultrassons são inaudíveis;
4. As ondas associadas às altas frequências são mais fáceis de direcionar.

Na medição feita por ultrassom as ondas ultrassônicas são feitas por meio de um gerador de pulsos e introduzidas no material testado através de um transdutor emissor, um dispositivo capaz de converter a energia de uma natureza para outra. O transdutor incorpora um material piezoelétrico e dessa forma converte sinais elétricos em vibrações mecânicas (transdutor emissor). Posteriormente, um transdutor receptor, também incorporado a um material piezoelétrico, recebe os pulsos mecânicos e os transforma em pulsos elétricos os quais são amplificados. Baseado na velocidade de propagação do som, a atenuação de sua frequência ao atravessar o material, a distância percorrida e no tempo levado para percorrer o material, o computador é capaz de reconstruir as imagens e localizar as inclusões presentes no caminho (AZEVEDO JÚNIOR, 2002; CARDIN, 2011; MAZUREK et al., 2020; PERLIN, 2011; RAMÍREZ, 2015). É apresentado na FIG. 7 abaixo o funcionamento do ultrassom.

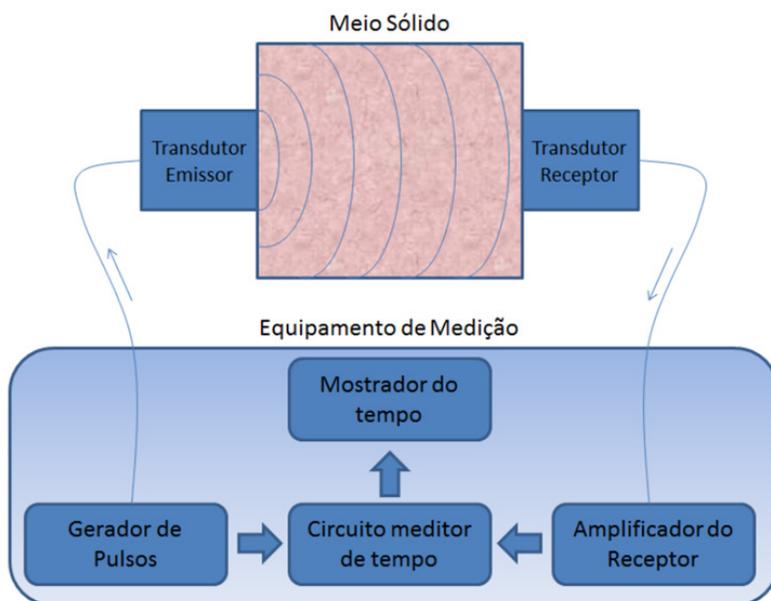


Figura 7 – Esquema de funcionamento do ultrassom.

Fonte: (PERLIN, 2011, p. 28).

Além de ser seguro para a saúde humana, a TTU é uma forma de medição de baixo custo e não invasiva no ambiente testado, que não causa alterações nos parâmetros físicos e químicos que possam interferir nos resultados da medição. Essa modalidade é capaz de detectar possíveis inclusões presentes no corpo – defeitos que vieram de materiais externos estranhos, como por exemplo, vários grãos de arroz numa gelatina que não deveriam estar lá – o que ajuda na averiguação da qualidade dos produtos. Um exemplo de aplicação dessa modalidade de tomografia se dá na detecção de danos em estruturas de concreto (RAMÍREZ, 2015). Entretanto, além da área civil, essa modalidade tomográfica possui possíveis aplicações nos seguintes campos: indústria alimentar e química, produção de detergentes, tintas e cosméticos, indústria farmacêutica etc.

Imagem Por Ressonância Magnética

Por definição, Ressonância Magnética (RM) é uma propriedade física exibida por núcleos de determinados elementos que, quando submetidos a um campo magnético forte e excitados por ondas de rádio em determinada frequência (Frequência de Larmor), emitem rádio sinal que pode ser captado por uma antena e transformado em imagem. O princípio físico da RM tem por base a interação de campos magnéticos, pulsos de radiofrequência (RF) e núcleos atômicos. Mas apenas são átomos “ativos” em RM os que possuem núcleos magnéticos, ou seja, que possam ser considerados como pequenos ímanes, sem orientação específica na ausência de um campo magnético (AMARO JÚNIOR; YAMASHITA, 2001;

HAGE; IWASAKI, 2009; MAZZOLA, 2009; PINTO, 2016).

A imagem por ressonância magnética (IMR) é hoje um método de diagnóstico estabelecido na prática clínica e em crescente desenvolvimento. Essa tecnologia consegue avaliar vários tipos distintos de tecidos do corpo humano, sendo assim utilizada para analisar todas as partes anatômicas e funcionais do corpo humano (GOULD, 2011; HAGE; IWASAKI, 2009; MAZZOLA, 2009).

O design básico de um aparelho comum de ressonância magnética terá, pelo menos, 2 m de altura x 2 m de largura x 3 m de comprimento, se parecendo com paralelepípedo gigante. Entretanto, vale pontuar que as dimensões do equipamento variam de modelo para modelo, e novas tecnologias podem reduzir o seu tamanho. Outra característica marcante é a existência de um tubo horizontal que atravessa o magneto (imã) na parte dianteira até a traseira, sendo esse tubo uma espécie de vão do magneto. Dentro da aplicação clínica, o paciente a realizar o exame irá deslizar para dentro do vão por meio de uma mesa especial, sendo que ele pode entrar primeiro com a cabeça ou com os pés dependendo do exame a ser feito (GOULD, 2011; PINTO, 2016). É apresentado na FIG. 8 abaixo o equipamento de ressonância magnética.

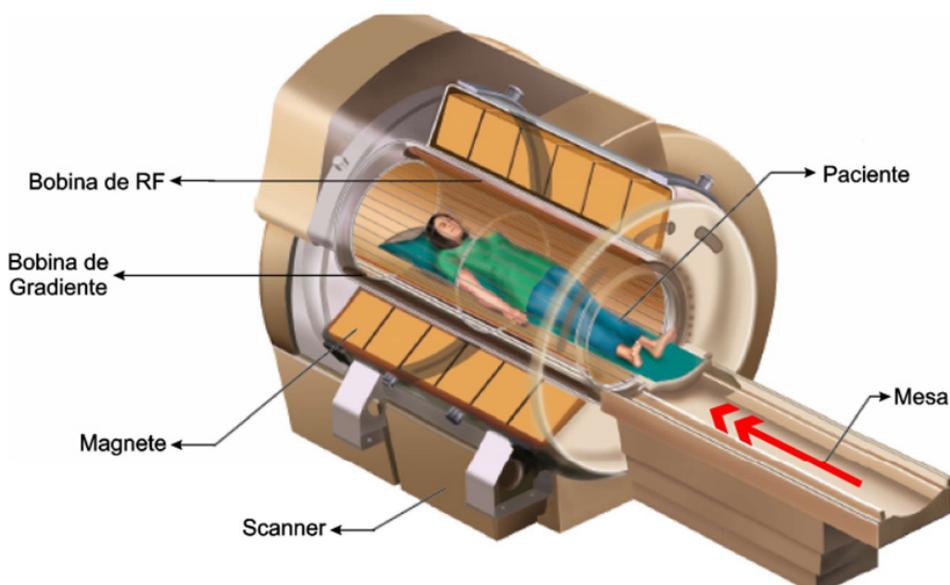


Figura 8 – Equipamento de ressonância magnética no qual são apresentados os principais elementos constituintes do equipamento.

Fonte: (PINTO, 2017, p. 16).

Segundo (GOULD, 2011; PINTO, 2016), para realizar o exame de IRM, uma bobina presente no aparelho de ressonância magnética aplica pulsos de RF direcionados somente

ao hidrogênio. O aparelho direciona esses pulsos a uma área do corpo humano que se deseja examinar e faz os prótons naquela área absorverem a energia necessária para que girem em uma direção diferente. O pulso de RF obriga os prótons (apenas 1 ou 2 que não se anularam em cada milhão) a girar em uma frequência específica, a Frequência de Larmor, e direção específicas. Quase ao mesmo tempo, os magnetos gradientes são ligados e desligados de maneira rápida e bem específica, modificando o campo magnético principal em um nível muito localizado e permitindo escolher a área exata da qual se deseja uma imagem, como se estivesse “fatiando” um local específico.

A formação da imagem com o equipamento de RM ocorrerá após o realinhamento natural dentro do hidrogênio com o campo magnético. Esse realinhamento acontecerá quando o pulso de RF é desligado, o que faz com que os prótons de hidrogênio liberem o excesso de energia armazenada. Quando isso acontece, um sinal é emitido e recebido pela bobina, que o envia para o computador. Tais dados matemáticos são convertidos em uma imagem por meio de uma transformada de Fourier (GOULD, 2011; PINTO, 2016)

Apesar da elevada precisão e dos avanços tecnológicos que essa tecnologia vem adquirindo ao longo do tempo, tal método de medição não se avalia como efetivo na aplicação metrologia ou indústria, o atual foco deste presente trabalho. Isso se dá devido a alguns fatores como:

1. Tempo de aquisição de imagem elevado;
2. O uso de campos magnéticos fortes, o que impede o seu uso próximo a materiais metálicos;
3. A necessidade de manter o campo magnético o mais uniforme possível para uma boa qualidade de imagem;
4. Necessita-se que o corpo permaneça completamente imóvel por longos períodos de tempo.

Conclui-se então que a ressonância magnética, assim como a tomografia, possui diversas aplicações e continuam sendo altamente utilizadas e exploradas. Entretanto, a IRM se apresenta mais eficaz na área médica, sendo o seu uso em processos industriais um futuro muito distante. Em contrapartida, a tomografia já apresenta diversas aplicações dentro de processos industriais como na análise de fluxos multifásicos, análise de solos, dentro da indústria do petróleo, etc.

Tomografia Computadorizada de Raios X ou Gama

Inicialmente, entender-se-á que as radiações ionizantes são ondas eletromagnéticas originadas do núcleo de átomos que possuem um nível de energia alto o suficiente para remover um elétron de um átomo, alterando assim o seu estado físico e o tornando eletricamente carregados. Esse tipo de radiação, ao interagir com a matéria, desencadeia

uma série de ionizações, transferindo energia aos átomos em moléculas presentes no campo de irradiação, promovendo alterações físico-químicas intracelulares. Dentre os tipos de radiações, somente os raios X e gama são considerados ionizantes. A menor quantidade de qualquer radiação eletromagnética é designada fóton, sendo que um feixe de raios X corresponde ao conjunto de fótons que foram gerados com o bombardeamento de elétrons de alta energia cinética (GUIMARÃES, 2016; REIS NETO et al., 2011).

A Tomografia Computadorizada de Raios X ou Gama (TCR) baseia-se nessa interação de um feixe de fótons com o objeto em análise. A FIG. 9 abaixo ilustra a configuração de um tomógrafo de forma simplificada.

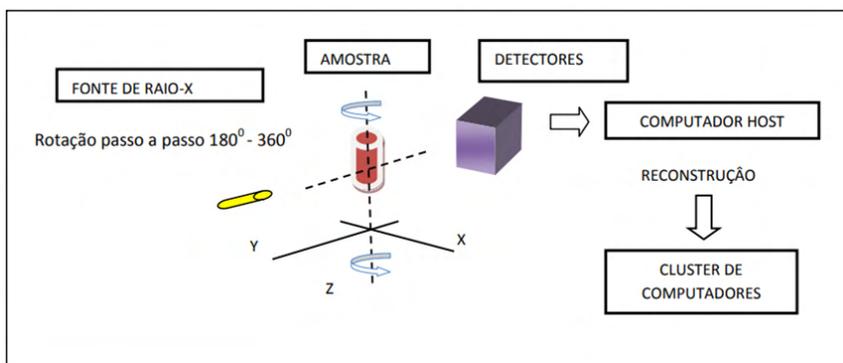


Figura 9 – Esquema simplificado que representa a obtenção de imagens por meio da TCR.

Fonte: (LING, 2013, p. 29).

Quando os raios X passam pelo material de um objeto, eles são atenuados, isto é, a intensidade de um feixe de fótons será reduzida por causa da absorção ou espalhamento. O grau de atenuação depende do comprimento do material absorvente, sua composição, sua densidade (ou seja, o coeficiente de atenuação μ) e a energia dos raios X. Medir essa atenuação permitirá a detecção da presença de material (mesmo vários materiais, para peças multi-materiais) e o comprimento percorrido dentro desses materiais (GUIMARÃES, 2016; KRUTH et al., 2011; REIS NETO et al., 2011).

Segundo (GUIMARÃES, 2016; KRUTH et al., 2011; LING, 2013; REIS NETO et al., 2011), uma imagem com gradiente cinza em 2D será obtido ao capturar os raios X remanescentes que atravessam a peça por meio de um detector de raios X de painel plano, ou seja, medir a atenuação dos raios X. Se for utilizado um detector de linha 1D será obtida um perfil cinza 1D. Para se obter essas imagens em cinza é necessário fazer várias projeções da peça, posicionando-a em vários ângulos diferentes. As imagens projetadas serão reconstruídas matematicamente, levando a um modelo de voxel 3D (um voxel é o análogo 3D de um pixel), onde o valor de cinza do voxel é uma medida para a absorvidade

do material (composição, densidade, etc.).

Como visto acima, a maneira como os raios X são atenuados ao passar pela matéria depende muito do material e de seu coeficiente de atenuação. Uma atenuação medida que resulta numa faixa de potência 20-450 kV (típica para TC industrial) ocorre devido à absorção fotoelétrica e espalhamento Compton. A absorção fotoelétrica acontece quando a energia total de um fóton de raio-X de entrada é transferida para um elétron interno, fazendo com que o elétron seja ejetado. O espalhamento Compton pode ser considerado como uma colisão entre um fóton incidente e um elétron orbital. O fóton incidente é espalhado em uma direção diferente da inicial, sendo que na colisão o fóton transfere parte de sua energia para o elétron que se torna um elétron de recuo. Ambos os efeitos são dependentes de energia, mas essa dependência é maior para a absorção fotoelétrica (FONSECA, 2017; KRUTH et al., 2011; ROMBERG, 2019). Veja uma ilustração desses dois tipos de atenuação na FIG. 10 abaixo:

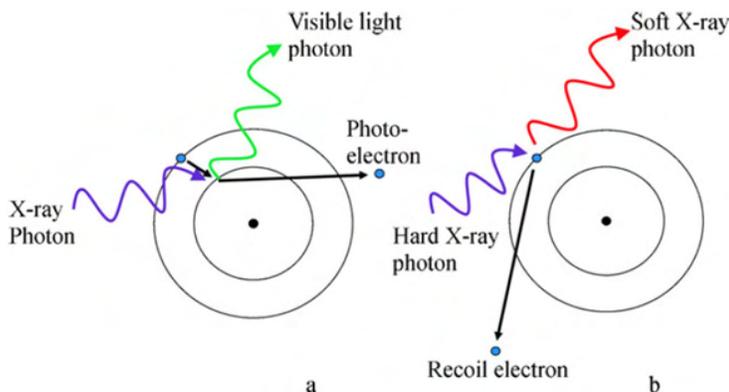


Figura 10 – a) absorção Fotoelétrica b) espalhamento Compton.

Fonte: Adaptado de (KRUTH et al., 2011, p. 828).

As próximas etapas dizem respeito aos principais componentes técnicos da TCR.

Fonte de Raios X

Os raios X da TCR são produzidos acelerando os elétrons através de uma alta voltagem, em um tubo de vácuo, e permitindo que os elétrons colidam com um alvo de metal. Na colisão, os elétrons emitem energia na forma de fótons, com as mais diversas energias (frequências). Algumas delas estão situadas na faixa conhecida como radiação X, enquanto outras são frequência na faixa do infravermelho (calor), ultravioleta e luz visível. Os raios X podem ser gerados por meio de dois processos distintos: radiação de freamento e radiação característica (KRUTH et al., 2011; SOARES, 2006; SUN; BROWN; LEACH,

2012).

A radiação de freamento, também conhecida como *bremsstrahlung*, palavra em alemão que significa exatamente radiação de freamento, é produzida quando um elétron passa próximo ao núcleo ou eletrosfera de um átomo. O elétron é afetado pela forte atração nuclear, onde o núcleo com carga positiva atrai o elétron com carga negativa. A perda de energia cinética original desse elétron, devido à interação, leva à emissão de um fóton com a mesma energia. A probabilidade desse tipo de radiação aumenta junto com o número atômico do alvo (Z) e com o aumento da energia dos elétrons. O espectro de raios X *bremsstrahlung* é contínuo (FONSECA, 2017; KRUTH et al., 2011; SOARES, 2006; SUN; BROWN; LEACH, 2012). A seguir um exemplo na FIG. 11;

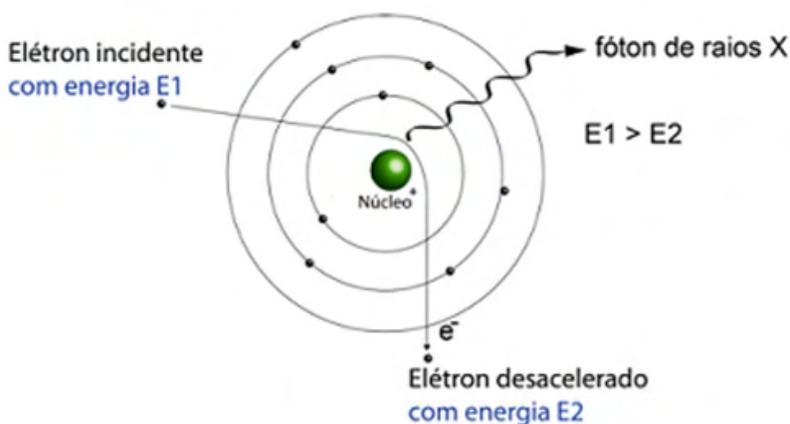


Figura 11 – Esquema representativo da Radiação de Freamento.

Fonte: (DAVID, 2016, p. 3).

A radiação característica ocorre quando se tem um elétron de alta energia que impacta e excita um elétron da camada interna em um átomo do alvo. A atenuação desse elétron que foi impactado ou de um elétron substituto (no caso de o elétron da camada interna ser ejetado e a vaga for preenchida por um elétron de um nível de energia mais alto) produz a liberação da energia do elétron e de um fóton de radiação característica. A radiação característica, dependendo do número atômico do alvo, produz picos de energia que são sobrepostos à radiação *bremsstrahlung* (FIG. 12). Esses raios X característicos são uma propriedade do material alvo. Conforme o comprimento de onda dos raios X usados é diminuído, a energia por fóton aumenta, junto com a capacidade de maiores poderes de resolução espacial (KRUTH et al., 2011; SOARES, 2006; SUN; BROWN; LEACH, 2012).

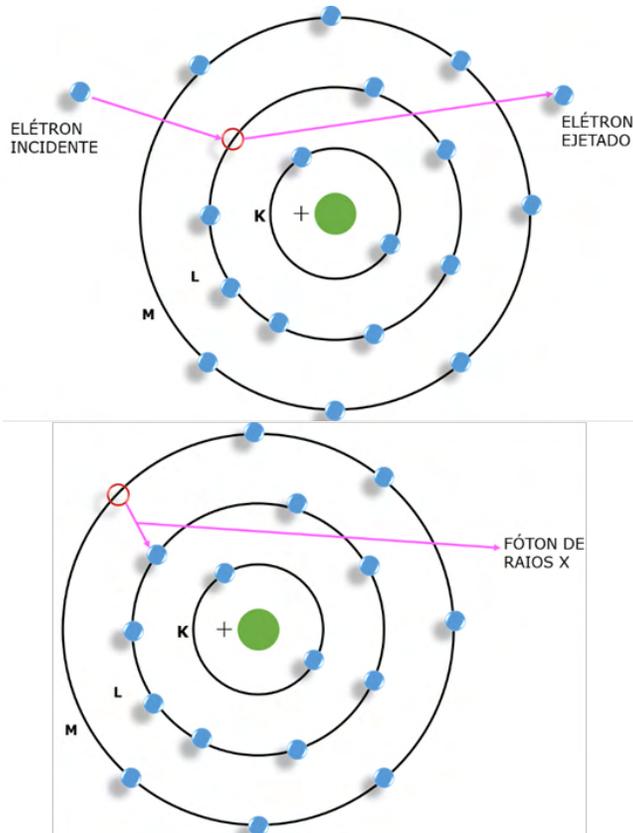


Figura 12 – Esquema demonstrativo da radiação característica.

Fonte: Adaptado de (DAVID, 2016, p. 2).

A fonte dos raios X é uma ampola de raios X chamada também de tubo de raios X (tubo de vácuo). Trata-se de uma válvula termiônica, cuja função é a produção de um feixe de raios X. Para produzir raios X é necessário um espaço evacuado para evitar a interação com moléculas do gás que podem produzir elétrons secundários de menor energia, a radiação de raios X requer um ambiente de vácuo em que dois eletrodos são colocados para que haja a circulação e corrente elétrica. Dessa forma, uma ampola de raios X é composta por uma carcaça de um vidro especial, o ânodo e o cátodo (filamento) (ANDRADE, 2008; ROMBERG, 2019; SOARES, 2006). A FIG. 13 abaixo apresenta um exemplo dos componentes básicos de uma ampola de raios X.

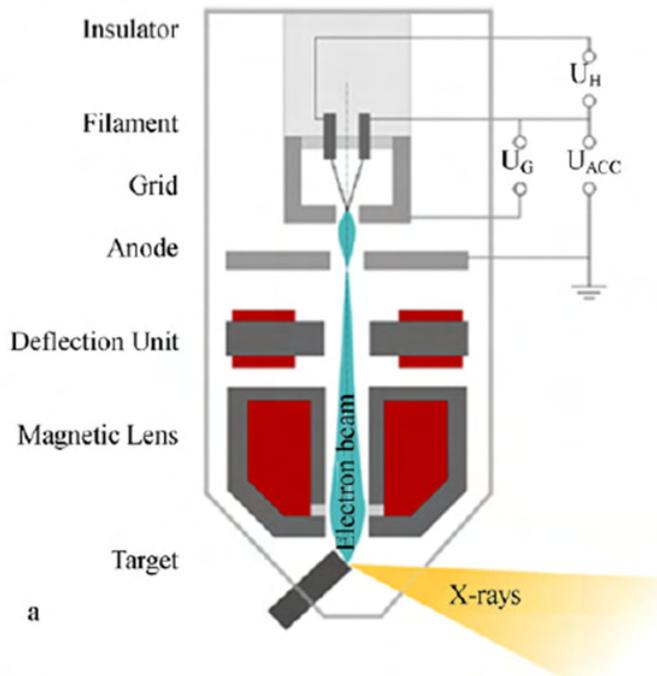


Figura 13 – Componentes básicos de uma ampola de raios X.

Fonte: Adaptado de (KRUTH et al., 2011, p. 823).

De acordo com (ROMBERG, 2019; SOARES, 2006), a carcaça de vidro geralmente é feita de um vidro temperado, cuja pressão interna é menor que 10^{-5} torr (ou 0,001 333 223 68 Pascal), e deve atender a uma série de requisitos, como:

- I. Possuir boa resistência mecânica;
- II. Possuir boa resistência a variação de temperatura;
- III. Possuir boa vedação para manter o alto vácuo;
- IV. Possuir bom isolamento de alta tensão;
- V. Ter transparência à radiação;
- VI. Ser quimicamente estável, de modo que a passagem de radiação não modifique suas características;
- VII. Possibilitar solda com metais das conexões (cátodo e ânodo).

Além do vidro temperado, a ampola também possui o ânodo e o cátodo. O cátodo é o polo negativo do tubo de raios X e geralmente é constituído de um filamento de tungstênio devido ao seu alto ponto de fusão (acima de $3300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Quando a ampola é ligada esse

filamento é aquecido por passagem de corrente elétrica e a temperatura pode chegar a atingir 2 000 °C, o que ocasiona no efeito termiônico (aumento do fluxo de elétrons que saem de um metal, devido ao aumento de temperatura). Devido a esse efeito, os elétrons são liberados do cátodo e acelerados em direção ao ânodo devido ao potencial elétrico, criando assim um feixe de elétrons. Esse feixe tende a se dispersar devido a repulsão eletrostática entre os elétrons e para evitar essa dispersão é adicionada uma capa focalizadora junto ao filamento. A eficiência dessa capa focalizadora depende do seu tamanho, forma e da carga aplicada, além de depender da dimensão, da forma e do posicionamento do filamento no interior da própria capa (ANDRADE, 2008; CONCEIÇÃO, 2017; ROMBERG, 2019; SOARES, 2006)

Observa-se na FIG. 14 o filamento e a influência da capa focalizadora na colimação (processo de alinhamento de lentes ou de espelhos em componentes ópticos) do feixe de elétrons:

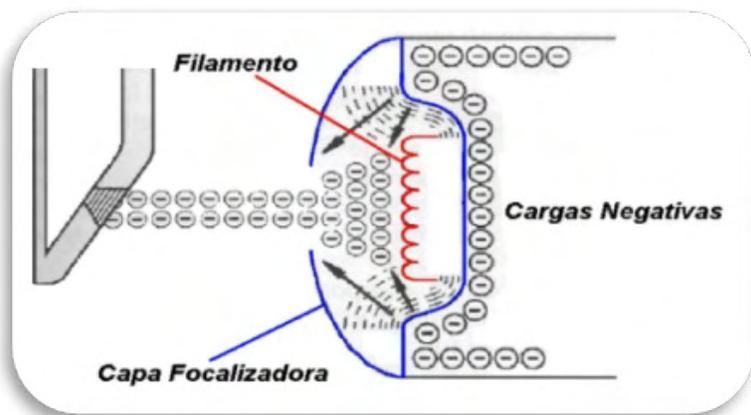


Figura 14 – Ilustração do cátodo e da capa focalizadora.

Fonte: (MARCOS, 2015, p. 1).

Quando os elétrons atingem o ânodo, eles são desacelerados repentinamente, fazendo com que sua energia seja convertida em calor (mais de 99%) e raios X (menos de 1%), sendo essencial um pequeno feixe de elétrons ou ponto de raios X para obter imagens nítidas (ver FIG. 15). Vale ressaltar que uma quantidade significativa de calor gerado pode produzir danos e pode afetar a estabilidade dos raios X gerados. Os designs modernos usam tubos de ânodo rotativos para que o calor possa ser disperso em diferentes partes da placa alvo. Além de usar ânodo rotativo e cobre para dispersão de calor, sistemas de recirculação de água, óleo ou outros materiais condutores térmicos são frequentemente usados para resfriar tubos de raios X (ANDRADE, 2008; CONCEIÇÃO, 2017; ROMBERG,

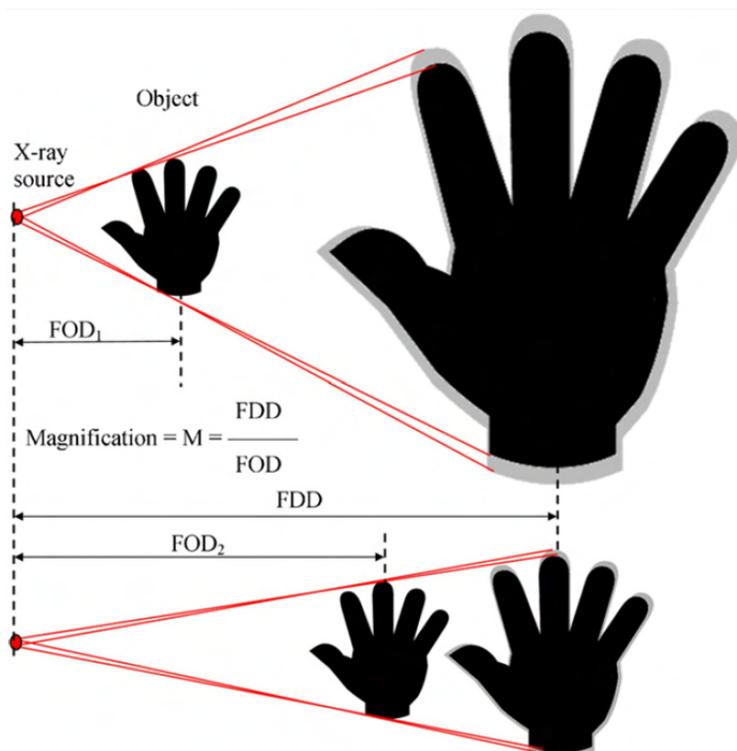


Figura 15 – Demonstração da importância de se ter um pequeno feixe de elétrons ou ponto de raios X para obter imagens nítidas.

Fonte: Adaptado de (KRUTH et al., 2011, p. 824).

Detectores de Raios X

Os detectores de TC usados hoje em dia são detectores de tela plana consistindo de uma matriz 2D de pixels, ou detectores de linha reta ou curva consistindo de uma matriz 1D de pixels. Na FIG. 16 abaixo é apresentada a configuração básica dos tomógrafos industriais com uma representação dos dois detectores de TC usados hoje em dia.

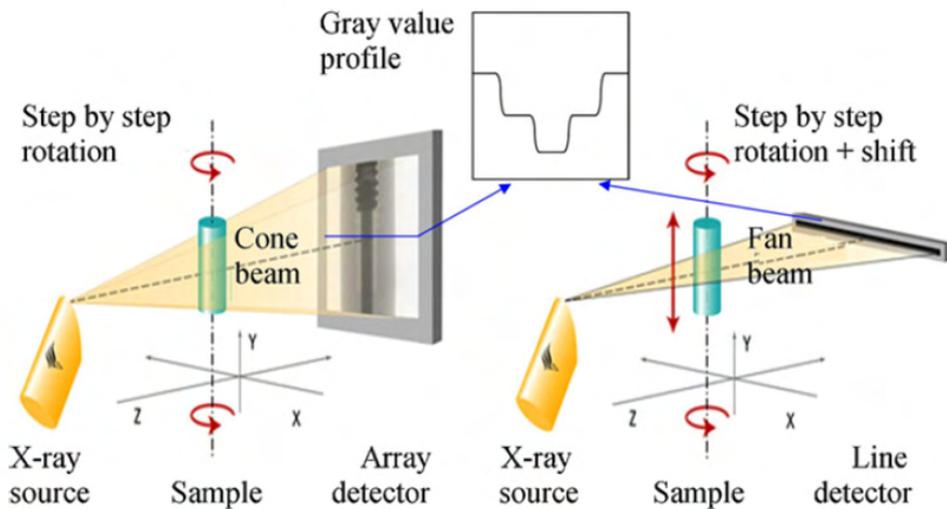


Figura 16 – Detector plano 2D com feixe cônico e detector de linha 1D com feixe em leque. Um perfil de valor cinza ao longo de uma linha de pixel é mostrado.

Fonte: Adaptado de (KRUTH et al., 2011, p. 822).

Por permitirem o uso de feixes de raios X colimados (feixe em leque em vez de feixe cônico) e gerar menos interação ou dispersão de pixels (FIG. 17), os detectores de linha com 1D apresentam maior precisão, são mais eficientes e resistem a energias mais altas de raios X, permitindo que objetos mais grossos sejam medidos. No entanto, o uso de um detector de linha consome mais tempo, pois apenas uma fatia é medida durante uma rotação da peça de trabalho e o objeto deve ser deslocado na direção Y para cada nova fatia a ser medida. Segundo (KRUTH, et al., 2011)¹, “medir uma peça de 100 mm de altura com uma distância entre cortes de 100 μm resulta em 1000 cortes e um tempo de medição que pode ser 1000 vezes maior do que com um detector 2D”. Os detectores 1D também podem ser curvos em vez de retos, com o centro do arco coincidindo com o ponto de raios X, reduzindo assim a deformação da imagem ao se afastar do pixel central (KRUTH et al., 2011; SUN; BROWN; LEACH, 2012).

1. Tradução nossa.

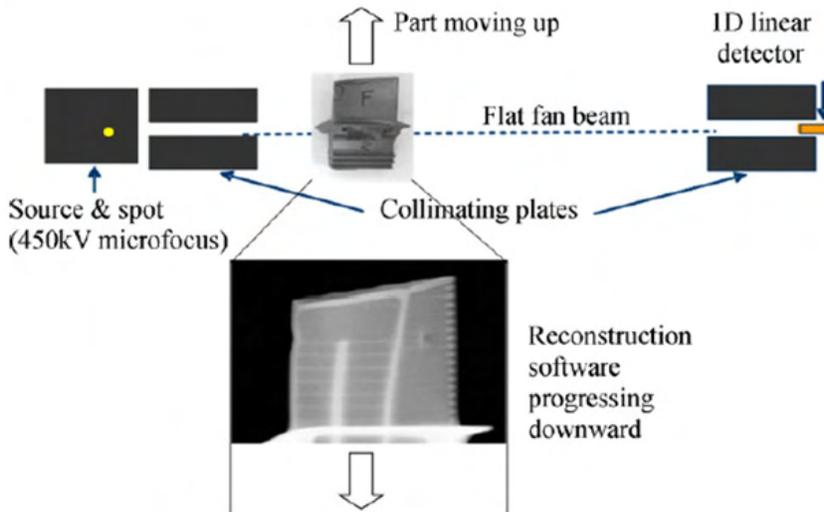


Figura 17 – Detector linear (1D) com feixe colimado.

Fonte: Adaptado de (KRUTH et al., 2011, p. 824).

Sistema Cinemático

Em geral, nos tomógrafos utilizados para aplicações metrológicas, o tubo de raios X e o detector são fixos, enquanto o objeto gira no espaço entre o tubo e o detector. Quando se usa um detector 2D, ocorre um movimento sem translação. Já para um detector 1D, ocorre o movimento com translação vertical. Para efeito de comparação, vale informar que em um scanner de TC médico, o(s) tubo(s) de raios X e o detector giram continuamente ao redor do objeto medido (paciente), enquanto o objeto é transladado horizontalmente através do espaço entre o tubo e o detector (GUIMARÃES, 2016; KRUTH et al., 2011; SOARES, 2006).

