

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Vitor Camargo Nardelli

**MELHORIA DO DESEMPENHO METROLÓGICO DA
TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA POR RAIOS X
POR MEIO DA SELEÇÃO SISTEMÁTICA DOS
PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO**

Florianópolis

2012

Vitor Camargo Nardelli

**MELHORIA DO DESEMPENHO METROLÓGICO DA
TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA POR RAIOS X
POR MEIO DA SELEÇÃO SISTEMÁTICA DOS
PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO**

Tese submetida ao Programa
de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do
Grau de Doutor em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr.-Ing.
Carlos Alberto Schneider

Co-orientador: Prof. Dr. Eng.
Gustavo Daniel Donatelli

Florianópolis

2012

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

Nardelli, Vitor Camargo

Melhoria do desempenho metrológico da tomografia
computadorizada por raios X por meio da seleção sistemática dos
parâmetros de configuração [tese] / Vitor Camargo Nardelli ; orientador,
Carlos Alberto Schneider ; coorientador, Gustavo Daniel Donatelli. -
Florianópolis, SC, 2012.

145 p. ; 21cm

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica..

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Metrologia dimensional. 3. Tomografia
computadorizada industrial por raios X. 4. Avaliação de sistemas de
medição. I. Schneider, Carlos Alberto. II. Donatelli, Gustavo Daniel. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. IV. Título.

Vitor Camargo Nardelli

**MELHORIA DO DESEMPENHO METROLÓGICO DA
TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA POR RAIOS X
POR MEIO DA SELEÇÃO SISTEMÁTICA DOS
PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de
“Doutor em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma
final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica.

Florianópolis, 04 de julho de 2012.

Prof. Júlio César Passos,
Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Carlos Alberto
Schneider, Dr.-Ing.
Orientador/ Presidente

Banca Examinadora:

Prof. João Bosco de
Aquino Silva, Dr.

Prof. Armando Albertazzi
Gonçalves Júnior, Dr. Eng.

Prof. Joaquim Teixeira de
Assis, Dr.

Prof. Rolf Bertrand
Schroeter, Dr. Eng.

Prof. André Roberto de
Souza, Dr. Eng.

Dedico este trabalho
à minha querida esposa
Patrícia.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo suporte financeiro e às agências de fomento CAPES e DFG, por viabilizarem meu intercâmbio através do projeto CTmetro no contexto do programa BRAGECRIM.

À Universidade Federal de Santa Catarina, através do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e do LABMETRO, pela oportunidade e estrutura oferecida.

Ao laboratório de máquinas-ferramenta (WZL) da RWTH Aachen na Alemanha, em especial aos colegas Alberto Pavim, Christoph Mersmann e Christian Niggemann.

À Fundação CERTI, em especial aos colegas Francisco Arenhart e Mauricio Campos Porath, pelas importantes discussões, e ao Mateus Dieckemann por viabilizar oportunidades de trabalho junto à indústria.

Aos colegas de projeto, Bruno, Misael, Fabricio, Rafael e Bernardo pelo suporte nos experimentos.

Aos meus orientadores, Carlos Alberto Schneider e Gustavo Donatelli, pelos ensinamentos e pelo comprometimento.

Aos meus pais, por me encorajarem a encarar esta empreitada.

E por fim, um agradecimento especial à minha esposa Patrícia, pela paciência, carinho e compreensão durante este período.

RESUMO

A aplicação industrial da tomografia computadorizada (CT) vem crescendo rapidamente na caracterização da geometria de peças. Durante o processo de medição, o usuário deve tomar decisões com relação a parâmetros que influenciam diretamente a qualidade da imagem e, conseqüentemente, o resultado da medição. Porém, as complexidades inerentes ao processo de medição por CT fazem com que boa parte dos usuários tenham dificuldades para relacionar os valores dos parâmetros de configuração com a qualidade dos dados gerados pela medição. Isso leva normalmente a um processo iterativo de escolha, que afeta negativamente o tempo de *setup*. Diante deste contexto, o propósito de pesquisa foi demonstrar que é possível sistematizar o processo de seleção dos parâmetros de configuração, de forma a obter resultados adequados em termos da incerteza e o tempo de medição, sem necessidade de iteração. Dessa forma, usuários com menos conhecimento, tempo e experiência também poderão ser capazes de obter resultados robustos para medições com CT. Como a definição de um critério de qualidade é um aspecto fundamental para a comparabilidade dos resultados, uma importante contribuição deste trabalho é a avaliação da qualidade dos dados gerados por CT através da análise da dispersão dos pontos extraídos de uma determinada característica de referência de uma peça ou padrão. A utilização deste indicador de dispersão em uma abordagem experimental sistêmica resultou na estruturação de um conjunto de regras e recomendações para apoiar o processo de seleção dos parâmetros de configuração. O método para seleção sistemática dos parâmetros de configuração, apresentado neste trabalho, irá contribuir na orientação de usuários de CT, auxiliar fabricantes na otimização de *hardwares* e *softwares* de seus sistemas e auxiliar os metrologistas na identificação e redução das causas de erro das medições.

Palavras-chave: Metrologia dimensional, tomografia computadorizada industrial por raios X, avaliação de sistemas de medição.

ABSTRACT

The application of industrial computed tomography (CT) for the geometrical characterization of work pieces within the scope of quality assurance processes is growing rapidly. When planning the execution of a specific measurement task, the user has to make decisions about the values of parameters that directly influence the image quality and therefore the measurement result. Due to the large number of parameters, the planning and setup processes can be very time consuming. The complex relationships between these parameters and the measurement result makes the planning process strongly dependent on the experience of the user, leading frequently to a trial-and-error setup approach. Based on this context, the purpose of this research is to demonstrate that the process for defining the setup parameters can be systemized in order to obtain better results in terms of measurement uncertainty and measurement time, without the need of an iterative approach. Therefore, users with less knowledge, time and experience would also be able to get robust measurements from CT systems. Since the definition of a quality index is an essential requirement for the comparability of the results, an important contribution of this thesis is to assess the quality of the CT extracted data by the analysis of extracted integral features. A systematic experimental approach combined the proposed quality index resulted in the structuring a set of rules and recommendations to assist users on the selection of the setup parameters. The information provided by the systematic approach for selection of setup parameters is complementary to a framework project aiming in developing support systems to help CT users in selecting adequate setup parameters; assisting manufacturers on the optimization of their CT systems; and assisting researchers on quantifying sources of measurement errors.

Keywords: Dimensional metrology, X-ray computed tomography, Measurement system evaluation.

LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
A/D	Análogo para Digital (<i>Analog to Digital</i>)
AI	<i>Artificial Intelligence</i> (Inteligência Artificial)
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (Análise da Variância)
ART	<i>Algebraic Reconstruction Technique</i> (Técnica de reconstrução algébrica)
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> (Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
BAM	<i>Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung</i> (Instituto federal para pesquisa e teste de materiais na Alemanha)
CAA	<i>Computer Aided Accuracy</i> (Exatidão corrigida por Computador)
CAD	<i>Computer-aided Design</i> (Projeto Auxiliado por Computador)
CDF	<i>Contrast Discrimination Function</i> (Função para discriminação do contraste)
CMM	<i>Coordinate Measuring Machines</i> (Máquina de Medir por Coordenadas)
CT	<i>Computed tomography</i> (Tomografia computadorizada)
DAS	<i>Data Acquisition System</i> (Sistema de Aquisição de Sinais)
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> (Transformada discreta de Fourier)
DOE	<i>Design of Experiments</i> (Planejamento de Experimentos)
EMPA	<i>Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt</i> (Laboratório Federal para Pesquisa e Testes em Materiais na Suíça)
ERF	<i>Edge Response Function</i> (Função de Resposta da Borda)
EZRT	<i>Entwicklungszentrum Röntgentechnik</i> (Centro de desenvolvimento de tecnologia por raios X)

FBP	<i>Filtered Back-projection</i> (Retro Projeção Filtrada)
FDK	Feldkamp, Davis e Kress – autores do artigo sobre o algoritmo de reconstrução de imagens tomográficas com feixe cônico
FH-OOE	<i>Fachhochschul Oberösterreich</i> (Universidade de Ciências Aplicadas da Alta Áustria)
GPS	<i>Geometrical Product Specifications</i> (Especificação Geométrica de Produto)
GUM	<i>Guide to the expression of Uncertainty in Measurements</i> (Guia para a expressão da Incerteza de Medição)
HW	<i>Hardware</i> (Componentes físicos de um sistema)
ISO	<i>International Standardization Organization</i> (Organização Internacional de Normatização)
KBS	<i>Knowledge Based System</i> (Sistema Baseado em Conhecimento)
LSCI	<i>Least Squares Circle</i> (Círculo Ajustado por Mínimos Quadrados)
LSF	<i>Line Spread Function</i> (Função de Dispersão da Linha)
MCCI	<i>Minimum Circumscribed Circle</i> (Mínimo Círculo Circunscrito)
MICI	<i>Maximum Inscribed Circle</i> (Máximo Círculo Inscrito)
MPE	<i>Maximum Permissible Error</i> (Erro Máximo Admissível)
MTF	<i>Modulation Transfer Function</i> (Função de Transferência de Modulação)
MWS	<i>Multi-wave standard</i> (Padrão de múltipla ondas)
NDT	<i>Nondestructive Testing</i> (Ensaio Não-Destrutivo)
OPR	Ondulação por Revolução
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
POM	Polióxido de Metileno
PTB	<i>Physikalisch Technische Bundesanstalt</i> (Instituto nacional de metrologia da Alemanha)
DQE	<i>Detector Quantum Efficiency</i> (Eficiência Quântica de Detecção)
RM	Resultado da Medição
ROI	<i>Region of Interest</i> (Região de Interesse)

RWTH	<i>Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule</i> (Universidade Técnica da Renânia do Norte-Vestfália)
SI	<i>Le Système International d'Unités</i> (Sistema Intencional de Unidades)
SM	Sistema de Medição
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> (Relação Sinal-Ruído)
STL	<i>Stereolithography</i> (Estereolitografia)
SW	<i>Software</i> (Programa de Computador)
TFT	<i>Thin Film Transistor</i> (Transistor de Película Fina)
VDE	<i>Verband der Elektrotechnik</i> (Associação Alemã de Engenharia Elétrica, Engenharia Eletrônica e Tecnologia da Informação)
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> (Associação dos Engenheiros Alemães)
WZL	<i>Werkzeugmaschinenlabor</i> (Laboratório de Máquinas-Ferramenta da RWTH em Aachen na Alemanha)

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Parâmetro de configuração de CT: Tempo de integração [ms]
B_n	Parâmetro de configuração de CT: <i>Binning</i>
Br	Tamanho do ponto focal [μm]
C_p	Índice de qualidade: Contraste da projeção
C_{V_x}	Índice de qualidade: Contraste da matriz de voxel
D_{SD}	Distância entre fonte de radiação e detector
D_{SO}	Distância entre fonte de radiação e objeto
E	Parâmetro de configuração de CT: Capacitância do ganho do detector [pF] (usado também como Energia do fóton [keV] - §2.1)
F	Transformada de Fourier
G_v	Valor do nível de cinza
I	Parâmetro de configuração de CT: Corrente do tubo de raios X [μA]
$I(x, E)$	Intensidade do feixe de raios X
$I_0(E)$	Intensidade do feixe de raios X que incide no objeto
$I_F(E)$	Intensidade do feixe de raios X que incide no detector
L	Comprimento medido [mm]
M	Símbolo da composição química do material do objeto
Or	Parâmetro de configuração de CT: Orientação do objeto na mesa rotativa
P	Parâmetro de configuração de CT: Número de projeções
$P_\theta(t)$	Função da projeção de um objeto $f(x, y)$
\mathcal{R}	Transformada de Radon
R	Amplitude entre amostras de um subgrupo
SNR_p	Índice de qualidade: Relação sinal-ruído das projeções
SNR_{V_x}	Índice de qualidade: Relação sinal-ruído da matriz de voxel
U	Parâmetro de configuração de CT: Tensão do tubo [kV]
V	Parâmetro de configuração de CT: Espessura do pré-filtro de cobre [mm]

V_x	Tamanho do voxel [μm]
V_g	Ampliação da imagem 3D
X	Parâmetro de configuração de CT: Posição da mesa rotativa [mm] – o mesmo que D_{SO}
Z	Número atômico
c	Velocidade da luz no vácuo [m/s]
$f(x,y)$	Função que define os limites do objeto
h	Constante de Planck
m_i	Distância de cada um dos pontos medidos em relação à origem do LSCI para obter ρ_{meas}
p	Distância entre cada elemento de decção
r_i	Distância de cada um dos pontos calibrados em relação à origem do LSCI para obter ρ_{ref}
s	Índice de qualidade: índice de dispersão dos pontos extraídos
t	Tempo total de aquisição das projeções [min] (usado também na equação da linha que representa cada raio que atravessa o objeto - §2.5)
x	Espessura de material atravessada pelo raio X [mm]
x,y,z	Sistema de coordenadas do objeto
x_d,y_d,z_d	Sistema de coordenadas do detector
x_s,y_s,z_s	Sistema de coordenadas da fonte de radiação
α	Nível de significância
γ	Fóton incidente
γ'	Fóton secundário
δ	Função delta de Dirac
θ	Ângulo de rotação da mesa rotativa
λ	Comprimento de onda do fóton [nm]
μ	Coefficiente de atenuação [cm^2/g]
μ_b	Média dos valores do nível de cinza do fundo
$\mu_{peça}$	Média dos valores do nível de cinza da peça
μ_{meio}	Média dos valores do nível de cinza do meio
ν	Frequência da onda do fóton [Hz]
ρ_{meas}	Raio do LSCI obtido a partir dos pontos medidos
ρ_{ref}	Raio do LSCI obtido a partir da calibração
σ_b	Desvio padrão dos valores do nível de cinza do fundo
$\sigma_{peça}$	Desvio padrão dos valores do nível de cinza da peça
σ_{meio}	Desvio padrão dos valores do nível de cinza da peça
ϑ	Ângulo da dispersão inelástica Compton