O sistema cinemático básico da TCR funciona da seguinte forma:

1. “Uma mesa giratória para rotação gradual ou contínua da peça de trabalho;
2. Um eixo de translação horizontal para posicionar a mesa giratória com a peça de trabalho entre a fonte de raios X e o detector (direção Z). Esse eixo é frequentemente referido como eixo de ampliação: a ampliação geométrica mais alta é obtida posicionando o objeto mais perto da fonte (FIG. 15). Uma ampliação maior, entretanto, produz um efeito positivo e negativo: aumenta a resolução da imagem, mas também causa mais imagens borradas devido ao tamanho finito do ponto de raio-X.
3. **Opcional:** um eixo de translação horizontal na direção X para mover a base giratória (e a peça de trabalho) paralela ao detector. Esse eixo de translação permite posicionar a peça dentro e fora do campo de medição, por ex., para

colocar a mesa giratória subsequentemente em diferentes posições horizontais em varredura do tipo rotação-translação ou varredura de deslocamento somente de rotação para grande ampliação ou objetos grandes, ou para a costura de projeções para peças maiores ao usar um modo de rotação.

4. Um eixo de translação vertical que move a mesa giratória e a peça de trabalho (ou fonte e detector). Ao usar painéis planos 2D, esse eixo é usado para posicionar a peça (ou uma região específica de interesse no caso de peças altas) no campo de medição (detector) e/ou para a costura de regiões de medição de uma parte vertical maior que tem a ser medido em várias vezes. Para sistemas de TC com detectores 1D, o eixo vertical fornece a translação gradativa necessária para varredura de fatias ou translação contínua para TC espiral.” – (KRUTH et al., 2011, p. 824)².

Processamento das Imagens Pelo Computador

Segundo (SUN; BROWN; LEACH, 2012), após a aquisição das imagens do detector para cada uma das posições rotacionais, um processo lento feito por um computador fará com que o conjunto de imagens passe por uma série de cálculos que traduzem essas informações em voxels. Conseqüentemente, a capacidade do computador é crítica, sendo que três componentes devem ser considerados ao construir um computador para reconstrução de dados XCT e análise de dados. Esses componentes são:

- Unidade de processamento central (CPU);
- Memória de acesso aleatório (RAM);
- Placas gráficas.

Conforme (SUN; BROWN; LEACH, 2012)³, o avanço nas tecnologias de processadores multicore e placas gráficas avançadas com unidades de processamento gráfico (GPUs) “pode acelerar significativamente a velocidade ao lidar com grandes quantidades de dados e aumentar a velocidade de decodificação da imagem.” A capacidade de escolher o tamanho necessário de memória do computador permite que quantidades de dados enormes sejam lidos. Também é notado que a supercomputação possui um elevado valor, mas o desenvolvimento da computação em grade oferece outras chances de melhorar consideravelmente a eficiência das análises de dados, onde o custo pode ser compartilhado entre alguns usuários.

Exemplos de Aplicações da Tomografia Computadorizada de Raios X

2. Tradução nossa.

3. Tradução nossa.

Uma aplicação possível da TCR é demonstrada no estudo de caso publicado por (DU PLESSIS; LE ROUX; GUELPA, 2016), onde um grande cilindro de concreto (96 mm de altura e 68 mm de diâmetro) foi escaneado com tomógrafos médicos e micro tomógrafo de raios X (microCT). A amostra utilizada continha pedras agregadas, concreto e porosidade de uma grande variedade de tamanhos, o que os autores consideraram indicador de boa qualidade para tomografias computadorizadas de raios X, especialmente para análise quantitativa de defeitos. As imagens médicas e do micro tomógrafo da vista superior são apresentadas na FIG. 18 abaixo:

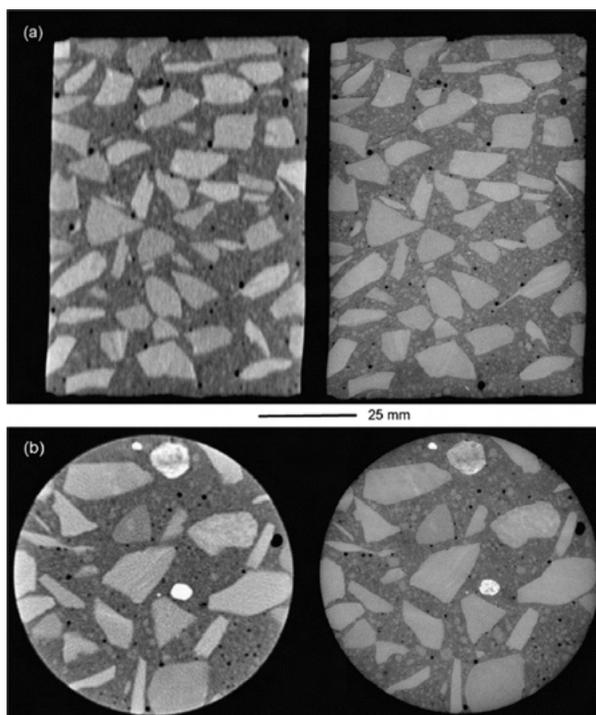


Figura 18 – Vistas superiores do cilindro de concreto com o tomógrafo médico (esquerda) e com o micro tomógrafo (direita).

Fonte: Adaptado de (DU PLESSIS; LE ROUX; GUELPA, 2016, p. 22).

Os autores do estudo de caso concluíram que, nesse teste específico, tanto a TC médica quanto a microCT podem ter aplicações em tais amostras, mas uma maior precisão nas dimensões dos defeitos medidos, como porosidade, pode indicar que o microCT é superior para análise de defeitos em geral, pois as dimensões dos defeitos são de importância significativa na tomada de decisões com relação à análise não destrutiva. Também é afirmado nesse estudo que a TCR proporciona uma melhora significativa em sua capacidade de detectar pequenos defeitos, em comparação com a radiografia tradicional,

o que explica seu uso crescente em aplicações industriais. Importante salientar que foi utilizado apenas um teste realizado nesse estudo, sendo que o mesmo não se limita a esse teste apenas e possui outros focos de análise.

Além das possíveis aplicações industriais da TCR, o livro da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), de autoria (VAZ et al., 2014), demonstra que há estudos e grupos de pesquisa cujo foco é o desenvolvimento de equipamentos tomográficos customizados para diversas aplicações, como a ciência do solo, germinação de sementes, madeiras, geologia, paleontologia, etc. Alguns equipamentos diferentes são apresentados na FIG. 19 a seguir.



Figura 19 – Tomógrafos da Embrapa instrumentação Agropecuária.

Fonte: (VAZ et al., 2014, p. 21).

No Quadro 1 abaixo é apresentado uma revisão detalhada da literatura dos últimos 25 anos de contribuições de grupos brasileiros de tomografia computadorizada, o desenvolvimento e algumas aplicações do grupo de tomografia da Embrapa Instrumentação e Parceiros.

Ano	Tipo	Publicações	Desenvolvimento/ aplicação
1985	Metodologia	Crestana (1985) Crestana et al. (1985)	Medida da densidade e da umidade dos solos; germinação de sementes
1987	Instrumentação	Crestana et al. (1986) Cruvinel, (1987) Cruvinel et al. (1990)	Minitomógrafo
1989	Metodologia	Crestana et al. (1992) Vaz (1989) Vaz et al. (1989)	Estudos da compactação dos solos
1993	Metodologia	Posadas e Crestana (1993)	Infiltração preferencial da água no solo
1994	Instrumentação	Naime (1994)	Tomógrafo de campo
1997	Instrumentação	Biassusi et al. (1999) Cassaro (1994)	Tomografia de duplo feixe
1997	Instrumentação	Macedo (1997)	Desenvolvimento do microtomógrafo
1998	Metodologia	Macedo et al. (1998)	Medidas de selamento superficial solo
2001	Instrumentação	Naime (2001)	Tomógrafo com feixe em leque
2002	Metodologia	Macedo et al. (2002)	Densidade de madeira
2002	Metodologia	Fante-Junior et al. (2002)	Compactação em solo sob pivô central
2003	Metodologia	Cruvinel et al. (2003)	Avaliação de danos por besouros em madeiras
2005	Metodologia	Pedrotti et al. (2005)	Aplicações em sistema de plantio direto
2009	Metodologia	Cruvinel et al. (2009)	Processamento e reconstrução 3D para estudos de fluxo preferencial da água no solo
2011	Metodologia	Vaz et al. (2011) Beraldo et al. (2012)	Distribuição do tamanho de poros de solos Medidas da porosidade de solo em diferentes sistemas de manejo

Quadro 1 – Desenvolvimento e algumas aplicações do grupo de tomografia da Embrapa Instrumentação e Parceiros

Fonte: (VAZ et al., 2014, p. 22).

Como visto até o presente momento, apesar da utilização mais difundida da tomografia ser no diagnóstico médico, área que foi introduzida inicialmente e é mundialmente conhecida, a TC é uma tecnologia altamente complexa e que evoluiu muito ao longo dos anos. Como já abordado, essa tecnologia possui diversas modalidades diferentes dependendo de como funciona e quais as principais aplicações, sendo que a Tomografia

Computadorizada de Raios X ou Gama se destaca na aplicação industrial e metrológica. Sendo assim, aprofundar-se-á no funcionamento dessa modalidade tomográfica específica, tendo em vista a sua contundente aplicação e uso na indústria, o que condiz com o foco deste presente estudo de caso.

AVALIAÇÃO DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA QUANTO AO USO NOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Na indústria mecânica todas as máquinas e peças possuirão algum tipo de imperfeição, tais como poros, inclusões, trincas, dentre outras. Essas imperfeições internas em produtos acabados podem comprometer o sucesso do componente em operação. Por esse motivo, é muito comum a necessidade de inspecionar tais componentes mecânicos durante o período de vida útil. Nesses casos, não será possível a destruição da peça ou do componente a ser testado, uma vez que, após inspecionado, ele deverá ser recolocado no sistema de origem. Para esses casos específicos, recorre-se aos Ensaios Não Destrutivos dos materiais. Dentre as diversas técnicas utilizadas para esse ensaio, atualmente a Tomografia Computadorizada, mais notoriamente a de raios X ou gama, está se destacando demonstrando grande potencial de aplicação. Em função disso, esse capítulo tem como foco: definir a diferença de descontinuidade, defeitos e falha; conceituar os ensaios não destrutivos, explicar os principais métodos utilizados; e demonstrar as aplicações da tomografia computadorizada, com maior notoriedade para a tomografia de raios X ou gama, nos ensaios não destrutivos.

FALHAS E IMPERFEIÇÕES

De acordo com (ANDERSON, 1995; ZOLIN, 2011), existem uma série de fatores que os projetistas não são capazes de antecipar ao conceber um novo projeto. Novos materiais, novos desenhos, entre outros, são capazes de oferecer enormes vantagens, mas também problemas potenciais. Sendo assim, um novo projeto ou material deve ser utilizado apenas após diversos testes e análises. Além disso, conhecer as falhas se torna muito importante para se compreender o porquê de um mecanismo vir a falhar durante o seu funcionamento. Mas primeiro, é importante diferenciar o significado de alguns termos técnicos, porém necessários:

- **Descontinuidade:** É uma interrupção da estrutura típica do componente, tal como uma falta de homogeneidade nas suas características mecânicas, metalúrgicas ou físicas. Uma descontinuidade não é necessariamente um defeito.
- **Defeito:** É uma descontinuidade que, em virtude da sua natureza, como dimensões, localização ou efeito acumulado, torna a peça ou componente inapropriado para uso por não satisfazer os requisitos mínimos de aceitação da norma ou

especificação aplicável.

Nas seções seguintes abordar-se-á os principais tipos de descontinuidades para os processos de soldagem, fundição e forjamento.

PRINCIPAIS DESCONTINUIDADES EM PROCESSOS DE SOLDAGEM

Os processos de soldagem são aqueles em que acontece a união entre metais, utilizando para isso uma fonte de calor com ou sem aplicação de pressão e com ou sem a utilização de metal de adição. A soldagem está presente em diversos ramos da indústria como: fabricação de produtos e estruturas metálicas, aviões, navios, locomotivas, prédios, dentre outros (SENAI-BA CIMATEC, 2012).

Porosidade

Porosidade é uma descontinuidade volumétrica em que um espaço vazio é formado pelo aprisionamento de bolhas de gases durante a solidificação do metal. Essa descontinuidade pode ser esférica ou cilíndrica (alongado) e é aceita pelas normas de qualificação de procedimentos e soldadores até uma determinada dimensão e distribuição. A FIG. 20 abaixo ilustra um exemplo de porosidade agrupada com a secção transversal (canto superior esquerdo) de uma junta soldada e a vista superior (canto inferior esquerdo) de um cordão de solda (DE NOVAIS, 2009; MURTA, 2018; PEREIRA; BARRA, 1999; SUYAMA, 2015)

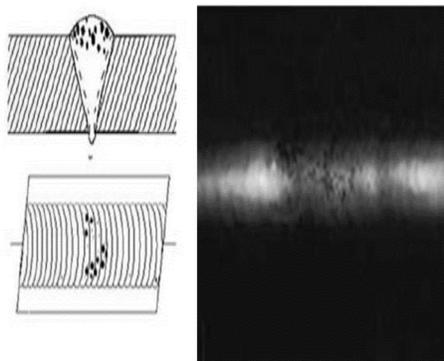


Figura 20 – Cordão de solda com porosidade.

Fonte: (SUYAMA, 2015, p.30).

Inclusão de Escória

Inclusão de escória é uma descontinuidade gerada pela presença de partículas no

metal solidificado. Ela se origina no metal de solda devido ao aprisionamento de material metálico (inclusão de tungstênio na soldagem TIG) e não metálico retido na zona fundida. Esse aprisionamento provém do fato dessas partículas despreendidas do eletrodo e escória na superfície a ser soldada apresentarem um ponto de fusão muito alto. Algumas formas de controlar essa descontinuidade são: limpeza adequada da região a ser soldada, remoção total da escória antes do próximo passe, geometria adequada da junta, uso de aporte de calor adequado e manipulação adequada do eletrodo ou tocha. Segue um exemplo de inclusão na FIG. 21 abaixo onde se tem uma macrografia mostrando a presença de uma inclusão na interface zona fundida/metal base (a) e micrografia mostrando a presença de uma inclusão na zona fundida (b).

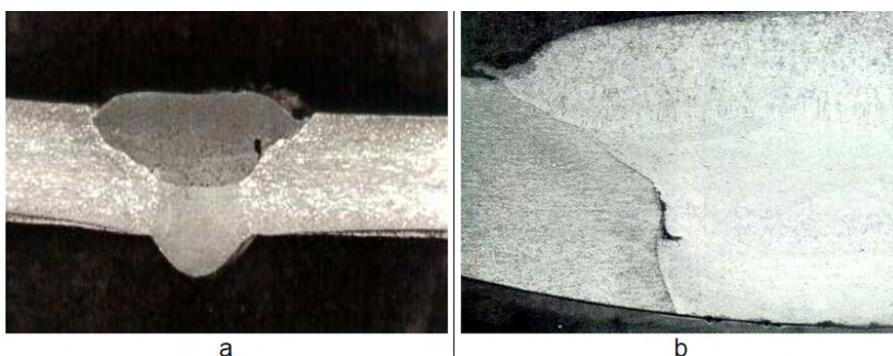


Figura 21 – Exemplo de inclusão de escória
Fonte: (PEREIRA; RODRIGUES, 1999, p. 26).

Trincas

Por serem fortes concentradoras de tensão, podendo favorecer o início de fratura do tipo frágil na estrutura soldada, as trincas são consideradas os defeitos mais graves em uma junta soldada. De maneira simplória, uma trinca pode ser definida como resultado da incapacidade do material em responder aos esforços de tensões decorrentes do processo de soldagem. Vários mecanismos agem a favor da formação de trincas nas juntas soldadas, podendo ocorrer durante a soldagem (na solidificação), durante o resfriamento da peça e inclusive dias após a realização da soldagem (DE NOVAIS, 2009; SUYAMA, 2015). A FIG. 22 ilustra uma macrografia de uma trinca.

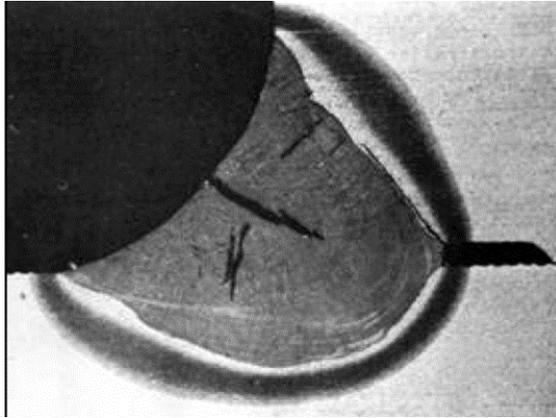


Figura 22 – Macrografia de trincas, observada em uma junta soldada pelo processo arco submerso.

Fonte: (DE NOVAIS, 2009, p. 12).

Respingos

Os respingos são partículas metálicas expelidas no decorrer da soldagem por fusão e que não pertencem a solda. Eles podem ficar aderidos nas adjacências da solda ou não. Apesar do excesso de respingos indicar que o processo não está estável, normalmente não é considerado uma descontinuidade relevante, exceto quando sua presença for interferir nas operações subsequentes (DE NOVAIS, 2009). Na FIG. 23 tem-se um exemplo dessa descontinuidade.

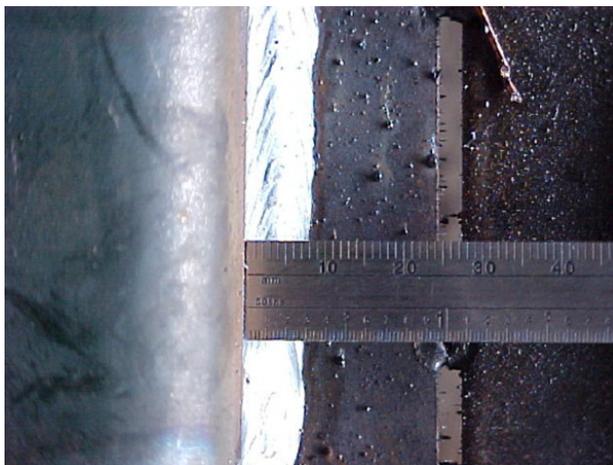


Figura 23 – Exemplo de respingos numa junta com respingos

Fonte: (DE NOVAIS, 2009, p. 8).

Falta de Fusão

A falta de fusão configura-se como a ausência de continuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal de base ou entre dois cordões adjacentes. Ela pode ser causada por: parâmetros de soldagem inadequados, manipulação inadequada da tocha, desalinhamento, ângulo de chanfro muito pequeno, entre outras. A região afetada por essa descontinuidade atua como forte concentrador de tensão, o que pode facilitar a nucleação e propagação de trincas e reduzir a seção efetiva da junta (DE NOVAIS, 2009; PEREIRA; BARRA, 1999; SUYAMA, 2015). Observa-se exemplo de falta de fusão na FIG. 24 abaixo.

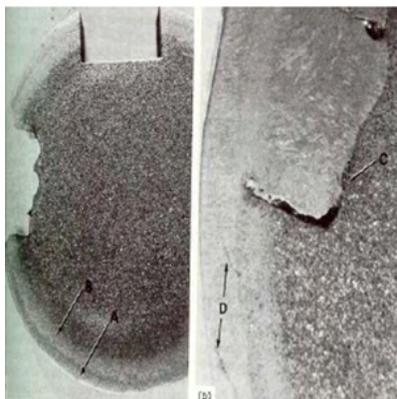


Figura 24 – Exemplo de falta de fusão (seta C)

Fonte: (BARRA; PEREIRA, 1999, p. 30).

Falta de Penetração

Nessa descontinuidade ocorre a união incompleta entre as partes a serem soldadas ao longo da espessura e o cordão de solda. Isso acontece porque parte da raiz do cordão de solda não foi completamente fundida. Essa descontinuidade se relaciona a problemas de projeto inadequado da junta e a aplicação de parâmetros incorretos no processo de soldagem, ou seja, uma difícil penetração do metal líquido na região da raiz (DE NOVAIS, 2009; PEREIRA; BARRA, 1999; SUYAMA, 2015). Tem-se um exemplo dessa descontinuidade na FIG. 25 adiante.

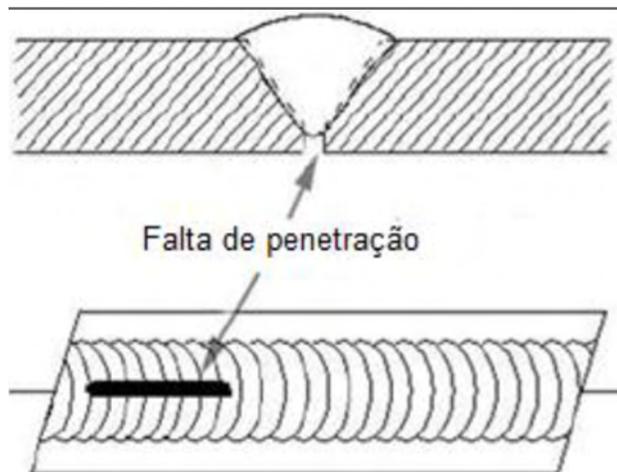


Figura 25 – Exemplo de falta de penetração no cordão de solda

Fonte: (SUYAMA, 2015, p. 31).

FUNDIÇÃO E SUAS PRINCIPAIS DESCONTINUIDADES

Entende-se como fundição o processo de preencher um molde com o formato da peça requerida com metal líquido, em geral, uma liga metálica de aço, Alumínio, Cobre, Ferro, Magnésio ou Zinco e seguindo-se de resfriamento para solidificação da peça. Esse método de produção de peças metálicas é um dos mais antigos e versáteis. Porém, abordar-se-á nas seguintes seções as principais descontinuidades e defeitos decorrentes do processo de fundição, sendo relevante ressaltar que a ocorrência de erros em qualquer fase do processo de produção de uma peça pode causar certas imperfeições e erros que são aceitos desde que não se afete a funcionalidade da peça e esteja de acordo com os requisitos de aplicação da peça proposta pelo cliente (CARVALHO, 2001; DE OLIVEIRA, 2013; RESENDE, 2004; SANTANA, 2016).

Bolhas Gasosas

Segundo (CARVALHO, 2001; DE OLIVEIRA, 2013; RESENDE, 2004; SANTANA, 2016) bolhas gasosas são cavidades arredondadas formadas por gases que não saíram do molde. Sendo assim, os gases dentro do metal líquido podem ter apenas três origens:

1. Foram aspirados do ar durante o vazamento;
2. Foram difundidos do molde para o banho líquido após o vazamento;
3. Estavam no metal antes do vazamento por causa de deficiências na etapa de desoxidação.

As bolhas podem ser aparecer em decorrência da ventilação impropria dos machos,

uso errôneo da área de fundição ou pela compactação exagerada.

Inclusões

Conforme (CARVALHO, 2001; DE OLIVEIRA, 2013; RESENDE, 2004; SANTANA, 2016) inclusões são materiais que ficam na peça fundida contra o desejo do operador da fundição, como, por exemplo, óxidos, escória, sujeira e areia. Eles são provenientes das diversas partes do molde e também de gases absorvidos pelo metal. As inclusões de escória são formadas durante o vazamento decorrente do enchimento da cavidade do molde.

Já as inclusões de areia se originam quando o molde não está devidamente preparado, isto é: com a granulometria adequada para a peça desejada, quando o molde não está devidamente compactado ou se a alimentação do molde for malconduzida, por erro do operador ou por projeto incorreto do molde, dos alimentadores ou dos canais de descida. Um exemplo é demonstrado na FIG. 26 a seguir.

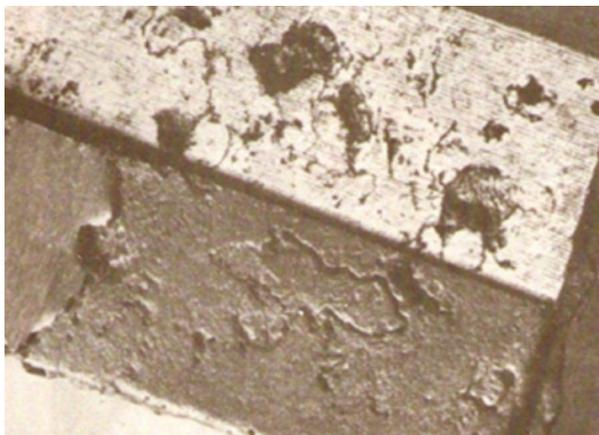


Figura 26 – Demonstração de uma peça com inclusões de areia e de escória

Fonte: (DE OLIVEIRA, 2013, p. 88).

Vazios de Contração

De acordo com (CARVALHO, 2001; RESENDE, 2004; BRAGA, 2011; OLIVEIRA, 2013; SANTANA, 2016), vazios de contração acontecem quando há uma alimentação que não é suficiente ou uma solidificação não progressiva na direção dos alimentadores. Segue na FIG. 27 uma ilustração desse tipo de vazio.

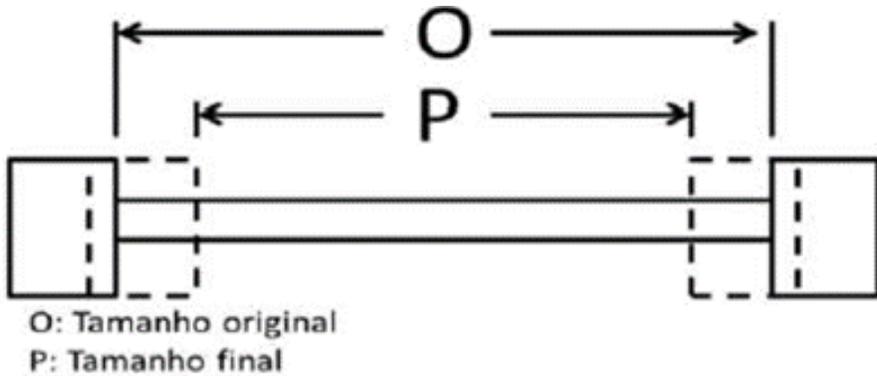


Figura 27 – Ilustração demonstrando o vazio de contração

Fonte: (SANTANA, 2016, p. 63).

Porosidade

Segundo (CARVALHO, 2001; DE OLIVEIRA, 2013; RESENDE, 2004; SANTANA, 2016), porosidades são descontinuidades em que pequenos orifícios, de forma arredondada ou angular, se distribuem por toda a parte interna da peça. Tais orifícios se caracterizam pela presença de algum gás dissolvido no metal durante o processo de solidificação (muito semelhante ao que ocorre na soldagem). Geralmente essa descontinuidade aparecerá com maior frequência quando a temperatura de vazamento for elevada e a velocidade de solidificação for pequena. A presença de poros não apresenta problemas para peças fabricadas, desde que a concentração de gases esteja abaixo do limite de solubilidade. A seguir, um exemplo de poros numa peça de Bronze na FIG. 28 é apresentado.

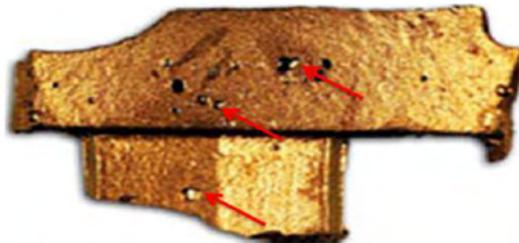


Figura 28 – Fotografia de porosidade em peça de Bronze.

Fonte: (SANTANA, 2016, p. 45).

Mordeduras

Tipifica-se como mordedura a ocorrência de fusão da superfície da chapa do metal de base próxima a margem do cordão de solda formando uma grande depressão, motivada

pelo alto aporte térmico. As principais causas dessa descontinuidade em forma de depressão são: corrente de soldagem muito elevada, velocidade de soldagem excessivamente alta, sopro magnético, entre outros. A mordedura é aceitável dependendo da norma utilizada para a fabricação do conjunto soldado. Entretanto, em alguns metais de base ela é uma descontinuidade perigosa visto que, em alguns casos, pode criar um entalhe na zona de ligação e concentrar tensões nesses locais (DE NOVAIS, 2009; PEREIRA; BARRA, 1999; SUYAMA, 2015). Um exemplo de mordedura combinada com desalinhamento do cordão de solda é apresentado na FIG. 29 a seguir.



Figura 29 – Exemplo de mordedura combinada com desalinhamento do cordão de solda.

Fonte: (DE NOVAIS, 2009, p. 9).

Trincas de Contração

Apesar dos metais possuírem alta ductibilidade em altas temperaturas, existe uma faixa, próxima à temperatura de solidificação, em que se tornam quebradiços ou frágeis. As trincas de contração que acontecem nessa faixa são geradas a partir da presença de pouco líquido nos contornos dos grãos, na fase final de solidificação. Se for aplicada alguma tensão, ocorre a ruptura que não é preenchida porque não há metal líquido suficiente para tal, dado que a solidificação já está praticamente concluída. As trincas também podem acontecer se houver uma desmoldagem prematura do molde ou movimentações bruscas e batidas no mesmo (CARVALHO, 2001; DE OLIVEIRA, 2013; RESENDE, 2004; SANTANA, 2016).

Peça incompleta

Uma peça incompleta ocorre quando falta enchimento do molde. Essa falta de enchimento pode vir da temperatura insuficiente do metal fundido ou ainda de sua pequena fluidez (CARVALHO, 2001; SANTANA, 2016).

Gotas Frias

São gotas que respingaram nas paredes do molde quando o metal líquido foi colocado no mesmo. Essas gotas se resfriaram com rapidez e oxidaram superficialmente. Por causa da presença da película de óxido, as gotas que permanecem fixas às paredes do molde não se aderem completamente ao fundido, constituindo assim como uma descontinuidade superficial (CARVALHO, 2001; MINARI, 2009).

Segregação

É o acúmulo de impurezas na região central do lingote ou do molde. Esse acúmulo acontece porque o aço possui impurezas normais, outros tipos de metais e metalóides (semimetais como Enxofre e o Fósforo) e quando ele está no estado fundido os metalóides ali presentes encontram-se perfeitamente dissolvidos, sendo bem menos solúveis no metal quando ele se encontra no estado sólido. Dessa forma, à medida que acontece a solidificação, as impurezas vão sendo expulsas para a fase líquida, e como a solidificação começa da parte exterior para interior (o centro se resfria mais lentamente e as impurezas o fazem baixar seu ponto de solidificação), acontece essa concentração na região central descrita no início (CARVALHO, 2001; MINARI, 2009).

Chapelins Não Fundidos

Segundo (CARVALHO, 2001), “Chapelins são peças de metal utilizadas na moldagem, sendo fusíveis à passagem da corrente líquida do metal. Se essa fusão não acontecer, há a formação de interfaces e com elas, as descontinuidades “

Interrupção de Vazamento

Segundo (CARVALHO, 2001), “A ausência de união metalúrgica, ocasionada pelo acréscimo de metal líquido sobre uma camada de metal já solidificada, no molde, recebe a denominação de interrupção de vazamento”.

FORJAMENTO E SUAS PRINCIPAIS DESCONTINUIDADES

De acordo com (CARVALHO, 2001; DE SOUZA, 2015; SEPTIMIO, 2015), forjamento é a nomenclatura genérica dada a operações de conformação mecânica efetuada com golpes rápidos e repetidos (como martelo de queda livre ou acionado) ou por esforço de compressão sobre uma matéria dúctil, de forma que ele tem a tendência de assumir o contorno ou perfil da ferramenta de trabalho. Nas seções seguintes, abordar-se-á as

principais descontinuidades e defeitos decorrentes do processo de forjamento.

Trincas Superficiais

São causadas pelo trabalho excessivo na superfície de uma peça que está com temperatura baixa ou por causa do aquecimento da peça em fornos com atmosfera rica em enxofre (CARVALHO, 2001; DE SOUZA, 2015; SEPTIMIO, 2015).

Trincas nas Rebarbas

A presença de impurezas nos metais, em consequência da contração do material (tanto no forjamento quanto no tratamento térmico) ou porque as rebarbas são pequenas causam esse tipo de trinca. Elas se iniciam nas rebarbas e podem penetrar na peça durante a operação de rebarbação (CARVALHO, 2001; DE SOUZA, 2015; SEPTIMIO, 2015).

Trincas Internas

Tensões causadas por grandes deformações fazem surgir trincas no interior da peça (DE SOUZA, 2015).

Incrustações de Óxidos

São causadas por uma camada de óxidos que se formam durante o aquecimento. Essas incrustações geralmente se desprendem, mas, ocasionalmente, podem ficar presas nas peças (CARVALHO, 2001; DE SOUZA, 2015; SEPTIMIO, 2015).

Descarbonetação

Tipifica-se pela perda de carbono na superfície do aço causada pelo aquecimento do metal. A atmosfera do forno, o tipo do material e o tempo de permanência na temperatura de aquecimento afetam a profundidade do alcance dessa descontinuidade (CARVALHO, 2001; DE SOUZA, 2015; SEPTIMIO, 2015).

Queima

Quando a elevação da temperatura atinge valores próximos a temperatura de fusão é provocado uma alteração permanente no material devido a penetração Inter cristalina de gases oxidantes que dão origem às películas de óxidos entre os limites de grão (CARVALHO, 2001; DE SOUZA, 2015; SEPTIMIO, 2015).

Gotas Frias

Elas acontecem quando ocorre uma dobra de superfícies sem a ocorrência de soldagem. Elas são provocadas por fluxos não normais de material quente dentro das matrizes, incrustações de rebarbas e colocação inadequada do material na matriz (CARVALHO, 2001; DE SOUZA, 2015; SEPTIMIO, 2015).

CONCEITUANDO OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os Ensaios Não Destrutivos (END's) podem ser definidos como a avaliação de uma peça ou equipamento sem provocar a sua destruição ou agredir a sua integridade estrutural. Esse tipo de ensaio abrange técnicas que visam medir, detectar propriedades ou verificar o desempenho de materiais metálicos (ferrosos ou não ferrosos) e materiais não metálicos. A detecção de descontinuidades e defeitos no interior dos materiais apenas se tornou possível com a utilização dos END's. A diferença entre os END's e os ensaios destrutivos é que este último deixa algum tipo de marca no material após a realização dos testes, mesmos que a peça ou componente analisado não fique inutilizado (DE OLIVEIRA, 2013; GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012; SENAI-BA CIMATEC, 2012).

De acordo com (DE OLIVEIRA, 2013; GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012; SENAI-BA CIMATEC, 2012), as principais técnicas de END's utilizadas são: a inspeção visual, líquido penetrante, partícula magnética, radiografia e ultrassom.

Inspeção Visual

Conforme (MOREIRA, 2014; SENAI-BA CIMATEC, 2012), o ensaio visual ou inspeção visual é um dos mais utilizados, sendo que geralmente precede outros ensaios. Para realizar a inspeção visual, primeiro deve se levar em consideração os seguintes fatores:

1. Se o inspetor possui capacidade física para detectar visualmente as descontinuidades (essa capacitação é comprovada através de exames práticos no SNQC – Sistema Nacional de Qualificação e Certificação);
2. A capacidade do inspetor em detectar, identificar e avaliar as descontinuidades;
3. As condições de iluminação para realização da inspeção visual e da superfície.

Além desses fatores, a inspeção visual pode ser uma inspeção visual direta, quando executada apenas com a visão desprovida de nenhum objeto auxiliar, ou inspeção visual remota, quando o olho humano é auxiliado por uma série de instrumentos ópticos (lupas, buroscópio, câmeras, etc.). Um exemplo é mostrado na FIG. 30 abaixo:

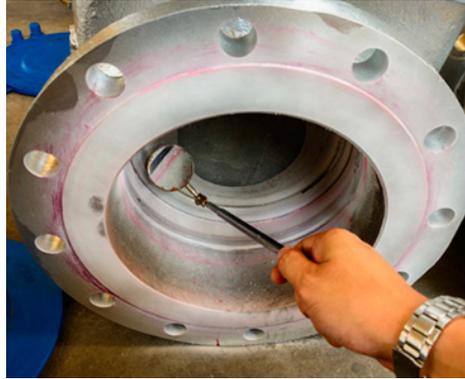


Figura 30 – Exemplo de um ensaio por inspeção visual.

Fonte: Disponível em <<http://www.speminspecoes.com.br/ensaio-visual-end.php>> Acesso em 19 de dezembro de 2020.

O ensaio visual é muito vantajoso por ser o que apresenta o menor custo e permitir detectar e eliminar possíveis irregularidades antes da execução de uma operação, reduzindo o uso de outros END's. Contudo, é um ensaio que depende muito da experiência e conhecimento por parte do inspetor e está limitado a detecção de defeitos superficiais.

Líquido Penetrante

Segundo (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012; MOREIRA, 2014; SENAI-BA CIMATEC, 2012), o ensaio por líquido penetrante é utilizado para revelar descontinuidades, como trincas, poros, dobras, etc. Ele tem alta aplicabilidade nas etapas de fabricação e no acompanhamento da integridade do equipamento em uso podendo ser aplicado em todo material sólido desde que esse não seja poroso ou tenha uma superfície muito grosseira. Esse teste é bastante simples de ser executado, tendo em suma cinco etapas. A seguir é apresentado um esquema explicativo na FIG. 31.

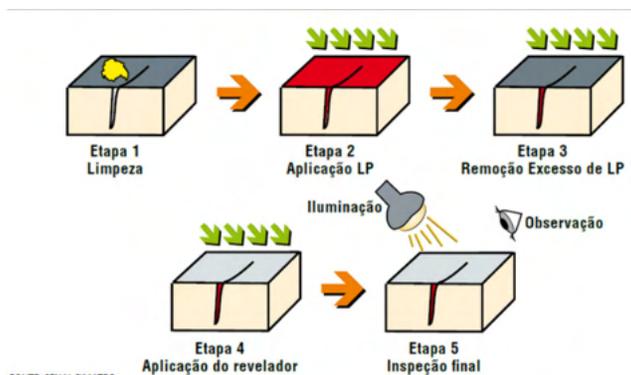


Figura 31 – Etapas da realização do ensaio por líquido penetrante.

Fonte: (SENAI-BA CIMATEC, 2012, p. 326).

Esse teste baseia-se na ação dos líquidos penetrantes que são aplicados na superfície do componente analisado e penetram nas trincas e rachaduras superficiais dele por ação do fenômeno da capilaridade. Os líquidos utilizados podem ser fluorescentes ou coloridos.

O ensaio por líquido penetrante possui uma boa sensibilidade de detecção de descontinuidades muito pequenas, é bastante versátil, pois qualquer material sólido não poroso pode ser inspecionado, é rápido e fácil de executar, além de possuir um baixo custo. Entretanto, esse teste não detecta descontinuidades que não estão abertas à superfície, a temperatura da superfície também é um fator limitante e uma limpeza minuciosa é necessária.

Partículas Magnéticas

Os ensaios por partículas magnéticas se baseiam no princípio do magnetismo, uma característica intrínseca dos materiais. Esse tipo de inspeção é dirigido para materiais magnetizáveis, de forma que é possível visualizar defeitos superficiais e, em alguns casos, defeitos subsuperficiais.

Nesse ensaio, o corpo analisado será magnetizado e serão aplicadas partículas magnéticas (óxido de ferro ou limalha de ferro) sobre ele. Caso ele possua uma interrupção na continuidade da sua superfície, como a presença de descontinuidades estruturais (como trincas e poros) ou a presença de qualquer material (inclusões) com propriedades magnéticas diferentes do metal base, as linhas de campo magnético serão distorcidas. Na região onde se encontra essa interrupção as partículas magnéticas forçarão a passagem do campo magnético para fora do corpo de prova, formando um campo de fuga que atrairá as partículas magnéticas. Dessa forma, se cria uma indicação visível da localização e da extensão do defeito (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012; MOREIRA, 2014; SENAI-BA CIMATEC, 2012). É apresentado um exemplo na FIG. 32 adiante.

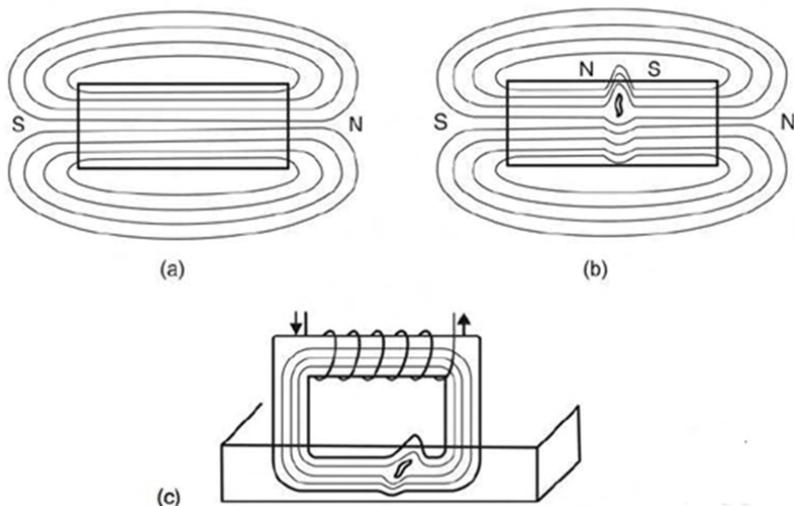


Figura 32 – Esboço do campo magnético desviado por uma trinca e sua visualização.

Fonte: (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012, p. 293).

Esse ensaio caracteriza-se por um preço mais baixo, fornece resultados imediatos sem precisar aguardar nenhum tempo de revelação e é capaz de detectar descontinuidades subsuperficiais (até 4 mm). Entretanto, ele não permite registros permanentes do resultado, somente se aplica a materiais ferromagnéticos, é limitado pela geometria da peça ensaiada (geometrias muito complexas o tornam um ensaio pouco confiável) e é difícil de inspecionar materiais com diferentes características magnéticas (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012; MOREIRA, 2014; SENAI-BA CIMATEC, 2012).

Radiografia

Segundo (MOREIRA, 2014; SENAI-BA CIMATEC, 2012), esse ensaio se baseia na mudança de atenuação da radiação pela matéria. Dependendo das características do objeto em análise, como sua geometria e o tipo de descontinuidades apresentadas por ele, o feixe de radiação sofrerá uma maior ou menor absorção, sensibilizando em maior ou menor grau o meio utilizado para o registro da imagem radiográfica. Após a radiação atravessar o material, será impressionado um filme formando uma imagem do mesmo. A este filme se dá o nome radiografia. Observa-se na FIG. 33 o arranjo básico utilizado para realizar o ensaio radiográfico.

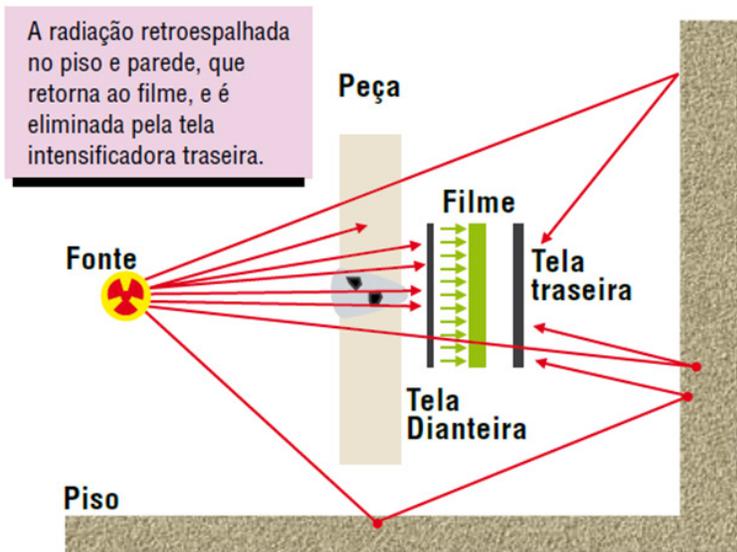


Figura 33 – Arranjo básico do ensaio radiográfico.

Fonte: (SENAI-BA CIMATEC, 2012 p. 335).

Apesar desse ensaio registrar os resultados permanentemente e detectar facilmente defeitos volumétricos (como poros e inclusões), ele possui algumas limitações como: custo do equipamento e material de consumo relativamente altos, elevado tempo de duração do ensaio, a interpretação requer grande experiência e conhecimento dos processos de soldagem para identificação correta das descontinuidades, a detecção de descontinuidades bidimensionais (como trincas e faltas de fusão) só são possíveis se o plano delas estiver alinhado com o feixe de radiação, é necessário o acesso aos dois lados da superfície da peça ensaiada e a radiação afeta a saúde dos operadores.

Ultrassom

Para que seja possível detectar, situar e dimensionar as descontinuidades internas ou superficiais que possam existir no objeto avaliado, o método de teste ultrassônico vai emitir um feixe de som de alta frequência nesse componente. O feixe de som emitido pode ser refletido por interfaces presentes no objeto avaliado, e a medição dessas reflexões fornece informações de medidas. Descontinuidades como poros, fissuras, inclusões diversas, dupla laminação, falta de fusão, falta de penetração, etc. atuam como interfaces, da mesma forma que a parede ou superfície do material. Com as informações obtidas é possível averiguar se a peça atende as especificações do fabricante (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012; MOREIRA, 2014; SENAI-BA CIMATEC, 2012). Observa-se na FIG. 34 abaixo uma ilustração do princípio básico da inspeção por ultrassom.

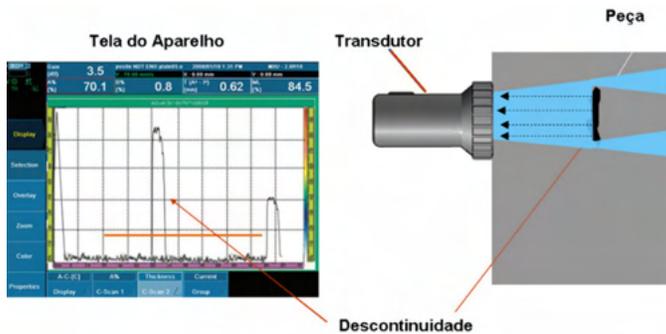


Figura 34 – Princípio básico da inspeção por ultrassom.

Fonte: Disponível em <<http://www.awiservice.com.br/ensaio-por-ultrassom-aplicacoes-industriais/>> Acesso em 19 de dezembro de 2020.

Segundo (SENAI-BA CIMATEC, 2012), o ensaio por ultrassom tem como vantagens:

- Não necessitar do acesso em ambas as superfícies da peça;
- Pode ser executado em materiais metálicos e não metálicos;
- Permite localizar e dimensionar descontinuidades com precisão;
- É mais rápido que a radiografia e pode ser executado em juntas de geometria complexa, como nós de estrutura tubulares.

Porém, ele possui como desvantagens:

- Não poder ser aplicado a peças cuja forma, geometria e rugosidade superficial impeçam o perfeito acoplamento de cabeçote à peça;
- O reforço de raiz, cobre-juntas e outras condições aceitáveis podem causar falsas indicações;
- Peças pequenas ou pouco espessas são difíceis de inspecionar;
- O grão grosseiro de certos metais de base e de solda, como ligas de níquel e aço inoxidável austenítico, podem dispersar o som e causar sinais que perturbem ou impeçam o ensaio;
- Os inspetores de ultrassom requerem mais tempo de treinamento e experiência do que outros ensaios não destrutivos;
- A identificação do tipo de descontinuidade requer muita experiência do inspetor, ainda assim, podendo não ser totalmente segura.

APLICAÇÕES DA TÉCNICA TC

Como descrito nas seções anteriores, existem diversos ensaios não destrutivos (END's) que são utilizados para detectar e mensurar defeitos e descontinuidades presentes em peças e componentes mecânicos. Em geral, esses métodos trabalham apenas com uma dimensão ou duas dimensões. Contudo, os avanços na ciência da computação e no processamento de dados em conjunto com as enormes melhorias no desempenho de hardware se tornaram possível e atrativo a utilização de tomógrafos computadorizados (TC) em avaliações não destrutivas. Em especial, destaca-se a aplicação da tomografia computadorizada de raios X ou gama (TCR) nos setores industriais (BARTSCHER et al., 2007; CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; DU PLESSIS; ROSSOUW, 2015; HSIEH, 2003; LIU et al., 2015; MÜLLER, Pavel et al., 2013; STAMOPOULOS et al., 2016).

A análise não destrutiva de defeitos e descontinuidades e a composição do material dentro do volume da peça digitalizada são os principais interesses para a aplicação industrial da TC. Com a capacidade de detectar variações de densidade na faixa de 21%, é possível analisar os defeitos dos materiais de forma qualitativa. Com o aprimoramento dessa tecnologia, a TC industrial não apenas permite a detecção de defeitos nas peças, como também os mensurar em suas dimensões e sua distribuição na espécie avaliada. Sendo assim, atualmente se desenvolve formas de utilizar a TC industrial para realizar inspeções mais quantitativas. A inspeção do primeiro artigo, um tipo de inspeção que avalia se o processo de manufatura de uma peça é capaz de entregar peças que estejam de acordo com as especificações de maneira consistente, também é possível, detectando pontos fracos do produto em seu estágio inicial e, portanto, aumentando a produtividade do processo (BARTSCHER et al., 2007; CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; DU PLESSIS; ROSSOUW, 2015; HSIEH, 2003; LIU et al., 2015; MÜLLER, Pavel et al., 2013; STAMOPOULOS et al., 2016).

Tendo em vista que a utilização da TC gera uma informação volumétrica completa sobre o corpo medido, é possível gerar superfícies no volume escaneado e determinar as coordenadas do corpo medido. Isso significa que tanto as máquinas de medição por coordenadas (MMC) quanto a TC podem ser utilizadas para medir dimensões (BARTSCHER et al., 2007; CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; HSIEH, 2003; LIU et al., 2015). É possível encontrar o uso da TC em muitos campos industriais diferentes, tais como:

- Ciências dos Materiais;
- Eletrônicos;
- Militar;

- Médico / alimentício;
- Arqueologia;
- Segurança;
- Aeroespacial;
- Automotivo.

Conforme mostrado na FIG. 35, as principais tarefas para TC industrial são visualização, testes não destrutivos, digitalização e metrologia dimensional:

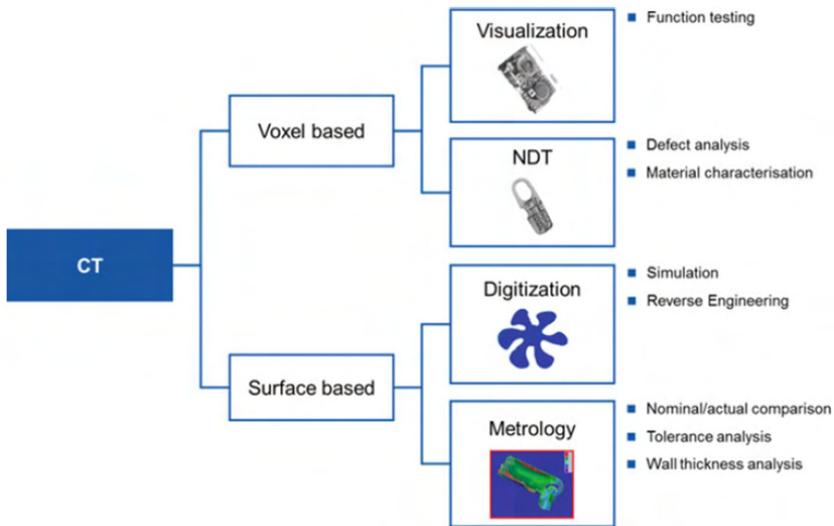


Figura 35 – Esquema demonstrando os principais campos de aplicações para TC industrial.

Fonte: Adaptado de (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018, p. 334).

Segundo (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; LIU et al., 2015), vale informar que dentre os campos de aplicação da TC industrial apresentados acima:

- A visualização é um teste qualitativo com intuito de inspecionar, por exemplo, a conformidade e funcionamento das peças montadas.
- A utilização da TC industrial nos END's é feita com intuito de se analisar algum defeito ou descontinuidade e também para caracterização de materiais. Enquanto que orifícios de contração, inclusões de material ou rachaduras, são de interesse especial para estruturas internas de END's, na ciência dos materiais a caracterização 3D de diferentes fases é relevante. A aplicação da TC nos END's é uma das mais antigas e importantes.

- O uso da TC para digitalização implica em criar e avaliar modelos geométricos virtuais de objetos e inclui simulação e engenharia reversa. A prototipagem virtual permite melhorar a geometria dos protótipos na fase de pré-produção. Além disso, a modelagem e o cálculo das propriedades do material podem ser realizados com base em dados da TC, por exemplo, para o objeto de meios de filtro ou para o objeto de peças poliméricas reforçadas com fibras.
- Dentro da metrologia o uso da TC industrial se dá na realização de medições dimensionais. Os principais interesses dentro da metrologia são: a medição de distâncias cruciais, espessuras de parede, diâmetros e a geometria 3D de superfícies internas e externas em geral.
- Outras aplicações da TC podem ser encontradas nas áreas de ciências biomédicas, geologia, artes ou arqueologia.

É importante apontar que é possível fazer uma comparação dos dados da TC com os dados do CAD (Desenho Assistido por Computador). Entretanto, essa comparação não pode ser realizada de maneira completamente segura e é recomendável que não se compare os dados da TC com os dados do CAD, mas sim com as medições realizadas no instrumento óptico ou ainda melhor no MMC, equipamento cuja incerteza de medição é conhecida. Não há certeza se essas variações no conjunto de dados da TC ocorrem por causa de imprecisões presentes no processo de fabricação ou devido aos próprios dados da TC (BARTSCHER et al., 2007; CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; HSIEH, 2003; LIU et al., 2015).

Outro problema de disputa também ocorre se for realizada uma comparação direta entre os pontos de dados da TC com os pontos de dados da MMC, onde se verificou diferenças que podem ser da ordem de vários micrômetros. Para solucionar esse segundo problema, deve-se comparar exatamente os mesmos pontos no objeto, ou seja, selecionar os mesmos pontos na nuvem de pontos de TC que foram os pontos sondados pelo MMC. Segundo (CANTATORE; MÜLLER, 2011)¹, “O problema da estratégia de medição e avaliação faz parte da pesquisa em andamento no DTU.”, sendo DTU a *Danmarks Tekniske Universitet* (Universidade Técnica da Dinamarca) (BARTSCHER et al., 2007; CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; HSIEH, 2003; LIU et al., 2015).

O autor comunica que em seções posteriores deste trabalho será abordado um capítulo focado no uso da TC dentro da metrologia dimensional e como um sistema de medição dimensional. Neste momento, focar-se-á na análise da TC industrial quanto ao uso como END.

Nas seções seguintes serão apresentados dois exemplos da aplicação da TC em END. Contudo, o autor considerou extremamente importante informar que os estudos

1. Tradução nossa.

apresentados a seguir estão muito resumidos. O objetivo é de demonstrar e exemplificar uma possível aplicação da TC na detecção de defeitos e descontinuidades. Portanto, recomenda-se ao leitor pesquisar e ler os estudos originais para compreendê-los completamente e obter todas as informações que aqui não foram mostradas.

Primeiro Exemplo de aplicação da TC em END

Um artigo publicado por (NAEIMI et al., 2017) selecionou amostras de trilhos ferroviários que sofreram defeitos de fadiga de contato de rolamento (estão associados a complexas redes de trincas) e utilizou a TC para mensurar essas trincas. A FIG. 36 mostra a vista superior dos defeitos selecionados quando fotografados no campo, juntamente com os espécimes finais preparados para os experimentos de TC.

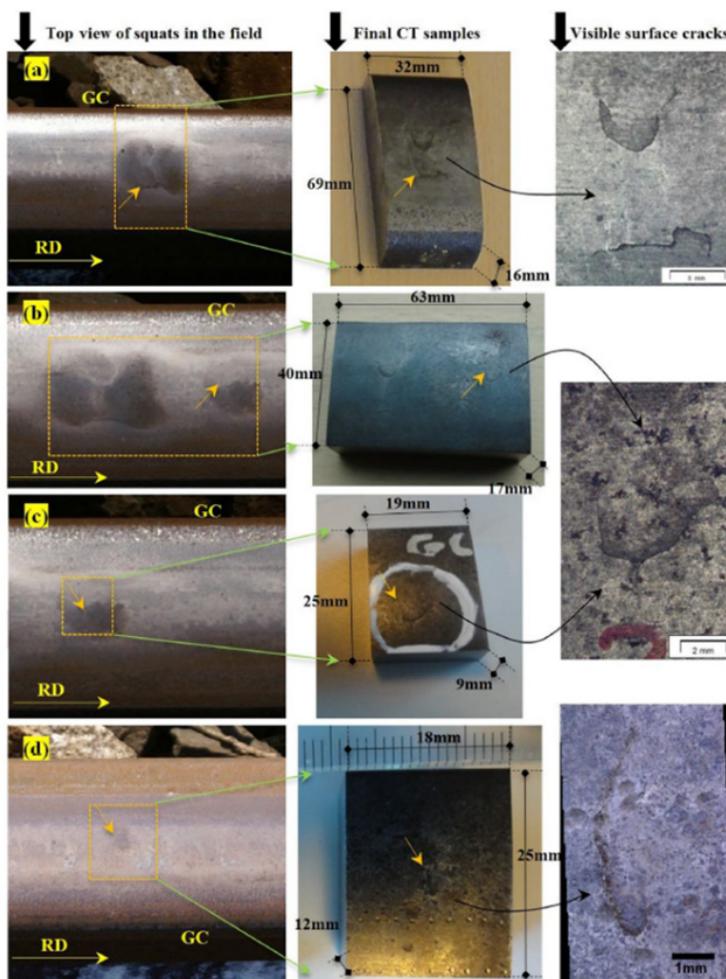


Figura 36 – Vista superior dos defeitos de agachamento selecionados e amostras finais preparadas para TC.

Fonte: Adaptado de (NAEIMI et al., 2017, p. 202).

Na figura acima as pequenas setas indicam a localização das fissuras estudadas: (a) agachamento moderado, espécime 1; (b) agachamento leve, espécime 2^a; (c) agachamento leve, espécime 2b; e (d) agachamento infantil, espécime 3. As aberturas das rachaduras na superfície do trilho, visto ao microscópio, são mostrados à direita.

Foi utilizado nesse estudo um micro TC da marca Phoenix Nanotom™ cujos raios X são gerados com 180 kV, e a resolução espacial máxima (tamanho mínimo do pixel 3D chamado de voxel) é 300 nm. Como a resolução depende do tipo de material estudado, o tamanho do voxel considerado nesse estudo foi de 12 µm x 12 µm x 12 µm.

As trincas presentes nessa espécime foram mensuradas pelo micro TC e por microscópios para validar as medições. A FIG. 37 (a) demonstra a vista superior do corpo de prova; em (b) estão os alinhamentos de fissuras denominados C1, C2 e C3 que foram medidos com microscopia; já em (c) estão os alinhamentos de fissuras que foram detectados pela TC e em (d) a comparação dos resultados das duas medições.

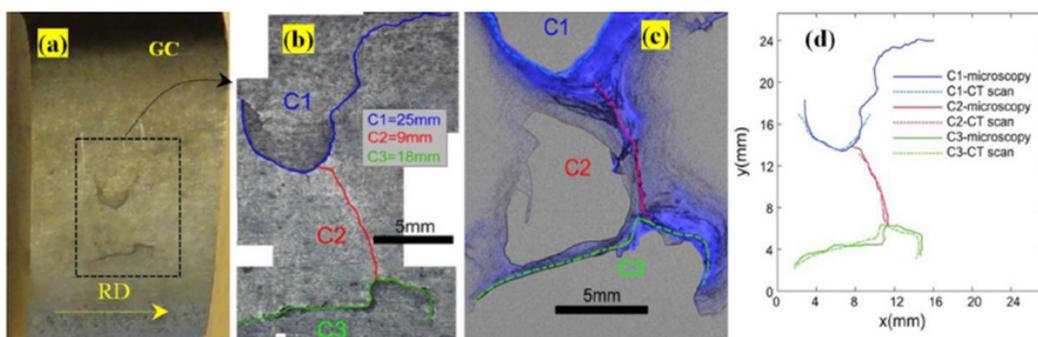


Figura 37 – Alinhamentos de fissuras presentes na superfície no agachamento moderado de um corpo de prova.

Fonte: Adaptado de (NAEIMI et al., 2017, p. 208).

Em suma, nesse estudo a TC foi capaz de detectar a presença de fissuras em todos os espécimes estudados. Contudo, a qualidade da medição da TC para identificar a geometria real das fissuras internas dependia dos ajustes da TC e do tamanho da amostra. As medições realizadas pela TC se demonstraram confiáveis, pois os alinhamentos de trincas observados pela microscopia na superfície do trilho eram quase idênticos aos de trincas detectadas pela TC.

Segundo Exemplo de aplicação da TC em END

No estudo realizado por (REDDY et al., 2011), é discutido o desenvolvimento e caracterização de um sistema TC industrial para aplicações aeroespaciais e apresentar alguns estudos de caso de aplicações da TC industrial. Um objeto apresentado por este

estudo foi uma inserção de garganta, um componente crítico em um bico de motor de foguete que experimenta temperaturas muito altas e plumas extremamente erosivos. São feitos cortes com a TC para encontrar a distribuição de densidade em amostras no estágio final de infiltração (realizada para criar pastilhas de C-SiC que oferecem uma maior resistência a erosão).

Os valores de densidade da pré-forma (nível de porosidade) para atingir um conteúdo de vazio aceitável no produto final é otimizado apenas por imagens de TC, o que mostra o potencial da TC para essa aplicação. A geração de superfície de isovalor para uma grade com um isovalor especificado pelo usuário foi possível no software e é efetivamente usada para extrair o conteúdo de volume dos defeitos (ver a FIG. 38).

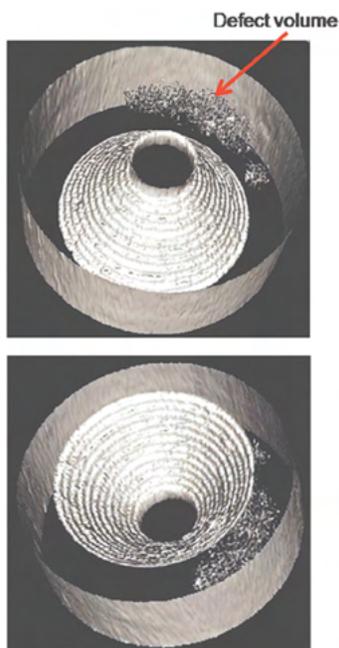


Figura 38 – Visualização 3D da inserção da garganta e do conteúdo do volume do defeito extraído por isovalor variável.

Fonte: Adaptado de (REDDY et al., 2011, p. 310).

Em suma, no estudo realizado por (REDDY et al., 2011) foi desenvolvido e caracterizado uma TC com resolução de 350 μm para digitalizar grandes objetos aeroespaciais. Os autores concluíram que:

“O sistema TC é comprovadamente o único método eficaz para revelar o conteúdo de vazio final em um inserto da garganta do bocal do motor de foguete C-SiC durante seu desenvolvimento e atua como a modalidade END

básica para aceitação durante a fabricação. O sistema TC é capaz de revelar múltiplas rachaduras, descolamentos e delaminações em componentes aeroespaciais.” – (REDDY et al., 2011, p. 310)².

VANTAGENS E DESVANTAGENS GERAIS DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Conforme apresentado até o presente momento, a TC traz várias vantagens. Mas ela também inclui desvantagens em seu uso. Uma das vantagens que pode ser citada é o fato de que a TC está cada vez mais sendo utilizada na indústria para END's. E como demonstrado nos exemplos acima, a mesma aparenta ter uma enorme capacidade em detectar e medir defeitos e descontinuidades. Já na parte metrológica, essa tecnologia que trabalha sem entrar contato ajuda a medir características internas e externas em um tempo de aquisição muito curto, com precisão e sem destruir o item analisado (CANTATORE; MÜLLER, 2011; DE CHIFFRE et al., 2014a; LIU et al., 2015; MÜLLER, Pavel et al., 2013). As vantagens e desvantagens estão descritas de forma resumidas abaixo:

VANTAGENS

- Pode ser aplicada nos END's;
- Determina a geometria interna e externa;
- Confere volume de dados de alta densidade;
- Tempo curto de digitalização.

DESVANTAGENS

- Nenhum procedimento de teste (normas de padronização) aceito e internacionalmente utilizado até o presente momento;
- Quantidades de influência complexas e numerosas que afetam as medições;
- Capacidade de medição de forma reduzida devido a erros de medição (artefatos);
- Incerteza de medição em muitos casos desconhecida (os resultados não são rastreáveis);
- Problema encontrado ao digitalizar vários materiais em um produto.

2. Tradução nossa.

CONCLUSÃO QUANTO AO USO DA TC EM END'S

Como descrito neste capítulo, todo componente mecânico está sujeito a descontinuidades e defeitos, sejam estes adquiridos antes, durante ou depois do processo de fabricação. Para detectar e mensurar essas descontinuidades e defeitos são utilizadas diversas técnicas de ensaios não destrutivos. Os END's vão ser escolhidos de acordo com a descontinuidade que se pretende avaliar, o nível de precisão necessário, qual componente mecânico estará sob análise e em quais condições. Entretanto, além das formas de END's mais utilizadas, tem se observado o uso TCR na técnica de ensaios não destrutivos (CANTATORE; MÜLLER, 2011; DE CHIFFRE et al., 2014; LIU et al., 2015; MÜLLER et al., 2013).

Com base em tudo que já foi retratado até o presente momento, é possível concluir que a técnica da TC é uma ferramenta de END poderosa para caracterização e visualização de diferentes propriedades dos materiais. Avaliar quantitativamente as propriedades do material como, por exemplo, a determinação da porosidade, trincas, micro trincas, dimensões em geral, entre outros, são aplicações importantes dos métodos de processamento de imagem aplicados aos dados da TC (CANTATORE; MÜLLER, 2011; DE CHIFFRE et al., 2014; LIU et al., 2015; MÜLLER et al., 2013).

Entretanto, como foi demonstrado na seção anterior, ainda existem problemas a serem resolvidos quanto a aplicação da técnica da TC como END. Os artefatos precisam ser considerados, principalmente para dados quantitativos gerados a partir de varreduras da TC. Além disso, apresenta-se necessário o desenvolvimento de métodos mais avançados de processamento e visualização de imagens para que seja possível utilizar diariamente na indústria os dados quantitativos extraídos dos conjuntos de dados da TC (CANTATORE; MÜLLER, 2011; DE CHIFFRE et al., 2014; LIU et al., 2015; MÜLLER et al., 2013).

ANÁLISE DA TC QUANTO AO USO COMO SISTEMA DE MEDIÇÃO DIMENSIONAL

Um sistema de medição é um conjunto de elementos físicos (instrumentos de medir acessórios) necessários para se atingirem os objetivos de uma medição, por meio da aplicação de processos de medição, em dadas condições (INMETRO, 2012b)

Tendo esse conceito em mente, o intuito do presente capítulo é avaliar como a TC pode ser utilizada como um sistema de medição dimensional. Para isto, conceituar-se-á as tolerâncias dimensionais e tolerâncias geométricas. Também serão expostos estudos de caso e exemplos da literatura que demonstrem a capacidade da tecnologia TC em avaliar as tolerâncias dimensionais e as tolerâncias geométricas e assim ser utilizada como um sistema de medição.

INTRODUÇÃO A CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA METROLOGIA

O processo de fabricação de uma peça obrigatoriamente estará sujeito a imperfeições e desvios. Isso significa que inexatidões ou variações das cotas indicadas no desenho sempre acontecem, tornando assim a existência de tolerâncias fundamentais na engenharia dimensional. Tolerâncias bem definidas garantem a intercambialidade das peças, algo fundamental para componentes mecânicos que estão associados a outras peças, formando conjuntos mecânicos que desempenham funções determinadas (CAMARGO; ABACKERLI, 2010; DE OLIVEIRA NETO; SOARES JÚNIOR, 2016). Importante destacar que, de acordo com (AGOSTINHO, 2018), na fabricação intercambiável “O princípio estabelece que se execute cada dimensão de todas as peças de uma máquina, tal que, qualquer das peças se ajustará com a sua respectiva peça par, funcionando corretamente em qualquer uma das montagens”.