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	PRINCÍPIOS DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA	27
2.1	FONTE DE RADIAÇÃO	27
2.2	INTERAÇÃO DOS RAIOS X COM A MATÉRIA	31
2.3	DETECTOR	34
2.4	SISTEMA CINEMÁTICO	37
2.5	RECONSTRUÇÃO DA IMAGEM	39
2.6	EXTRAÇÃO DA SUPERFÍCIE	42
2.7	SÍNTESE DO CAPÍTULO	43
3	TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA PARA METROLOGIA DIMENSIONAL	45
3.1	APLICAÇÕES	45
3.2	MODELO QUALITATIVO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO POR CT	49
3.3	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS DADOS OBTIDOS POR CT	52
3.4	RASTREABILIDADE	59
3.5	SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO	63
3.6	DISCUSSÃO DO CAPÍTULO	66
4	OBJETIVOS	69
5	MÉTODOS E MATERIAIS DE PESQUISA	71
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS FATORES CONSIDERADOS NA PESQUISA	72
5.2	UM NOVO ÍNDICE DE QUALIDADE PARA CT	74
5.3	PEÇAS PARA TESTE	79
5.4	PLANEJAMENTO E ANÁLISE EXPERIMENTAL	84
5.5	SISTEMATIZAÇÃO DO CONHECIMENTO	86

5.6	SÍNTESE	87
6	SISTEMÁTICA PARA MELHORAR A SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO	89
6.1	ANÁLISE DO DESEMPENHO DO ÍNDICE DE DISPERSÃO	89
6.2	MÉTODO PARA SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO	99
6.3	DISCUSSÃO SOBRE A COMPLETUDE DA SISTEMÁTICA PROPOSTA	114
7	APLICAÇÕES	117
7.1	APLICAÇÃO 1 – PEÇA PLÁSTICA	117
7.2	APLICAÇÃO 2 – FUNDIDO DE ALUMÍNIO	122
7.3	DISCUSSÃO DO CAPÍTULO	127
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	129
8.1	CONCLUSÕES	129
8.2	OPORTUNIDADES PARA TRABALHOS FUTUROS	130
8.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	132
	REFERÊNCIAS	133
	APÊNDICE A – EXPERIMENTOS PRELIMINARES	145

1 INTRODUÇÃO

A tomografia computadorizada (CT) é uma tecnologia de aquisição de imagens cuja aplicação já é bem consolidada em diagnósticos médicos. A CT representou um grande avanço na aplicação dos raios X, radiação descoberta por Wilhelm Conrad Röntgen em 1895 [1]. Foi o primeiro método a adquirir, de maneira não invasiva, imagens do interior do corpo humano, como a de tecidos menos densos, sem que houvesse a superposição das estruturas anatômicas como ocorre com as radiografias. Embora, do ponto de vista puramente matemático, o problema da reconstrução de uma função a partir de suas projeções tenha sido solucionado em 1917 por Johann Radon [2], a invenção da CT é atribuída a Allan Cormack [3], que, independentemente, desenvolveu parte dos algoritmos usados para reconstrução das imagens, e a Godfrey Hounsfield [4, 5] com quem em 1979 dividiu o prêmio Nobel de Medicina.

Esta tecnologia já vem sendo utilizada na indústria como técnica de ensaio não-destrutivo (NDT) para inspeção da estrutura interna de materiais há mais de trinta anos, ou seja, apenas alguns anos depois que os primeiros tomógrafos começaram a aparecer nos hospitais. Entre as primeiras aplicações industriais estão o escaneamento de troncos de árvores por Habermehl e Ridder [6] para avaliar a influência da chuva ácida, e a inspeção de hélices de helicópteros pela MBB¹ em Ottobrunn, na Alemanha [7]. Desde então houve um considerável aumento na capacidade dos tomógrafos, tanto em *hardware*² (HW) quanto em *software*³ (SW), possibilitando melhorias em termos de resolução e tempo de inspeção. Os campos de aplicação industrial também se estenderam para outras áreas como: a indústria de petróleo [8], na análise geológica [9, 10] e de escoamento de fluidos multifásicos [11]; a avaliação de materiais compósitos [12] e de construção [13]; a inspeção de grandes componentes, como motores de foguetes [14]; a inspeção de montagens; e a detecção de falhas em fundidos e peças injetadas [14].

¹ Messerschmidt-Bölkow-Blohm, atualmente Eurocopter.

² Componentes físicos de um sistema. – Obs.: No decorrer deste documento serão encontrados alguns termos ou palavras em outros idiomas, pois são amplamente utilizados nesta área de estudo. Estes termos serão traduzidos na primeira vez em que aparecerem no texto. No entanto, sempre que o autor julgar adequado, os termos aparecerão já traduzidos no próprio texto, sem deixar de apresentar também a versão original.

³ Programa de computador.

Graças a estas melhorias, a partir do início do século XXI [15] a CT ampliou seu campo de aplicação à metrologia dimensional [16].

Desta forma, começaram a surgir no mercado sistemas de CT dedicados, cujo propósito principal é de serem justamente aplicados como máquinas de medir por coordenadas (CMM) [17-24]. O grande diferencial da CT, como sistema de medição (SM) dimensional em relação a todas as demais alternativas ópticas e de medição por contato, está justamente na capacidade de obtenção de uma densa nuvem de pontos, tanto para as características externas como para as internas das peças, independentemente da complexidade da geometria. Isto possibilita uma abordagem holística do processo de controle da qualidade, onde a inspeção de defeitos do material (e.g. presenças de bolhas) pode ser combinada a uma avaliação completa da geometria da peça.

As limitações que inibem uma mais vasta aplicação desta tecnologia estão relacionadas ao elevado custo do equipamento, à elevada complexidade do processo de medição, além do fato de não existir ainda uma padronização específica definida em relação à rastreabilidade. Ou seja, não existe ainda um procedimento normalizado para relacionar as medições obtidas por CT com os padrões fundamentais, assim como, também, não existe um procedimento padronizado para declarar a incerteza obtida em uma dada tarefa de medição com CT [25]. Apesar destas vantagens, os sistemas de CT disponíveis não são capazes de fornecer medições com incertezas tão baixas quanto as CMM por contato ou mesmo com as que utilizam sensores ópticos.

Os metrologistas que atuam na indústria ainda não estão familiarizados com esta tecnologia. A falta de procedimentos normalizados, aliada à falta de tempo para adquirir conhecimento em função das demandas da produção, faz com que boa parte dos usuários, que já estão utilizando os novos sistemas de CT dimensional, não aproveitem todo o potencial do equipamento.

Em relação aos métodos ópticos, foi afirmado que:

“Em muitos casos, as vantagens óbvias dos métodos ópticos, (...), são ofuscadas por características metrológicas complexas que demandam conhecimento especializado dos usuários [26].”

Este mesmo tipo de problema observado por Schwenke [26] na aplicação dos métodos ópticos, pode ser estendido também para medições com CT por raios X. O usuário está entre as principais fontes potenciais de erro que afetam a aquisição e processamento de imagens tomográficas para fins metrológicos. Durante o processo de medição, o usuário deve tomar decisões com relação aos parâmetros de configuração que influenciam diretamente a qualidade da imagem e, conseqüentemente, o resultado da medição (RM). A escolha dos parâmetros de configuração é um processo que exige experiência do usuário, o que acaba resultando em um processo iterativo de tentativa e erro.

Diante deste contexto, a linha de pesquisa adotada tem como propósito demonstrar que é possível selecionar parâmetros de configuração ótimos, em termos da qualidade da matriz de voxel e do tempo de medição, para uma determinada tarefa de medição. Desta forma, um sistema baseado em conhecimento (KBS) pode ser desenvolvido para dar suporte ao usuário do tomógrafo na seleção destes parâmetros. Assim, usuários com menos conhecimento, tempo e experiência também serão capazes de obter resultados com menores incertezas e aprender sobre o processo.

Este trabalho foi conduzido em parceria com o laboratório de máquinas-ferramenta (WZL) da Universidade Técnica da Renânia do Norte-Vestfália em Aachen (RWTH-Aachen) através do programa BRAGECRIM⁴. A principal vantagem desta parceria é a troca de conhecimentos entre as instituições, principalmente pela posição de destaque que a Alemanha ocupa no campo de pesquisa e desenvolvimento (P&D) desta tecnologia. Uma vantagem adicional foi a disponibilidade do tomógrafo instalado em Aachen para realização dos experimentos relativos a este trabalho, o que possibilitou antecipar o desenvolvimento desta pesquisa no Brasil. Em 2011 foram instalados dois tomógrafos dedicados a aplicações metrológicas no Brasil, um foi instalado no laboratório de metrologia dimensional - LMD compartilhado entre o LABMETRO/UFSC e a Fundação CERTI enquanto o outro foi instalado no IPT em São Paulo, SP. Até então, o único tomógrafo para esta finalidade havia sido instalado em 2008, na empresa Andreas Stihl Moto-Serras Ltda. em São Leopoldo, RS [27], porém sem disponibilidade para uso em P&D.

⁴ Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology (Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura).

Uma descrição mais detalhada da proposta de tese e dos objetivos é apresentada no capítulo 4. No próximo capítulo são apresentados os fundamentos básicos de CT de forma a orientar o entendimento acerca dos fenômenos físicos e das relações matemáticas que podem influenciar os resultados da medição. Assim, no capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte em aplicações de CT em metrologia dimensional, destacando os aspectos relacionados a qualificação da matriz de voxel e a seleção dos parâmetros de configuração.

2 PRINCÍPIOS DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

A tomografia computadorizada (CT) consiste, basicamente, em reconstruir uma imagem a partir de suas projeções. Estas projeções são processadas com auxílio computacional resultando na imagem das secções transversais do objeto [28]. Em tomógrafos com feixes cônicos a imagem resultante é volumétrica, com uma dimensão espacial a mais, e pode ser denominada de matriz de voxel⁵. Os requisitos necessários para que um sistema de medição (SM) por CT apresente resultados satisfatórios estão inter-relacionados com os diversos subsistemas que o compõe e com a capacidade do usuário de definir os parâmetros de configuração para a aquisição das imagens. Apesar das diferenças de projeto decorrentes de cada aplicação e fabricante, praticamente todos os tomógrafos possuem: uma fonte de radiação; um detector; um sistema cinemático; e um sistema computacional para aquisição, reconstrução e processamento das imagens (Figura 1).

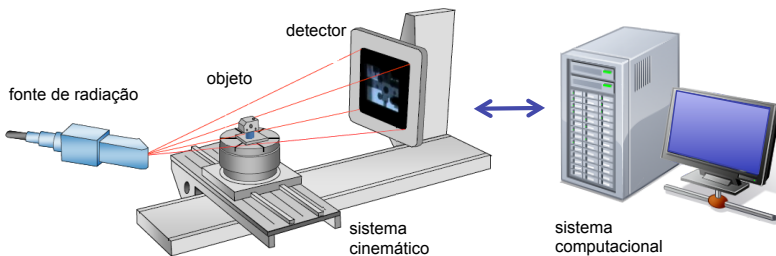


Figura 1. Componentes básicos de um sistema de CT. Fonte: adaptado de [29].

2.1 FONTE DE RADIAÇÃO

Os tubos de raios X são as fontes de radiação normalmente encontradas nos tomógrafos utilizados em medição dimensional. Os raios X são ondas eletromagnéticas, assim como a luz visível, as ondas de rádio, as microondas e os raios infravermelho e ultravioleta. Possuem comprimentos de onda aproximadamente entre 6 pm e 12 nm, com frequência variando entre cerca de 24 PHz e 50 EHz [30]. Em fontes de origem elétrica, os raios X são produzidos quando elétrons, deslocando-

⁵ **Voxel** é um acrônimo composto por volume e elemento.

se em alta velocidade, são abruptamente desacelerados ao entrar em contato com o alvo, um metal com elevado número atômico, normalmente o tungstênio. A energia cinética adquirida pelo elétron é convenientemente expressa em elétrons-volts (eV)⁶, unidade não pertencente ao SI e definida como:

“O elétron-volt é a energia cinética adquirida por um elétron ao passar por uma diferença de potencial de um volt no vácuo [31]”.

Por esta razão, a máxima energia de um fóton de raios X ou o maior valor energético do espectro de raios X é a energia cinética do elétron. A energia de cada fóton E é proporcional à sua frequência ν , podendo ser representada pela equação:

$$E[keV] = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} = \frac{1,2398}{\lambda[nm]} \quad (1)$$

onde, h é constante de Planck, λ é o comprimento de onda do fóton e c é a velocidade da luz no vácuo .

Um tubo de raios X é basicamente composto por um catodo e por um anodo, montados em uma câmara de vácuo (Figura 2). Pelo filamento do catodo passa uma corrente elétrica de aquecimento resultando em um efeito termiônico⁷. Uma alta diferença de potencial (d.d.p.) entre o anodo e o catodo faz com que os elétrons sejam acelerados em direção ao anodo, atingindo o alvo em alta velocidade. O fluxo de elétrons entre o anodo e o catodo define a corrente do tubo [32].

Uma unidade focal é utilizada para concentrar os elétrons em uma pequena área do alvo. Esta área a_e , é definida como ponto focal e, tanto seu tamanho como forma tem importante contribuição na nitidez da imagem. A área efetiva do foco é denominada foco óptico a_o [14, 32, 33]. Quanto menor o ponto focal, melhor será a nitidez da imagem. Porém, o superaquecimento do alvo é uma limitação física que impede o uso de pontos focais muito pequenos.

O espectro de raios X vai depender do material do alvo, da tensão e da corrente elétrica aplicada ao tubo, além do material e da espessura do pré-filtro [34]. A tensão determina o máximo valor energético do

⁶ 1 eV \approx 1,602 \times 10⁻¹⁹ J.

⁷ Efeito termiônico é o aumento do fluxo de elétrons que saem de um metal, devido ao aumento de temperatura.

espectro (Figura 3 – eixo das abscissas), enquanto a intensidade do raio é determinada pela corrente do anodo (Figura 3 – eixo das ordenadas). Já o pré-filtro é usado para atenuar os baixos valores energéticos com a intenção de reduzir o espectro de raios X (Figura 3 – linha pontilhada).