Desta forma, abordar-se-á a definição das tolerâncias, suas subdivisões, o que são ajustes e como os mesmos se aplicam no cotidiano industrial.

Compreendendo as Tolerâncias Dimensionais e os Ajustes

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o órgão responsável pela normalização técnica. Segundo (ABNT, 1995), a NBR 6158 “fixa o conjunto de princípios, regras e tabelas que se aplicam à tecnologia mecânica, a fim de permitir escolha racional de tolerâncias e ajustes, visando a fabricação de peças intercambiáveis”. Essa

Norma também estabelece que a dimensão nominal é “Dimensão a partir da qual são derivadas as dimensões limites pela aplicação dos afastamentos superior e inferior” e Dimensão real ou efetiva é a dimensão real obtida através da medição.

A NBR 6158 também determina que tolerância é a diferença entre a dimensão máxima aceitável e a dimensão mínima. Em outras palavras, em qual faixa nominal as dimensões reais medidas de um componente devem estar. O campo de aplicação dessa Norma abrange dimensões nominais de até 3 510 mm de peças intercambiáveis.

Também de acordo com (ABNT, 1995), os campos de tolerâncias são “Em uma representação gráfica de tolerâncias, o campo compreendido entre duas linhas, representando as dimensões máxima e mínima, é definido pela magnitude da tolerância e sua posição relativa em relação à linha zero”. Observa-se na FIG. 39 abaixo a representação gráfica dos campos de tolerâncias, segundo a NBR 6158.

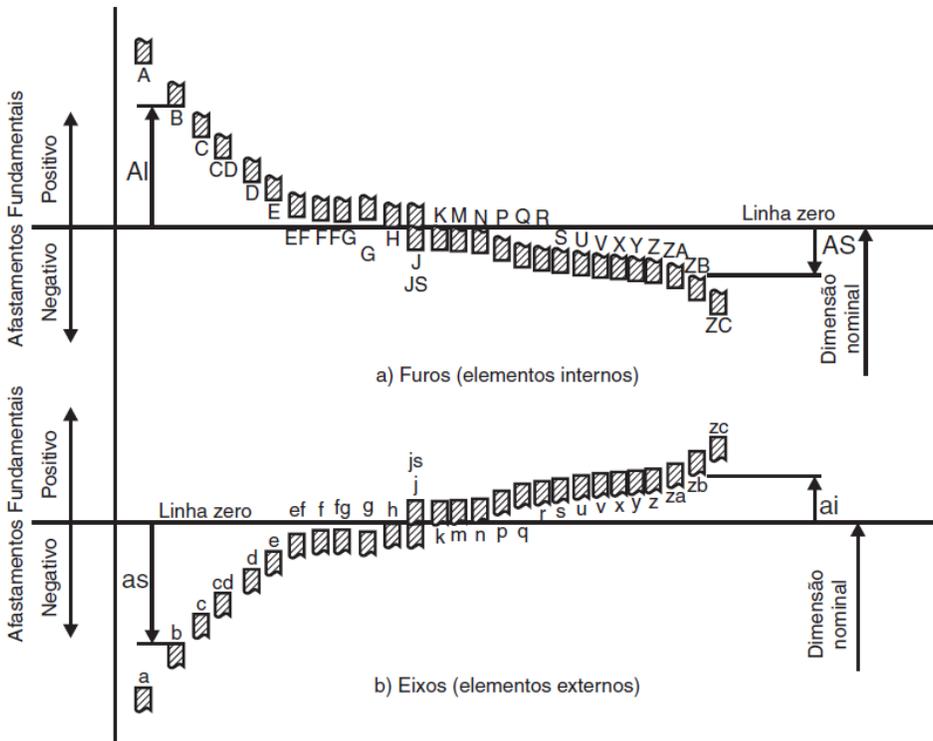


Figura 39 – Representação convencional dos campos de tolerâncias.

Fonte: (NETO, 2012, p. 104).

Os conceitos apresentados acima são necessários para a compreensão dos ajustes. Segundo (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 2020; CAMARGO; ABACKERLI,

2010), quando se pretende montar duas peças, chama-se ajuste a relação entre as peças acopladas determinada pela diferença de medidas das peças antes do acoplamento. Por exemplo, ao adotar o sistema ABNT de ajustes, o furo 25 H7 e o eixo m6 formam os ajustes 25H7m6, ou, demonstrando os valores numéricos:

- O furo de 25 mm de diâmetro terá um afastamento superior igual a + 0,000 mm e um afastamento inferior de + 0,021 mm; a dimensão máxima do furo será 25,021 mm e a dimensão mínima do furo será de 25 mm;
- O eixo de 25 mm de diâmetro terá um afastamento superior de + 0,021 mm e um afastamento inferior de + 0,008 mm; a dimensão máxima do eixo será de 25,021 mm e a dimensão mínima do eixo será de 25,008 mm.

Os ajustes podem ser ajustes com folga ou ajuste com interferência. Os ajustes com folga são aqueles que o eixo se encaixa no furo de modo a deslizar ou girar livremente. Já os ajustes com interferência o eixo se encaixa no furo com um certo esforço, de modo a permanecer fixo (ABNT, 1995; AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 2020; CAMARGO; ABACKERLI, 2010). Na FIG. 40 há uma representação do ajuste com folga, e na FIG. 41 está representado o ajuste com interferência.

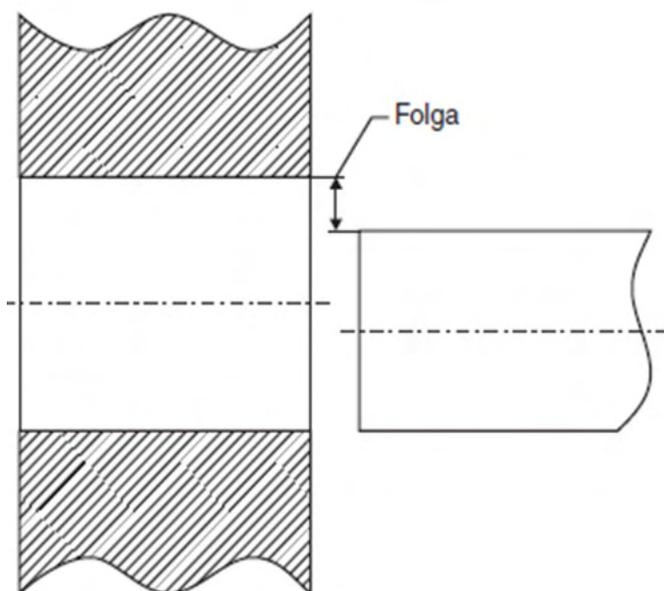


Figura 40 – Representação de ajuste com folga.

Fonte: (NETO, 2012, p. 109).

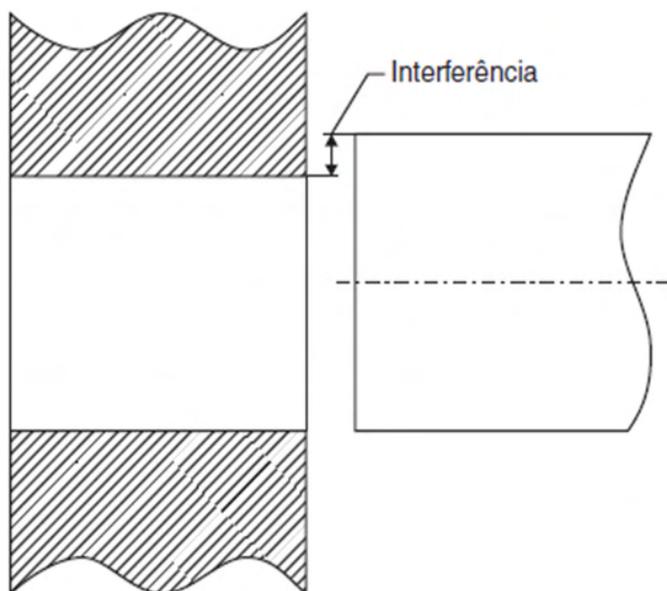


Figura 41 – Representação de ajuste com interferência.

Fonte: (NETO, 2012, p. 109)

Compreendendo as Tolerâncias Geométricas

As tolerâncias dimensionais sozinhas são insuficientes para se determinar corretamente o estado final da peça, em relação ao projeto de trabalho, pois a forma do componente também deve ser levada em consideração. Em virtude disso, tolerâncias geométricas são necessárias.

Apresentar-se-á um exemplo: para um certo pino, foi estipulado que o comprimento nominal de seu eixo seria de 30,0 mm, sem contar com a cabeça. A dimensão mínima aceitável é de 29,9 mm e a dimensão máxima é de 30,1 mm. Contudo, observa-se na FIG. 42 que não foi o suficiente determinar apenas as dimensões da peça, pois é possível apresentar um desvio de forma no eixo final (TELECURSO, 2000).

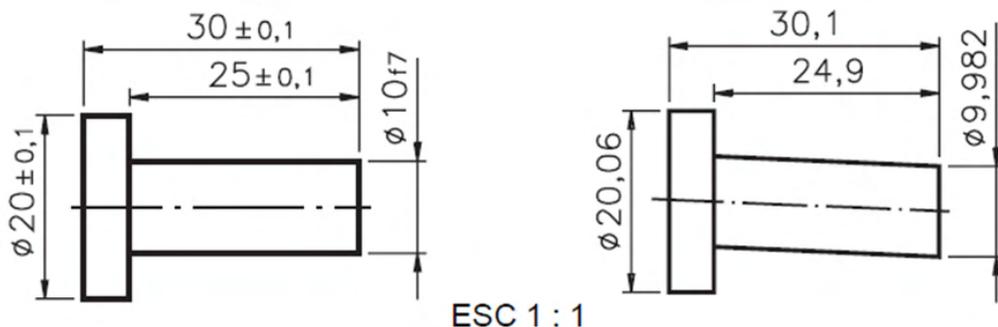


Figura 42 – Exemplo de desvio geométrico num pino. À esquerda o desenho técnico do pino com indicação das tolerâncias. À direita mostra como ficou a peça depois de fabricada.

Fonte: (TELECURSO, 2000, p. 1).

Conforme (ABNT, 1997), a NBR 6409 “estabelece os princípios gerais para indicação das tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento, e, ainda, as definições geométricas apropriadas”. Isso significa que essa norma que define os diferentes tipos de tolerâncias geométricas existentes, como elas devem ser indicadas num desenho técnico e outros requisitos gerais e específicos. As tolerâncias geométricas podem ser associadas a desvios:

- Macro geométricos: retitude, planeza, circularidade, cilindridade, entre outros.
- Micro geométricos: rugosidade.

As tolerâncias macro geométricas são erros de fabricação ligados a forma, orientação e a posição dos elementos mecânicos. Na FIG. 43 é apresentado todas as tolerâncias macro geométricas, suas respectivas denominações e simbologias (ABNT, 1997).

CARACTERÍSTICA TOLERADA		SÍMBOLO
FORMA	Retitude	
	Planeza	
	Circularidade	
	Cilindricidade	
	Perfil de linha qualquer	
	Perfil de superfície qualquer	
ORIENTAÇÃO	Paralelismo	
	Perpendicularidade	
	Inclinação	
POSIÇÃO	Posição	
	Concentricidade	
	Coaxialidade	
	Simetria	
BATIMENTO	Circular	
	Total	

Figura 43 – As características geométricas e os seus respectivos símbolos.

Fonte: (NETO, 2012, p. 123).

Na FIG. 44 a) é representado um desenho técnico mecânico de um cilindro com tolerância dimensional. Na parte b) da figura abaixo é possível verificar que a peça possui erro de forma, contudo, no desenho não foi especificado a tolerância geométrica para orientar a avaliação desses erros geométricos. Por fim, na FIG. 44 c) é possível observar que, por conta dos erros (ou desvios) de forma, existem diversos valores possíveis para o diâmetro da peça produzida (DE OLIVEIRA NETO; SOARES JÚNIOR, 2016).

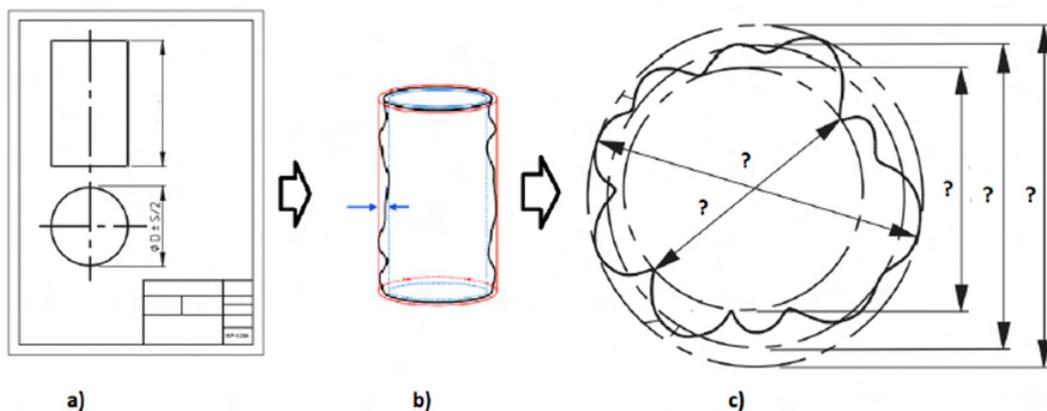


Figura 44 – Exemplo que demonstra as tolerâncias metroológicas.

Fonte: (DE OLIVEIRA NETO; SOARES JÚNIOR, 2016, p. 58).

Atualmente, quando se pretende produzir alguma peça, como o cilindro apresentado na FIG. 44, será elaborado um projeto mecânico que vai especificar as características necessárias do produto final. Apesar dos erros dimensionais e geométricos possíveis de serem observados num componente mecânico, as medições metroológicas efetuadas seguem um procedimento de expressão de incerteza de medição que será abordado no capítulo 5.

Por fim, é importante salientar que com um mercado cada vez mais globalizado e competitivo, exige-se mais velocidade e eficiência das empresas, fazendo com que elas se veem perante o desafio de trazer melhores produtos, mais atraentes, personalizados, mais acessíveis, mais robustos, confiáveis e principalmente, lançados no nicho de mercado antes da concorrência. Para poderem atingir esses objetivos, diversos setores da engenharia atuam de forma integrada por meio de grupos especialistas em concepção de projeto, desenvolvimento de produto, protótipo, testes de engenharia e manufatura, sendo utilizadas diferentes tecnologias digitais e novas técnicas (CAMARGO; ABACKERLI, 2010; DE OLIVEIRA NETO; SOARES JÚNIOR, 2016).

APRESENTANDO AS CAPACIDADES DE MEDIÇÕES DIMENSIONAIS DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Presentemente a complexidade das peças industriais está aumentando, enquanto os tempos de desenvolvimento devem ser minimizados. As tecnologias de manufatura aditiva (AM) são capazes de produzir geometrias altamente complexas e peças personalizadas diretamente do modelo de projeto da peça sem ferramentas dedicadas. Contudo, elas enfrentam o desafio de realizarem processos de produção e desenvolvimento de produtos de maneira cada vez mais eficiente em termos de custo e tempo (ou seja, cada vez mais rápido e barato). Avanços na tecnologia de manufatura possibilitam o uso de materiais avançados, como como plásticos reforçados com fibra, para o desenvolvimento de novos produtos. Contudo, esses novos produtos vão exigir novas técnicas de medições e métodos de testes com um elevado grau de confiabilidade e qualidade. Em outras palavras, as demandas industriais estão exigindo tolerância e controle de qualidade geométrica de peças complexas, como as peças geradas por manufatura aditiva ou de moldagem por injeção. Testar a conformidade das características do produto em cada estágio de produção com tecnologias de medição precisas e eficientes em tempo pode contribuir para reduzir desperdícios e custos durante a fabricação.

É nesse contexto que a Tomografia Computadorizada (TC) industrial, em especial a de raios X ou gama, oferece uma grande variedade de aplicações em toda a cadeia de desenvolvimento e produção se tornando uma atraente alternativa aos equipamentos convencionais atualmente utilizados (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; DE CHIFFRE et al., 2014a; MÜLLER, Pavel et al., 2013; VILLARRAGA-GÓMEZ et al., 2018; VILLARRAGA-GÓMEZ; LEE; SMITH, 2018).

A seguir, o capítulo se concentrará principalmente em realizar uma caracterização metrológica da TC, falando a respeito de seus aspectos metrológicos.

Resolução da TC

Primeiro, apresentar-se-á o fluxo de trabalho da TC na FIG. 45 para relembrar o procedimento de aquisição de imagens da Tomografia Computadorizada de Raios X (TCR), conforme descrito em seção futura.

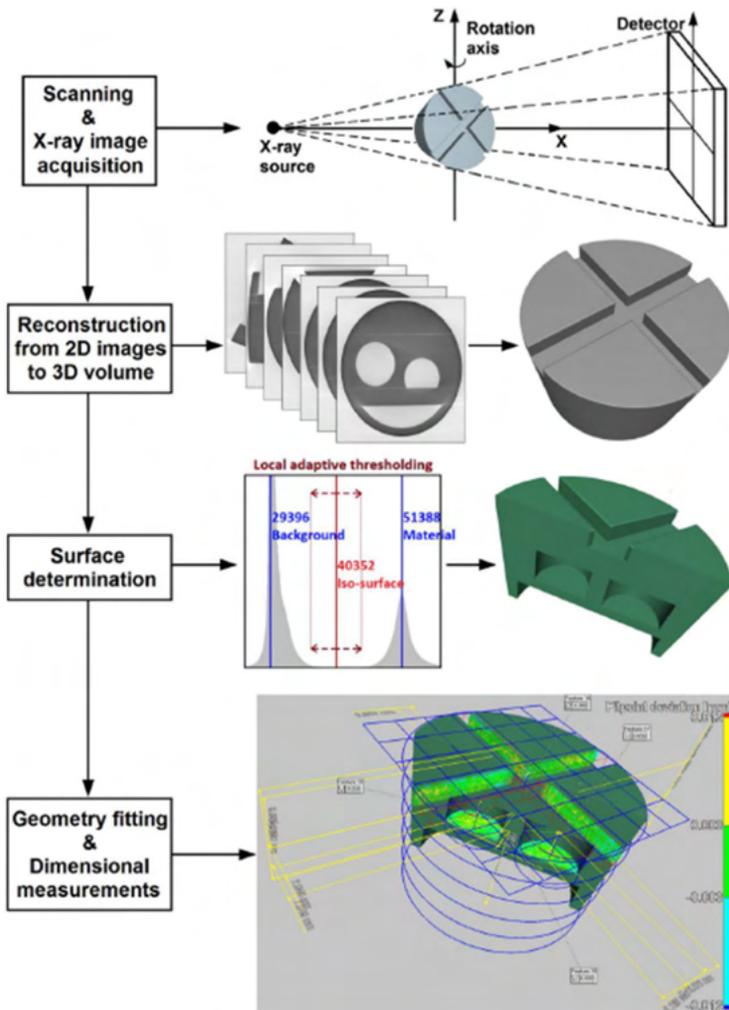


Figura 45 – Demonstração do fluxo de trabalho para todo o processo de TC de raios X que inclui avaliação de medidas dimensionais.

Fonte: Adaptado de (VILLARRAGA-GÓMEZ; LEE; SMITH, 2018, p. 4).

Vale recordar que a TCR utiliza um algoritmo de reconstrução de software para gerar um modelo 3D a partir das imagens de raios X bidimensionais para o interior e exterior da peça.

Segundo, é importante entender que, de acordo com (INMETRO, 2012b), resolução é a “menor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente”. Ou seja, é o menor detalhe que é perceptível dentro de uma máquina: por exemplo, o menor valor que um paquímetro consegue perceber e indicar ao se medir o comprimento de uma peça. Existem diversos fatores que influenciam a resolução espacial

das reconstruções da TC, dentre eles pode-se citar:

- O tamanho do ponto focal da fonte de raios X;
- O desempenho do detector ampliação;
- O número de projeções;
- Os algoritmos de reconstrução e pós-processamento de dados.

O tamanho do ponto focal é um dos principais fatores que afetam a qualidade da imagem obtida. Sistemas com tamanho de ponto focal maior que 0,1 mm são normalmente referidos como TC convencional ou TC macro. Sistemas que tem um tamanho de ponto de até um ou poucos micrometros são chamados de microfoco (mTC). Já os sistemas nanofoco (nanoCT) podem atingir o tamanho do ponto submicrométrico, atualmente abaixo de 0,4 μm . Na FIG. 46 é apresentado as faixas típicas de resolução espacial para os diversos sistemas tomográficos apresentados acima (DE CHIFFRE et al., 2014a; GAPINSKI et al., 2014; KRUTH et al., 2011; VILLARRAGA-GÓMEZ; LEE; SMITH, 2018).

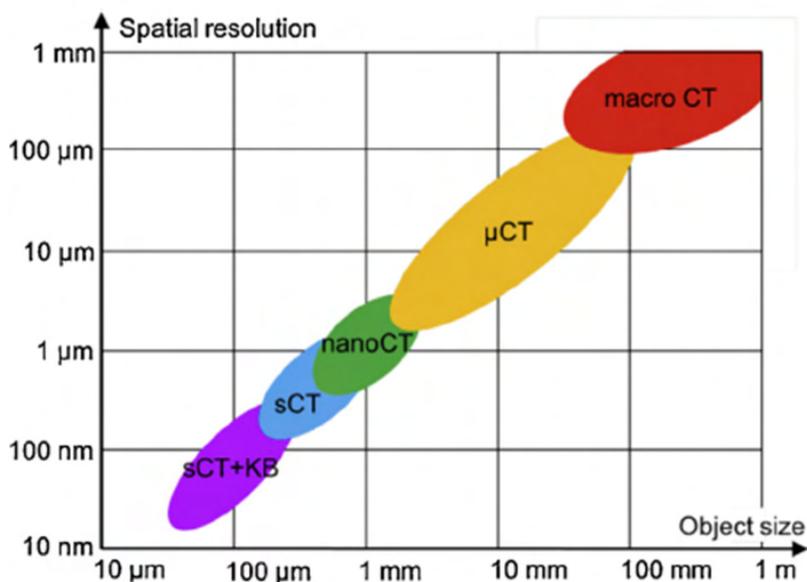


Figura 46 – Resoluções espaciais típicas e tamanhos de objeto (diâmetro) para macro CT, micro CT, nano CT, CT síncrotron (sCT) e CT síncrotron com espelhos KB (sCT + KB).

Fonte: Adaptado de (DE CHIFFRE et al., 2014^a, p. 659).

Tempo de Varredura da TC v.s. Tempo de varredura da MMC

De acordo com (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; DE CHIFFRE et al., 2014b;

MÜLLER, Pavel et al., 2013; VILLARRAGA-GÓMEZ et al., 2018; VILLARRAGA-GÓMEZ; LEE; SMITH, 2018; ZANINI; CARMIGNATO, 2019), um dos principais equipamentos convencionais utilizados para medir as dimensões de algum componente mecânico são as Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC) ópticas ou táteis. Elas são capazes de medir a superfície externa de uma peça, mas não a interna ou outras estruturas inacessíveis à inspeção tátil ou baseada na visão. As MMC táteis também podem produzir tensões compressivas e fricção durante o deslizamento que podem produzir desgaste na superfície. Enquanto as medições por coordenadas convencionais (por exemplo, obtidas usando um Sistema de Medição de Coordenadas tátil, SMC) são feitas diretamente na superfície da peça, as medições de TC são realizadas em um modelo virtual da peça. Isso significa que um grande número de recursos pode ser analisado ao mesmo tempo, sem comprometer o tempo de varredura. A FIG. 47 mostra a relação entre o tempo de varredura e o número de recursos analisados para diferentes SMC. Em vermelho está o SMC tátil, em amarelo está o SMC óptico e em verde a TC.

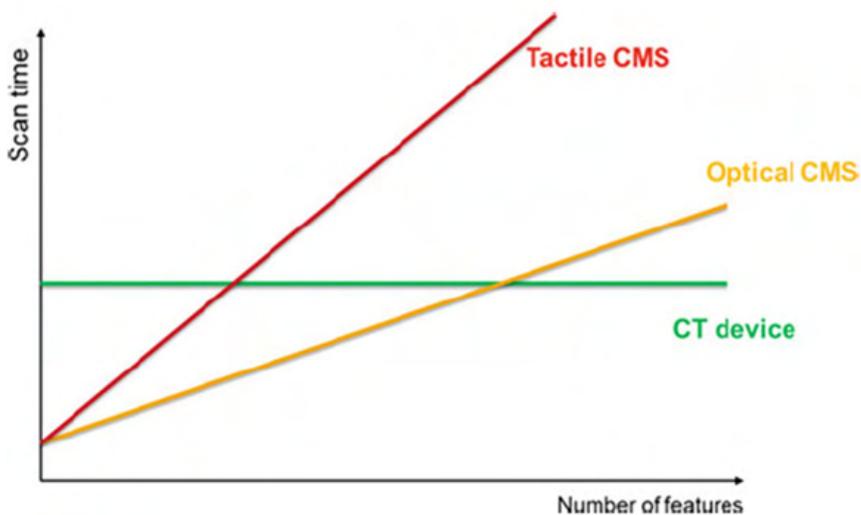


Figura 47 – Tempo de varredura em função do número de recursos para diferentes sistemas de medição por coordenadas.

Fonte: Adaptado de (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018, p. 335).

Em suma, com um sistema de TC o tempo de varredura é independente do número de recursos a serem medidos no objeto (ao contrário das MMC). Por outro lado, o tempo de varredura da TC depende de uma série de parâmetros, incluindo: tempo de exposição, número de projeções e desempenho do processamento de dados.

Espessura Máxima de Material Penetrável

Como já foi explicado neste presente estudo, o funcionamento da TCR se baseia na atenuação dos raios X ao atravessarem um objeto. Também já foi informado que o coeficiente de atenuação do material e da energia do fóton do raio X determina a espessura máxima acumulada do material que pode ser penetrada pelos raios X. Os valores típicos para materiais comuns são fornecidos na TAB. 1 a seguir.

X-ray voltage	130 kV	150 kV	190 kV	225 kV	450 kV
Steel/ceramic	5 mm	<8 mm	<25 mm	<40 mm	<70 mm
Aluminum	<30 mm	<50 mm	<90 mm	<150 mm	<250 mm
Plastic	<90 mm	<130 mm	<200 mm	<250 mm	<450 mm

Tabela 1 – Espessuras de material penetrável máximas típicas para materiais industriais comuns.

Fonte: Adaptado de (DE CHIFFRE et al., 2014a, p.659).

Capacidades da TC em Medir Produtos Multimateriais

A capacidade de analisar objetos multimateriais é frequentemente exigida em diversas aplicações industriais. A análise da TC em objetos multimateriais apresenta dificuldades significativas devido a diferentes atenuações de raios X por diferentes materiais e a artefatos de imagem específicos. Peças com coeficientes de absorção semelhantes representam um problema comum ao realizar a segmentação de cada peça. A FIG. 48 mostra a varredura de um complexo multimaterial de uma caneta de insulina que consiste em vários materiais poliméricos. Nesta ocasião, o principal desafio é segmentar as diferentes partes do material, uma vez que possuem coeficientes de absorção semelhantes (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; DE CHIFFRE et al., 2014a; KRUTH et al., 2011).

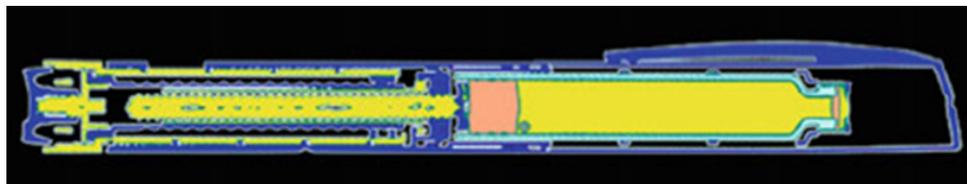


Figura 48 – Conjunto multimaterial de uma caneta de insulina, consistindo em componentes de diferentes materiais poliméricos.

Fonte: Adaptado de (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018, p. 357).

A FIG. 49 mostra um exemplo de inspeção da montagem de dois componentes

roscados. Nesse caso, as capacidades de inspeção do TC são insuficientes para distinguir as duas partes diferentes da montagem, uma vez que são feitas do mesmo material. Isso pode representar um problema típico ao inspecionar um conjunto mecânico montado (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018).

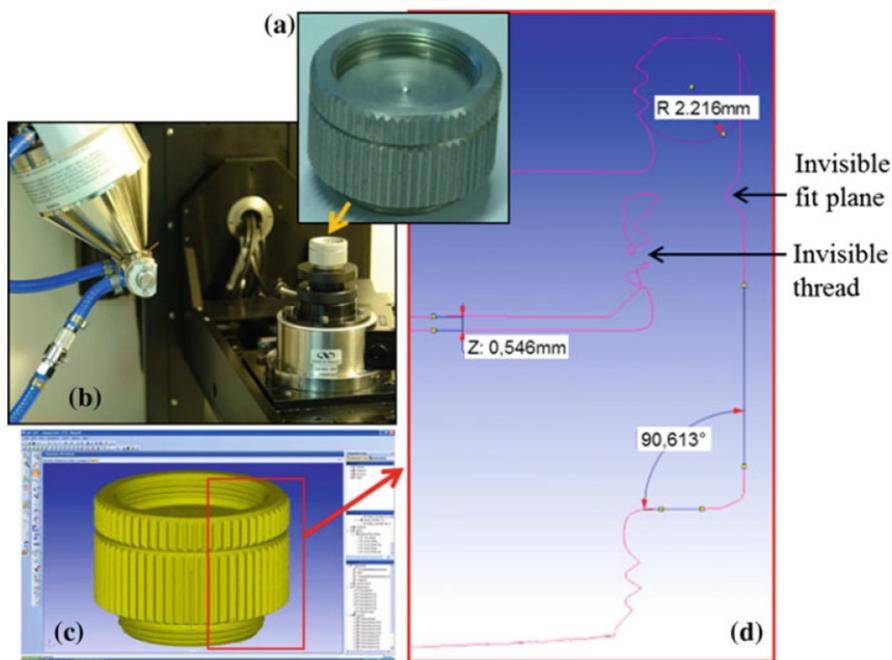


Figura 49 – Conjunto composto por duas peças roscadas do mesmo material (a); medição de TC (b); volume de TC reconstruído virtualmente (c); seção transversal cortando a parte direita do modelo de TC (d).

Fonte: Adaptado de (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018, p. 356).

Suponha uma combinação de três materiais com níveis crescentes de cinza L1 (ar), L2 (borracha), L3 (aço), conforme a FIG. 50 a seguir. De acordo com (DE CHIFFRE et al., 2014a)¹, “Na transição entre o ar (L1) e o aço (L3), haverá alguns pixels com um nível intermediário de cinza entre L1 e L3 que serão erroneamente reconhecidos como borracha.” Não obstante, o valor do limite ideal (valor de borda) necessário para diferenciar o aço da borracha pode ser diferente do limite ideal para discernir o aço do ar.

1. Tradução nossa.

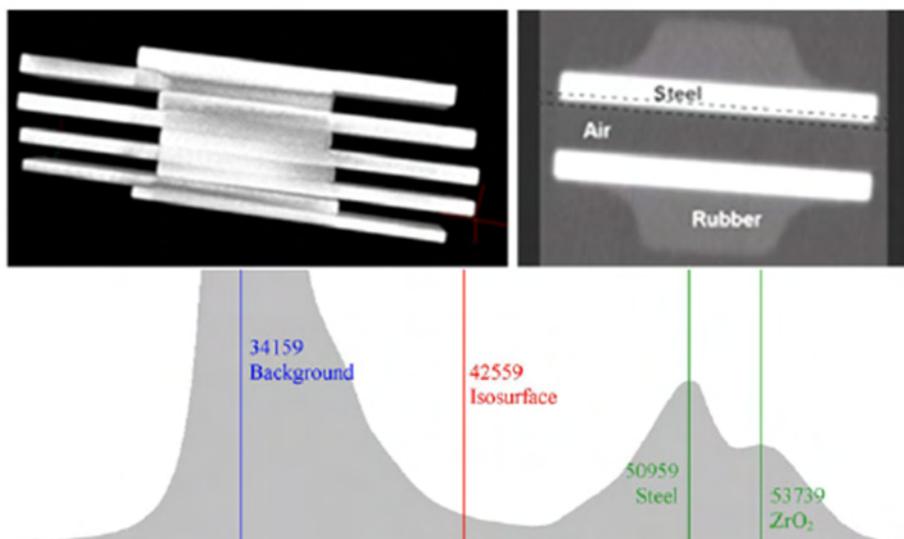


Figura 50 – Exemplo de medições multimateriais: superior esquerdo e inferior aplicam-se a medidores de extremidade alternados de aço e ZrO_2 ; superior direito é uma luva de aço cercada por borracha.

Fonte: Adaptado de (KRUTH et al., 2011, p. 834).

Da mesma forma que peças com coeficientes de absorção semelhantes representam um problema comum ao realizar a segmentação de cada peça (devido a diferentes atenuações de raios X), outro problema surge ao digitalizar peças com coeficientes de absorção dramaticamente diferentes. Por exemplo, imagine um componente mecânico que possui uma parte feita de metal (ou seja, possui alta absorção) e outra parte feita de plástico (que possui baixa absorção). A exposição a alta energia (alta tensão, corrente ou tempo de exposição) é necessária para penetrar o material de alta absorção com fótons suficientes para que alcancem o detector. Porém, isso não permite visualizar o material de baixa absorção (absorção insuficiente). Por outro lado, a exposição a baixa energia permite visualizar o material de baixa absorção (se não for totalmente absorvido pelo material de alta absorção), mas produzirá artefatos ou extinção total devido à presença de material de alta absorção (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; KRUTH et al., 2011).

Segundo (DE CHIFFRE et al., 2014a; KRUTH et al., 2011), os fabricantes dos TCR e outros estudos oferecem soluções distintas para facilitar as medições de objetos multimateriais. Entre essas soluções, pode-se citar:

- Alvos multimaterial (por exemplo, materiais diferentes em uma cabeça indexável);
- TC de fonte dupla;

- detectores sanduíche sensíveis à energia;
- Medições de multienergia fundidas ao nível da reconstrução de voxels 3D ou de imagens de projeção 2D;
- Fusão de conjuntos de dados de um único dispositivo de TC diferindo apenas na energia de aquisição.

Nas seções seguintes, apresentar-se-á alguns exemplos da literatura quanto ao uso da TC na avaliação de tolerâncias.

AVALIAÇÃO DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS COM A TECNOLOGIA DA TC

Primeiro, vale informar que, segundo (DE CHIFFRE et al., 2014a), existe uma diferença entre comparação nominal/real, análise de tolerância e análise de espessura de parede dentro da metrologia dimensional:

- A comparação nominal/real é uma análise e visualização dos desvios geométricos com um modelo CAD ou com uma peça de referência (dados nominais) e uma peça medida (dados reais). Esses desvios aparecem em cores e permitem uma avaliação holística sem se basear em recursos.
- A análise de tolerância é realizada em um modelo virtual, diferente da MMC convencional. Essa análise compreende as tolerâncias dimensionais de forma, orientação, posição, geometria regular e de superfície.
- Medições dimensionais da TC podem ser utilizadas para controlar a qualidade no processo de desenvolvimento e fabricação de um produto na indústria como, por exemplo, na fabricação de hélices para aviação. A análise da espessura da parede determina um número característico no modelo volumétrico.

Segundo, é importante apontar que nas medições realizadas pela TC os dados fornecidos permitem a criação e avaliação de modelos virtuais de peças de trabalho, diferentemente dos dados fornecidos pelo Desenho Assistido por Computador (CAD). Esse modelo virtual pode ser utilizado para melhorar os processos de fabricação relativos à geometria da matriz de moldagem e aos parâmetros do processo de moldagem ou para distinguir entre peças de boa ou má qualidade (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; DE CHIFFRE et al., 2014a; KRUTH et al., 2011).

Segue adiante, na FIG. 51, um exemplo de modelo virtual criado a partir de dados e medições fornecidas pela TC. Nesse exemplo, é analisado o ventilador de entrada de um carro de corrida, uma peça cujos recursos internos são inacessíveis e requerem a medição do diâmetro, da retitude, da posição, de orientação, etc. Percebe-se que três verificações de qualidade foram feitas com os mesmos dados da TC: (I) controle da forma e dos desvios

geométricos, (II) verificação da espessura e (III) controle da densidade/porosidade do material (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; DE CHIFFRE et al., 2014a; KRUTH et al., 2011).

Conforme (KRUTH et al., 2011), a FIG. 51 (b) compara a geometria externa em relação com a geometria CAD nominal, a FIG. 51 (c) é um corte 2D artificial através do coletor permitindo a inspeção de alguns elementos geométricos internos, e a FIG. 51 (d) representa a geometria externa reconstruída com algumas medidas de distância TC entre os orifícios.

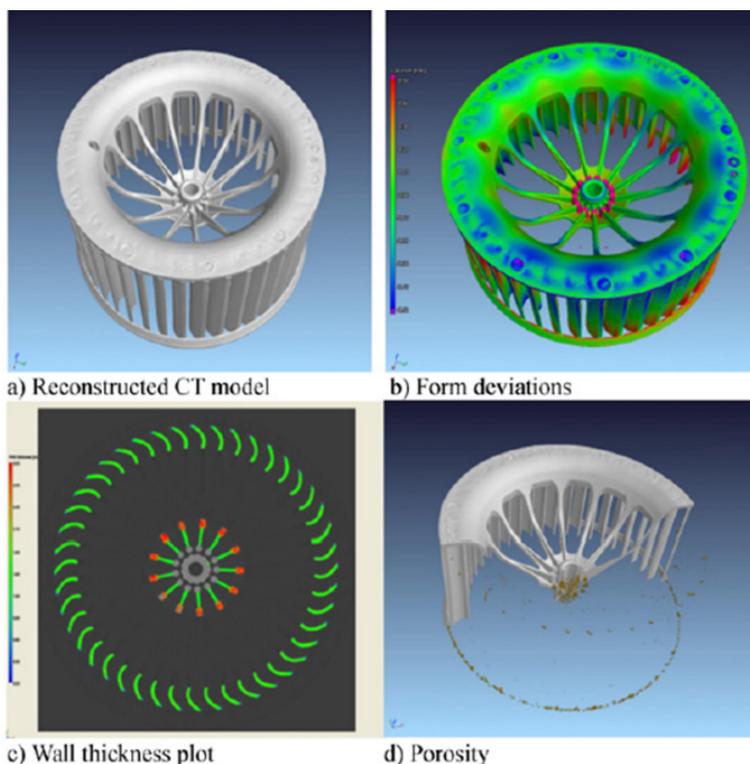


Figura 51 – Exemplo de peça analisada com a TC: Ventilador de entrada do carro; controle geométrico (b e c) e controle material (d).

Fonte: Adaptado de (KRUTH et al., 2011, p. 840).

Nessa seção, forçar-se-á na apresentação de estudos de casos e exemplos da literatura que ilustrem as aplicações da TC para avaliar dimensões em peças e componentes mecânicos vindos, principalmente, da manufatura aditiva (AM). Importante salientar que todos os exemplos estão sendo apresentados de forma resumida, portanto, recomenda-se que o leitor pesquise e leia os estudos originais para compreendê-los completamente e obter todas as informações que aqui não foram mostradas.

Apresentando Estudos de Casos e Exemplos da Literatura

Um primeiro exemplo de estudo de caso é dado em (VILLARRAGA et al., 2014), cujo objetivo é ilustrar estratégias para metrologia usando a tomografia computadorizada de raios X (TCR) para realizar medições dimensionais em estruturas no interior da peça que são inacessível ao tato de máquinas de medição por coordenadas (MMC). Para realizar essas medidas, os valores obtidos com as medições foram comparados com valores de referência obtidos através de um método destrutivo. O artefato com geometria interna analisado se encontra representado na FIG. 52 adiante. Ele é feito de alumínio e possui uma geometria interna inacessível para medição com MMC baseada em visão ou tátil. Ele foi fornecido aos autores do estudo pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST – Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia) para ser caracterizado com tecnologias de TC e para comparar as dimensões medidas com uma MMC Moore M48.



Figura 52 – Esquerda: artefato NIST feito de Alumínio. À direita: artefato NIST na frente de um detector de tela plana em uma máquina TC e fixado com isopor transparente de raios X.

Fonte: Adaptado de (VILLARRAGA et al., 2014, p. 684).

Outro equipamento utilizado além da MMC Moore M48 foi o TCR da marca Zeiss Metrotom 800, cujas configurações durante a varredura eram: tensão de 100 kV, corrente de 161 μ A, tamanho do ponto focal de 40 μ m, tamanho do voxel de 40 μ m, ampliação geométrica de 3,17, distancia da fonte de raios X do objeto de 239 mm, detector da fonte estava a 800 mm de distância e foram realizadas 800 projeções. O software utilizado para visualizar as características geométricas internas do artefato na imagem reconstruída foi o VGStudio MAX. Mais especificações técnicas são dadas em (VILLARRAGA et al., 2014).

Nesse estudo de caso, uma imagem seccional (FIG. 53, direita) foi obtida através de um corte planar do volume 3D mostrado no lado esquerdo da FIG. 53, revelando a forma de um “rosto feliz” feito de vazios.

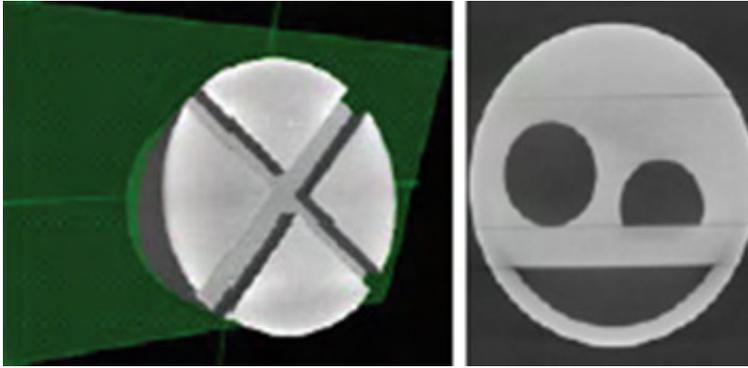


Figura 53 – Esquerda: imagem 3D vinda da TCR do artefato do NIST. Direita: Fatia da imagem, um corte seccional através do plano verde na imagem 3D que está à esquerda.

Fonte: Adaptado de (VILLARRAGA et al., 2014, p. 684).

O autor do estudo também examina planos seccionais em outras orientações (FIG. 54). Utilizando o software VGStudio MAX 2.2, foi feito um corte seccional através de um plano (está na cor azul na FIG. 54) e outro corte seccional através de outro plano (está na cor vermelha na FIG. 54). Esses cortes permitiram aos autores “inferir que o artefato NIST aparentemente contém dois vazios cilíndricos no interior (doravante referidos como recursos F1 e F2)”². Essa inferência foi confirmada no estudo somente após a conclusão do relatório de caracterização da metrologia TC. Na FIG. 55 é mostrado uma imagem do projeto do artefato do NIST.

2. Tradução nossa.

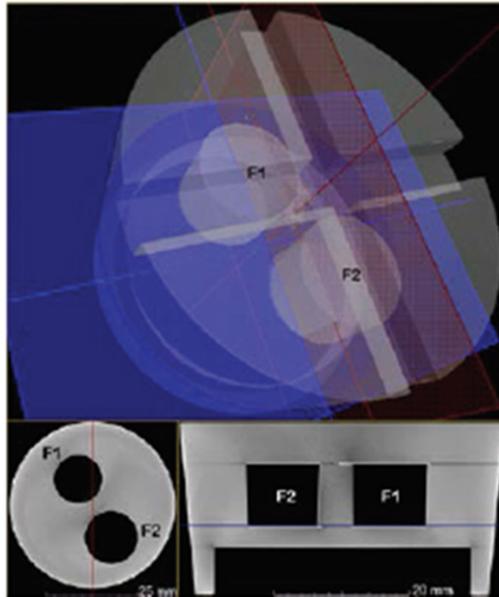


Figura 54 – Visualização no artefato NIST usando VGStudio MAX 2.2. Esquerda inferior: visualização do corte seccional feito pelo plano de cor azul. Direita inferior: visualização do corte seccional feito pelo plano de cor vermelha.

Superior: vista semitransparente do volume 3D do CT.

Fonte: Adaptado de (VILLARRAGA et al., 2014, p. 685).

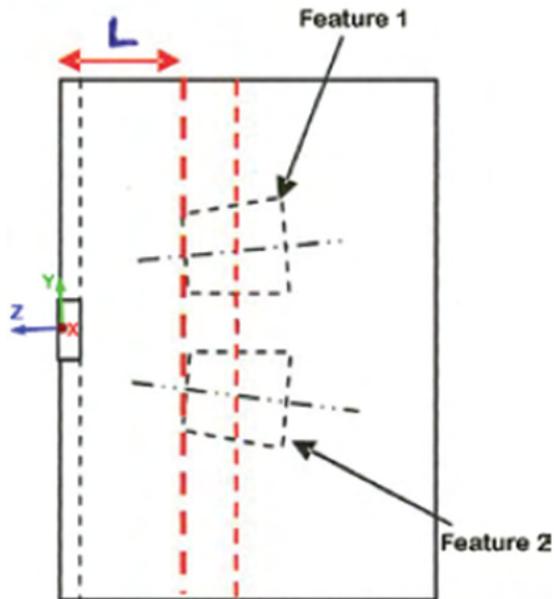


Figura 55 – Projeto de design do artefato do NIST.

Fonte: Adaptado de (VILLARRAGA et al., 2014, p. 687).

Os dois recursos internos F1 e F2 possuem diferenças nos diâmetros da parte inferior e superior de cada recurso: 0,2065 mm para F1 e 0,4063 mm para F2. As superfícies cônicas, portanto, fornecem um melhor ajuste para essas formas de vazios internos. Nesse estudo, as medições da TC são comparadas com os valores de calibração de referência obtidos com a MMC M48. A TAB. 2 a seguir mostra uma comparação entre alguns dos valores de medição relatados pelas duas técnicas diferentes, listando a diferença absoluta entre as medições de TC e MMC, bem como o erro normalizado, para a mesma característica geométrica em qualquer recurso F1 ou recurso F2. Todas as unidades da TAB. 2 estão em milímetros.

	<i>CT value</i> $\pm U_{CT}$	<i>CMM</i> $\pm U_{CMM}$	<i>lDelta</i>	$ E_n $
F1 backplane depth (L)	-9.9753 ± 0.0098	-9.9790 ± 0.0001	0.0037	0.38
F1 Diameter at Z= -15.479	13.4521 ± 0.0082	13.4486 ± 0.0001	0.0035	0.43
F1 x-value at Z= -15.479	-4.1451 ± 0.0084	-4.1440 ± 0.0001	0.0011	0.13
F1 y-value at Z= -15.479	7.2498 ± 0.0084	7.2480 ± 0.0001	0.0018	0.13
F1 Cone Angle (deg.)	1.2610 ± 0.0500	1.1870 ± 0.0010	0.0740	1.48
F2 backplane depth (L)	-9.9750 ± 0.0125	-9.9790 ± 0.0001	0.0040	0.32
F2 Diameter at Z= -15.479	14.8268 ± 0.0082	14.8270 ± 0.0001	0.0002	0.02
F2 x-value at Z= -15.479	4.8867 ± 0.0084	4.8750 ± 0.0001	0.0117	1.10
F2 y-value at Z= -15.479	-8.6042 ± 0.0081	-8.5950 ± 0.0001	0.0092	1.14
F2 Cone Angle (deg.)	2.4855 ± 0.0500	2.4390 ± 0.0010	0.0465	0.93

Tabela 2 – Comparação das medições feitas com a TC e a MMC em algumas características geométricas particulares do artefato NIST. O \pm indica as incertezas de medição calculadas. lDelta são os valores da diferença absoluta obtida entre as medições TC e MMC.

Fonte: Adaptado de (VILLARRAGA et al., 2014 p. 687).

Observa-se que a TC foi capaz de determinar e medir as características dos recursos internos de uma peça que normalmente seriam inacessíveis com MMC's táteis. Entretanto, apesar da resolução da TC chegar nas faixas dos micrômetros, as incertezas de medição

dela são maiores em comparação com a MMC. Mesmo que essas incertezas de medições maiores da TC sejam algo compreensível, devido à complexidade dos fenômenos da TC e o número de parâmetros de influência manipulados durante o processo de varredura e análise, fica claro que a tecnologia da TC como técnica precisa para a metrologia ainda está em revisão e novos estudos devem ser realizados (VILLARRAGA et al., 2014).

Um segundo exemplo a ser apresentado é o estudo de (MÜLLER, Pavel et al., 2013). Nessa pesquisa o objeto de investigação foi o invólucro de uma caneta de insulina (veja a FIG. 56a) manufaturado por Novo Nordisk A/S. Além do invólucro, a carcaça da caneta foi produzida por modelagem por injeção e é confeccionada em polipropileno (PP).

O estudo (MÜLLER, Pavel et al., 2013) estabelece cinco mensurandos (três dimensionais e dois geométricos) para serem medidos:

“Diâmetro externo da carcaça (D) definido na superfície externa da peça, diâmetro interno do flange (d), distância (L) definida entre a flange e a extremidade da carcaça, coaxialidade (C) definida entre a parte circular do flange e uma superfície cilíndrica na rosca interna, e o paralelismo (P) da superfície plana na janela e um plano de referência definido nas ranhuras internas.” – (MÜLLER, Pavel et al., 2013, p. 126)³.

Eles são definidos e indicados na FIG. 56b. As dimensões nominais e as tolerâncias relacionadas são as seguintes: $D = 15,35 \pm 0,05$ mm, $d = 6,4 \pm 0,05$ mm, $L = 52,5 \pm 0,05$ mm, $C = 0,1$ mm e $P = 0,2$ mm. Devido a um acordo de confidencialidade com a empresa que forneceu o objeto de estudo, todas as tolerâncias apresentadas são virtuais e não refletem as tolerâncias reais da peça.

3. Tradução nossa.

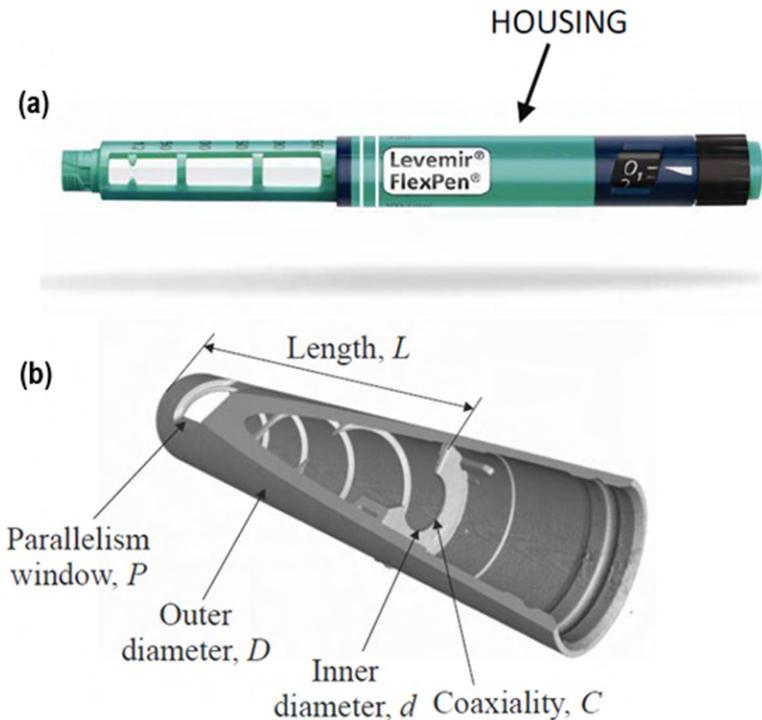


Figura 56 – (a) Caneta de insulina; (b) Definição de mensurandos

Fonte: Adaptado de (MÜLLER et al., 2013, p. 127).

Nesse estudo os autores também utilizaram dois sistemas de TC de feixe cônico os softwares comerciais para avaliar os dados VGStudio MAX da Volume Graphics e Calypso CT da Zeiss.

Segundo (MÜLLER, Pavel et al., 2013), o procedimento efetuado foi:

- Mediu-se os recursos apresentados na FIG. 56 com um MMC tátil para garantir a rastreabilidade da unidade do medidor. Essas medidas foram utilizadas como referência;
- Os resultados dos cálculos de incerteza das medições de referência foram levados em consideração ao calcular a incerteza das medições de TC;
- Não se fez comparação entre os resultados de medição da MMC e da TC por causa das diferentes abordagens utilizadas.

Os resultados das tolerâncias dimensionais e geométricas do alojamento são apresentados na FIG. 57 a seguir. Para expressar os resultados de medição expostos na FIG. 57 os autores determinaram que:

“cada coluna representa um valor médio de três medições de TC reproduzidas. As barras de erro representam a incerteza expandida para medições de TC com intervalo de confiança de 95%. A designação dos símbolos A-E é refere-se a uma combinação de variáveis empregadas. As linhas tracejadas violetas são valores médios medidos pelo MMC em 16 peças escolhidas aleatoriamente de um lote de produção, e as linhas vermelhas cheias mostram a gama de incertezas expandidas em um intervalo de confiança de 95%.” – (MÜLLER et al., 2013, p. 130)⁴.

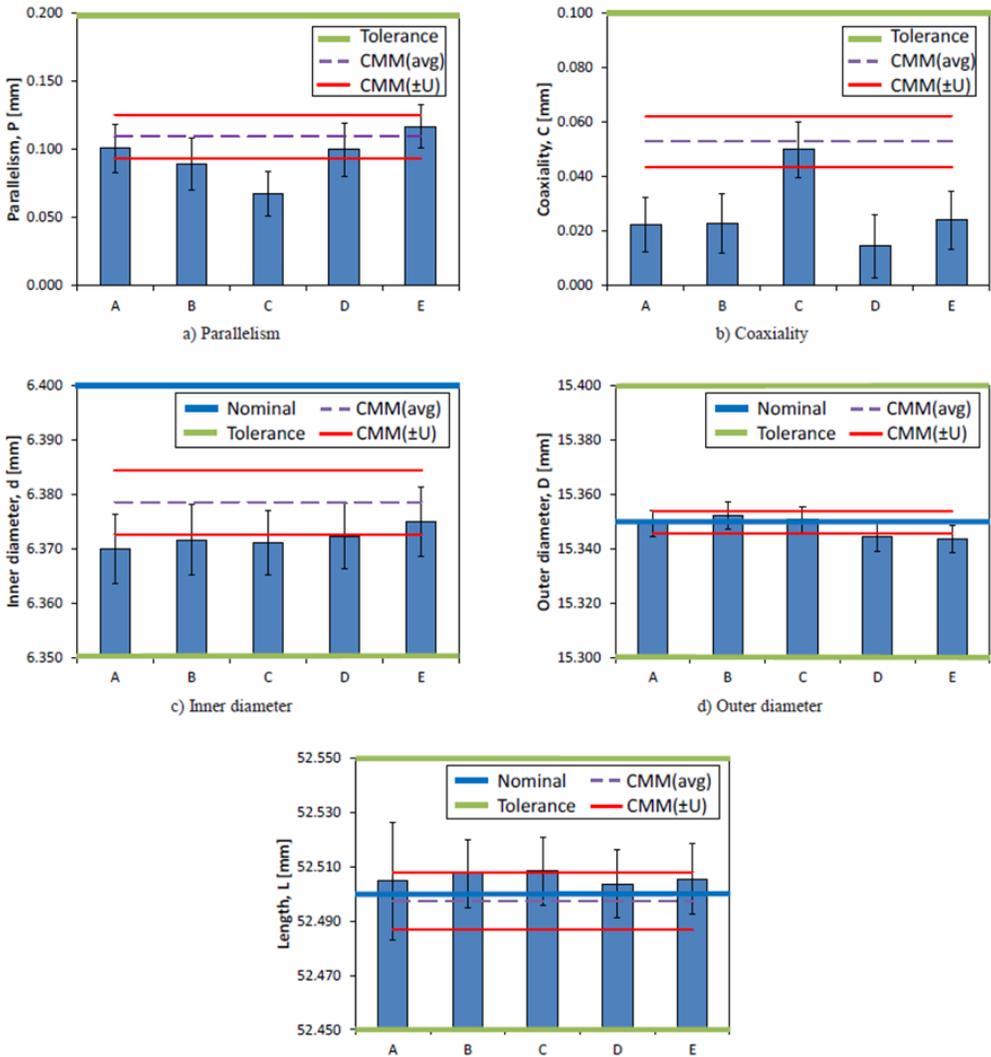


Figura 57 – Resultados da análise de tolerância dimensional (Inner Diameter, Outer diameter, Length) e tolerância geométrica (Parallelism e Coaxiality).

Fonte: Adaptado de (MÜLLER et al., 2013, p. 130).

Os autores do estudo apresentado afirmam que “Ambas as medições de MMC e TC da casa satisfazem as especificações do fabricante. As tolerâncias geométricas foram encontradas abaixo dos limites de tolerância especificados e as tolerâncias dimensionais estavam dentro da faixa de tolerância”⁵. Sugere-se também que trabalhos futuros foquem em peças calibradas (peças-mestre) para investigar as contribuições de incerteza relacionadas à TC diretamente (MÜLLER, Pavel et al., 2013).

Outra pesquisa que apresenta as capacidades de medição e avaliação de tolerância dimensionais da técnica TC é (ONTIVEROS et al., 2012). Neste artigo é analisado a viabilidade do uso de técnicas de TC para medir componentes moldados com a técnica de micro injeção. Para cumprir com tal finalidade, são utilizadas duas peças de trabalhos que foram fabricadas por moldagem de micro injeção. O primeiro produto analisado é um alternador para aplicação de aparelho auditivo composto de polímero de cristal líquido (LCP) (FIG. 58 (a)). O segundo objeto analisado é um espécime de osso de cachorro miniaturizado (DB) usado para teste de material micro mecânico; ele é feito de copolímero de acetal polioximetileno (POM) (FIG. 58 (b)). Ambos os componentes micro moldados tinham um peso parcial de 35 mg.

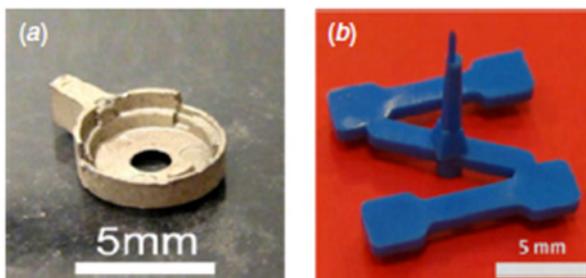


Figura 58 – Peças de trabalho utilizadas no estudo de (ONTIVEROS ET AL., 2012)

Fonte: Adaptado de (ONTIVEROS et al., 2012, p. 2).

Por causa das pequenas dimensões das peças e da alta incerteza das técnicas de TC, a incerteza de medição torna-se muito grande em comparação com o intervalo de tolerância, deixando uma zona de conformidade menor para verificação dos produtos. Esse problema foi analisado na pesquisa utilizando dois instrumentos de TC diferentes:

1. Uma máquina da General Electric eXplore Locus SP. Essa é uma máquina de micro-TC de feixe cônico orientado sem medição com uma fonte de energia de raios X de 50 a 80 kV e uma resolução mínima de 8 μm (TC-Z).
2. Uma máquina de TC de feixe cônico micro-TC desenvolvida pelo Laboratório

5. Tradução nossa.

Elettra em Trieste, Itália, caracterizada por uma faixa de energia de 40 a 130 kV e tamanho de ponto de 5 μm (TC-P).

Mais detalhes e especificações são fornecidos na pesquisa de (ONTIVEROS et al., 2012). Os resultados de medição da TC-Z e TC-P foram comparados com os resultados de um sistema de MMC óptico (MMCO) equipado com sensor de processamento de imagem de vídeo.

As medidas verificadas no estudo são:

“Para o alternador (FIG. 58(a)), foram verificadas três dimensões: diâmetro externo (D), diâmetro interno do furo no meio da peça (d) e altura do pilar (H). As dimensões nominais e tolerâncias foram: $D = 5,400 \pm 0,030$ mm, $d = 1,550 \pm 0,020$ mm e $H = 0,380 \pm 0,030$ mm, respectivamente. Para o DB, foram verificadas cinco dimensões do lado esquerdo e direito da peça (FIG. 58 (b)): comprimentos L, a, b, c, d e espessuras A, B, C, D, E e F. As dimensões nominais e tolerâncias foram: comprimentos $L = 11,800 \pm 0,030$ mm; comprimentos a e c = $3,000 \pm 0,030$ mm; comprimentos b = $1,500 \pm 0,020$ mm; comprimentos d = $1,350 \pm 0,020$ mm e espessuras de A a F = $1,000 \pm 0,020$ mm.” – (ONTIVEROS et al., 2012, p. 3)⁶.

Na FIG. 59 são apresentadas as dimensões medidas no estudo de (ONTIVEROS et al., 2012).

6. Tradução nossa.

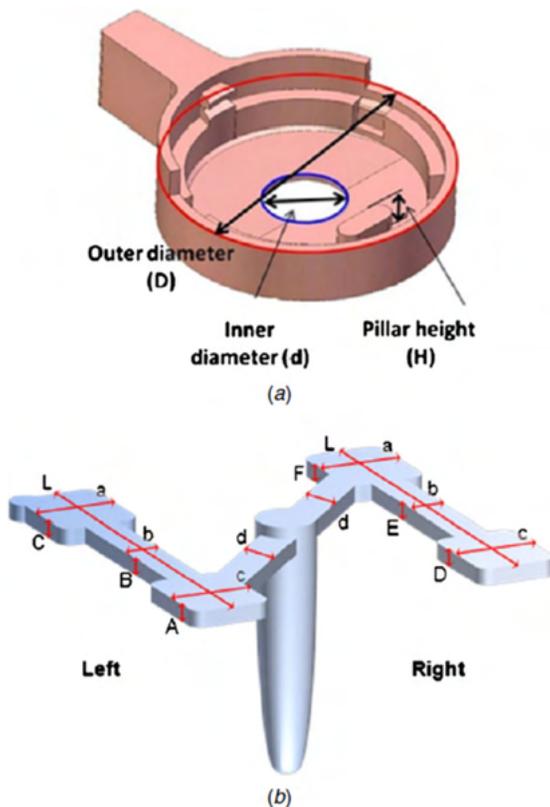


Figura 59 – As dimensões medidas D, d e H no alternador (a) e largura, comprimento e espessura do espécime de osso de cachorro miniaturizado (b).

Fonte: Adaptado de (ONTIVEROS et al., 2012 p. 3).

Importante pontuar que (ONTIVEROS et al., 2012) utiliza dois tomógrafos diferentes devido à falta de protocolos padronizados que garantam a rastreabilidade das medidas tomográficas, podendo assim fornecer resultados sobre a robustez e reprodutibilidade dessa técnica. Os autores afirmam que ao comparar os resultados fornecidos por duas máquinas de TC diferentes, com usuários distintos e dessemelhantes métodos de correção, porém nas mesmas peças e com a mesma definição dos mensurandos, pode-se estabelecer a viabilidade da técnica de TC. As medições realizadas com a MMCO no alternador foram efetuadas num laboratório de metrologia seguindo as condições padrão: temperatura 20 ± 1 °C e umidade 50–70%. Para calcular o diâmetro interno e externo fez-se uso do método detecção de bordas através do contraste de luz (preto-branco).

As medições feitas no alternador são apresentadas na TAB. 3, e as medições efetuadas no DB são apresentadas na TAB. 4. Por causa das limitações da MMCO em medir ao longo do eixo Z por técnicas de foco, os autores fizeram uso de um multisensor MMC (Werth Video-Check IP 400), equipado com um sensor de distância a laser baseado

no princípio de Foucault (fio de faca) pela Universidade de Padova. A motivação foi conferir se a correção da altura do pilar ‘H’ foi suficiente. Além disso, constata-se no estudo que “os desvios entre as medidas corrigidas pelo MMCO e pelo laser foram inferiores a 2,5 μm , o que corresponde a cerca de 0,6% da altura do pilar. Esse resultado verificou a confiabilidade da correção aplicada.”⁷ O cálculo da incerteza de medição foi feito de acordo com a ISO 15530-3:2011, sendo que uma explicação mais detalhada é apresentada na pesquisa de (ONTIVEROS et al., 2012).

Measurands	Toggle 1 (mm)	U_{95} (mm)	Toggle 2 (mm)	U_{95} (mm)	Toggle 3 (mm)	U_{95} (mm)
<i>H</i>	0.404	0.015	0.407	0.015	0.399	0.015
<i>d</i>	1.544	0.012	1.532	0.012	1.533	0.012
<i>D</i>	5.400	0.009	5.399	0.009	5.399	0.009

Tabela 3 – Resultados de medição do MMCO para o alternador (Toggle) utilizados como valores de referência.

Fonte: Adaptado de (ONTIVEROS et al., 2012, p. 4).

Measurand	DB1 (mm)	U_{95} (mm)	DB2 (mm)	U_{95} (mm)	DB3 (mm)	U_{95} (mm)	DB4 (mm)	U_{95} (mm)
Left <i>L</i>	11.773	0.007	11.770	0.004	11.773	0.004	11.770	0.004
Left <i>a</i>	3.001	0.004	3.002	0.004	3.002	0.004	3.002	0.004
Left <i>b</i>	1.519	0.004	1.519	0.004	1.519	0.004	1.519	0.004
Left <i>c</i>	2.969	0.004	2.970	0.004	2.969	0.004	2.970	0.004
Left <i>d</i>	1.358	0.004	1.358	0.004	1.357	0.004	1.358	0.004
Right <i>L</i>	11.779	0.005	11.781	0.008	11.780	0.005	11.781	0.005
Right <i>a</i>	2.977	0.004	2.976	0.004	2.977	0.004	2.977	0.004
Right <i>b</i>	1.524	0.004	1.524	0.004	1.524	0.004	1.524	0.004
Right <i>c</i>	2.995	0.004	2.995	0.004	2.995	0.004	2.996	0.004
Right <i>d</i>	1.359	0.004	1.358	0.004	1.359	0.004	1.358	0.004
<i>A</i>	1.005	0.015	1.002	0.015	1.002	0.015	1.005	0.015
<i>B</i>	0.998	0.015	0.997	0.015	0.996	0.015	1.001	0.015
<i>C</i>	1.007	0.015	1.001	0.015	1.002	0.015	1.005	0.015
<i>D</i>	0.999	0.015	0.997	0.015	0.997	0.015	0.999	0.015
<i>E</i>	0.993	0.015	0.993	0.015	0.993	0.015	0.997	0.015
<i>F</i>	1.001	0.015	0.998	0.015	1.000	0.015	1.003	0.015

Tabela 4 – Resultados de medição do MMCO para o espécime de osso de cachorro miniaturizado (DB) utilizados como valores de referência.

Fonte: Adaptado de (ONTIVEROS et al., 2012, p. 4).

Os desvios de medição dos tomógrafos em comparação com os resultados de medição do MMCO são apresentados na TAB. 5 e TAB 6.