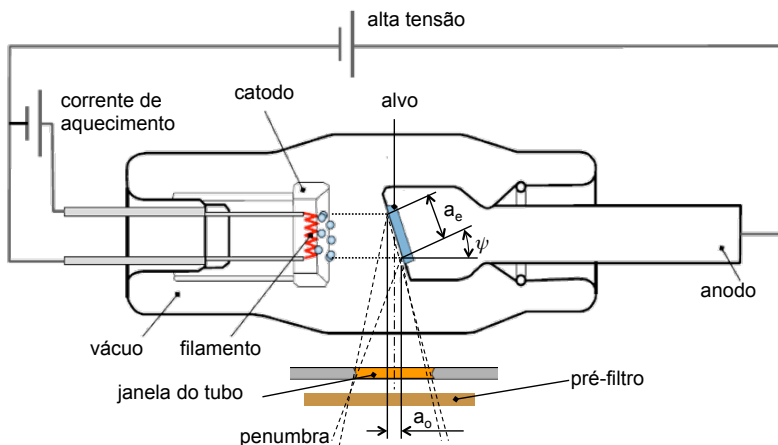


Figura 2. Representação esquemática de um tubo de raios X. Fonte: adaptado de [29].

Quando elétrons em alta velocidade interagem com o material do alvo, ocorrem distintas formas de colisão. A maioria destas interações envolve apenas a transferência de pequenos valores de energia conduzindo a ionização dos átomos do alvo e não resultando, portanto, na produção de raios X. Mais de 99% da energia fornecida ao tubo é perdida na forma de calor. Existem, no entanto, dois tipos de interações que resultam na geração de fótons de raios X. Uma é a responsável pela chamada radiação branca ou *Bremsstrahlung*⁸ enquanto a outra irá gerar a radiação característica [28, 34-36].

A emissão de *Bremsstrahlung* ocorre quando o elétron que chega a alta velocidade ao anodo é desacelerado ao passar próximo ao núcleo dos átomos do material do catodo. Como o elétron passa por diversos átomos à medida que penetra o material, ocorrem múltiplas desacelerações, resultando em um espectro distribuído continuamente (Figura 3a).

A radiação característica ocorre quando os elétrons vindos do catodo em alta velocidade se chocam com os elétrons de camadas

⁸ Do alemão “*Bremsen*” frear e “*Strahlung*” radiação, i.e. radiação de desaceleração.

orbitais mais internas dos átomos do anodo. Quando um elétron de um orbital externo ocupa o lugar deixado, a radiação característica é emitida. Os picos observados no espectro correspondem à energia necessária para um determinado elétron deslocar de camada (Figura 3b).

Já quando um elétron em alta velocidade atinge diretamente o núcleo do átomo do anodo (Figura 3c), ocorre a conversão ideal de toda energia cinética em *Bremsstrahlung*.

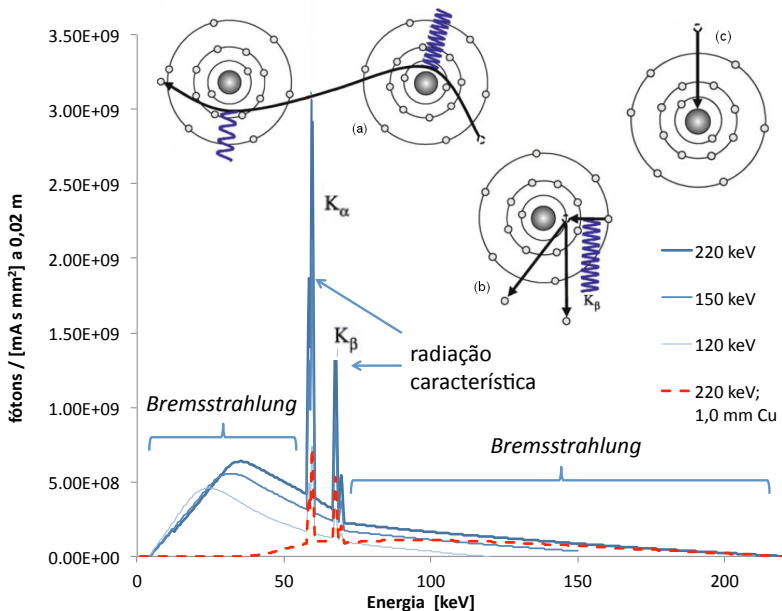


Figura 3. Espectro de raios X: (a) *Bremsstrahlung*; (b) radiação característica; (c) colisão entre elétron e núcleo. Fontes: adaptado de Viscom AG e Buzug [35].

As definições dos parâmetros da fonte de radiação (tensão, corrente e pré-filtro) estão diretamente relacionadas ao tipo de objeto que se deseja escanear. O conhecimento de como são gerados os raios X, das características do tubo e de como a interação dos elétrons com o material do anodo irá gerar o espectro de energia do feixe, é importante para se entender os fatores que influenciam na penetrabilidade dos fótons de raios X na matéria e, conseqüentemente, na resolução, no contraste e no ruído da imagem.

2.2 INTERAÇÃO DOS RAIOS X COM A MATÉRIA

Teoricamente, os fótons de raios X podem interagir com os elétrons do átomo, com o núcleo, com o campo elétrico do átomo, ou com o campo méson ao redor do núcleo. O resultado destas interações pode ser a absorção completa, a dispersão elástica ou a dispersão inelástica. Desse modo, a princípio, existem doze maneiras distintas com que os fótons podem interagir com a matéria (Tabela 1). Na prática, as interações mais importantes são: o efeito fotoelétrico, a dispersão Compton e a formação de pares. No entanto, na faixa de energia usada para medições dimensionais, inferior a 1 MeV, o efeito da formação de pares não é energeticamente possível de ocorrer. Outra interação, porém com menor importância para CT, é a dispersão elástica Rayleigh, que ocorre quando o campo elétrico do fóton incidente interage com o elétron de ligação do átomo, fazendo com que ele vibre momentaneamente, emitindo radiação com o mesmo comprimento de onda do fóton incidente. Neste processo, não há excitação nem ionização do átomo. As demais interações são energeticamente impossíveis de ocorrer ou desprezíveis no espectro de energia sob estudo.

Tabela 1. Interação dos raios X com a matéria [37, 38].

	elétrons	núcleo	campo elétrico do átomo
efeitos das interações	absorção total	efeito fotoelétrico	<i>foto desintegração</i>
	dispersão elástica	<i>dispersão Rayleigh</i>	<i>dispersão Delbruck</i>
	deserção inelástica	dispersão Compton	<i>dispersão ressonância nuclear</i>
			<i>formação de pares</i>

O efeito fotoelétrico ocorre quando um fóton de raios X, com energia superior à de um elétron de ligação, é absorvido por um elétron de uma das camadas internas do átomo. Este elétron, chamado de fotoelétron, é então ejetado do átomo com energia cinética equivalente à diferença entre a energia quântica do fóton incidente e a energia de ligação do fotoelétron. O espaço deixado pelo fotoelétron é preenchido por um elétron de uma camada mais externa, resultando na emissão de uma fluorescência de raios X característica. No entanto, esta emissão resultante não é considerada parte do efeito fotoelétrico (Figura 5). O coeficiente de absorção fotoelétrica μ_p é diretamente proporcional ao

número atômico Z do objeto elevado à quarta potência e ao comprimento de onda do fóton λ elevado à terceira potência [35].

$$\mu_P \propto Z^4 \cdot \lambda^3 \quad (2)$$

A dispersão inelástica Compton ocorre quando um fóton de raios X interage com um dos elétrons da camada de valência do átomo resultando na perda de energia e dispersão do fóton. Esta perda de energia depende do ângulo de dispersão ϑ , podendo ser representada através da variação do comprimento de onda do fóton $\Delta\lambda$ (Figura 3b).

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos \vartheta) \quad (3)$$

onde m_e é a massa do elétron⁹. A energia perdida pelo fóton é transferida, na forma de energia cinética, para o chamado elétron Compton [35]. Tanto o fóton dispersado quanto o elétron Compton tem energia suficiente para novas interações de ionização. A probabilidade de ocorrência da interação Compton depende da densidade de elétrons do objeto e não do número atômico [36].

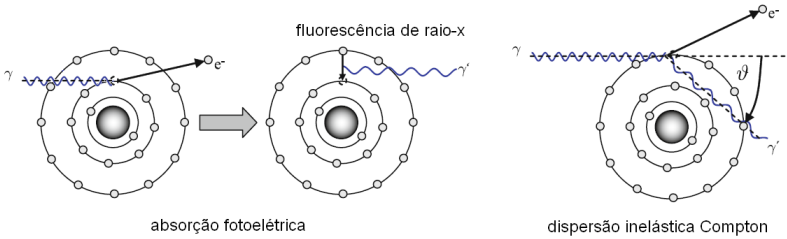


Figura 4. (a) interação fotoelétrica, e (b) interação Compton. Fonte: adaptado de [35].

Através destas interações, a quantidade de fótons incidentes é reduzida ao atravessar um determinado material, fazendo com que a intensidade $I(x)$ de um feixe de raios X seja exponencialmente atenuada. No caso ideal de um feixe unidirecional monoenergético atravessando um material de densidade e número atômico uniformes, a intensidade pode ser expressa pela chamada lei da absorção de Beer:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \cong I_0 \cdot e^{-(\mu_P + \mu_C + \mu_R) \cdot x} \quad (4)$$

⁹ $m_e \approx 9,109 \times 10^{-31}$ kg

onde, $I_0 = I(0)$ é a intensidade incidente, x é a espessura de material atravessada, e μ é o coeficiente de atenuação, que é a combinação do coeficiente de absorção linear (ou fotoelétrica) μ_P com os coeficiente de dispersão Compton μ_C e Rayleigh μ_R .

A contribuição de cada um dos efeitos de absorção descritos varia de acordo com o material (Figura 5). Pode-se observar que para os valores energéticos dentro do intervalo normalmente utilizado em medições dimensionais, os fótons de menor energia sofrem maior atenuação do que os de maior energia, especialmente em materiais mais densos. Esta é a origem do artefato¹⁰ conhecido como *beam hardening*¹¹.

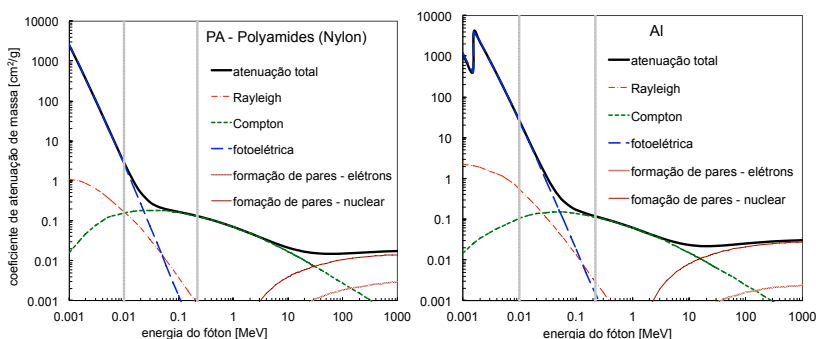


Figura 5. Coeficiente de atenuação da massa¹² do nylon e alumínio em relação à energia dos fótons incidentes. Fonte: dados de [39].

Outro aspecto importante a ser observado no intervalo do espectro de energia utilizado é a presença da dispersão Compton. Devido aos fótons secundários γ' este efeito resulta na redução de contraste, e da nitidez e no aumento do ruído da projeção. Além disso, devido à não-homogeneidade do material, o coeficiente de atenuação pode variar espacialmente ao longo do material. Por esta razão a atenuação dos raios X não é matematicamente tão simples como apresentada na equação (4), podendo ser reescrita da seguinte forma:

¹⁰ A palavra artefato no contexto da CT tem o sentido de defeito na imagem. Não será utilizado neste trabalho no sentido de padrão corporificado, como é normalmente empregado em metrologia dimensional.

¹¹ Termo inglês que pode ser traduzido como “endurecimento de feixe”.

¹² O coeficiente de atenuação de massa indica a capacidade de uma substância em absorver ou dispersar ondas eletromagnéticas por unidade de massa.

$$I(x, E) = \int_0^{E_{max}} I_0(E) \cdot e^{-\int_0^{x_{max}} \mu(E, x) \cdot dx} dE \quad (5)$$

sendo E o valor energético do fóton e x a quantidade de material atravessado pela radiação.

Os fenômenos físicos que caracterizam a interação entre a radiação e o material do objeto inspecionado, ressaltam a importância e a complexidade da escolha dos parâmetros de configuração relativos à fonte de radiação. É justamente neste processo de interação dos raios X com o material da peça que são originados alguns dos principais artefatos, como os efeitos de endurecimento e de dispersão do feixe.

2.3 DETECTOR

O sistema de detecção é responsável por converter a radiação que atravessou o objeto em um sinal eletrônico. Os detectores mais comumente encontrados em tomógrafos para medição dimensional são constituídos de um painel plano, com área variando entre $(100 \times 100) \text{ mm}^2$ a $(410 \times 410) \text{ mm}^2$, integrando atualmente até 2048×2048 elementos. O tamanho de cada elemento varia entre 200 e 400 μm [40-42]. O elemento de detecção é composto por um cristal cintilador, normalmente o iodeto de césio (CsI) ou oxissulfeto de gadolínio ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$) que é opticamente acoplado a uma matriz de fotodiodos, dispositivo foto-conversor feito à base de silício amorfo (Figura 6) [43]. O cintilador sofre interação fotoelétrica com os fótons de raios X e os fotoelétrons liberados excitam outros átomos do cintilador. Quando a excitação cessa, é emitida uma radiação, no intervalo entre o espectro visível e a radiação ultravioleta, que vai ser absorvida pelos fotodiodos e que, por sua vez, produzem uma carga elétrica proporcional à radiação de raios X. Durante a exposição do detector, a carga elétrica é integrada e armazenada no elemento de detecção, que se comporta como um capacitor. A aquisição do sinal é acionada por um transistor de película fina (TFT), que liga o detector ao sistema de aquisição de sinais (DAS) através de um circuito de transmissão de dados (*data line*). No DAS é feita a amplificação do sinal e a conversão do sinal analógico para digital, utilizando-se apenas um único chip, resultando em uma operação rápida e com baixo ruído eletrônico [35].

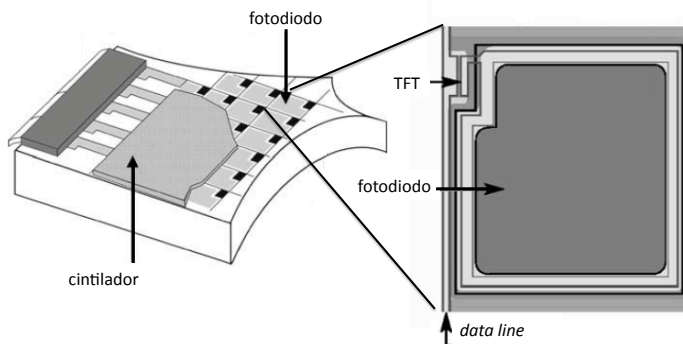


Figura 6. Composição de um detector plano e detalhe de um elemento.
Fonte: adaptado de [35].

Os fótons de luz produzidos no cintilador se espalham por todas as direções. Por esta razão, nem todos chegam aos fotodiodos. A eficiência quântica de detecção (DQE) pode ser definida pelos fótons de raios X que são atenuados pelo cintilador [31].

$$DQE = \frac{\int_0^{E_{max}} I_F(E) \cdot (1 - e^{-\mu_D(E) \cdot x_D}) dE}{\int_0^{E_{max}} I_F(E) \cdot dE} \Leftrightarrow \frac{(SNR_{detectado})^2}{(SNR_{incidente})^2} \quad (6)$$

onde, $I_F(E)$ é o espectro de raios X que incide no detector, x_D é a espessura do detector, e μ_D é o coeficiente de atenuação do detector. Na prática a eficiência da detecção é obtida da proporção entre a relação sinal ruído (SNR) da radiação detectada e da incidente. Como o raio X se comporta de acordo com a distribuição de Poisson, a segunda potência da SNR incidente é, de fato, o número de fótons totais [43].

Cintiladores de CsI apresentam uma eficiência de absorção superior aos cintiladores de Gd_2O_2S , o que pode resultar em até quatro vezes mais quantidade de luz incidente no fotodiodo (Figura 7 esquerda). Assim o uso de CsI permite menor tempo de exposição do objeto e menor espessura do material cintilador. Além disso, a dispersão da luz é menor em cintiladores de CsI, o que possibilita uma imagem mais nítida (Figura 7 direita). Porém o cintilador de Gd_2O_2S tem valores de eficiência mais constante, inclusive para maiores valores de energia, o que torna uma solução mais atrativa para tomógrafos mais potentes.

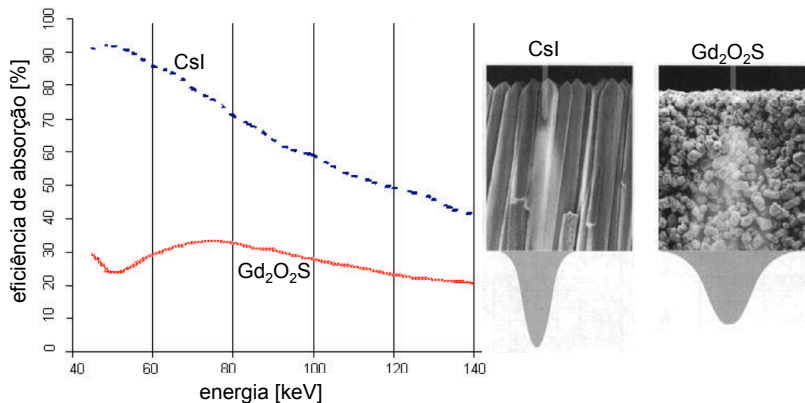


Figura 7. Comparação de desempenho entre materiais cintiladores.

Fonte: Thales Electron Devices e Hamamatsu Photonics *apud* Varian [43].

A qualidade da detecção pode ser afetada também pelo tempo necessário para que o cintilador se recupere da emissão anterior, ou seja, o tempo necessário para que o elétron excitado volte ao seu estado normal e deixe de emitir luz.

A histerese do detector, ou seja, os danos causados ao ganho do cintilador devido à exposição à radiação, é outro fator de influência importante. Estes danos variam de acordo com a história de uso do detector. O ganho é também influenciado pela estabilidade térmica do cintilador.

Além destes fatores, o DAS também influencia na qualidade da imagem. Parâmetros como linearidade, taxa de aquisição, ruído eletrônico são importantes em todos os sistemas de medição.

O detector, ou no caso, o painel de detecção, é na verdade o sensor do SM por CT. Como pôde ser visto nessa seção, as principais influências deste subsistema na qualidade do resultado são intrínsecas ao próprio equipamento. Em geral, a contribuição do detector na qualidade das medições está diretamente relacionada às melhorias nas tecnologias empregadas neste componente. No entanto, o desempenho do sensor vai degradando com o passar do tempo. Por isso, recomenda-se [44] a avaliação periódica através de calibrações para verificar a homogeneidade entre elementos de detecção, bem como para identificar a presença de elementos defeituosos. O procedimento de calibração do detector é orientado pelo próprio fabricante, possibilitando ao operador desativar os elementos defeituosos e ajustar o ganho, caso alterações no

intervalo de tempo para recuperação do cintilador não apresentem resultados positivos.

2.4 SISTEMA CINEMÁTICO

O sistema cinemático proporciona o posicionamento relativo entre a peça, a fonte de radiação e o detector. As relações geométricas entre estes elementos devem ser conhecidas, já que são importantes para o algoritmo de reconstrução. Assim como nas CMM tradicionais, limitações construtivas causam erros geométricos que, no caso da tomografia, resultam em artefatos na imagem. O eixo de rotação da peça, por exemplo, pode apresentar certo grau de batimento ou folga, bem como o detector pode não estar idealmente ortogonal ao eixo de simetria do “cone” do feixe de raios X [45].

Além disso, não é possível acessar a fonte de radiação ou detector através de medições por contato. A posição do ponto focal do tubo de raios X está localizada dentro de uma câmara de vácuo. O mesmo acontece com a matriz de detecção, que é protegida pelo cintilador. A localização e a orientação do ponto focal e de cada elemento de detecção também são sensíveis à variação de temperatura.

Para aplicações de nível metrológico, tais relações devem ser determinadas através da avaliação dos eixos e guias e do processamento de imagem de projeções específicas para definir o valor da escala. A implementação de ajustes e correções são realizadas acessando-se o CAA¹³ do tomógrafo. A escala da imagem, ou relação voxel/mm, é definida da seguinte maneira (Figura 8) [46]:

1. A origem do sistema de coordenadas do tomógrafo é definida no ponto focal da fonte de raios X;
2. O plano $x_d - z_d$ do detector está localizado a uma distância D_{SD} da fonte de raios X e é perpendicular ao eixo y_s . Os eixos x_d e z_d do detector são paralelos a x_s e z_s da fonte. O eixo y_s intercepta o detector em x_0 e z_0 .
3. Um padrão é posicionado e orientado arbitrariamente entre a fonte e o detector. Através de transformações de corpo rígido, os pontos calibrados do padrão, no sistema de coordenadas peça, são transformados para o sistema de coordenada do tomógrafo.

¹³ CAA é a sigla para “*Computed Aided Accuracy*”, sistema computacional para compensação dos erros de um SM, traduzida como “exatidão corrigida por computador”.

Para cada projeção, a relação geométrica entre fonte de raios X , detector e peça é dada por nove parâmetros: D_{SD} , x_0 , z_0 e os seis graus de liberdade da orientação do objeto.

Uma vez definidos os parâmetros de formação da imagem, o algoritmo de reconstrução calcula o centro dos voxels, formando um grid 3D equidistante, onde o tamanho do voxel V_x é dado por:

$$V_x = p \cdot V_g = p \cdot \frac{D_{SO}}{D_{SD}} \quad (7)$$

sendo V_g a ampliação e p a distância entre cada elemento (ou pixel) do detector. D_{SO} é escolhido para proporcionar uma ampliação adequada. Dessa maneira, fica definida a escala que será usada na medição dimensional. Como pode ser visto, erros na definição D_{SO} e D_{SD} afetam diretamente a escala. Além disso, se por um lado o posicionamento da peça mais próxima à fonte (D_{SO} menor) resulta em uma melhor relação pixel/mm, por outro lado, a nitidez da imagem fica comprometida com o aumento da penumbra. Vale lembrar (§2.1) que a nitidez pode ser melhorada com a redução do ponto focal. Cabe ao operador analisar os efeitos da escolha destes parâmetros de forma que os requisitos de uma dada tarefa de medição sejam adequadamente atendidos.

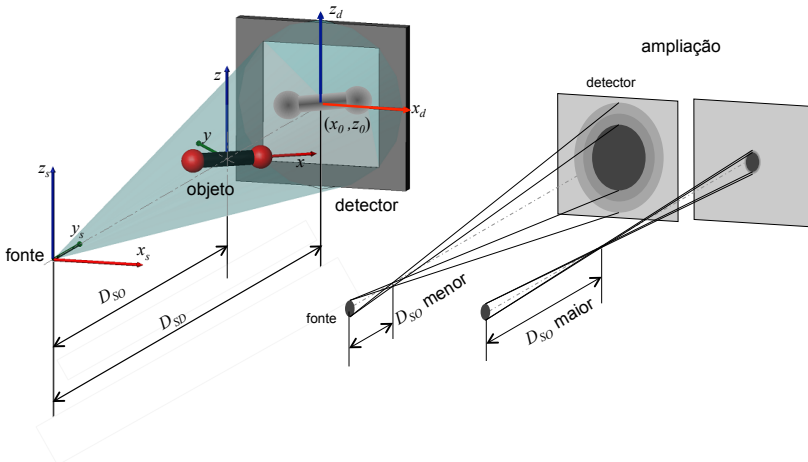


Figura 8. Relação geométrica entre fonte de radiação, detector e peça.

2.5 RECONSTRUÇÃO DA IMAGEM

A reconstrução da imagem consiste em determinar a melhor estimativa da seção transversal de um objeto a partir de um determinado número de medições de suas projeções. A equação que descreve a projeção dos raios atenuados ao atravessar um determinado objeto é denominada transformada de Radon [2]. Para um feixe de raios paralelos, a transformada de Radon do objeto representado pela função $f(x,y)$ pode ser expressa da seguinte forma:

$$P_{\theta}(t) = \int_{(\theta,t)line} f(x,y) ds \quad (8)$$

Utilizando a função delta de Dirac, a equação é reescrita como:

$$\mathcal{R}[f(x,y)] = P_{\theta}(t) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) dx dy \quad (9)$$

Onde $t = x \cos \theta + y \sin \theta$, é a equação da linha que representa cada raio que atravessa o objeto (Figura 9 – esquerda).

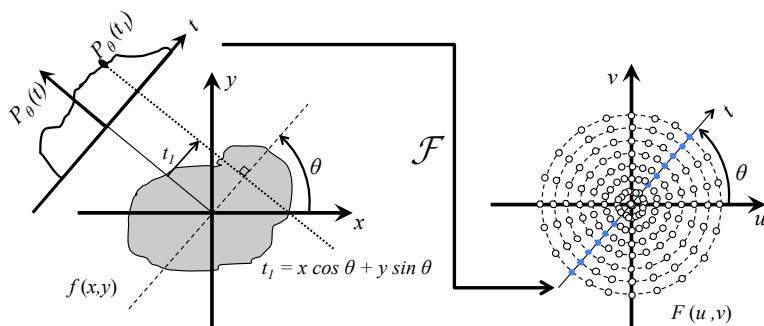


Figura 9. Projeção $P_{\theta}(t)$ de um objeto $f(x,y)$ no domínio do espaço (esquerda) e no domínio da frequência (direita).

Matematicamente, o problema consiste em inverter a transformada de Radon:

$$f(x,y) = \mathcal{R}^{-1}[P_{\theta}(t)] \quad (10)$$

Desde que Radon [2] e posteriormente Cormack [3] provaram que esta tarefa é possível, surgiram diversos algoritmos de reconstrução

para diferentes tipos de projeções. Os algoritmos normalmente utilizados em CT são baseados no método da retroprojeção filtrada¹⁴ (FBP) [28, 47] por serem derivados analiticamente e exigir menos recurso computacional. Métodos iterativos e baseados em inversão de matrizes, como a técnica de reconstrução algébrica¹⁵ (ART) [47], também apresentam bons resultados, mas são evitados, pois demandam elevada capacidade computacional.

O algoritmo FBP é baseado no teorema da fatia de Fourier¹⁶, onde se define que a transformada de Fourier unidimensional de cada projeção é, de fato, uma fatia da transformada de Fourier bidimensional do objeto original (Figura 9) [28, 35, 36, 47]. Usando a transformada de Fourier unidimensional de diversos ângulos de projeção, pode-se reconstruir a imagem 2D da seção do objeto no domínio da frequência (Figura 10).

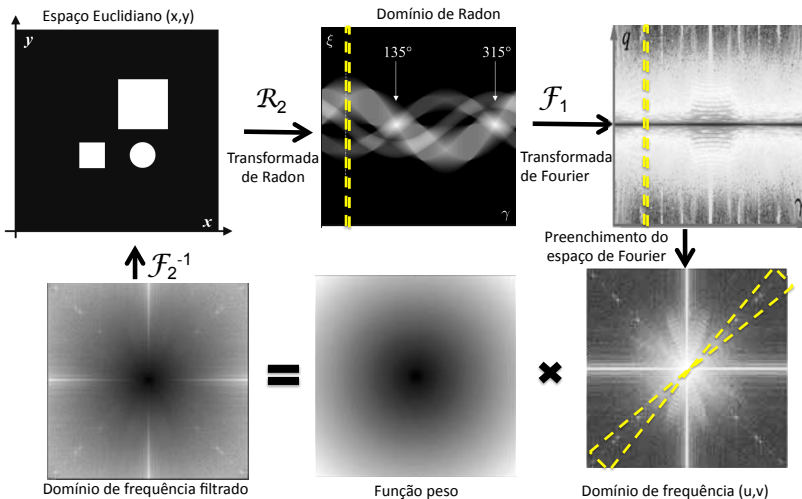


Figura 10. Processo de reconstrução da imagem por FBP. Fonte: adaptado de [35].

Devido a um número finito de projeções, quanto maior for a frequência dos componentes da imagem maior será o erro devido à interpolação que ocorre no domínio da frequência. Isto resulta em uma reconstrução final sem muita nitidez. Para corrigir o aspecto borrado das

¹⁴ Tradução do inglês para “filtered backprojection”

¹⁵ Tradução do inglês para “Algebraic reconstruction technique”

¹⁶ Tradução do inglês para “Fourier slice theorem”

imagens é aplicado um filtro, ou uma função peso, à projeção (Figura 10).