7. Tradução nossa.

Measurand	Toggle 1 (μm) (%)	Toggle 2 (μm) (%)	Toggle 3 (μm) (%)
<i>H</i>	-3 (0.7)	-8 (2.0)	2 (0.5)
<i>d</i>	25 (1.6)	-4 (0.3)	-21 (1.4)
<i>D</i>	58 (1.1)	0 (0.0)	0 (0.0)

Measurand	DB1 (μm) (%)	DB2 (μm) (%)	DB3 (μm) (%)	DB4 (μm) (%)
<i>L</i>	7 (0.1)	23 (0.2)	3 (0.0)	9 (0.1)
<i>a</i>	-7 (0.2)	-17 (0.6)	-11 (0.4)	-19 (0.6)
<i>b</i>	5 (0.3)	-4 (0.3)	2 (0.1)	-2 (0.1)
<i>c</i>	6 (0.2)	1 (0.0)	4 (0.1)	8 (0.3)
<i>d</i>	0 (0.0)	-9 (0.7)	0 (0.0)	-9 (0.7)
Thickness	-5 (0.5)	-2 (0.2)	3 (0.3)	8 (0.8)

Tabela 5 – Desvios de medição (TC-Z em relação à referência de valores) obtidos após a correção.

Fonte: Adaptado de (ONTIVEROS et al., 2012, p. 6).

Measurand	Toggle 1 (μm) (%)	Toggle 2 (μm) (%)	Toggle 3 (μm) (%)
<i>H</i>	0 (0.0)	-8 (2.0)	-3 (0.8)
<i>d</i>	10 (0.6)	-2 (0.1)	-7 (0.5)
<i>D</i>	1 (0.0)	6 (0.1)	0 (0.0)

Measurand	DB1 (μm) (%)	DB2 (μm) (%)	DB3 (μm) (%)	DB4 (μm) (%)
<i>L</i>	6 (0.1)	13 (0.1)	15 (0.1)	11 (0.1)
<i>a</i>	-14 (0.5)	-4 (0.1)	-10 (0.3)	-15 (0.5)
<i>b</i>	6 (0.4)	-10 (0.7)	-12 (0.8)	-14 (0.5)
<i>c</i>	4 (0.1)	4 (0.1)	6 (0.2)	-7 (0.3)
<i>d</i>	9 (0.7)	-11 (0.8)	-8 (0.6)	-9 (0.6)
Thickness	-13 (1.3)	-14 (1.4)	-10 (1.0)	4 (0.4)

Tabela 6 – Desvios de medição (TC-P em relação aos valores de referência) obtidos após correção.

Fonte: Adaptado de (ONTIVEROS et al., 2012, p. 6).

Segundo a análise feita pelos autores da pesquisa, os resultados de medição da TC-Z e TC-P nos mesmos componentes (alternador e DB) demonstram que a técnica de medição TC é viável para o controle de qualidade completo de peças micro moldadas 3D, podendo se tornar uma alternativa às técnicas de medições táteis que muitas vezes não são

adequadas para essas peças devido ao seu substrato de polímero macio. Os tomógrafos utilizados apresentaram desvios de medições muito pequenos quando comparados com as medidas realizadas pelo MMCO (ver TAB. 5 e TAB. 6). Entretanto, o estudo destaca que ainda existem desafios relativos à rastreabilidade, estimativa de incerteza e padronização. Superar esses desafios é algo crucial para explorar totalmente o potencial de uso da TC para tarefas orientadas à metrologia.

AValiação DE TOLERÂNCIA GEOMÉTRICAS COM A TECNOLOGIA DA TC

Primeiro, vale pontuar que os exemplos de estudo de caso e exemplos da literatura na seção anterior, cujo foco era nas tolerâncias dimensionais, apresentavam medidas de tolerâncias geométricas em seus resultados (ver FIGs 56 e 57). No estudo de (MÜLLER et al., 2013), os resultados indicam que as tolerâncias geométricas (paralelismo e coaxialidade) estavam abaixo dos limites de tolerância especificados e as tolerâncias dimensionais estavam dentro da faixa de tolerância.

Na próxima seção, mais exemplos da literatura científica serão apresentados sendo o foco os estudos que apontam a capacidade da TC em avaliar tolerâncias geométrica, mas sem se limitar à essa avaliação apenas. Importante ressaltar que todos os exemplos aqui apresentados estão resumidos, portanto, recomenda-se que o leitor pesquise e leia os estudos originais para compreendê-los completamente e obter todas as informações que aqui não foram mostradas.

Apresentando Estudos de Casos e Exemplos da Literatura

Um primeiro exemplo a ser abordado é o estudo de (SHAH; RACASAN; BILLS, 2016). O artigo investiga a precisão e a capacidade das medições da TC em comparação com medições de referência realizadas com uma MMC, bem como enfoca na avaliação de diferentes métodos de AM. Os autores do estudo selecionaram três métodos de AM devido à sua popularidade, são eles: alteração fotoquímica direta de polímero líquido ou estereolitografia (SLA), sinterização seletiva a laser (SLS) e modelagem de deposição fundida (FDM).

Foi medido um artefato cilíndrico que fornece atenuação uniforme dos raios X, escolhido na expectativa de elevar ao máximo os detalhes e a resolução ao mesmo tempo em que faz uma série de projeções ao longo de seu eixo central. Na pesquisa, os recursos do artefato manufaturado foram adquiridos através de uma abordagem sistemática para aquisição de dados e são medidos e comparados com dados da MMC para avaliar a estabilidade e variabilidade dos resultados. De acordo com (SHAH; RACASAN; BILLS, 2016)⁸, “a verificação da conformidade e a determinação da incerteza obedecerão aos procedimentos usados na ISO 15530 [18]. Cada artefato será medido 20 vezes no MMC e

8. Tradução nossa.

examinado uma vez na TC”.

Na FIG. 60 é apresentado um esboço do procedimento de TC efetuado pelos autores do estudo, os recursos analisados são ilustrados na FIG. 61 e listados na TAB. 7 (SHAH; RACASAN; BILLS, 2016).

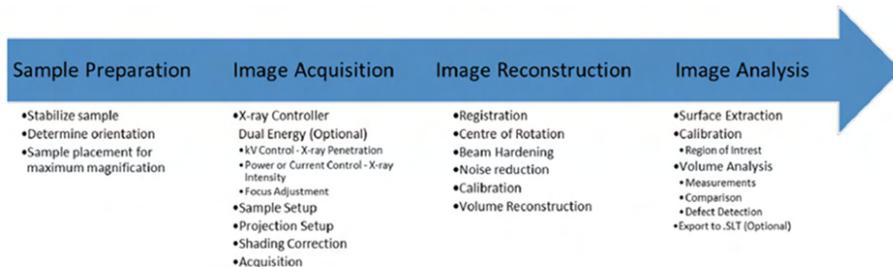


Figura 60 – Procedimento de aquisição de dados efetuado pelo estudo exemplificado.

Fonte: Adaptado de (SHAH; RACASAN; BILLS, 2016, p. 74).

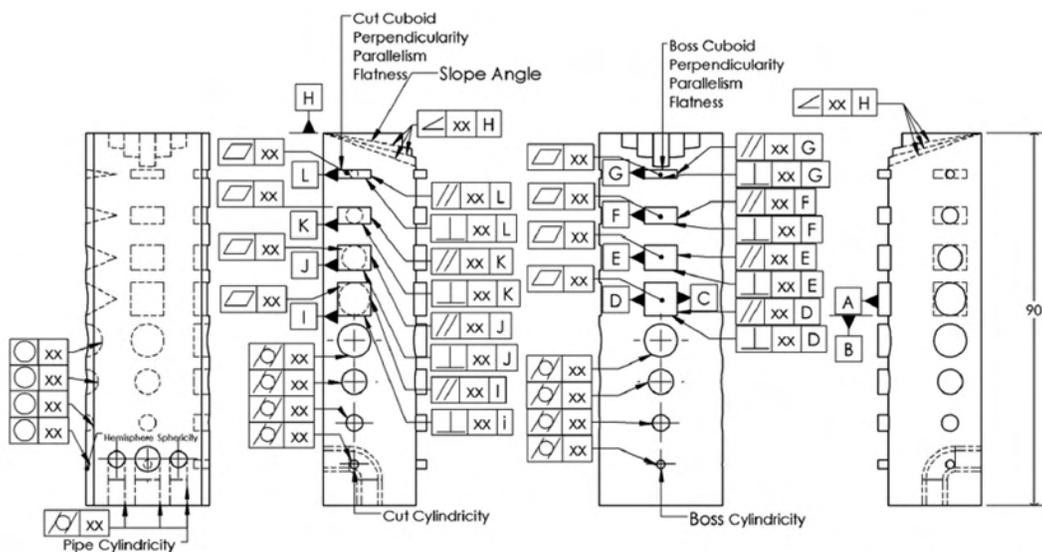


Figura 61 – Ilustração do cilindro HUDD fabricado por manufatura aditiva para tomografia computadorizada.

Fonte: Adaptado de (SHAH; RACASAN; BILLS, 2016, p. 73).

Feature	I.D.	U.I.D.	Tolerance
Slope Angularity	SA	SA1 SA2 SA3R SA3L SA4 SA5	Angularity
Cut cuboid perpendicularity	CCPE	CCPE1-4	Perpendicularity
Cut cuboid parallelism	CCPA	CCPA1-4	Parallelism
Cut cylindricity	CC	CCC1-4	Cylindricity
Boss cuboid perpendicularity	BCPE	BCPE1-4	Perpendicularity
Boss cuboid parallelism	BCPA	BCPA1-4	Parallelism
Boss cylindricity	BC	BCC14	Cylindricity
Hemisphere sphericity	HS	HS1-4	Sphericity
Pipe cylindricity	PC	PCC1-3	Cylindricity
Cut cuboid flatness	CCF	CCF1-4	Flatness
Boss cuboid flatness	BCF	BCF1-4	Flatness

Tabela 7 – Lista dos recursos e das tolerâncias avaliadas no estudo apresentado.

Fonte: Adaptado de (SHAH; RACASAN; BILLS, 2016, p. 73).

Os autores do estudo realizaram uma análise do desvio visual utilizando um módulo de editor de formas digitalizadas para criar um arquivo original cuja extensão é STL e comparando a uma exportação STL do software VGS. Na FIG. 62 abaixo as áreas verdes representam o desvio de $\pm 0,200$ mm da forma original desejada. As áreas vermelhas e roxas representam regiões que contêm maior material ou empenamento fora da forma desejada.

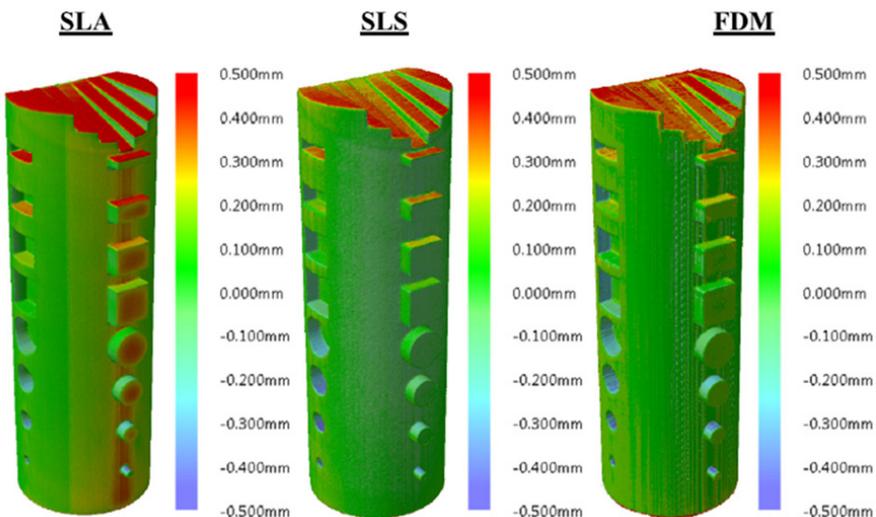


Figura 62 – Análise visual dos desvios de forma.

Fonte: Adaptado de (SHAH; RACASAN; BILLS, 2016, p. 75).

Além disso, nos resultados também:

“Foi encontrada imprecisão posicional das características, onde o ângulo de inclinação impresso perpendicular ao leito de impressão em todas as amostras apresenta desvios superiores a $\pm 500\mu\text{m}$. Isso pode ser devido ao processo de estratificação criando um degrau em cada camada, produzindo um efeito de escada visível em vez de uma inclinação suave.” – (SHAH; RACASAN; BILLS, 2016, p. 75)⁹.

Na TAB. 8 é mostrado o erro percentual dos resultados da TC em comparação com os resultados de referência da MMC.

Feature	FDM		SLS		SLA	
	CT1	CT2	CT1	CT2	CT1	CT2
SA	47.43	46.27	42.55	59.15	28.33	41.53
CCPE	57.86	56.92	24.56	23.97	50.81	60.14
CCPA	36.61	26.71	72.17	76.17	88.88	86.05
CC	39.52	40.88	30.50	31.81	24.49	13.64
BCPE	44.69	48.02	70.63	18.89	53.84	37.04
BCPA	42.34	37.52	85.21	65.28	74.81	55.77
BC	23.12	24.18	18.59	16.39	73.81	47.92
HS	32.46	32.74	36.82	31.30	24.23	35.34
PC	60.81	60.75	45.44	46.22	66.77	11.87
CCF	27.56	27.89	14.48	13.02	69.06	29.99
BCF	56.53	58.37	29.31	26.15	36.07	22.90

Tabela 8 – Erro percentual das medições de TC usando resultados de referência (quanto menor, melhor).

Fonte: Adaptado de (SHAH; RACASAN; BILLS, 2016, p. 77).

De acordo com (SHAH; RACASAN; BILLS, 2016), durante a discussão dos resultados, vale apresentar que as medições da TC foram mais imprecisas e com um nível de incerteza maior do que as medições obtidas com a MMC. Observa-se que, nos desvios percentuais das medições da TC em comparação com as medições da MMC na TAB. 8, alguns recursos apresentam alta precisão e conformidade, como o BC (*boss cylindricity*) em SLS, enquanto outros recursos demonstram altos desvios, como o BCPA (*boss cuboid parallelism*) também de SLS. Vários fatores afetam a precisão e aumentam a incerteza de medição da TC, como o tamanho do voxel, estabilidade mecânica dos itens avaliados, orientação do objeto, etc. A sugestão dos autores para mitigar esse problema seria efetuar uma investigação estatística para os fatores de incertezas que contribuem nas medições da TC.

Utilizando o VGS, o desvio nominal de cada característica de cada amostra

9. Tradução nossa.

manufaturada é apresentado na FIG. 63.

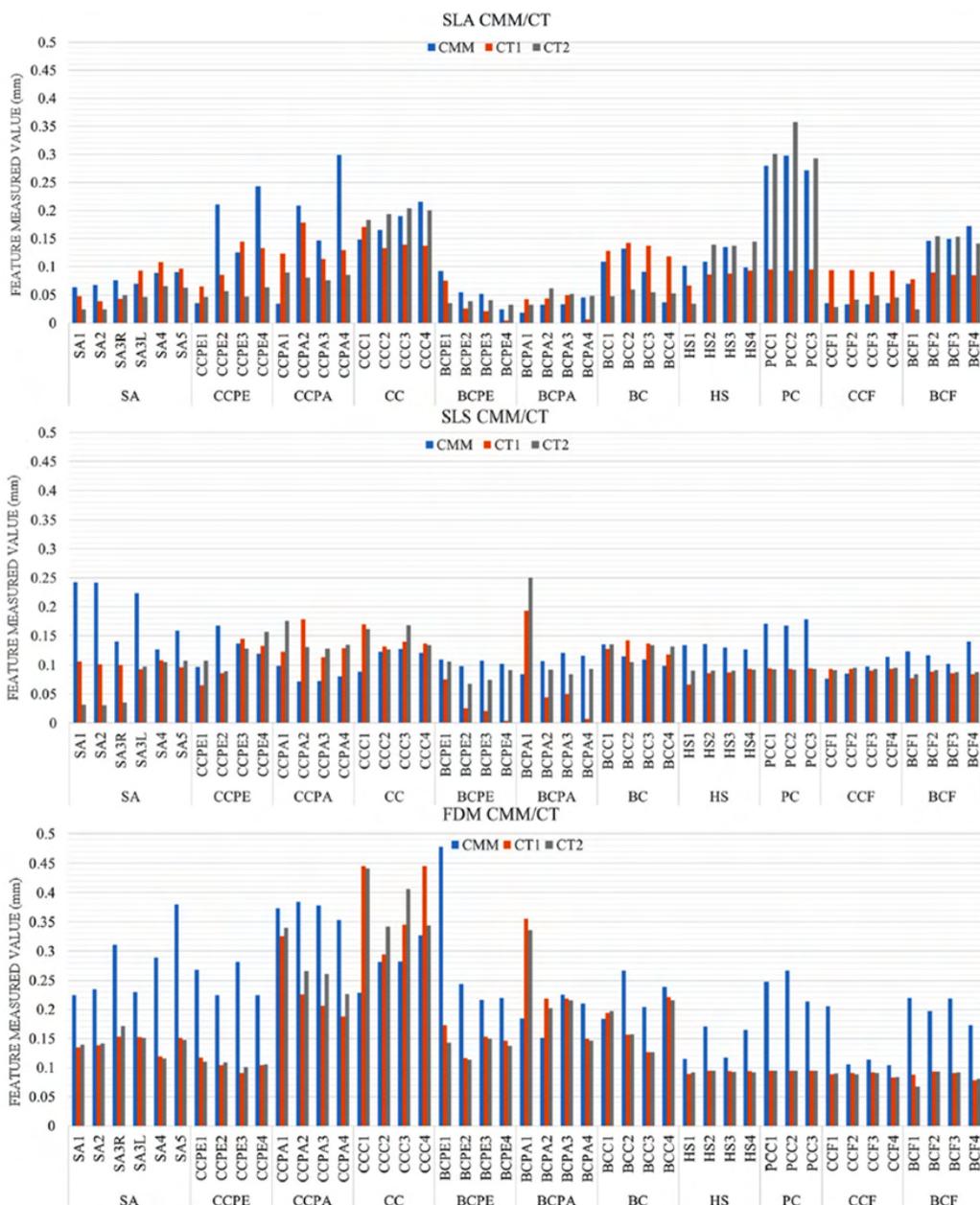


Figura 63 – Gráficos com as medições da TC e da MMC nos artefatos obtidos através da manufatura de tipo SLA (gráfico de cima), SLS (gráfico do meio) e FDM (gráfico de baixo).

Fonte: Adaptado de (SHAH; RACASAN; BILLS, 2016, p. 76).

Cada característica foi verificada visualmente em busca de anomalias, sendo que o VGS forneceu pouca indicação se um plano está ou não corrigido corretamente, mas uma verificação de cada recurso individual fornece ampla validação (SHAH; RACASAN; BILLS, 2016).

Esse artigo não é o único a expor que a TC é capaz de avaliar recursos geométricos, como paralelismo, cilindridade, planicidade, etc. No estudo de (MÜLLER, P. et al., 2012) duas peças industriais de materiais e tamanhos diferentes foram selecionadas, são elas:

1. Um conector de tubo de liga de alumínio utilizado na indústria automotiva, fabricado por forjamento a frio e posteriormente usinado nas dimensões desejadas (FIG. 64 a esquerda);
2. Um microcomponente polimérico utilizado para aplicações de aparelhos auditivos denominado alternador (FIG. 64 a direita).

Os quatro mensurandos da primeira peça são: diâmetro interno do furo (d_P), distância entre duas superfícies paralelas do flange interno (L_P), paralelismo entre as duas superfícies (P_P) e cilindridade (C_P) do furo interno.

Já os mensurandos da segunda peça são: diâmetro externo do alternador (D_T), diâmetro interno do furo no meio da peça (d_T), concentricidade definida entre o furo no meio da peça e o recurso cilíndrico externo (C_T) e altura (H_T) do pilar.

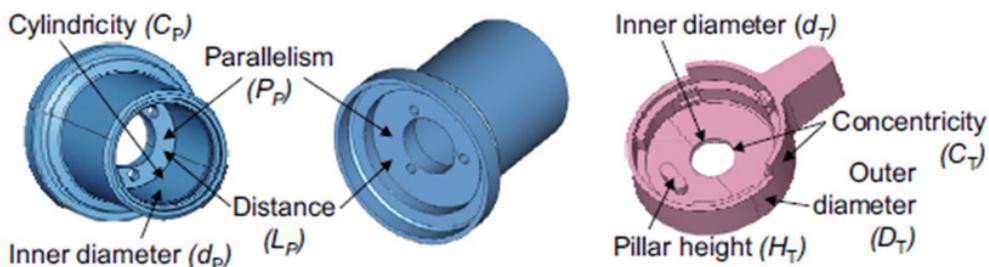


Figura 64 – Conector de tubo (esquerdo e meio) e Alternador de aparelho auditivo (direita). Os mensurandos avaliados são indicados.

Fonte: Adaptado de (MÜLLER, P. et al., 2012, p. 109).

Os autores utilizaram de diferentes estratégias de medição que foram aplicadas junto com diferentes softwares de inspeção. Os objetos foram medidos com uma TC comercial e medições de MMCs táteis e ópticas foram utilizadas como referência. Em suma, nesse estudo de caso específico a TC foi capaz de avaliar as tolerâncias dimensionais e geométricas com um baixo grau de incerteza a depender do mensurando avaliado, software utilizado, procedimento efetuado, etc. Entretanto, uma das pontuações que os autores fazem é de que o artigo apresenta apenas um estudo de caso, sendo que uma variabilidade

maior de peças (material, geometria e tamanhos diferentes) devem ser considerados. Mais detalhes dos objetos estudados, metodologia, resultados e discussão e conclusão podem ser encontrados no estudo original de (MÜLLER, P. et al., 2012).

Outros exemplos da literatura podem ser encontrados em (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018). Uma amostra de aplicação da TC para controle de qualidade de um bico injetor fabricado por manufatura aditiva é mostrada na FIG. 65. Segundo os autores “O bico (FIG. 65 (a)) apresenta um canal de resfriamento helicoidal que pode ser inspecionado apenas usando TC (FIG. 65 (b)). Os desvios da geometria nominal foram calculados por meio de uma comparação nominal-real (FIG. 65 (c))”¹⁰.

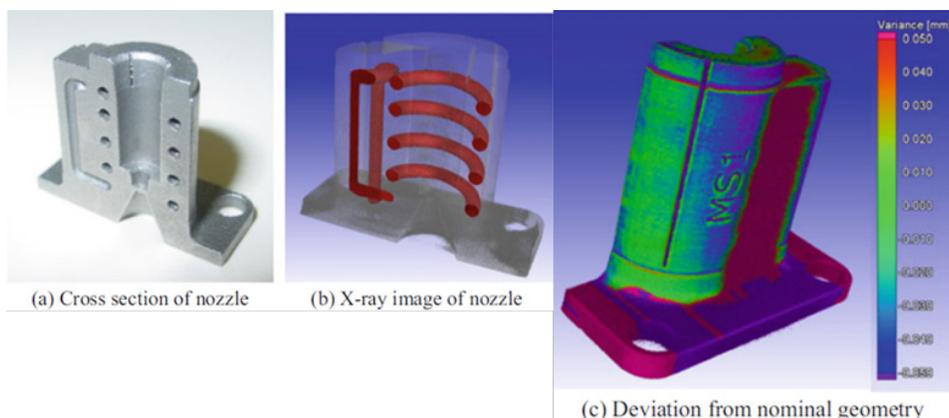


Figura 65 – Bico injetor (a). Imagem do bico injetor utilizando TC (b). Modelo virtual 3D que efetua uma comparação nominal-real (c).

Fonte: Adaptado de (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018, p. 348).

CONCLUSÃO

Com base no que foi exposto neste presente capítulo é possível inferir que a utilização da TC como sistema de medição dimensional apresenta-se possível, mas com grandes desafios pela frente. A capacidade dessa tecnologia em analisar recursos internos inacessíveis e a geração de um modelo virtual 3D que compara os valores nominais-reais das peças podem contribuir fortemente para a indústria, tanto para uma avaliação qualitativa quanto quantitativa de componentes manufaturados. Entretanto, características como tamanho, forma, geometria, tipo de material, temperatura, orientação do objeto, entre outros traços do componente submetido à análise da TC podem dificultar a apresentação dos resultados de medições com as incertezas de medições expandidas com elevada confiança. Além disso, não existem procedimentos padrões para as medições que

10. Tradução nossa.

abrangem todas as situações possíveis, o que dificulta a sua implementação na indústria de maneira escalonada e integrada.

Em suma, a capacidade da TC em avaliar poros, trincas, e outras imperfeições, assim como mensurar recursos internos que são inacessíveis torna essa tecnologia muito promissora para ser utilizada em análises qualitativas e quantitativas pela indústria. Entretanto, a falta de padronização nos procedimentos, a dificuldade em apresentar resultados com alto grau de confiança em certos casos, assim como todos os outros problemas já mencionados apresentam-se como grandes desafios a serem superados.

PROPOSIÇÃO DE FONTES DE INCERTEZA NO RESULTADO DE MEDIÇÃO COM USO DA TC

O presente capítulo possui como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica acerca da metrologia e do sistema internacional de unidades, expondo termos importantes para a compreensão do procedimento de cálculo da incerteza de medição. A partir daí, será efetuada uma revisão bibliográfica que apresentará quais as proposições de fontes de incerteza no resultado de medição com o uso da TC.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – ASPECTOS IMPORTANTES DA METROLOGIA

Metrologia

A metrologia é uma palavra de origem grega a partir da junção dos termos: *metron*= medida; *logos* = ciência. Ela é uma ciência que abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza em quaisquer campos da ciência ou tecnologia. Ela procura garantir a segurança e qualidade dos produtos a partir de calibrações de instrumentos e/ou realizações de ensaios para a verificação da peça (INMETRO, 2000, 2012b).

Precisão de medição v.s. Exatidão de Medição

Embora sejam muitas vezes vistos como sinônimos, o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), (INMETRO, 2012), estabelece uma diferença entre esses dois termos:

- Precisão é “Grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas”.
- Exatidão é “Grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro dum mensurando.”

Veja na FIG. 66 uma demonstração da diferença entre precisão e exatidão.

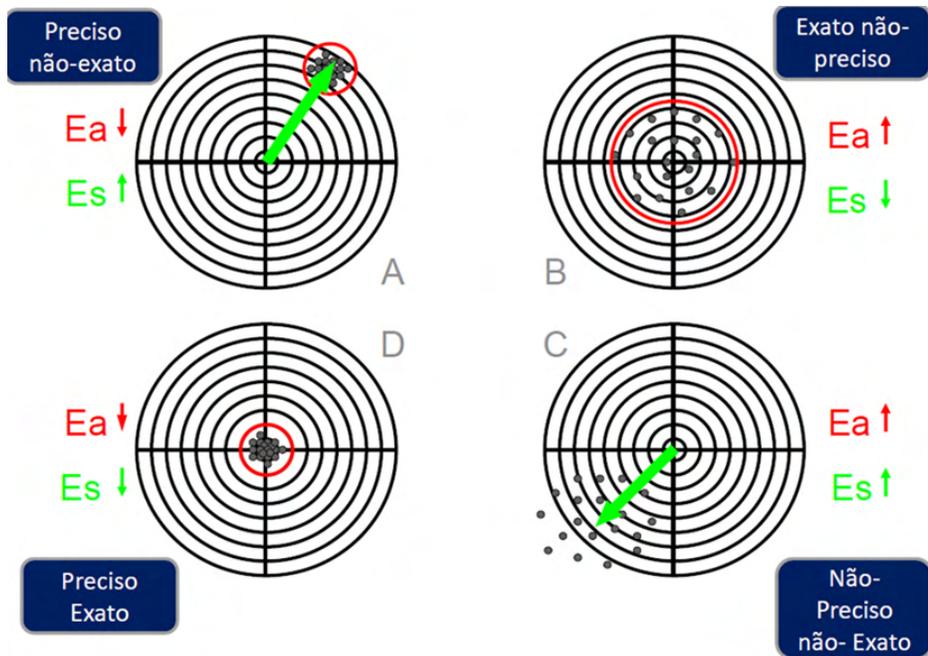


Figura 66 – Demonstração da diferença entre precisão e exatidão.

Fonte: Autoral.

Grandezas e Mensurando

Uma grandeza é definida pelo VIM como “atributo de um fenômeno, corpo ou substância que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado”. A expressão do valor de uma grandeza geralmente vem sob a forma de uma unidade multiplicada por um número. Por exemplo:

- Comprimento de uma barra: 5,34 m ou 534 cm;
- Massa de um corpo: 0,152 kg ou 152 g.

O valor verdadeiro de uma grandeza consiste com a definição de uma dada grandeza específica e seria obtido por uma medição perfeita, algo que é impossível. A grandeza que se pretende medir é denominada mensurando.

Sistema Internacional de Unidades

O Sistema Internacional de Unidades (SI), comumente conhecido como sistema métrico, é o padrão internacional das grandezas e medições. Segundo (SANTOS et al., 2012), “O Bureau Internacional de Pesos e Medidas, o BIPM, foi criado pelo artigo 1º da Convenção do Metro, no dia 20 de maio de 1875, com a responsabilidade de estabelecer

os fundamentos de um sistema de medições, único e coerente, com abrangência mundial.” As sete unidades de base do SI, listadas na TAB. 9, fornecem as referências que permitem definir todas as unidades de medida do Sistema Internacional.

Sistema Internacional de Unidades (SI)		
Grandeza de Base	Unidade de Base	
Nome	Nome	Símbolo
comprimento	metro	m
massa	kilograma	kg
tempo	segundo	s
corrente elétrica	ampere	A
temperatura termodinâmica	kelvin	K
quantidade de substância	mol	mol
intensidade luminosa	candela	cd

Tabela 9 – Unidades de base do Sistema Internacional de Unidades (SI).

Fonte: Adaptado de (INMETRO, 2012b).

Instrumento de Medição e Sistema de Medição

Instrumento de medição é “Dispositivo utilizado para realizar medições, individualmente ou associado a um ou mais dispositivos suplementares”. Exemplo: paquímetros, micrômetros, réguas (INMETRO, 2012b).

Sistema de medição é o conjunto de um ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos que serão utilizados para obter os valores medidos dentro dos intervalos especificados. Vale informar que um instrumento de medição que pode ser utilizado individualmente é um sistema de medição. (INMETRO, 2012b).

Erros Sistemático e Erro Aleatório

Conforme (INMETRO, 2012a), as medições possuem imperfeições que dão origem ao erro no resultado de medição. Tradicionalmente, um erro é dividido entre:

- Um erro aleatório que “se origina de variações temporais ou espaciais, estocásticas ou imprevisíveis, de grandezas de influência.” Esse erro, apesar de não poder ser eliminado, é possível reduzir o seu efeito no resultado de medição aumentando o número de observações realizadas.
- Erro sistemático que “se origina de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência em um resultado de medição [...]” Esse erro também não pode ser eliminado, porém frequentemente ele é reduzido ao aplicar um fator de correção.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Para avaliar e expressar as incertezas de medições de forma padronizada o *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) foi publicado pela ISO em 1993. Esse foi o primeiro Guia internacional que orientava os trabalhos relacionados à medição em praticamente todas as áreas. Em conjunto com o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), o GUM compõe um conjunto de critérios e regras gerais para avaliar e expressar incerteza em medição sendo que a versão mais recente desse documento foi traduzida e publicada pelo INMETRO em 2012 sob o título “Avaliação de dados de medição – Guia para a expressão de incerteza de medição - GUM 2008” (INMETRO, 2012a).

De acordo com (ARENCIBIA et al., 2019), o método proposto para avaliar e expressar as incertezas de medições pode ser dividido nas seguintes etapas:

1. Definição do mensurando ou variável de saída;
2. Identificação das variáveis que podem afetar o resultado da medição;
3. Expressão do mensurando em função das variáveis de influência, por meio de um modelo matemática;
4. Avaliação da incerteza-padrão associada às variáveis de entrada;
5. Avaliação da incerteza-padrão combinada associada à variável de saída;
6. Avaliação da incerteza expandida associada à variável de saída;
7. Expressão do resultado de medição.

Nas seguintes seções serão explicadas cada uma das etapas.

Definição de Medição e do Mensurando

De acordo com (INMETRO, 2012b), medir é “Processo de obtenção experimental dum ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza.” Toda medição possui o intuito de determinar o valor do mensurando. Sendo assim, uma medição começa com a especificação completa do mensurando, o que significa que, para um nível de exatidão determinado, o seu valor é único. Além da definição do mensurando é necessário também especificar o método de medição e do procedimento de medição apropriado (ARENCIBIA et al., 2019; INMETRO, 2012a).

Com as condições dadas, por exemplo, medir o diâmetro de uma barra a 20 °C com um paquímetro analógico cuja resolução é de 0,05 mm e faixa nominal de 150 mm, o resultado de medição é obtido efetuando repetidas medições com um sistema de medição apropriado. O resultado de medição é somente uma aproximação do valor real do mensurando devendo sempre estar acompanhado pela declaração da incerteza dessa estimativa.

A incerteza associada ao resultado de uma medição é um reflexo da falta de conhecimento exato do valor do mensurando sendo definida pelo VIM como “parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas” (ARENCIBIA et al., 2019; INMETRO, 2012a, b).

Conforme é exposto por (ARENCIBIA et al., 2019), com essa definição é importante destacar alguns pontos:

1. Ressalta-se que a incerteza se relaciona com o resultado de medição, e não ao valor verdadeiro da grandeza;
2. A incerteza não é intrínseca ao sistema de medição, e sim aos valores indicados por ele;
3. A incerteza é uma faixa de valores, e não um valor pontual.

Identificando as Grandezas de Influência

Primeiro, deve-se identificar todas as grandezas que influenciam a medição, ou seja, mapear as fontes de incerteza. Essas fontes podem estar relacionadas às condições ambientais, ao operador, aos equipamentos e padrões utilizados, ao método de medição, dentre outros fatores (ARENCIBIA et al., 2019; INMETRO, 2012a).