Um dos algoritmos mais difundidos para a reconstrução 3D de projeções de feixes cônicos em detectores planos e uma trajetória circular¹⁷ foi publicado em 1984 por Feldkamp, Davis e Kress (FDK) [48]. O problema desta montagem cinemática, muito comum em tomógrafos industriais, está na amostragem incompleta do espaço de Radon.

Para cada projeção, os limites do espaço de Radon formam uma esfera, cujo diâmetro é igual à distância entre a fonte de raios X e o eixo de rotação do objeto. Uma rotação de 360° produz um espaço de Radon na forma de um toro (Figura 11a), uma vez que a esfera que representa a projeção no espaço Radon é rotacionada junto à mesa rotativa.

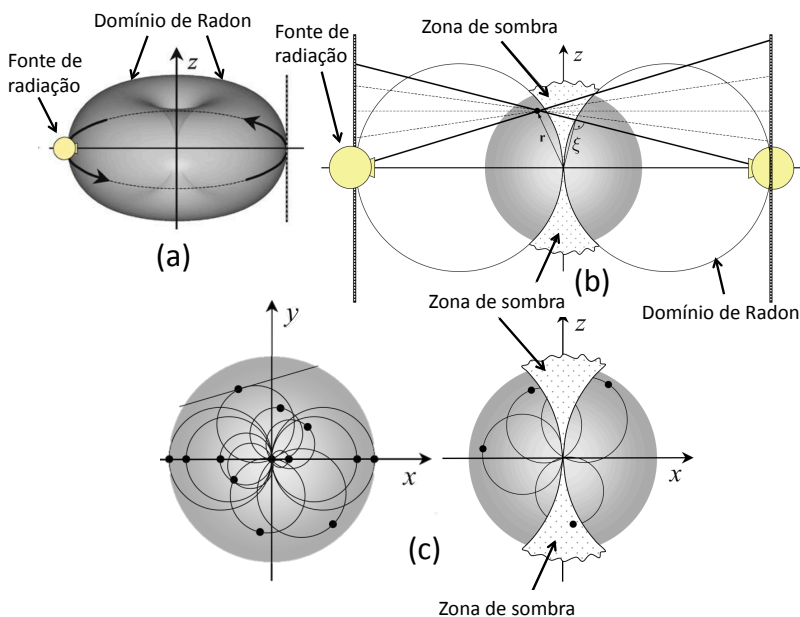


Figura 11. Origens do artefato de Feldkamp. Fonte: adaptado de [35].

No entanto, a representação do espaço de Radon por um toro faz com que parte da informação necessária para uma reconstrução

¹⁷ Trajetória circular é caracterizada pela rotação do volume de reconstrução ao redor de seu próprio eixo.

completa fique em uma “zona de sombra” (Figura 11b). Assim, esta montagem cinemática não satisfaz a condição de suficiência de Tuy-Smith [49, 50] e a consequência são artefatos normalmente visualizados em planos ortogonais ao eixo de rotação. Estes artefatos são normalmente denominados de “artefatos de Feldkamp”, uma alusão ao algoritmo FDK, que é uma aproximação da transformada inversa de Radon. Pode-se observar que no plano ortogonal ao eixo de rotação que intercepta a fonte de radiação a reconstrução é completa (Figura 11c). A solução para este problema é a alteração da trajetória relativa entre peça e tubo, *e.g.* o uso de uma trajetória helicoidal [51].

Para os usuários do sistema é útil conhecer os conceitos básicos do processo de geração da imagem, para que possam entender que tipos de informações estão adquirindo, quais são os fatores que podem influenciar a qualidade da imagem e quais artefatos são inerentes a este processo.

2.6 EXTRAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Existem diversas técnicas para identificar as bordas de um objeto ou intercessão entre diferentes materiais num mesmo objeto: pode-se simplesmente atribuir um valor limite dos níveis de cinza para voxels da borda, utilizar métodos de *threshold* globais [52-54] ou métodos de *threshold* locais [44, 55, 56]. Normalmente, o *threshold* é definido automaticamente, reduzindo a influência do operador à escolha do método a ser utilizado.

Um método global para definição do valor de *threshold* comumente utilizado é o chamado ISO 50% [54]. O valor do *threshold* corresponde ao valor médio entre os picos do histograma, onde os valores maiores correspondem à peça e os valores menores correspondem ao meio (Figura 12). Porém, este método apresenta erros sistemáticos de deslocamento de superfície que variam de acordo com material do objeto, sobretudo por causa do artefato *beam hardening* [57].

Em função da variação dos valores de níveis de cinza e do contraste ao longo de uma matriz de voxel uma alternativa, principalmente para medições dimensionais, é o uso dos chamados métodos locais para definição do *threshold*. Neste método, a superfície é previamente identificada (uso de CAD ou geração de arquivo STL) possibilitando que os valores dos níveis de cinza sejam amostrados ao

longo da normal da superfície. O valor de *threshold* é definido como sendo o ponto onde o máximo gradiente dos níveis de cinza é detectado (Figura 12).

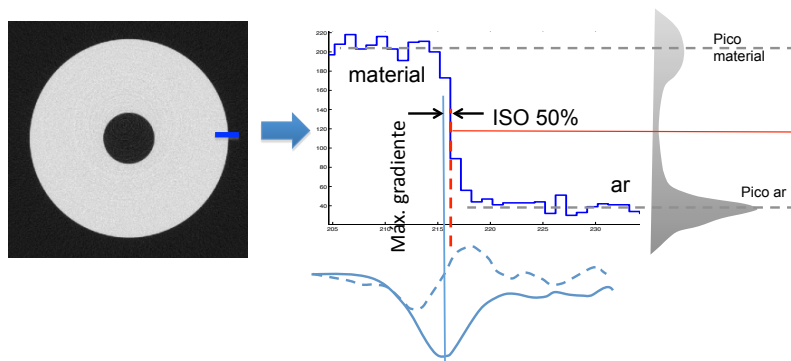


Figura 12. Comparação entre *threshold* global (ISO 50%) e *threshold* local (máx. gradiente).

Embora o método local seja preferido para aplicações metrológicas, não há ainda unanimidade sobre o tema. Heinzl [58] e Weiss [46] demonstram que melhores resultados podem ser obtidos por métodos locais. Porém, Tan [57] argumenta que o deslocamento da superfície é mais facilmente corrigido com *threshold* globais.

2.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Os conceitos apresentados neste capítulo podem ser considerados o primeiro passo no processo de caracterização das fontes que influenciam o resultado de uma medição dimensional. Embora não tenha sido dado um maior aprofundamento, devido à natureza deste documento, foi possível ilustrar a complexidade inerente a cada subsistema do tomógrafo e como o usuário pode interagir com estes elementos. As quatro primeiras seções foram dedicadas à apresentação dos componentes usados para a aquisição de dados: fonte de radiação, detector, sistema cinemático de guias e os efeitos da interação do objeto com a radiação. Na seção seguinte é apresentado o conceito matemático utilizado na reconstrução das imagens. Os conceitos apresentados nestas cinco primeiras seções são comuns a todas as aplicações de CT. O diferencial para aplicações relacionadas a metrologia dimensional é

apresentado na última seção, onde se destaca o processo de extração da superfície. Assim, todo o processo de aquisição de dados brutos é descrito, orientando o entendimento dos parâmetros e fenômenos que podem influenciar a qualidade da imagem. O desafio consiste em relacionar a qualidade da imagem obtida com o desempenho metrológico. O estado da arte da CT no ambiente da metrologia dimensional industrial é apresentado no próximo capítulo.

3 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA PARA METROLOGIA DIMENSIONAL

Apenas com os avanços tecnológicos recentes em processamento computacional para reconstrução das imagens, resolução de detectores e geradores de raios X com ponto focal suficientemente pequenos é que se tornou possível a utilização da tomografia computadorizada em metrologia dimensional. Mesmo assim, ainda há a necessidade de se adequar índices para avaliação da qualidade da imagem, questões referentes à rastreabilidade ainda não estão suficientemente resolvidas, e é significativa a influência dos usuários nos resultados em função das dificuldades na seleção dos parâmetros de configuração para medições. Estes temas são abordados neste capítulo onde é apresentado o estado da arte desta tecnologia em aplicações metrológicas.

3.1 APLICAÇÕES

A aplicação industrial da CT foi, por muito tempo, predominantemente voltada a análises qualitativas de ensaios não-destrutivos. No entanto, desde o final da década de 80 já se vislumbrava a hipótese de se obter informações quantitativas sobre a geometria do interior dos objetos. Na época, havia um grande esforço voltado para a análise tomográfica de pás de turbinas que, quando em operação, atingiam elevados valores de temperatura, necessitando de um engenhoso sistema de refrigeração. Através da CT, começou-se a medir o tamanho dos canais de resfriamento, a espessura das paredes entre os canais e os limites da peça [7].

Contudo, passaram-se quase duas décadas até que a CT começasse a ser considerada uma tecnologia com elevado potencial em aplicações na metrologia dimensional, sobretudo pela abordagem holística que é dada ao processo de inspeção de uma peça [15, 25]. Um importante marco ocorreu na *Control Fair* de 2005, na Alemanha, quando a empresa Werth exibiu um tomógrafo dedicado a aplicações metrológicas [59]. Os avanços tecnológicos dos últimos anos contribuíram significativamente para que os sistemas de CT passassem a ser aplicados em análises dimensionais. Foram adotadas bases rígidas de granito, mancais aerostáticos, eixos lineares e mesas rotativas compatíveis com o que se encontra em CMM tradicionais [25]. Além

disso, os algoritmos de reconstrução vêm sendo otimizados e os constantes desenvolvimentos na tecnologia de tubos de raios X e detectores prometem melhorar a resolução e o contraste das imagens [60]. O processo de medição ocorre automaticamente, o que qualifica esta tecnologia para o controle de processo [61]. Porém, o tempo para aquisição das imagens, normalmente entre 30 e 90 minutos, pode ser uma limitação para uma aplicação mais ampla.

Encontram-se hoje no mercado desde sistemas de grande porte, tendo aceleradores lineares como fonte de radiação, capazes de penetrar facilmente 300 mm de aço, até sistemas portáteis, apenas capazes de medir peças plásticas menores que 30 mm [62-65]. Atualmente, os sistemas considerados dedicados às aplicações metrológicas são classificados como micro-CT e nano-CT [62], e diferem entre si tanto em HW quanto no tipo de SW implementado. Em alguns casos são sistemas dedicados a aplicações específicas (Figura 13). Normalmente, são sistemas que possuem tubos com capacidade de emitir raios X com espectro energético entre 50 e 225 keV, apresentando um ponto focal que varia de 0,5 a 250 μm , permitindo-se obter uma resolução que viabiliza a aplicação dimensional em diversos ramos da indústria.

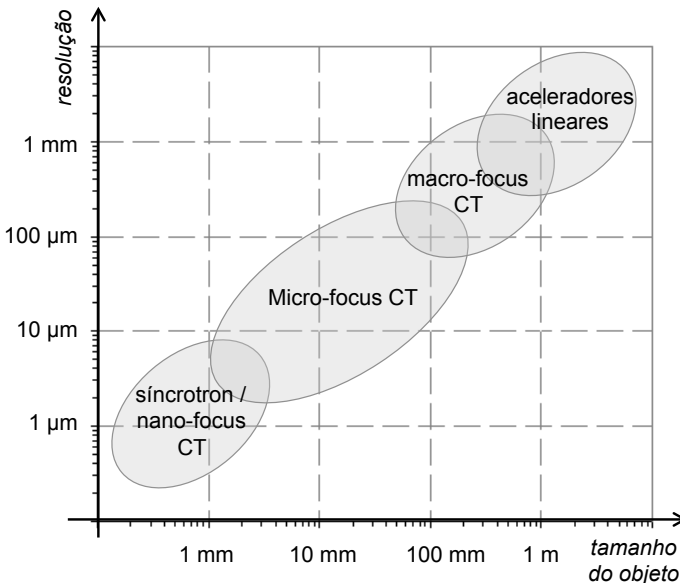


Figura 13. Resolução de diferentes tipos de tomógrafos. Fonte: adaptado de [62].

Um campo de aplicação que pode ser destacado, em se tratando de medições dimensionais por CT, é o de peças plásticas de precisão, feitas com os chamados “plásticos de engenharia” (polioximetileno, poliamida, policarbonato, acetal, polifenilenoóxido, poliésteres termoplásticos etc.), em função da complexidade geométrica, da baixa densidade do material, da baixa rigidez e do processo de fabricação [66]. Estes tipos de peças são frequentemente utilizadas pela indústria automotiva, de bens de consumo (eletrodomésticos e de eletrônicos) e produzidas pelo processo de injeção em moldes. Por esta razão, algumas características destas peças não são acessíveis por métodos de medição ópticos ou por contato, havendo em alguns casos a necessidade de se cortar a peça para realizar a medição. Isto torna CT uma solução especialmente atraente para este tipo de peças [15]. Além disso, a CT é um processo de medição sem contato, adequado para medir superfícies deformáveis, caso comum para este tipo de peças.

A análise dimensional de estrutura interna não se restringe apenas a peças plásticas. A CT vem sendo aplicada também na inspeção de bicos de injeção [67, 68] e encapsulamento de bobinas pelo processo de injeção de plásticos [69]. Pequenos fundidos em material de menor densidade como ligas de alumínio e magnésio [70, 71], ou mesmo pequenas peças de aço, como pequenas pás de turbina [21], também fazem parte do escopo de aplicação da CT.

Em geral, a CT pode ser considerada uma boa alternativa para medição de produtos com formas livres, desde que sejam peças de pequeno porte, uma vez que não faz muita diferença se a peça a ser medida possui elementos geométricos bem definidos, como planos, cilindros, esferas etc. ou geometria complexa. Peças com formas livres são cada vez mais comuns de se encontrar na indústria. A grande variedade deste tipo de peças gera demandas metrológicas que variam de acordo com a aplicação, com o material, o processo de fabricação, o tamanho etc. Como a medição deste tipo de peça normalmente é caracterizada pela comparação de dados com modelos CAD, é fundamental a obtenção de um grande número de pontos, distribuídos ao longo da superfície da peça.