Conforme (ARENCIBIA et al., 2019; INMETRO, 2012a), as fontes de incertezas vão variar de acordo com sistema de medição, o tipo de mensurando analisado e o nível de exatidão exigido. Dessa forma, é necessário que o operador interprete o certificado de calibração para retirar as informações relevantes para o cálculo da incerteza, conheça o procedimento correto de medição assim como o princípio de funcionamento do sistema de medição utilizado. Os principais fatores que podem afetar a incerteza final e devem ser monitorados são:

- Defeitos e/ou características do equipamento;
- Fatores ambientais, como umidade, temperatura, pressão, vibração mecânica, entre outros;
- Características da peça, como rugosidade, material e geometria;
- Erros cometidos pelo operador durante a medição, como o erro de paralaxe;
- Problemas com a estratégia de medição utilizada.

Identificar esses componentes que contribuem para a incerteza de medição é muito importante para se dar início ao cálculo de incerteza. Idealmente falando, seriam efetuadas infinitas medições para se obter o máximo de confiabilidade. Entretanto, na prática são realizadas várias medições de um mesmo mensurando para obtenção de uma amostra

que possa ser considerada representativa da população, de forma que as conclusões obtidas a partir dessa amostra possam ser estendidas à população (ARENCIBIA et al., 2019; INMETRO, 2012a).

Com uma amostra identifica-se erros grosseiros e efetua-se uma análise estatística dos dados. Entretanto, é importante pontuar que mesmo que as medições sejam tomadas em condições aparentemente idênticas (condições de repetibilidade), o conjunto de observações da grandeza vai apresentar uma certa variabilidade, sendo ela quantificada por meio do desvio-padrão experimental e denomina-se repetibilidade (ARENCIBIA et al., 2019; INMETRO, 2012a).

Na TAB. 10 é apresentado um exemplo de uma medição hipotética de indicação da média e do desvio padrão.

Medição	Indicação
1	30,005
2	30,007
3	30,012
4	30,002
5	30,009
6	30,011
7	30,015
8	30,011
9	30,005
10	30,003
Média aritmética (mm)	30,008
Desvio padrão (mm)	0,004268749

Tabela 10 – Medições hipotéticas associadas à altura de uma peça. Média e desvio-padrão considerando 10 indicações.

Fonte: Autoral.

O desvio-padrão é uma medida da dispersão dos valores do mensurando em torno da média, indicando os valores limites do erro aleatório para uma probabilidade determinada. Ele tende a se estabilizar à medida que o número de elementos da amostra aumenta, assim como é possível diminuir o erro aleatório aumentando o número de observações. Contudo, vale pontuar que limitações de tempo e de recursos financeiros, além de outros problemas, podem impedir a adoção dessa prática (ARENCIBIA et al., 2019).

Além da importância de se ter uma amostra representativa, as fontes de incertezas previamente citadas devem ser avaliadas. Quando se suspeita que uma variável relacionada

ao ambiente possa influenciar o resultado de medição, torna-se necessário monitorar essa variável simultaneamente à realização da medição em curso (ARENCIBIA et al., 2019; INMETRO, 2012a)

Além das grandezas de influência já citadas, o GUM apresenta as seguintes fontes de incerteza:

- a. Definição incompleta do mensurando;
- b. Realização imperfeita da definição do mensurando;
- c. Amostragem não representativa – a amostra medida pode não representar o mensurando definido;
- d. Conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- e. Erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- f. Resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- g. Valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- h. Valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados;
- i. Aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- j. Variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

Obtenção do Modelo Matemático

Após identificar as grandezas de influência, deve-se propor um modelo matemático que descreva o processo de medição, pois ele é a base para a aplicação da lei de propagação de incertezas. Segundo (ARENCIBIA et al., 2019), esse modelo “relaciona todas as variáveis de influência (variáveis de entrada) do progresso de medição com o mensurando (variável de saída).” Essa função é dada pela Eq. 1:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

Na qual:

Y= variável de saída;

X_i = variável de entrada.

Observe o seguinte exemplo dado por (ARENCIBIA et al., 2019):

Considere a medição de um comprimento por meio de uma régua de aço, com resolução de 0,5 mm. Nesse caso, podem ser identificadas como variáveis de influência a variabilidade das leituras, a resolução da régua e a incerteza associada à calibração da régua, declarada no certificado de calibração da mesma. (ARENCIBIA et al., 2019, p.23).

Assim sendo, o comprimento da peça pode ser expresso por meio da relação funcional na Eq. 2 a seguir:

$$C_R = f(\bar{X}; R_R; IC_R) \quad (2)$$

Em que:

C_R = comprimento da peça medido com a régua;

\bar{X} = média aritmética dos valores indicados pela régua;

R_R = resolução da régua;

IC_R = incerteza associada à calibração da régua.

Como não existe um modelo matemático que descreva essa medição, pode-se utilizar uma expressão algébrica para expressar o mensurando (C_R) em função das variáveis de influência conforme apresentado na Eq. 3 adiante.

$$C_R = \bar{X}_R + \Delta R_R + \Delta IC_R \quad (3)$$

Sendo que:

\bar{X}_R = média aritmética das (n) observações;

ΔR_R = correção associada à resolução da régua.

ΔIC_R = correção associada à incerteza da calibração da régua.

Dessa maneira, pode-se realizar concluir que:

“De forma geral, o modelo matemático da medição inclui, além da média aritmética das observações, as várias grandezas de influência que são conhecidas de forma inexata. Desta forma, contribuem para a incerteza do resultado da medição as variações das observações repetidas, bem como a falta de conhecimento das variáveis de influência.” (ARENCIBIA et al., 2019, p. 24).

Avaliação da Incerteza-Padrão

De acordo com (ARENCIBIA et al., 2019; INMETRO, 2012a), o GUM apresenta duas classificações distintas para o método de avaliação de incerteza-padrão, são elas: avaliação do Tipo A e avaliação do Tipo B. Para se obter a incerteza padrão se efetua uma análise individual de cada uma das grandezas de influência, sendo o método de avaliação a ser utilizado dependente da quantidade de informação disponível sobre esses componentes de incerteza e da forma como eles se apresentam. Ambos os tipos de avaliação de incerteza-padrão são baseados em distribuições de probabilidade e não possuem o intuito de substituir os termos “aleatório” ou “sistemático”.

Incerteza-Padrão Tipo A

A avaliação do Tipo A da incerteza-padrão é o “método de avaliação de incerteza pela análise estatística de séries de observações” – (INMETRO, 2012a). Esse método de avaliação apresenta um gráfico cujo formato é denominado Curva de Gauss (FIG. 67), também chamado de distribuição normal (ARENCIBIA et al., 2019; INMETRO, 2012a).

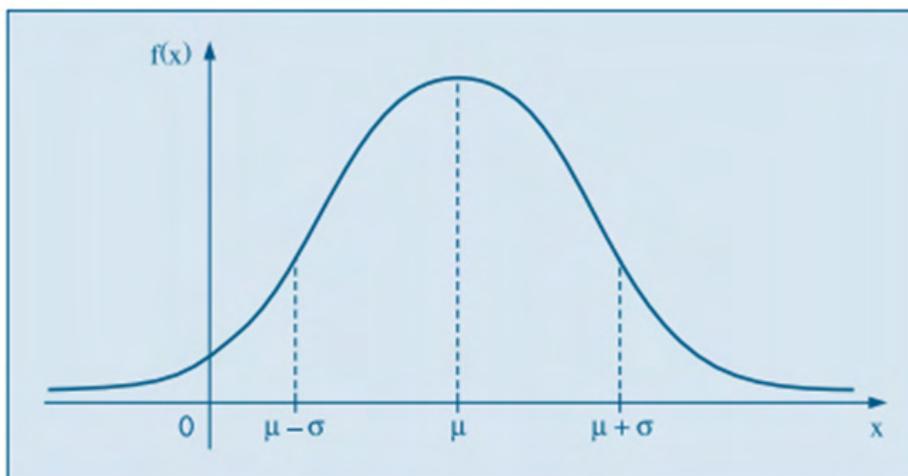


Figura 67 – Exemplo de gráfico com distribuição normal (Curva de Gauss).

Fonte: (MORETTIN; BUSSAB, 2010, p.176).

Dentre os componentes nesse método de avaliação, tem-se a média aritmética de (n) observações repetidas no mesmo mensurando que representa a melhor estimativa do valor do mensurando. Vale pontuar que, por causa de variações aleatórias provenientes das observações individuais, ou efeitos aleatórios, as observações individuais vão possuir valores distintos entre si. O desvio-padrão experimental da média visa considerar as

flutuações aleatórias além das influências constantes, sendo ele um cálculo da incerteza associada ao valor da média (ARENCEBIA et al., 2019; INMETRO, 2012a).

Incerteza-Padrão do Tipo B

A avaliação do Tipo B é “método de avaliação de incerteza por outros meios que não a análise estatística de séries de observações” – (INMETRO, 2012a). Ela é avaliada por julgamento científico e se baseia em uma série de informações disponíveis, tais como: dados de medições prévias, especificações do fabricante, dados fornecidos em certificados de calibração, dados de experiências anteriores, entre outras. A depender da quantidade de informações acessíveis tem-se diferentes distribuições de probabilidade para efetuar os cálculos. Esse método de avaliação exige discernimento baseado na experiência e no conhecimento geral, habilidade que pode ser aprendida na prática. É importante reconhecer que a avaliação do Tipo B pode ser tão confiável quanto uma avaliação do Tipo A, especialmente se o número (n) de observações da avaliação do Tipo A for baseado em um número comparativamente pequeno de observações estatísticas independentes (ARENCEBIA et al., 2019; INMETRO, 2012a).

Alguns exemplos de distribuição de probabilidade da avaliação do Tipo B é a Distribuição Retangular (FIG. 68), e a Distribuição Triangular (FIG. 69).

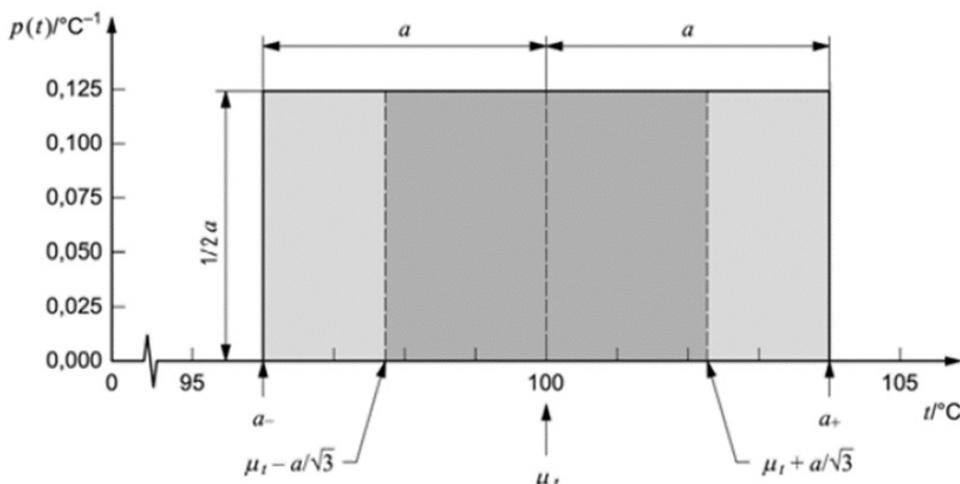


Figura 68 – Exemplo de Distribuição Retangular presente na avaliação do Tipo B.

Fonte: (INMETRO, 2012a, p. 17).

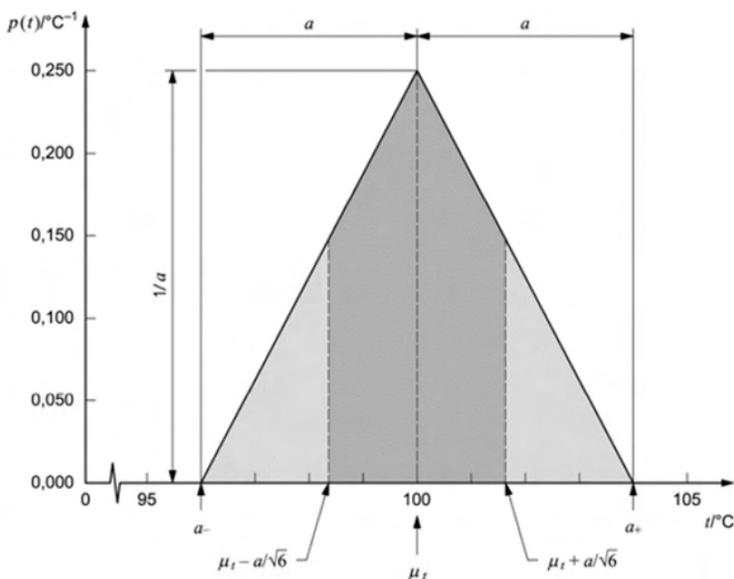


Figura 69 – Exemplo de Distribuição Triangular presente na avaliação do Tipo B.

Fonte: (INMETRO, 2012a, p. 17).

Na seção seguinte abordar-se-á a incerteza-padrão combinada.

Incerteza-Padrão Combinada

Por fim, vale destacar a incerteza-padrão combinada. Segundo (INMETRO, 2012a), a incerteza padrão de y , onde y é a estimativa do mensurando Y e, desta maneira, o resultado de medição, é obtida pela combinação correta de incertezas-padrão das estimativas de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . Essa incerteza-padrão combinada da estimativa y é representada por $u_c(y)$. Na incerteza-padrão combinada as grandezas de entrada podem ser:

- Estatisticamente independentes ou não correlacionadas;
- Estatisticamente dependentes ou correlacionadas.

A discussão a respeito das avaliações do Tipo A e Tipo B e da incerteza-padrão combinada não se destina a ser exaustiva; há muitas situações, algumas altamente complexas, que exigem procedimentos e métodos estatísticos distintos. Portanto, este estudo limitou-se a abordar de forma resumida os detalhes de cada incerteza, não aprofundando-se nos detalhes técnicos ou nos cálculos.

Incerteza Expandida e o Resultado de Medição

De acordo com (INMETRO, 2012a), a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ é utilizada

como parâmetro para expressar quantitativamente a incerteza do resultado de uma medição. Entretanto, ao fornecer uma medida de incerteza deve-se definir “um intervalo em torno do resultado da medição com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando”. A medida adicional de incerteza que satisfaz esse requisito de fornecer um intervalo é denominada incerteza expandida e é representada por U . A incerteza expandida U é apresentada na Eq. 4 a seguir. Ela é obtida, multiplicando-se a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência k :

$$U = k u_c(y) \quad (4)$$

O GUM especifica que:

“ U é interpretado como definindo um intervalo em torno do resultado de medição que abrange uma extensa fração p da distribuição de probabilidade caracterizada por aquele resultado e sua incerteza-padrão combinada, sendo p a probabilidade de abrangência ou nível da confiança do intervalo.” (INMETRO, 2012^a, p. 23)

À vista disso, a abrangência (k) é escolhida em função do nível de abrangência requerido para o intervalo estando geralmente entre 2 e 3 para uma distribuição normal de probabilidade, considerando 95,45% e 99,73% de nível de confiança, respectivamente (INMETRO, 2012^a, p. 23).

De acordo com (INMETRO, 2012^a, p. 23), ao expressar o resultado de uma medição e sua incerteza, é preferível errar por excesso no fornecimento de informações a fornecê-las com escassez. Sendo assim, deve-se sempre:

- Apresentar uma descrição completa da definição do mensurando;
- Fornecer uma estimativa da incerteza padrão combinada do mensurando junto com suas unidades;
- Descrever no relatório de forma detalhada como o resultado da medição e sua incerteza foram obtidos seguindo as recomendações do GUM.

O resultado de medição com a medida de incerteza expandida (U) é declarado conforme o exemplo da Eq. 5 adiante:

$$m_s = 100,021\ 47 \pm 0,000\ 79) \text{ g} \quad (5)$$

Onde o número após o símbolo \pm é o valor numérico de $U = k u_c$ (uma incerteza expandida) com U determinado por $u_c = 0,35 \text{ mg}$ (uma incerteza-padrão combinada) e $k = 2,26$ (um fator de abrangência) avaliado com base na distribuição-t para $n = 9$ graus de liberdade. U define um intervalo estimado para ter um nível da confiança de 95 por cento.

FONTES DE ERRO E FONTES DE INCERTEZA DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Conforme (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; KRAEMER; LANZA, 2016; KRUTH et al., 2011), durante o processo de medição, uma grande quantidade de fatores influencia as características metrológicas do sistema de medição. Consequentemente, os tomógrafos industriais apresentam diversas distorções aleatórias ou sistemáticas em relação às reais características medidas. Os fatores de influência podem ser divididos em cinco grupos de parâmetros (ver FIG. 70):

- Sistema da TC;
- Peças de trabalho;
- Software/processamento de dados;
- Ambiente;
- Operador.

A diretriz alemã VDI / VDE 2630-1.2 (2008) é um dos poucos documentos que padroniza o procedimento de medição com a TC, fornece uma visão geral completa dos fatores que impactam o fluxo de trabalho de medição

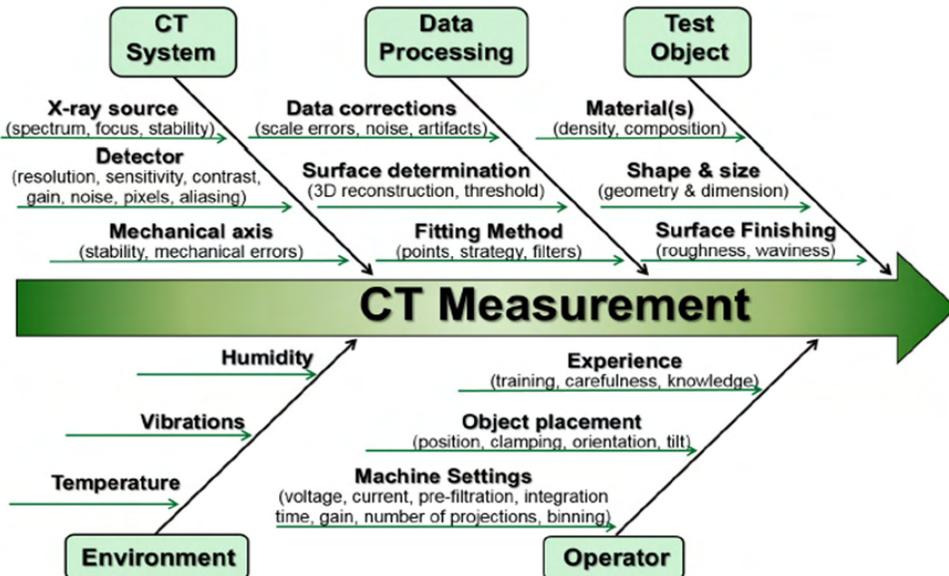


Figura 70 – Diagrama que descreve alguns dos principais fatores de influência para a TC na metrologia dimensional.

Fonte: Adaptado de (VILLARRAGA-GÓMEZ; LEE; SMITH, 2018, p. 12).

Vale pontuar que, para fins de simplificação, a sequência de títulos apresentadas a seguir seguem a mesma ordem que o estudo de (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018).

Sistema da TC

Como já foi abordado no capítulo 2, os principais componentes que compõem os hardwares da tomografia computadorizada industrial são: a fonte de raios X, os detectores de Raios X e o sistema de posicionamento.

Fonte de Raios X

Em resumo, os raios X da TC são produzidos acelerando os elétrons através de uma alta voltagem, em um tubo de vácuo, e permitindo que os elétrons colidam com um alvo de metal. Na colisão, os elétrons emitem energia na forma de fótons, com as mais diversas energias (frequências). Algumas delas estão situadas na faixa conhecida como radiação X, enquanto outras são frequência na faixa do infravermelho (calor), ultravioleta e luz visível (KRUTH et al., 2011; SOARES, 2006; SUN; BROWN; LEACH, 2012).

Segundo (CANTATORE; MÜLLER, 2011), as variáveis mais importantes que determinam a qualidade do espectro de emissão de raios X são: o tamanho do ponto focal, o espectro de energias de raios X geradas e a intensidade de raios X.

A dimensão do ponto focal afeta a resolução espacial da TC, determinando quantos caminhos possíveis existem entre a fonte de raios X e o detector: quanto mais caminhos forem possíveis, maior será o desfoque da imagem final. Se por um lado ter um ponto focal pequeno produzirá imagens mais nítidas, por outro lado isso também vai aumentar o calor concentrado produzido no ponto alvo dentro do tubo de raios X, exigindo alvos resfriados e limitando a tensão máxima aplicável. Com um ponto focal grande ocorrerá um desfoque conhecido como efeito penumbra (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018). A FIG. 71 ilustra o efeito causado pelo tamanho do ponto.

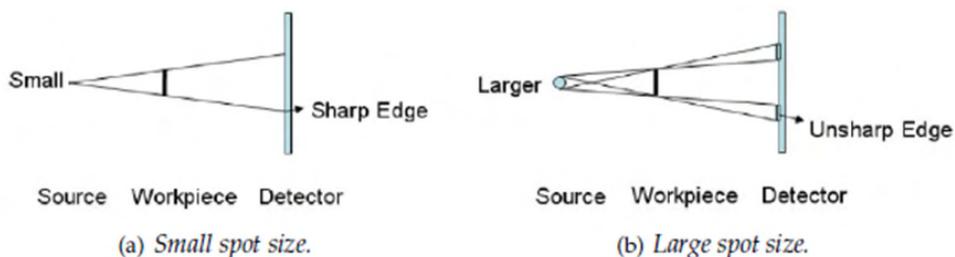


Figura 71 – Influência do tamanho do ponto focal na nitidez da imagem da TC.

Fonte: Adaptado de (CANTATORE; MÜLLER, 2011, p. 31).

O espectro de energia define a capacidade de penetração dos raios X, assim como a sua atenuação relativa esperada à medida que passam por materiais de diferentes densidades. A forma do espectro de raios X vai depender do material alvo e de sua espessura, sendo que alvos feitos com elementos de baixo número atômico, como cobre e molibdênio, são adequados para a geração de imagens de peças de baixa absorção com alto contraste. A intensidade dos raios X é limitada pela dissipação máxima de calor que o material alvo possui sendo necessário pontos focais maiores para intensidades maiores de raios X, o que limita a resolução da imagem obtida. Portanto, o material alvo deve ser selecionado para se adequar às condições de operação exigidas (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018).

Detectores de Raios X

O objetivo do detector é converter o fluxo de raios X incidente em um sinal elétrico, que pode então ser tratado por técnicas convencionais de processamento eletrônico. Existem muitos parâmetros que afetam a qualidade da imagem em detectores de TC de raios X, sendo os principais: eficiência quântica (QE), número de pixels, velocidade de leitura (taxa de quadros) e faixa dinâmica. O tamanho do pixel impacta a resolução espacial e na relação sinal-ruído (SNR). Tamanhos pequenos de pixel aumentam a resolução espacial, e tamanhos grandes de pixel resultam em melhor SNR (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018).

Outra fonte de erro é a maneira com que os detectores de raios X são feitos. Um marco importante no desenvolvimento de detectores é o detector de tela plana que garante a precisão geométrica das imagens e o transporte eficiente da luz do cintilador para os fotodiodos. Uma melhoria significativa na conversão é obtida com a conversão direta dos fótons por semicondutores, sendo que os materiais mais utilizados são uma combinação de: Cádmio (Cd), Telúrio (Te), Zinco (Zn), Silício (Si), Gálio (Ga) e Arsênio (As). Contudo, eles são caracterizados por uma perda de qualidade na análise de alguns recursos como, por exemplo, faixa dinâmica, pixels mortos, e possuem menor número de pixels e possível deslocamento de segmento (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018).

Sistema de Posicionamento

De acordo com (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018), a posição relativa entre a fonte de raios X, a mesa rotativa e o detector de raios X deve estar corretamente alinhada para se evitar a introdução de artefatos nas imagens. A geometria ideal do sistema é mostrada na FIG. 72, em (b). Uma representação de uma imagem de TC de um ponto sem desalinhamento é apresentado em (a), e uma imagem de

TC com um ponto desalinhado em 10 pixels é apresentado em (c).

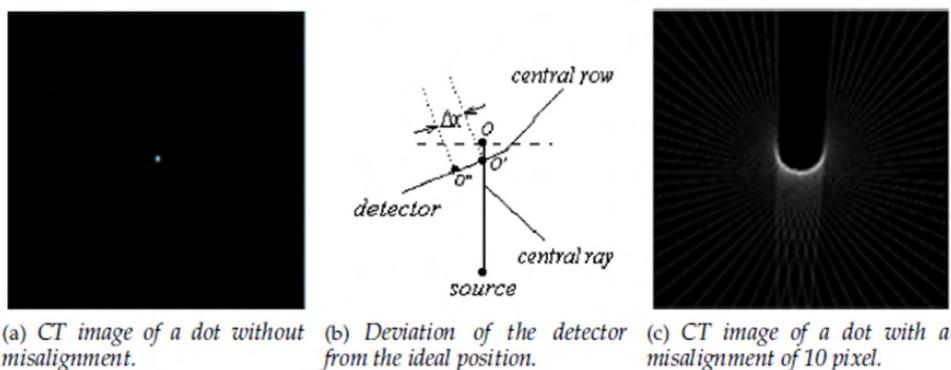


Figura 72 – Efeito de desalinhamento devido ao deslocamento horizontal transversal fora do centro ao longo da direção da coluna do detector.

Fonte: Adaptado de (CANTATORE; MÜLLER, 2011, p. 34).

Os desalinhamentos associados à fonte de raios X originam-se das dificuldades em adquirir suas coordenadas centrais das projeções de um objeto de calibração, incluindo marcadores fiduciais. Os desalinhamentos da fonte de raios X, do detector e/ou mesa rotativa, diferentes artefatos podem aparecer nas imagens de TC, refletindo em artefatos na geometria 3D reconstruída. (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018).

Peças de Trabalho

Primeiro, lembrar-se-á que quando os raios X passam pelo material de um objeto, eles são atenuados, isto é, a intensidade de um feixe de fótons será reduzida por causa da absorção ou espalhamento. O grau de atenuação depende do comprimento do material absorvente, sua composição, sua densidade (ou seja, o coeficiente de atenuação μ) e a energia dos raios X. Medir essa atenuação permitirá a detecção de presença de material (mesmo vários materiais, para peças multi-materiais) e o comprimento percorrido dentro destes materiais (GUIMARÃES, 2016; KRUTH et al., 2011; REIS NETO et al., 2011).

Portanto, dependendo do coeficiente de atenuação do material que compõe a peça de trabalho o valor da espessura do mensurando terá um limite, sendo que alguns desses limites foram apresentados anteriormente na seção Espessura Máxima de Material Penetrável, TAB. 1. Ademais, os raios X têm maior possibilidade de serem transmitidos (ou penetrar mais fundo) através da matéria que possui baixo número atômico, pois átomos com alto número atômico detêm maiores chances de interagir (e atenuar) mais os fótons. Tais efeitos são esquematizados na FIG. 73 (a) e (b) (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018).

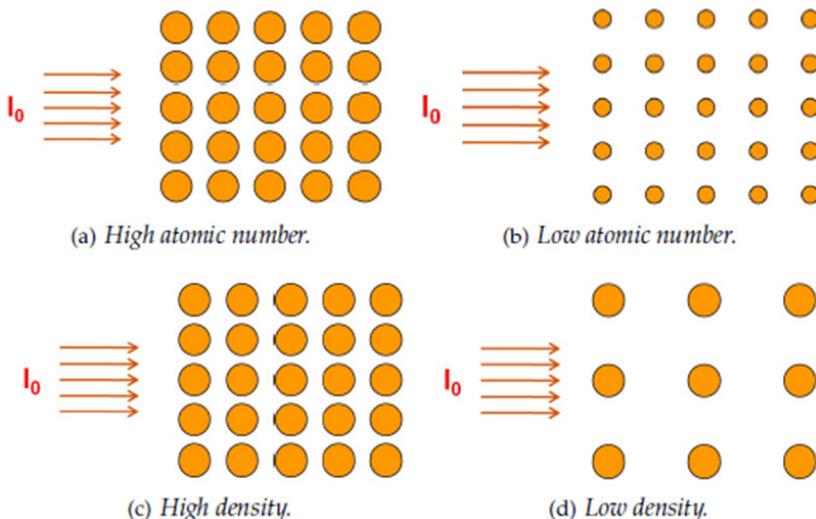


Figura 73 – Uma imagem esquemática da influência do número atômico e da densidade do material na intensidade dos fótons de raios-X transmitidos.

Fonte: Adaptado de (CANTATORE; MÜLLER, 2011, p. 50).

Os raios X também penetram melhor materiais menos densos (leves) do que materiais mais densos (pesados). Isso acontece porque os materiais mais pesados e densos oferecem uma resistência à penetração dos raios X maior porque absorvem mais energia (observe a FIG. 73 (c) e a FIG. 73 (d)) (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018).

Além dessas características da peça de trabalho (espessura, número atômico e densidade), a superfície do mensurando também pode afetar o resultado final, além de sua massa que, para tomógrafos com foco na metrologia, não deve ultrapassar 5 kg visando as especificações mecânicas durante o movimento da mesa rotativa (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018).

Em suma, de acordo com (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; KRUTH et al., 2011), algumas das principais características da peça de trabalho que afetam a incerteza de medição são:

- Coeficiente de atenuação da peça de trabalho;
- Espessura do material;
- Número atômico do material;
- Densidade do material;
- Massa total;

- Geometria da peça;
- A textura da superfície da peça (rugosidade).

Condições do Meio Ambiente

A metrologia dimensional geralmente requer que as medições sejam realizadas a 20° C com variações da ordem de 1° C ou menos. Porém, esse requisito se demonstra um desafio para a TC porque o próprio sistema é uma fonte de calor sendo necessários resfriamento no tubo de raios X e no gabinete. As mudanças na temperatura podem fazer a peça dilatar ou contrair, causando mudanças em suas dimensões. Ademais, a temperatura também afeta a cinemática de todos os componentes da TC envolvidos, elevando os erros geométricos. Além disso, uma temperatura alta pode afetar os elementos eletrônicos da TC, agitando termicamente um condutor elétrico que estava em equilíbrio, podendo assim corromper a calibração do detector (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; KRUTH et al., 2011).

Outro fator ambiental a ser levado em consideração é a umidade. Ela pode, por exemplo, diminuir a energia livre da superfície em polímeros e, ao mesmo tempo, aumentar o volume. Manter a estabilidade dos níveis de umidade é algo necessário para evitar a oxidação ou ferrugem no equipamento de medição e para evitar a expansão da peça de trabalho (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; KRUTH et al., 2011).

Por fim, choques e vibrações geralmente se originam em máquinas-ferramentas pesadas localizadas em salas adjacentes à da TC. Esses fatores influenciam na precisão se ultrapassados os níveis máximos que um sistema TC pode suportar. A vibração também pode modificar o alinhamento da posição relativa dos componentes da TC, tendo consequências diretas no sucesso das medições (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; KRUTH et al., 2011).

Software e Processamento de Dados

O processamento de dados é um componente essencial das medições de TC, tendo como etapas principais: a reconstrução do objeto em uma versão digital 3D, a determinação de superfície e o tratamento de dados. Quando o processo de aquisição do objeto digitalizado é concluído, algoritmos de reconstrução são usados para reconstruir o volume 3D. Primeiro, vale lembrar que um voxel é uma imagem 3D análoga à um pixel (ver FIG. 74), onde o valor de cinza do voxel é uma medida para a absortividade do material (ou seja, composição, densidade, etc.). O tamanho do voxel é uma função do tamanho do pixel e da distância entre o objeto-fonte e o detector-fonte (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018).

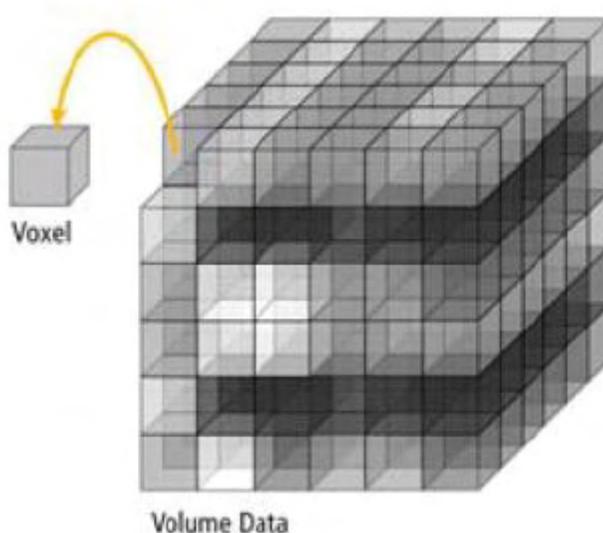


Figura 74 – Ilustração da definição de um voxel.

Fonte: Adaptado de (CANTATORE; MÜLLER, 2011, p. 38).

Na reconstrução, praticamente utiliza-se algoritmos de retroprojeção filtrado (FBP) para corrigir o desfoque encontrado na projeção. Alguns dos filtros mais conhecidos na reconstrução em FBP são apresentados na FIG. 75. Segundo (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018)¹, “Além do filtro de rampa (*lax filters*), todos os filtros reduzem a amplitude do sinal em altas frequências”. Todos os filtros geram resultados de reconstrução (resultados de medição) semelhantes se houver pouca presença de ruído (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; SUN; BROWN; LEACH, 2012). Um exemplo de imagem obtida sem e após filtração é apresentada adiante na FIG. 76.