Savio, De Chiffre e Schmitt [63] apresentam uma comparação entre uma série de SM existentes para o controle da qualidade deste tipo de característica (Tabela 2), levando em consideração alguns requisitos metrológicos importantes. A CT é apresentada como um método adequado para medição de pequenas e micro peças, sendo devidamente destacada pela capacidade de medir detalhes que são, algumas vezes, inacessíveis quando utilizados outros métodos. Porém, assim como

alguns métodos ópticos, é apontada a desvantagem de não haver ainda a rastreabilidade completamente definida de suas medições.

Tabela 2. Comparação entre sistemas de medição. Fonte: adaptado de [63].

	laser tracker	comparação direta	CMM contato	CMM óptica	CT raios-x	projeção de franjas	deflectometria/ reflexo de franjas	fotogrametria	topogrametria	topografia de superfície por contato	topografia de superfície óptica	microscopia confocal	microscopia de força atômica
Dimensão da peça													
grande ($10^0 - 10^2$ m)	●	◐	●	●		◐		●	◐				
média ($10^{-1} - 10^0$ m)	●	◐	●	●		◐		●	◐				
pequena ($10^{-2} - 10^{-1}$ m)		●	●	●	●	●	●	●	●	◐	◐	◐	
micro (10^{-3} m)			◐	◐	●	◐	◐		●	●	●	●	◐
Complexidade da forma													
baixa	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
média	◐	◐	●	●	●	◐		◐		◐	◐	◐	◐
alta	◐		◐	◐	●								
Material e superfície													
duro, não sensível	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
deformável	●	◐	◐	●	●	●	●	●	◐	◐	●	●	●
especular	●	●	●		●		●		●	●		◐	●
transparente	●	◐	●		●			●		●		◐	●
opaco	●	●	●	●	●	◐	◐	●	●	●	●	●	●
Rastreabilidade													
	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐	●	●	◐	◐	●

Legenda: ● atende totalmente aos requisitos de medição
 ◐ atende parcialmente aos requisitos de medição

A elevada capacidade para digitalização de peças estende a aplicação de CT para a **engenharia reversa**, que consiste na criação de um modelo de CAD a partir do mapeamento da superfície de uma peça. Certos ramos da indústria, como o automotivo e o de tecnologia médica, têm observado que o uso da CT pode ser vantajoso na redução do tempo de lançamento de novos produtos. Quando aplicada no contexto do “desenvolvimento rápido de produtos” [72-75] a nuvem de pontos obtida do mapeamento de uma peça é posteriormente convertida em uma superfície formada por um arquivo STL, processo necessário para gerar um protótipo rápido. A CT se destaca das técnicas convencionais

de mapeamento, como CMM e *scanners laser*, quanto ao tempo necessário para gerar o arquivo STL e na capacidade de medir a densidade do material e a geometria interna, como canais de refrigeração de blocos de motores fundidos.

3.2 MODELO QUALITATIVO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO POR CT

Ao se considerar a aplicação de sistemas de CT em metrologia dimensional, entende-se que os resultados da medição serão utilizados para a avaliação da conformidade de produtos, ou seja, verificar se uma dada característica de uma peça produzida está em conformidade com os requisitos geométricos, tal como definido pelo projetista. Assim, a cadeia de medição por CT (Figura 14) pode ser apresentada com base nas definições do modelo de casca de acordo com as diretrizes da ISO/TS 17450-1 para especificação geométrica de produtos (GPS) [76, 77]. Neste sentido, a **operação de extração**¹⁸ pode ser considerada determinante para a qualidade dos resultados da medição.

A aquisição das projeções é o primeiro passo da operação de extração. Em seguida é realizada a reconstrução da imagem obtendo-se uma matriz de voxels. Estes passos são característicos de qualquer análise tomográfica, obedecendo aos princípios descritos no capítulo 2. É importante destacar, no entanto, que a escolha dos parâmetros de configuração está associada a estes passos, onde vários fenômenos físicos, transformações matemáticas e limitações de *hardware* acabam por introduzir desvios na superfície extraída. Por exemplo, fenômenos como o ruído quântico, o espalhamento de fótons resultante da interação da radiação com o material e o ruído do detector durante a aquisição de imagem produzem perturbações aleatórias e redução da nitidez nas projeções adquiridas. O número limitado de elementos detectores pode causar *aliasing* nas projeções, o que resulta em padrões de Moiré na matriz de voxel [28].

¹⁸ Não confundir operação de extração no contexto GPS com extração da superfície em CT.

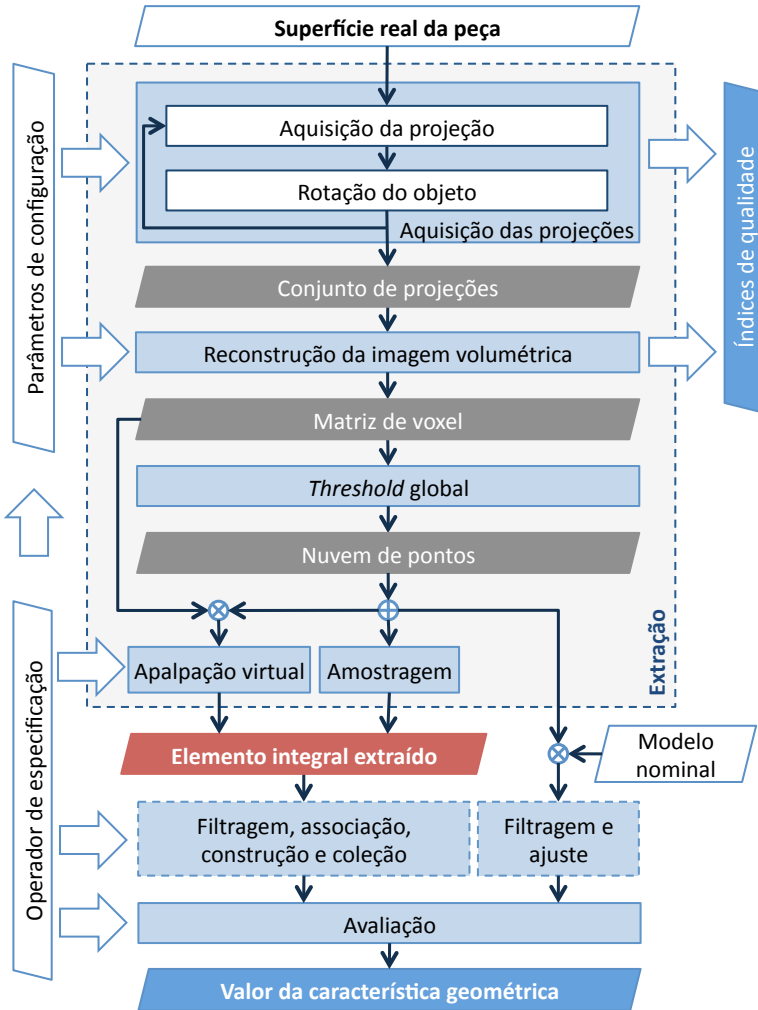


Figura 14. Modelo do fluxo de informação do processo de medição por CT.

Do ponto de vista do usuário, a análise dimensional começa a se caracterizar a partir do processo de extração da superfície cujo resultado é uma nuvem de pontos também chamada de “superfície virtual” (ou modelo de casca virtual). O algoritmo de *threshold* está diretamente relacionado com a exatidão das medições. A partir da nuvem de pontos pode-se fazer uma comparação direta de cada ponto com valores de referência de um modelo nominal, e.g. um arquivo CAD ou analisar

cada característica geométrica individualmente. A análise individual de cada característica pode ser realizada através de uma amostragem direta da nuvem de pontos ou pode-se optar pela reamostragem dos pontos. Neste caso, um passo adicional é necessário para obtenção dos **elementos integrais extraídos**. A amostragem dos pontos que definem estes elementos integrais extraídos utiliza uma estratégia definida pelo metrologista, e é normalmente realizada através da reamostragem de pontos interpolados na superfície virtual utilizando SW dedicado através da chamada "apalpação virtual" [78]. A reamostragem é normalmente obtida através da aplicação de métodos de *threshold* locais. O uso de intervalos de amostragem inadequados na superfície virtual também pode levar a *aliasing*¹⁹ adicional nos elementos integrais extraídos [79].

Os desvios resultantes da operação de extração têm grande influência nos próximos passos da análise dimensional, e podem ser classificados da seguinte forma: dispersão dos pontos extraídos com relação à superfície real e deslocamento médio entre superfície real e virtual. A escolha dos parâmetros de configuração tem influência direta sobre ambos. O **deslocamento médio da superfície** é um desvio sistemático e, portanto, com possibilidade de compensação. Técnicas de utilização de padrões calibrados vem sendo aplicados na correção de erros de escala e avaliação dos valores de *threshold* [80]. Outra abordagem possível é a fusão de dados, seja de dados obtidos com diferentes parâmetros de configuração [81, 82] ou utilizando dados de sensores com melhor exatidão (táteis, ópticos) [83]. A **dispersão dos pontos extraídos**, por outro lado, não pode ser compensada e, portanto, seus efeitos devem ser minimizados por uma seleção adequada de parâmetros de configuração.

Após a operação de extração, as operações de verificação restantes (como **filtragem**, **associação**, **construção**, **coleção** e **avaliação**) devem ser realizadas, a fim de se obter o resultado da análise geométrica de interesse. Estas operações restantes, embora comuns a todos os sistemas de medição dimensional, também estão sujeitas à influência dos usuários. É importante mencionar, no entanto, especialmente no caso da CT, que o uso de alguns operadores de verificação pode reduzir a sensibilidade da avaliação geométrica à dispersão dos pontos extraídos (por exemplo, usando baixas frequências de corte para operações de filtragem ou métodos de mínimos quadrados para operações de associação). No entanto, o uso de operadores de verificação (tarefa de medição) que não atendam os operadores de

¹⁹ Sub-amostragem.

especificação (mensurando definido pelo projetista) devem ser evitados, pois resultam na introdução de incerteza do método [84].

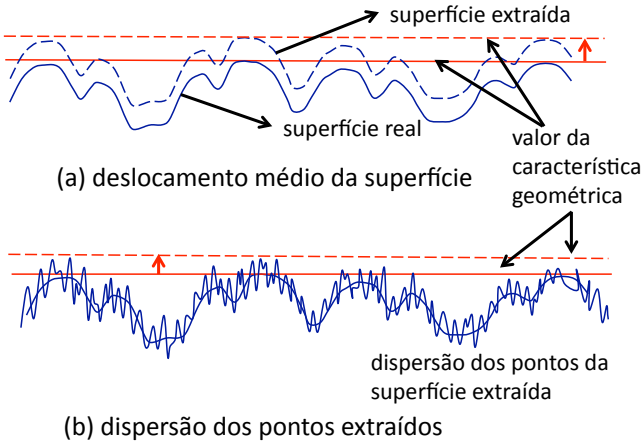


Figura 15. Desvios resultantes do processo de extração.

Assim, fica evidente que as decisões em relação a parâmetros de configuração são de grande importância, uma vez que estão relacionadas à obtenção de uma quantidade aceitável (*i.e.* de acordo com os operadores de especificação) de distorções na característica extraída.

3.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS DADOS OBTIDOS POR CT

A avaliação da qualidade dos dados gerados por CT não pode ser considerado um tema trivial [36]. Uma análise metrológica com resultados que apresentem baixa incerteza depende sobretudo da geração de uma matriz de voxel de qualidade. Existem diversos procedimentos de teste normalizados para avaliar a qualidade das projeções e da matriz de voxel, porém idealizados para aplicações de ensaios não destrutivos (NDT). Não se chegou ainda a um consenso sobre qual, ou quais índices de qualidade devem ser empregados para avaliar uma matriz de voxel utilizada em aplicações de metrologia dimensional.

3.3.1 Índices de qualidade das projeções

Analisando apenas as projeções individualmente é possível estimar o contraste, a relação sinal ruído (SNR) da radiação medida pelo detector, a falta de nitidez da imagem, além de índices de qualidade que dependem de *phantoms*²⁰ específicos [14, 85, 86].

Normalmente os tomógrafos informam a SNR_p e exibem o histograma da projeção, o que permite ao operador estimar facilmente o contraste das projeções C_p .

Relação sinal ruído da projeção (SNR_p) pode ser obtida a partir da radiação detectada sem a presença da peça.

$$SNR_p = \frac{\mu_b}{\sigma_b} \quad (11)$$

sendo μ_b a média dos valores do nível de cinza e σ_b o desvio padrão dos valores dos níveis de cinza.

Já o **contraste da projeção** pode ser definido como [87]:

$$C_p = \frac{Gv_{max} - Gv_{min}}{Gv_{max} + Gv_{min}} \quad (12)$$

com Gv_{max} e Gv_{min} representando os valores de níveis de cinza máximo e mínimo. O denominador representa o dobro da média dos níveis de cinza.

3.3.2 Índices de qualidade da matriz de voxel

Após o processo de reconstrução, o **contraste** da matriz de voxel C_{vx} pode ser definido como a diferença entre o coeficiente de atenuação linear resultante da reconstrução do objeto e o coeficiente de atenuação do meio onde o objeto se encontra (normalmente o ar).

$$C_{vx} = |\mu_{peça} - \mu_{meio}| \quad (13)$$

com μ_{meio} a média dos valores do nível de cinza no meio em que o objeto se encontra, normalmente o ar e $\mu_{peça}$ a média dos valores do nível de cinza na peça.

²⁰ Termo normalmente usado para peças de teste de referência em CT.

A **sensibilidade ao contraste** é outro índice normalizado para qualificação de dados de CT em aplicações de NDT. Esta medida avalia a capacidade de se detectar a diferença entre duas características de um objeto numa imagem e pode ser quantificada através da **função para discriminação do contraste** (CDF) [37]. Esta função é obtida através da divisão do centro da imagem de um disco desenvolvido para esta finalidade (1/3 do diâmetro total do disco), em um conjunto de elementos na forma de ladrilhos (Figura 16). Para cada elemento são calculados a média, o desvio padrão e o desvio padrão das médias para os valores de cinza obtidos. A CDF corresponde a três vezes o valor da porcentagem do desvio padrão das médias em relação à média das atenuações obtidas em cada elemento [37].

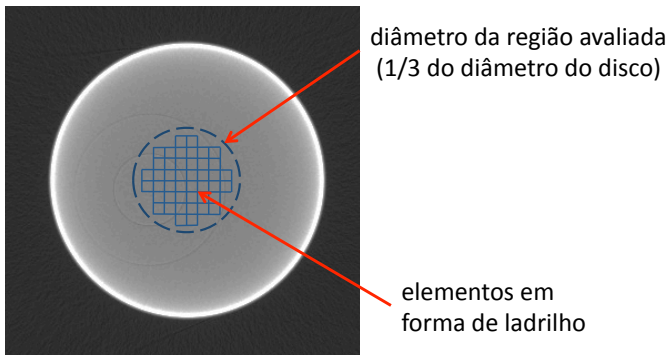


Figura 16. Elementos utilizados para o cálculo da CDF.

O **ruído** é evidenciado por causar uma variação aleatória nos valores dos tons de cinza da matriz de voxel de modo que um material, de fato homogêneo, não seja representado por um único valor de cinza. O ruído é causado pelo processo de geração da radiação, pela interação da radiação com a peça, pela eletrônica do detector e pelos efeitos da dispersão da radiação. A presença de ruído na imagem dificulta o processo de extração da superfície fazendo com que o coeficiente de atenuação do objeto se sobreponha ao do meio onde este se encontra. A SNR também é utilizada em imagens reconstruídas. A **relação sinal ruído da matriz de voxel** (SNR_{Vx}) pode ser expressa da seguinte forma.

$$SNR_{Vx} = \frac{\mu_{peça}}{\sigma_{peça}} \quad (14)$$

sendo $\mu_{peça}$ a média dos valores do nível de cinza na peça e $\sigma_{peça}$ o desvio padrão destes valores em um volume equivalente a 100 pixels.

O conceito de **resolução** é definido pela ISO 15708-1 [38] através da função de transferência de modulação (MTF²¹). A MTF determina a resposta em frequência relativa de um sistema de geração de imagens. Em geral, estruturas de baixa frequência são estruturas grandes reproduzidas com mais fidelidade do que estruturas de alta frequência. A resolução é normalmente definida como sendo a frequência espacial a uma dada porcentagem (e.g. cerca de 10% a 30%) do máximo valor da MTF. Inicialmente é obtida a função de resposta da borda (ERF²²) de um cilindro padrão (Figura 17b). Podem ser utilizados diversos perfis, desde que não se sobreponham uns aos outros (Figura 17a). Em seguida, a função de dispersão da linha (LSF²³) é calculada através da derivada discreta da ERF (Figura 17c). A transformada discreta de Fourier (DFT) da LSF é a MTF (Figura 17d). Por convenção, o maior valor do eixo das ordenadas da MTF é a unidade e o domínio da frequência é expresso em pares de linhas²⁴ por milímetro (lp/mm).

O **tamanho do voxel** é definido na seção 2.4 pela ampliação. É importante destacar que, em função da variedade de fatores que afetam a resolução, o tamanho do voxel não pode ser definido como sendo a resolução. No entanto, está diretamente relacionado com a escala do tomógrafo. Com a medição de medidas materializadas adequadas, o tamanho do voxel pode ser corrigido em cada dimensão, separadamente [88].

É importante destacar também que o conceito de resolução no contexto da metrologia dimensional apresenta uma abordagem distinta em relação ao conceito utilizado em aplicações de NDT. Dessa maneira, dois tipos diferentes de resolução podem ser distinguidos: resolução estrutural e resolução espacial²⁵ [89, 90].

²¹ Tradução do inglês para “*Modulation Transfer Function*”

²² Tradução do inglês para “*Edge Response Function*”

²³ Tradução do inglês para “*Line Spread Function*”

²⁴ Tradução do inglês para “*line pairs*”. Cada par de linhas consiste em uma linha preta e uma linha branca usadas em padrões de teste para avaliar a resolução em processamento de imagens.

²⁵ A fim de evitar ambiguidades, o termo “resolução espacial” encontrado nas normas para NDT [37, 38, 86] corresponde ao termo “resolução estrutural da escala de cinzas dos voxel” da diretriz VD/VDE 2617-6.2 ou VDI/VDE 2630-1.3 [89], e são caracterizado pela MTF. O termo “resolução estrutural” empregado no contexto da metrologia dimensional não deve ser confundido com o termo “resolução estrutural da escala de cinzas dos voxel”.

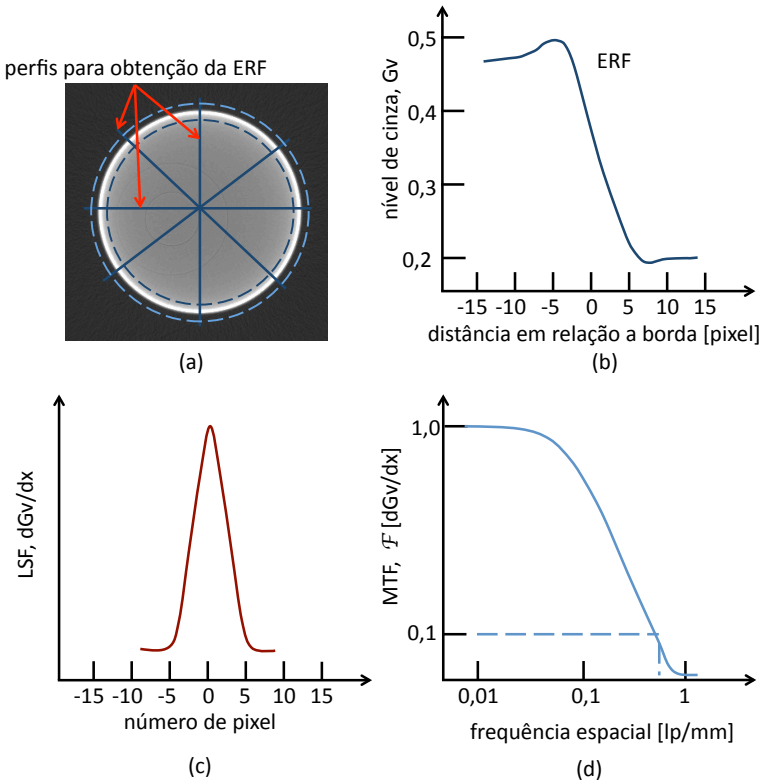


Figura 17. (a) imagem da seção transversal do cilindro; (b) função de resposta da borda; (c) função de dispersão da linha; (d) função de transferência modular.

A **resolução estrutural** para medições dimensionais descreve a menor estrutura que pode ser detectada na matriz de voxel dentro dos limites de erro especificados (*e.g.* MPE^{26}). Ou seja, consiste em determinar o tamanho e a forma de uma estrutura. Uma proposta para avaliar este tipo de especificação é determinar o menor tamanho de uma esfera que o sistema é capaz de detectar dentro de um determinado limite para o MPE. Entre os fatores que influenciam a resolução estrutural estão: o tubo de raios X (*e.g.* através do tamanho focal); uso de pré-filtro da radiação; amplificação; rede (*grid*) de detectores; quantidade de projeções; e o *threshold*.

²⁶ Erro máximo admissível.

Já a **resolução espacial** descreve o menor deslocamento mensurável na direção da medição (x , y e z). É equivalente a resolução da escala de um SM. Depende principalmente do tamanho do voxel, mas os métodos de *threshold* disponíveis permitem a obtenção de resultados com algoritmos significativos cuja ordem de grandeza é inferior ao tamanho do próprio voxel. Os fatores que influenciam a resolução espacial são: a amplificação; a quantização do conversor A/D; o ruído; e os algoritmos computacionais.

3.3.3 Presença de artefatos na imagem

Outro aspecto importante na qualidade dos dados gerados por CT é a presença de artefatos na imagem. Os artefatos são características que podem ser sistematicamente reproduzidas e que não fazem parte das características físicas do objeto examinado. Artefatos ocorrem em imagens obtidas através de qualquer tipo de sistema óptico. Em CT muitos artefatos são inerentes ao processo físico e matemático da geração da imagem (*e.g.* endurecimento do feixe, redução da nitidez devido a dispersão da radiação, estruturas em formas de anéis, os artefato de Feldkamp, entre outros.). Melhorias em HW e SW podem reduzir ou até eliminar alguns destes artefatos. Não existem, no entanto, ainda, características padronizadas para quantificar o efeito dos artefatos nas imagens, mas seus efeitos atuam diretamente na variação de valores locais do contraste e no nível de ruído, o que faz com que não possam ser negligenciados.

3.3.4 Índices de qualidade para metrologia dimensional

Os índices apresentados nesta seção, embora idealizados para aplicações de NDT, podem ser considerados como uma primeira alternativa para avaliar a qualidade metrológica dos dados obtidos por CT. Neste sentido, Hiller *et al* [91] apresentaram um estudo onde se defende a idéia de que as influências físicas inerentes ao sistema de tomografia podem ser investigadas através dos índices de qualidade da imagem. Assim, através de simulações por computador pode-se examinar a influência da qualidade da imagem reconstruída nos resultados de medições dimensionais.

Mais recentemente, uma ferramenta computacional de comparação baseada na visualização simultânea de múltiplas matrizes de voxel foi proposta por Malik *et al* [92] com o objetivo de comparar os efeitos da seleção de diferentes conjuntos de parâmetros de configuração com um valor de referência (Figura 18.). A região

analisada da imagem é segmentada em hexágonos, o valor de referência é apresentado em círculos localizados nos centros dos hexágonos, e as configurações avaliadas são apresentadas ao redor do círculo e quantificadas por um mapa de cores.

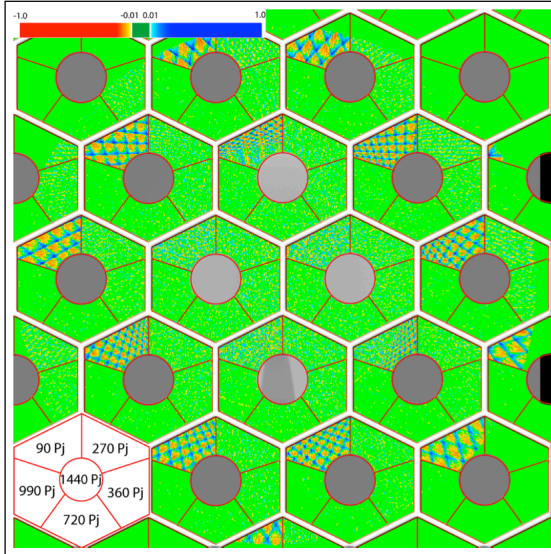


Figura 18. Sistema de avaliação de múltiplas imagens. Fonte: [92].

Apesar do fato dos índices apresentados nesta seção serem capazes de fornecer informações sobre a qualidade de dados gerados por CT, estes índices não cobrem toda a operação de extração. Consequentemente, há uma perda na capacidade de se quantificar o impacto dos desvios inerentes à operação de extração no resultado das medições. Neste sentido, uma abordagem natural seria atuar diretamente no valor das características geométricas. Este é o tema abordado na próxima seção.

3.4 RASTREABILIDADE

“A rastreabilidade é a propriedade do resultado de uma medição estar relacionado com um valor de referência estabelecido através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas” [93].

Obter rastreabilidade em medições por coordenadas sempre foi um desafio. Sobretudo em medições com CT, o problema da rastreabilidade está diretamente relacionado ao fato de existirem muitos fatores que influenciam as medições e na forma complexa com que estes fatores afetam a superfície extraída. Em todas as etapas de fluxo de dados, operações não triviais são executadas, induzindo a possível obtenção de imagens com qualidade inferior. Por isso, como é comum em qualquer sistema de medição por coordenadas, o operador tem uma importante contribuição no resultado da medição.

3.4.1 Normas e diretrizes

A comercialização de CT como sistemas de medição por coordenadas gera a necessidade de normas mais específicas e detalhadas. Estas normas são importantes para uniformizar a terminologia além da definição dos parâmetros característicos que são empregados nos ensaios de aceitação e verificação, dos tipos de medidas materializadas que devem ser utilizados e dos procedimentos em geral.

Existe apenas uma norma ISO sobre aplicação da CT em ambiente industrial. A **ISO 15708** é uma especificação técnica para NDT que utiliza métodos que emitem radiação penetrante. Esta norma está dividida em duas partes: (1) princípios [38]; e (2) técnicas para realização de ensaios [94].

Estes documentos normativos destinados à aplicação NDT apresentam algumas características que acabam sendo aproveitadas para tomada de decisões importantes como testes de aceitação ou comparação entre sistemas. No entanto, do ponto de vista metrológico, existem alguns pré-requisitos que não se pode deixar de considerar [25]:

- As características de um SM devem ser definidas de tal forma que todos os principais fatores de influência sejam considerados;
- Os testes devem ser facilmente executáveis pelos usuários e não devem ser muito demorados;

- Os padrões de referência devem estar disponíveis a preço viável. Além disso, devem ser facilmente calibráveis.

As normas para CT industrial são ainda muito genéricas a este respeito. A VDI iniciou em 2004 o conjunto de diretrizes técnicas **VDI/VDE 2630** para medições dimensionais com CT. No momento, apenas a **parte 1.1** [95] com os termos básicos está finalizada, mas algumas minutas das demais diretrizes estão disponíveis. A **parte 1.4** [96] compara diferentes técnicas de medição, incluindo CT, enquanto a **parte 1.2** [97] trata dos fatores de influência, apresentando uma grande tabela onde os fatores de influência de cada componente do sistema são descritos, destacando o impacto no resultado da medição, caso não seja corrigido. Além disso, descreve os diferentes tipos de tarefas de medição em que a CT pode ser aplicada.

Os testes dimensionais para medições com CT deverão seguir o mesmo princípio da **ISO 10360** para CMM. A **parte 1.3** [89] trata justamente dos parâmetros característicos para medição dimensional com CT. Nela, os testes para erro de “apalpação” e para erro de comprimentos são baseados nos testes da **VDI/VDE 2617-6.2** [90], que é a diretriz para a aplicação da ISO 10360 em medições por coordenadas através de métodos ópticos.