1. Tradução nossa.

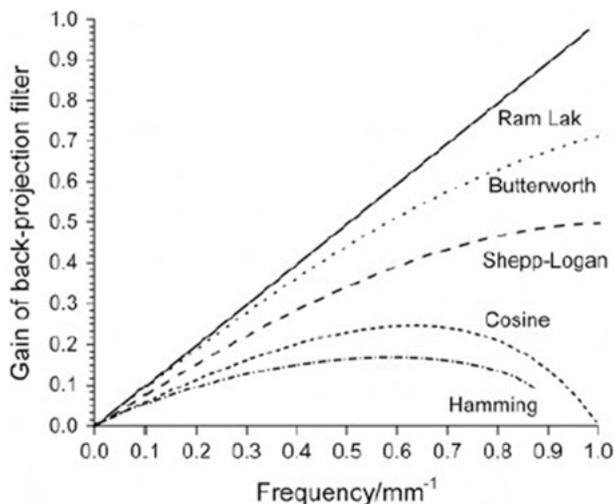


Figura 75 – Cinco filtros de reconstrução comumente usados em FBP.
 Fonte: Adaptado de (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018, p. 155).

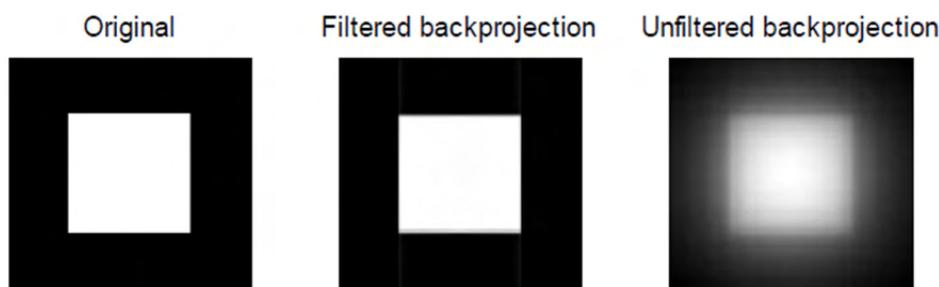


Figura 76 – Imagem original (esquerda); imagem filtrada por retroprojeção (meio); imagem sem filtro (esquerda).

Fonte: Adaptado de (SUN; BROWN; LEACH, 2012, p. 19).

Além da filtragem, e conforme (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018), a determinação da superfície, que influencia a geometria reconstruída resultante do objeto digitalizado, é feita através da determinação do valor de limiar. A limiarização consiste na conversão de uma imagem de valor cinza em uma imagem resultante com valor binário. Tem-se no final uma imagem formada por dois conjuntos:

1. Um com a cor preta, representando o fundo;
2. Outro da cor branca representando o componente analisado.

Vale salientar que as cores apresentadas são apenas para fins de exemplificação.

Por fim, segundo (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018)², “alterar os pontos

2. Tradução nossa.

iniciais, mesmo de alguns valores de cinza, resulta em deslocamentos de superfície devido à ausência de uma transição nítida entre os valores de cinza da peça de trabalho e do fundo”. O impacto da determinação da superfície na medição depende da característica investigada, e se relaciona a uma série de fatores.

Operador

O operador praticamente não influencia diretamente os resultados de medição da TC. Contudo, a implementação da estratégia de medição, assim como outros parâmetros que precisam ser definidos antes da varredura, dependem da experiência do operador. Fixação e orientação da peça de trabalho, ampliação, número de projeções, configurações do sistema TC são algumas das principais fontes de erro.

Primeiro, deve-se atentar à importância de se fixar corretamente a peça que será medida, evitando deslocamentos e rotações durante a varredura. Além disso, a orientação da peça de trabalho tem impacto considerável na variação do comprimento da passagem dos raios X pelo objeto durante o escaneamento. Se o comprimento variar muito, o resultado da reconstrução da imagem pode ser fraco e inadequado por causa de uma exposição incorreta das projeções reconstruídas. Portanto, é necessário que os raios X passem de forma igual por todo o comprimento do componente a ser medido. Além disso, os materiais de fixação devem ser devidamente escolhidos pelo operador como, por exemplo, polímero ou resina epóxi, garantindo assim uma boa fixação e orientação (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018).

Conforme (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018), outro fator importante a ser avaliado pelo operador é a ampliação geométrica, distancia pixel a pixel, o detector e da fonte de raios X, porque todos esses fatores afetam o voxel resultante (VS), e a dimensão do VS influencia a resolução de um sistema de TC. Por causa disso, componentes que possuam uma alta absorção não podem ser digitalizados em grandes ampliações. A ampliação geométrica é, segundo (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018)³, “determinada pela distância fonte-peça de trabalho L_{sw} , distância fonte-detector L_{sd} , a largura do detector D , o volume de medição d e o tamanho do pixel do detector p ”. Um esquema que exemplifica a ampliação geométrica é mostrado na FIG. 77 a seguir.

3. Tradução nossa.

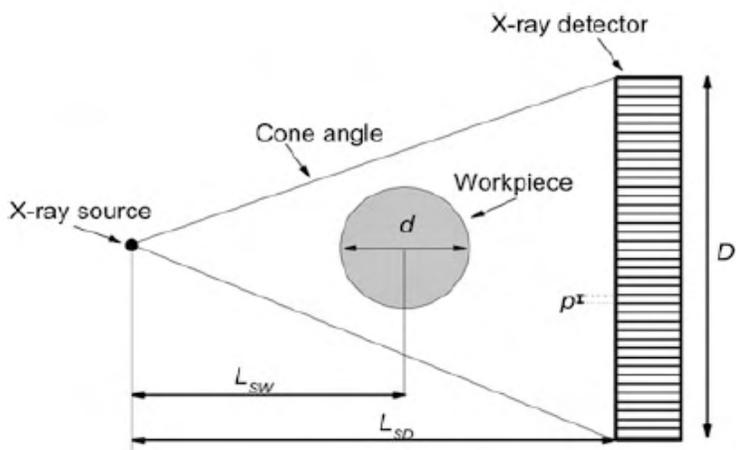


Figura 77 – Exemplificando a ampliação geométrica.

Fonte: Adaptado de (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018, p. 159).

O número de projeções está intrinsecamente relacionado com o tempo de varredura e a quantidade de dados gerados. Aumentar o número de projeções também aumentará a quantidade de dados gerados e o tempo de aquisição necessário. Sendo assim, deseja-se efetuar o menor número possível de projeções que forneça uma precisão aceitável. Ademais:

“Vários estudos identificaram a condição mínima para alcançar uma reconstrução bem-sucedida de conjuntos de dados em que a fonte dominante de ruído é a estatística de fótons e a peça de trabalho é uma geometria simples.” - (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018, p. 161)⁴.

A condição mínima P_{min} é dada pela fórmula a seguir na Eq. 5, onde M é o número de pixels necessários para inscrever a peça de trabalho. Essa equação assume que a peça de trabalho tem forma simples e apresenta simetria em relação ao eixo rotativo.

$$P_{min} = \frac{\pi}{4} M^2 \quad (6)$$

Além disso, escolher corretamente as configurações do sistema da TC é essencial. A intensidade dos raios X deve ser alta o suficiente para que eles penetrem na peça de trabalho em todos os ângulos de rotação. Entretanto, nenhum ângulo de rotação em nenhuma parte da imagem final deve ser saturado. Peças com geometria simples oferecem uma dificuldade menor aos operadores em satisfazer tais condições. Contudo, peças com geometria complexa e variada podem-se apresentar como um desafio na hora de definir

4. Tradução nossa.

esses parâmetros da TC. Para obter uma exposição de projeção uniforme, os operadores devem ser capazes de encontrar as configurações corretas do sistema da TC, tendo como base a sua própria experiência, qual a penetrabilidade dos raios X e outras noções técnicas referentes a todo o sistema TC (CANTATORE; MÜLLER, 2011; CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos, a tomografia computadorizada de raios X entrou com sucesso no campo da metrologia industrial. Conforme exposto exhaustivamente neste presente trabalho, essa técnica de medição apresenta diversas vantagens em relação os sistemas convencionais de medição, especialmente em comparação com as máquinas de medição por coordenadas (MMC). Algumas das principais vantagens a serem destacadas são:

- Capacidade de verificar peças enquanto estão montadas;
- Avaliação de peças com geometrias complexas e que possuem superfícies inacessíveis às MMCs;
- Controle simultâneo de qualidade dimensional e controle de qualidade de material;
- Capacidade de criar um modelo virtual da peça medida e comparar as medidas dimensionais e geométricas com o modelo virtual.

Entretanto, as medições de TC apresentam diversos desafios em relação aos resultados de suas medições. Como apresentado neste capítulo, ao realizar uma medição com qualquer sistema metrológico é necessário identificar e avaliar uma série de fatores que podem afetar o resultado final da medição. As fontes de incerteza da TC são muitas e apresentam uma elevada complexidade de análise por parte dos operadores. Além disso, como foi exposto em (VILLARRAGA et al., 2014), mesmo que essas incertezas de medições maiores da TC sejam algo compreensível, devido à complexidade dos fenômenos da TC e o número de parâmetros de influência manipulados durante o processo de varredura e análise, é possível inferir que a aplicação metrológica da tecnologia TC em um nível industrial ainda requer mais estudos. A TC carece de testes padronizados universalmente aceitos, além da dificuldade em suas medições possuírem rastreabilidade. Vale pontuar que é rastreabilidade metrológica é:

“Propriedade dum resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através duma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição.” - (INMETRO, 2012, p. 28).

Outrossim, é amplamente discutido em (CARMIGNATO; DEWULF; LEACH, 2018; GOMEZ, 2016) que a calibração e rastreabilidade das medições da TC não são tarefas triviais. Procedimentos e/ou padrões para o desenvolvimento de uma incerteza de medição específica em conformidade com o GUM não existem atualmente. No momento presente, o único documento de referência para especificação e verificação de sistemas TC usados para a metrologia dimensional é a VDI/VDE 2630, publicada por autoridades alemãs para aplicação da DIN EM ISO 10360 para máquinas de medição por coordenadas com sensores TC. O autor deste presente estudo informa que as normas VDI/VDE 2630 não puderam ser consultadas em vista do alto valor cobrado para poder acessá-las.

O autor deste presente trabalho propõe os seguintes projetos de pesquisas para serem realizados no futuro:

- Avaliação e/ou proposta de procedimentos que expressem a incerteza de medição da TC, visando complementar a norma alemã VDI/VDE 2630;
- Análise da literatura avaliando os padrões internacionais atualmente em discussão e publicados;
- Estudos de caso que envolvam a aplicação da TC na avaliação de recursos dimensionais e/ou geométricos;
- Como a indústria 4.0 e suas tecnologias, como a TC, vão impactar o ensino técnico mecânico?
- Como preparar os docentes e discentes das instituições de ensino técnico para as evoluções tecnológicas da indústria?

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 6158: Sistema de tolerâncias e ajustes**. 1995. 79 f. 1995.

_____. **NBR 6409: Tolerâncias geométricas - Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho**. 1997. 1–19 f. 1997.

AGOSTINHO, Oswaldo Luiz. **Sistemas de Manufatura**. São Carlos: EESC/USP, 2018.

AGOSTINHO, Oswaldo Luiz; RODRIGUES, Antonio Carlos dos Santos; LIRANI, João. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2020.

AMARO JÚNIOR, Edson; YAMASHITA, Helio. Aspectos básicos de tomografia computadorizada e ressonância magnética. **Revista Brasileira de Psiquiatria**, v. 23, n. suppl 1, p. 2–3, maio 2001.

ANDERSON, T.L. **Fracture Mechanics: fundamentals and applications**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press LLC, 1995.

ANDRADE, Marcos Ely Almeida. **Avaliação da qualidade de imagem e do índice volumétrico de Kerma Ar em tomografia computadorizada (CVOL) em Recife**. 2008. 132 f. f. Dissertação (Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

ARENCEBIA, Rosenda Valdés et al. **INCERTEZA DE MEDIÇÃO: Metodologia de Cálculo, Conceitos e Aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2019.

AZEVEDO JÚNIOR, Antonio Pires. **Avaliação não-destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através da técnica de ultra-som: conceituação teórica e resultados experimentais**. 2002. Dissertação (Mestrado de Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

BARBER, D. C. Electrical impedance tomography. **Biomedical Imaging**, p. 15-1-15–13, 2003. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0266-5611/18/6/201>>. Acesso em: 10 out. 2020.

BARROS, Tiago Rodrigues De. **Simulação Numérica de um Sensor de Tomografia Capacitiva para Análise de Escoamento Bifásico Ar-Água**. 2011. Universidade Estadual de Campinas, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/263383>>.

BARTSCHER, M. et al. Enhancement and Proof of Accuracy of Industrial Computed Tomography (CT) Measurements. **CIRP Annals**, v. 56, n. 1, p. 495–498, 2007.

CAMARGO, Roderlei; ABACKERLI, Alvaro Jose. Importância da Tolerância: Uma Contribuição da Engenharia Dimensional no Processo de Desenvolvimento do Produto. **Revista Ciência e Tecnologia**, v. 11, n. 19, 2010.

CANTATORE, Angela; MÜLLER, Pavel. Introduction to computed tomography. **Kgs.Lyngby: DTU Mechanical Engineering**, p. 76, 2011.

CAPELETI, Felipe Favaro. **Dosimetria em Tomografia Computadorizada e Avaliação do Perfil de Dose Empregando Dosímetro Fricke Gel e a Técnica de Imageamento por Ressonância Magnética**. 2014. Dissertação (Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – Universidade

Federal de São Paulo, São Paulo, 2014.

CARDIN, VIVIANE DE SALLES. **Ensaio Não Destrutivo Aplicado À Madeira Serrada E Estruturas: Técnicas Potenciais Para Uso No Brasil**. 2011. Dissertação (Pós Graduação em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

CARMIGNATO, Simone; DEWULF, Wim; LEACH, Richard. **Industrial X-Ray Computed Tomography**. Cham: Springer International Publishing, 2018.

CARVALHO, Antonio Carlos Pires. História da Tomografia Computorizada. **História da Radiol**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2007. v. 29. p. 61–66. Disponível em: <https://www.kodakleiria.com/wp-content/uploads/2014/03/cbct_historia_tomografia_computadorizada.pdf>.

CARVALHO, Gilberto. **Determinação de defeitos em profundidade (estereoradiografia)**. 2001. IPEN–CNEN–SP, 2001. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/GilbertoCarvalho_M.pdf>.

CONCEIÇÃO, Amábele Uana Simões da. **Utilização do Protocolo TRS 398 da IAEA para Controle de Qualidade de feixe de raios X em Acelerador Linear de 6 MeV**. 2017. TCC (Bacharel em Física) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2017.

DALVI-GARCIA, Felipe; DE SOUZA, Marcio Nogueira; PINO, Alexandre Visintainer. Algoritmo de reconstrução de imagens para um sistema de Tomografia por Impedância Elétrica (TIE) baseado em configuração multiterminais. **Revista Brasileira de Engenharia Biomedica**, v. 29, n. 2, p. 133–143, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-31512013000200003&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 10 out. 2020.

DAVID. **Estudo Radiográfico**. Disponível em: <<http://estudoradiografico.blogspot.com/2016/10/diferenca-entre-producao-de-radiacao.html>>. Acesso em: 20 out. 2020.

DE CHIFFRE, L. et al. Industrial applications of computed tomography. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 63, n. 2, p. 655–677, 2014a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.011>>.

_____. Industrial applications of computed tomography. **CIRP Annals**, v. 63, n. 2, p. 655–677, 2014b.

DE NOVAIS, Paulo Rogerio Santos. Avaliação das Principais Descontinuidades Encontradas nas Juntas Soldadas, Causas e Possíveis Soluções. **Contribuição Técnica**, 2009.

DE OLIVEIRA, Bruno Ferraz. **Fundição**. Belém-PA: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, 2013. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/7534963-Fundicao-bruno-ferraz-de-oliveira-instituto-federal-de-educacao-ciencia-e-tecnologia-para-campus-belem.html>>.

DE OLIVEIRA NETO, Raimundo Arrais; SOARES JÚNIOR, Luiz. **A importância da incerteza de medição na avaliação da conformidade de produtos mecânicos**. 2016. 2016.

DE SOUZA, Everton Duarte. **Estudo comparativo para fabricação de peças aeronáuticas: forjamento x usinagem**. 2015. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, 2015.

DU PLESSIS, Anton; LE ROUX, Stephan Gerhard; GUELPA, Anina. Comparison of medical and industrial X-ray computed tomography for non-destructive testing. **Case Studies in Nondestructive**

Testing and Evaluation, v. 6, p. 17–25, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.csndt.2016.07.001>>. Acesso em: 15 nov. 2020.

DU PLESSIS, Anton; ROSSOUW, Pierre. X-ray computed tomography of a titanium aerospace investment casting. **Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation**, v. 3, p. 21–26, abr. 2015.

FONSECA, Alexandra Carolina gomes. **Aplicação das Tomografias Computadorizadas de Raios-X e Gama na Análise de Solo Simulado**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências, Área de Concentração: Aplicações de Radioisótopos na Indústria e Medicina) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

FREITAS, Claudio Frões de. **Imaginologia: Série Abeno: Odontologia Essencial - Parte Clínica**. São Paulo: Artes Médicas LTDA, 2014. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=5xo7AgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>>.

GAPINSKI, Bartosz et al. Comparison of Different Method of Measurement Geometry Using CMM, Optical Scanner and Computed Tomography 3D. **Procedia Engineering**, v. 69, p. 255–262, 2014.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaios dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2012.

GOULD, Todd. Como funciona a geração de imagens por ressonância magnética. 2011. Disponível em: <<http://ebm.ufabc.edu.br/wp-content/uploads/2011/10/Como-funciona-a-geração-de-imagens-por-ressonância-magnética.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2020.

GUIMARÃES, Marcos Duarte. Tomografia Computadorizada e o Estudo das Radiações Ionizantes. **Interação Diagnóstica**, v. 92, n. June, p. 7, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/305903050_Tomografia_Computadorizada_e_o_Estudo_das_Radiacoes_Ionizantes>. Acesso em: 18 out. 2020.

HAGE, Maria Cristina Ferrarini Nunes Soares; IWASAKI, Masao. Imagem por ressonância magnética: Princípios básicos. **Ciencia Rural**, v. 39, n. 4, p. 1287–1295, 2009.

HARAGUCHI, Marcio; KIM, Hae Yong; MACHADO, Ronaldo. **Tomografia industrial computadorizada**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281843616_TOMOGRAFIA_INDUSTRIAL_COMPUTADORIZADA>. Acesso em: 13 set. 2020.

HSIEH, Jiang. **Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances**. 2. ed. Bellingham: SPIE Press, 2003.

INMETRO. Conceito de Metrologia. **Centro Integrado de Capacitação em Metrologia e Avaliação da Conformidade (CICMAC)**, p. 2, 2000. Disponível em: <http://www.inmetro.rs.gov.br/cicmac/material_didatico/polig_conceito_metrologia.pdf>.

_____. **GUM - Guia para a expressão de incerteza de medição**. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 2012a.

_____. **Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)**. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) É, 2012b.

KESHEH, Foad Mobini. **Desenvolvimento de Sistema Eletrônico Para Tomografia de Indução**

Magnética. 2011. 10–14 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Santa Catarina, 2011.

KRAEMER, Alexandra; LANZA, Gisela. Assessment of the Measurement Procedure for Dimensional Metrology with X-ray Computed Tomography. **Procedia CIRP**, v. 43, p. 362–367, 2016.

KRUTH, J. P. et al. Computed tomography for dimensional metrology. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 2, p. 821–842, 2011.

LIMA, Cícero Ribeiro de. **Estudo da Obtenção de Imagens de Tomografia de Impedância Elétrica do Pulmão pelo Método de Otimização Topológica**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, 2006.

LING, Tseng Chien. **Tomografia computadorizada de raios-X aplicada à análise da qualidade ambiental de solo no entorno da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira - SP**. 2013. 487–492 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

LIU, Zheng et al. **Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection**. London UK: Springer, 2015. (Advances in Computer Vision and Pattern Recognition).

MARCOS, Giuliana. **História dos Raios X**. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/1802134/>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

MAZUREK, Mariusz et al. Dedicated algorithm based on discrete cosine transform for the analysis of industrial processes using ultrasound tomography. p. 82–85, 2020. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3410530.3414381>>. Acesso em: 12 out. 2020.

MAZZOLA, Alessandro A. Ressonância magnética: princípios de formação da imagem e aplicações em imagem funcional. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 3, n. 1, p. 117–29, 2009. Disponível em: <<https://www.rbfm.org.br/rbfm/article/view/51>>. Acesso em: 14 out. 2020.

MENIN, Olavo H.; ARTIOLI, Vanessa Rolnik. Tomografia de Impedância Elétrica: uma nova técnica de imageamento em medicina. **Revista Iluminart**, v. 5, p. 12–25, 2010. Disponível em: <<http://revistailuminart.ti.srt.ifsp.edu.br/index.php/iluminart/article/view/95>>. Acesso em: 10 out. 2020.

MENIN, Olavo Henrique. **Método dos Elementos de Contorno para Tomografia de Impedância Elétrica**. 2009. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada à Medicina e Biologia) – Universidade de São Paulo, 2009.

MINARI, Ruy de Macedo. **Ruy de Macedo Minari Ruy de Macedo Minari**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, 2009.

MORAIS, José Mauro de. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2013. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=18251>. Acesso em: 10 out. 2020.

MOREIRA, Henrique Alencar. **Avaliação do Desempenho de Técnicas Não Destrutivas: Um estudo de Caso na Inspeção de Componentes para Molas Pneumáticas**. 2014. Monografia (Bacharel em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, 2014.

MORETTIN, Pedro A.; BUSSAB, Wilton De O. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

MOURA, Hector Lise De. **Reconstrução de imagens em tomografia de capacitância elétrica por representações esparsas**. 2018. 54 f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

MÜLLER, P. et al. A study on evaluation strategies in dimensional X-ray computed tomography by estimation of measurement uncertainties. **International Journal of Metrology and Quality Engineering**, v. 3, n. 2, p. 107–115, 14 nov. 2012.

MÜLLER, Pavel et al. Computed Tomography as a Tool for Tolerance Verification of Industrial Parts. **Procedia CIRP**, v. 10, p. 125–132, 2013.

MURTA, Rafaella Hermont Fonseca. **Reconhecimento de Padrões de Defeitos de Soldagem Utilizando Classificadores Treinados com Sinais Ultrassônicos Simulados Numericamente**. 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, 2018.

NAEIMI, Meysam et al. Reconstruction of the rolling contact fatigue cracks in rails using X-ray computed tomography. **NDT & E International**, v. 92, n. September, p. 199–212, dez. 2017.

NARDELLI, Vistor Camargo. **Melhoria do Desempenho Metrológico da Tomografia Computadorizada por Raios X por Meio da Seleção Sistemática dos Parâmetros de Configuração**. 2012. 145 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/100861>>. Acesso em: 10 set. 2020.

NETO, João Cirilo da Silva. **Metrologia e Controle Dimensional**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2012.

NOBELPRIZE.ORG. **Godfrey N. Hounsfield - Facts - NobelPrize.org**. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1979/hounsfield/facts/>>. Acesso em: 8 set. 2020.

ONTIVEROS, S. et al. Dimensional measurement of micro-moulded parts by computed tomography. **Measurement Science and Technology**, v. 23, n. 12, 1 dez. 2012.

PEREIRA, Aldo Santos; BARRA, Sérgio Rodrigues. **Descontinuidades em Soldagem**. 1999. Trabalho de Pesquisa Para Pós Graduação – Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

PERLIN, Lourenço Panosso. **Tomografia ultrassônica em concreto: desenvolvimento de ferramenta computacional**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

PINTO, Rafaele Inês Pires. **Segmentação Automática de Lesões de Esclerose Múltipla em Imagens de Ressonância Magnética**. 2016. Dissertação – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.

RAMÍREZ, Fernando Campo. **Deteccção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica**. 2015. 273 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

RANGHETTI, Rafael. **Caracterização de escoamentos bifásicos através de tomografia de capacitância elétrica**. 2016. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/171664>>. Acesso em: 4 out. 2020.

REDDY, M. V. et al. Industrial computed tomography system for aerospace applications: development and characterisation. **Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, v. 53, n. 6, p. 307–311, jun. 2011.

REIS NETO, José Manoel dos et al. A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 498–508, 2011. Disponível em: <<http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7846/0>>. Acesso em: 18 out. 2020.

RESENDE, Marino de Oliveira. **Princípios de Processos de Produção Volume I**. Disponível em: <<http://repositorio.eesc.usp.br/handle/RIEESC/6072>>.

RIBAS, Guilherme Carvalho; RIBAS, Eduardo Carvalho; RODRIGUES JR., Aldo Junqueira. O cérebro, a visão tridimensional, e as técnicas de obtenção de imagens estereoscópicas. **O cérebro, a visão tridimensional, e as técnicas de obtenção de imagens estereoscópicas**, v. 85, n. 3, p. 78–90, 2006.

ROMBERG, Hugo daCosta. **ESPECTROMETRIA DE RAIOS X DE UM SISTEMA DE MICROTOMOGRAFIA POR TRANSMISSÃO**. 2019. Projeto de Graduação (Curso de Engenharia Nuclear da Escola Politécnica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SANTANA, Adevanil dos Santos. **Identificação dos Principais Defeitos de Fundição Através da Aplicação de Ferramentas da Qualidade: Estudo de Caso em uma Fundição de Peças Metálicas**. 2016. TCC (Bacharel em Engenharia de Produção) – Centro Universitário Católica de Vitória, 2016. Disponível em: <<https://www.infodesign.org.br/infodesign/article/view/355%0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/731%0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/269%0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/106>>.

SANTOS, Paulo roberto da Fonseca et al. **1ª Edição Bras. da 8ª Edição do BIPM**. 1. ed. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.

SENAI-BA CIMATEC. **Inspetor De Soldagem**. Rio de Janeiro: SENAI-BA/SENAI-MG/SENAI-RJ, 2012.

SEPTIMIO, Rudimylla da Silva. **Estudo Do Forjamento Multidirecional de Precisão**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 2015.

SHAH, Paras; RACASAN, Radu; BILLS, Paul. Comparison of different additive manufacturing methods using computed tomography. **Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation**, v. 6, p. 69–78, nov. 2016.

SILVA, Sinara Martins Tarta da. **Tomografia Computadorizada: Uma Proposta para a Aplicação da Matemática no Ensino Médio**. 2018. 75 f. Dissertação (Mestrado em Matemática em Rede Nacional) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

SOARES, Flávio Augusto Penna. **Produção De Raios X Em Ampolas Radiográficas: Estudo Do Tomógrafo Computadorizado Do Hospital Regional De São José / Sc Estudo Do Tomógrafo Computadorizado Do Hospital Regional De São José / Sc**. 2006. Tese (Doutorado em Física Experimental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SOUSA, Lucas Daniel A. De; VERÍSSIMO, Pedro Henrique A.; MACEDO, Valquíria Gusmão. Reconstrução de Imagens Médicas de Tomografia Computadorizada Utilizando a Transformada de Radon. **Congresso de matemática Aplicada e Computacional**, p. 226–228, 2012a. Disponível em: <<http://arquivo.sbmec.org.br/cmecs/cmec-ne/2012/trabalhos/PDF/216.pdf>>.

_____. Reconstrução de Imagens Médicas de Tomografia Computadorizada Utilizando a Transformada de Radon. **Congresso de matemática Aplicada e Computacional**, p. 226–228, 2012b. Disponível em: <<http://arquivo.sbmec.org.br/cmecs/cmec-ne/2012/trabalhos/PDF/216.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2020.

STAMOPOULOS, AG et al. Evaluation of porosity effects on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced plastic unidirectional laminates by X-ray computed tomography and mechanical testing. **Journal of Composite Materials**, v. 50, n. 15, p. 2087–2098, jun. 2016.

SUN, Wenjuan; BROWN, Stephen; LEACH, Richard. An overview of industrial X-ray computed tomography Sun W, Brown S B and Leach R K JANUARY 2012. **National Physical Laboratory**, n. January, 2012.

SUYAMA, Fernando Moreira. **Detecção De Defeitos Em Juntas Soldadas De Tubulações De Petróleo Em Radiografias Computadorizadas Parede Dupla Vista Dupla (Pdv) Por Redes Neurais**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

TELECURSO. **Aula 29 - Tolerância geométrica**. Disponível em: <<http://fuestibular.com.br/downloads/apostilas/Telecurso-2000/metal-mecanica/leitura-e-interpretacao-de-desenho-tecnico/apostila-3/29-tolerancia-geometrica.pdf?x66929>>. Acesso em: 13 jul. 2021.

VAZ, Carlos Manoel Pedro et al. Tomografia computadorizada de raios X ou gama. **Conceitos e Apl. da instrumentação para o avanço da Agric**. Brasília, DF: [s.n.], 2014. p. 19–4.

VILLARRAGA-GÓMEZ, Herminso et al. The role of computed tomography in additive manufacturing. **2018 ASPE and euspen Summer Topical Meeting: Advancing Precision in Additive Manufacturing**, p. 201–210, 2018.

VILLARRAGA-GÓMEZ, Herminso; LEE, ChaBum; SMITH, Stuart T. Dimensional metrology with X-ray CT: A comparison with CMM measurements on internal features and compliant structures. **Precision Engineering**, v. 51, p. 291–307, jan. 2018.

VILLARRAGA, Herminso et al. Dimensional metrology of internal features with X-ray computed tomography. **Proceedings - ASPE 2014 Annual Meeting**, n. September 2016, p. 684–689, 2014.

WANG, Mi. **Industrial Tomography: Systems and Applications**. 1. ed. Cambridge UK: Elsevier, 2015.

WOLFF, Julia Grasiela Busarello. **Análise computacional da distribuição de campos e correntes e reconstrução de imagem em um sistema de tomografia de indução magnética**. 2011. 10–14 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade do Estado de Santa Catarina, 2011.

ZANINI, Filippo; CARMIGNATO, Simone. X-Ray Computed Tomography for Dimensional Metrology. **Am. Soc. Nondestruct. Test**. [S.l: s.n.], 2019. p. 537–583.

ZOLIN, Ivan. **Ensaio Mecânicos e Análises de Falhas**. 2011. 102 f. Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Santa Maria., 2011.

SOBRE OS AUTORES



RUBENS GABRIEL REZENDE NUNES - Rubens Gabriel Rezende Nunes é estudante no 3º ano do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) no curso Técnico em Mecânica Industrial. Já no primeiro ano nessa instituição de ensino, em 2019, ele executou uma pesquisa que visava analisar se a área profissional de Técnico em Mecânica podia ser uma opção profissional ou era apenas um meio de se chegar ao ensino superior. Esse trabalho foi apresentado na 29ª Mostra Específica de Trabalhos e Aplicações (META) do CEFET-MG, tendo sido premiado em primeiro lugar na modalidade Ciência e Sociedade. Em seu segundo ano de aprendizado, outro trabalho

de META se iniciou e evoluiu para um projeto de Iniciação Científica (IC) que foi desenvolvida durante os anos de 2020 até 2021, com duração de um ano. Além disso, também foram realizadas diversas outras atividades extracurriculares durante sua jornada acadêmica no CEFET-MG, como a participação de um minicurso de Metodologia Científica e outras oficinas de ensino. Atualmente, enquanto finaliza o curso no CEFET-MG ele continua estudando e desenvolvendo habilidades e conhecimentos multidisciplinares, visando se preparar para o ingresso na Universidade e, futuramente, no mercado de trabalho.



THIAGO GOMES CARDOSO - graduado e mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) com ênfase em mecânica dos sólidos, vibração e engenharia biomecânica. Seu trabalho de mestrado foi voltado ao desenvolvimento de um novo sistema de treinamento resistido de alto desempenho para cadeirantes e pessoas com mobilidade reduzida utilizando um sistema inovador de baixa inércia do tipo came-mola-seguidor. Coursou também, como aluno de intercâmbio, engenharia mecânica na Embry-Riddle Aeronautical University campus Daytona Beach, Flórida. Durante esse tempo atuou em

áreas como acústica para detecção de falhas em componentes, simulação por elementos finitos de materiais compósitos, análise dimensional e otimização não linear em empresas como DuPont Engineering Technology (DuET) nos Estados Unidos e APROM no Brasil. Atualmente é professor do departamento de Eletromecânica do CEFET-MG desempenhando pesquisas e atividades nas áreas de elementos de máquinas, metrologia, estática e resistência dos materiais. Participa, também, do grupo de pesquisa CINTESP.Br (Centro Brasileiro de Referência em Inovações Tecnológicas para Esportes Paralímpicos) com foco no desenvolvimento de tecnologias inovadoras para o Esporte Paralímpico e pessoas com deficiência visando melhoria de performance e qualidade de vida. Também no CINTESP.Br desenvolveu seu trabalho de mestrado.



THIAGO FERREIRA QUERINO - graduado em Engenharia de Produção pela Universidade Salgado de Oliveira (UNIVERSO BH), especialista em Projetos de Máquinas PUC MG – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração Energia e Sustentabilidade pela UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, trabalhando com Ensaio Térmico Não Destrutivo e Gestão de Ativos. Seu trabalho de mestrado foi voltado ao desenvolvimento de um modelo de predição de falhas de chaves seccionadoras em

subestações de energia elétrica com uso de Termografia Infravermelha Quantitativa, aplicando os princípios da ISO 55001. Atuou por 10 anos em funções técnica e de engenharia em empresas multinacionais dos segmentos de auto-peças, mineração e siderurgia, trabalhando nos setores de Manutenção Industrial e Gestão da Manufatura. Atualmente é professor do departamento de Eletromecânica do CEFET-MG desempenhando pesquisas e atividades nas áreas de ensaios destrutivos, ensaios não destrutivo, metrologia e resistência dos materiais. Participa, também, do grupo de pesquisa LEPU (Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem) da UFU - Universidade Federal de Uberlândia, onde cursa Doutorado, com foco em Manufatura Aditiva por Eletrodeposição e Manufatura Híbrida.



ESTUDO DOS PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA NA **INSPEÇÃO DIMENSIONAL E** **INTEGRIDADE ESTRUTURAL**

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

**Atena**
Editora

Ano 2022



ESTUDO DOS PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA NA **INSPEÇÃO DIMENSIONAL E** **INTEGRIDADE ESTRUTURAL**

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

@atenaeditora 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

**Atena**
Editora

Ano 2022