3.4.2 Avaliação metrológica

Do mesmo modo como ocorre com as demais CMM, devido à grande versatilidade destes sistemas de medição e à complexidade na caracterização dos erros sistemáticos, é também impraticável cobrir todas as possíveis tarefas de medição com CT através de um processo de calibração. Pode-se, dessa forma, associar o termo **calibração** a ensaios onde os erros sistemáticos são acessados e correções físicas ou ajustes no CAA da máquina são efetuados. Estes ensaios englobam também correções na relação pixel/milímetro.

A verificação dos tomógrafos pode ser realizada de diferentes formas [25]:

- Testes específicos para **verificação de desempenho**: são utilizados para avaliar apenas características específicas do sistema, ao invés de avaliar o sistema como um todo. A vantagem é que procedimentos bem definidos e validados podem ser especificados em normas e diretrizes.
- Testes específicos em **peças não calibradas**: são comparadas as medições, feitas em uma mesma peça, obtidas pelo sistema que se deseja avaliar com as medições realizadas por este

sistema, logo após ter passado por um teste de aceitação. A vantagem é que podem ser usadas as próprias peças de produção. As desvantagens são a ausência de informações sobre os desvios absolutos do processo de medição e a instabilidade geométrica das peças, sobretudo pelo tipo de material normalmente inspecionado em CT (alumínio e plásticos).

- **Testes específicos em peças padrão calibradas:** são comparadas as medições obtidas pelo tomógrafo que se deseja avaliar com as características calibradas em CMM (normalmente sensores por contato) por um laboratório acreditado. A vantagem é a obtenção dos erros de medição. A desvantagem é que, normalmente, apenas alguns pontos da peça são calibrados e em peças com baixa rigidez pode haver deformação local por causa da força de apalpação. Além disso, características do interior de algumas peças são difíceis de serem acessadas na CMM.
- **Verificações periódicas (*interim checks*):** são comparados os resultados da medição de um padrão corporificado com seus valores calibrados. São testes semelhantes aos testes específicos, porém destinados a avaliar a estabilidade do sistema ao longo do tempo.

Medidas materializadas já vêm sendo desenvolvidas, sobretudo com o objetivo de serem utilizadas em testes de aceitação e para verificações periódicas. Estes padrões são derivados e adaptados de procedimentos e padrões cujo conceito já está consolidado em CMM tradicionais (Figura 19 a, b, c). Os elementos esféricos ou em formato de calota são os mais recomendados para avaliar os erros de posicionamento, pois, o cálculo do centro das esferas sofre menos influências dos erros comuns ao processo de extração da superfície. No entanto, justamente por este motivo, não se pode deixar de considerar também, o uso de objetos específicos – com variação de espessura, densidade e com superfícies internas e externas – para detectar influências causadas por *beam hardenig* e deslocamento da superfície extraída (Figura 19 d, e).

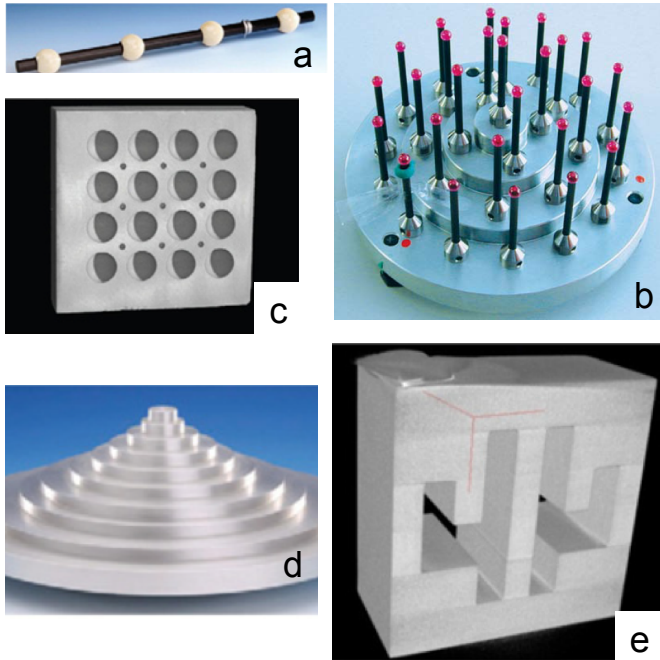


Figura 19. Medidas materializadas para avaliação metrológica de tomógrafos.
Fonte: [80, 98, 99].

3.4.3 Incerteza de medição

A análise da incerteza das medições com CT é específica para cada tarefa de medição. Expressar a incerteza de medição conforme recomendado pelo GUM [100] necessita de um modelo que contemple os fatores que exercem influência significativa sobre o mensurando. Outra alternativa seria o suplemento numérico [101] do GUM através do uso de simulações baseadas no método de Monte Carlo para expressão da incerteza. Da mesma forma que no GUM tradicional, este método também exige um modelo onde se conheçam os fatores de influência e sua relação funcional com o mensurando. Ainda são necessários mais estudos para que as influências do resultado sejam quantitativamente apresentadas [102]. Devido às complexidades mencionadas, não existe um modelo único que permita avaliar incertezas para qualquer tipo de medição em CT.

A incerteza das medições dimensionais com CT podem ser estimadas de acordo com a ISO/TS 15530-3 [103], um conceito já bem

difundido na metrologia por coordenadas, voltado para medições industriais. Nesta especificação técnica, pelo menos uma peça calibrada deve ser usada. A dificuldade de usar uma única peça está justamente no conhecimento insuficiente para estimar as influências causadas pela variação entre peças. A alternativa que pode ser considerada viável no atual estágio é a utilização de um método experimental com múltiplas peças [104, 105]. Quando a informação sobre os fatores que influenciam a incerteza de medição é insuficiente, o processo de medição pode ser modelado como uma caixa preta [106]. Christoph e Rauh [83] por sua vez, consideram que a rastreabilidade também pode ser assegurada quando a CT é utilizada em CMM com múltiplos sensores.

Apesar das dificuldades, diversos estudos [59] têm demonstrado que é possível obter resultados de medição com intervalos de incerteza inferiores ao tamanho do voxel. A fim de mapear a qualidade e a consistência destas estimativas de incerteza, recentemente Carmignato [107] publicou os resultados preliminares da primeira intercomparação laboratorial internacional, indicando que ainda há muito a ser feito nesta área.

3.5 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO

A seleção dos parâmetros de configuração está relacionada diretamente à incerteza de medição. Por esta razão estudos sobre os efeitos da escolha dos parâmetros de configuração se intensificaram nos últimos três anos. Simultaneamente, diversos centros de pesquisa têm se dedicado a simplificar o processo de seleção destes parâmetros.

3.5.1 Estudos acerca da variação dos parâmetros de configuração

Um dos primeiros estudos que tratam diretamente da influência dos parâmetros de configuração definidos pelo operador foi apresentado por Weckenmann e Krämer [108]. Neste estudo foram avaliados três parâmetros de configuração (orientação, ampliação e número de projeções) e apresentados os fatores que exerceram maior influência. Os demais parâmetros foram mantidos com valores constantes. O mensurado foi a distância entre as duas esferas de uma barra de esferas.

Schmitt e Niggemann [109] utilizaram o método experimental para avaliar o efeito da variação dos parâmetros de configuração na incerteza da medição de 12 características de uma peça de alumínio. Baseado na metodologia DOE, foram variados 5 parâmetros em 2 níveis

e 5 repetições resultando em 16 conjuntos de parâmetros no total. Foi observado que o melhor conjunto de parâmetros para um elemento não é necessariamente o melhor para toda a peça. Esta observação é válida tanto para tendência quanto para repetitividade. A orientação do elemento na peça apresentou variação significativa. Outra observação importante é a da tendência como principal fonte de contribuição para incerteza de medição.

Kiekens *et al* [99, 110, 111] propõem a utilização de uma peça de testes com 8 superfícies paralelas (Figura 19 e) para investigação dos efeitos da seleção de diferentes conjuntos de parâmetros de configuração no processo de extração de superfície. O objetivo é caracterizar o deslocamento da superfície através da comparação entre superfícies cuja normal tenha o mesmo sentido e de superfícies cujas normais tenham sentidos opostos. O estudo é realizado para diferentes espessuras de penetração da radiação.

Nardelli *et al* [112] apresentam um estudo de reprodutibilidade entre quatro usuários, utilizando três cilindros escalonados de polioximetileno (POM) como peças de teste. O resultado mostrou que o efeito da seleção dos parâmetros é significativo em relação à repetitividade do processo de medição. A diferença entre características geométricas também se mostrou relevante.

Reiter *et al* [113] apresentam o resultado da comparação de 22 conjuntos de parâmetros de configuração diferentes. A peça utilizada foi um cilindro escalonado de alumínio e os resultados obtidos com os cilindros externos indicaram variações significativas entre medições que utilizam pré-filtro e medições que não utilizam. No entanto o mesmo comportamento não foi observado nos resultados obtidos com os cilindros internos.

Estes estudos justificam os esforços que vêm sendo empregados para facilitar e assegurar que parâmetros de configuração sejam adequadamente selecionados.

3.5.2 Modelagem computacional

A simulação do processo de aquisição de imagens por CT é uma técnica que vem sendo desenvolvida em aplicações de NDT para ajustar a sensibilidade do tomógrafo na detecção de falhas e de outras heterogeneidades. Em aplicações metrológicas, esta abordagem pode ser vista como uma alternativa para análise do desempenho metrológico destes sistemas e para suporte na escolha de parâmetros de configuração.

Estão sendo desenvolvidos estudos para que os simuladores de CT aprimorem suas capacidades quantitativas. Um exemplo é o modelo desenvolvido pelo EMPA²⁷ [114], baseado no algoritmo GEANT4 [115], que utiliza o método de Monte Carlo para simular sistemas com feixes cônicos de raios X. O modelo foi utilizado para estudar a variação do efeito da dispersão dos feixes em relação ao tamanho da peça a ser medida.

Outro exemplo é o SW aRTist [116, 117], desenvolvido pelo BAM²⁸, cujo modelo de simulação é dividido em três partes: fonte de radiação; interação radiação-material; e processamento de imagem. Com o auxílio deste simulador foi possível caracterizar pela primeira vez a influência do ruído e dos artefatos circulares e de *beam hardening* na medição de características geométricas específicas [102]. Existe uma grande expectativa de se poder corrigir os desvios sistemáticos de uma medição com CT a partir da simulação com o modelo CAD da peça.

Pesquisadores do instituto Fraunhofer EZRT²⁹ também acreditam que a simulação das projeções de raios X é um caminho viável para se estimar a incerteza das medições com CT. Para isso desenvolveram a ferramenta de simulação Scorpius Xlab. Foram publicados resultados da investigação de alguns fatores de influência, como efeito da pré-filtragem, do alinhamento dos eixos e guias, da máxima rotação detectável e o tempo de exposição do detector [118, 119].

A Universidade de Ciências Aplicadas da Alta Áustria (FH-OOE) [120] apresenta uma ferramenta de simulação para sistemas de CT para dar suporte ao usuário com o intuito de minimizar artefatos usando parâmetros de medição otimizados. O sistema baseia-se nos índices de qualidade apresentados por Malik *et al* [120] e tem como objetivo melhorar a precisão das medições dimensionais.

Através de aplicativos que utilizam modelos CAD para simular o funcionamento de um tomógrafo, é possível obter um melhor entendimento do processo de medição, auxiliando o usuário na escolha dos parâmetros de um melhor ajuste antes mesmo da primeira medição ser realizada. Outra vantagem das simulações está no desenvolvimento de novos equipamentos. No entanto, atualmente os modelos de CT ainda não são completos o bastante no que diz respeito a fatores de influência dos resultados de medições dimensionais. Além disso, estes modelos

²⁷ Laboratório Federal para Pesquisa e Testes em Materiais na Suíça.

²⁸ Instituto federal para pesquisa e teste de materiais na Alemanha.

²⁹ Centro de desenvolvimento de tecnologia por raios-x.

necessitam passar por uma validação de desempenho, sobretudo para casos reais [121].

3.6 DISCUSSÃO DO CAPÍTULO

Conforme apresentado neste capítulo, no estágio tecnológico em que se encontra, a CT começa a atrair atenção para aplicações como sistema de medição dimensional. Os institutos de metrologia e as organizações normativas já começaram a se dedicar ao tema, a fim de facilitar as relações comerciais. Estão sendo desenvolvidas normas e procedimentos de verificação para que a CT atinja o mesmo nível de confiabilidade em que as CMM tradicionais se encontram hoje. No entanto, mesmo com todos os avanços obtidos nos últimos anos, é necessário ainda um grande esforço para a melhoria da exatidão das medições com CT.

A influência do usuário na qualidade dos resultados também começa ser relevada. Publicações recentes justificam (§3.5.1) a necessidade de se explorar este tema. Afinal, é função do usuário escolher os parâmetros de configuração para cada tarefa de medição. Embora existam algumas iniciativas, *e.g.* GEANT4, aRTist e Scorpius Xlab, que estão voltadas para auxiliar o usuário na definição destes parâmetros, uma validação efetiva para casos reais ainda é esperada.

A definição de um critério de qualidade é um aspecto fundamental para a comparabilidade dos resultados por CT. Uma das principais dificuldades encontrada no desenvolvimento deste trabalho é justamente a identificação de índices de qualidade adequados para avaliar a seleção dos parâmetros de configuração para aplicações metrológicas. A princípio pode-se considerar que os índices usados em NDT também sejam válidos, assumindo-se que uma matriz de voxel de qualidade para NDT resulta também em um processo de extração da superfície de qualidade. Porém, como visto na §3.3, estes índices não cobrem toda a operação de extração.

Nesse sentido, uma abordagem natural do ponto de vista metrológico é a avaliação de características específicas em elementos geométricos bem definidos (círculo, cilindro, planos, esferas, *etc.*). Este é o caso da abordagem convencional para avaliar um sistema de medição por coordenadas, apresentado na ISO 10360.

Contudo, as operações que sucedem a operação de extração reduzem sistematicamente a informação originalmente contida no

elemento integral extraído, resultando normalmente em um valor de diâmetro ou de uma distância cartesiana.

A análise de incerteza da medição por CT pode ser considerada o mais robusto e reconhecido índice de qualidade. No entanto, é uma abordagem com significativas limitações práticas. Em função da complexidade do processo de medição, uma avaliação tradicional seguindo o GUM ainda não foi validada. A alternativa que vem sendo utilizada é o uso de uma abordagem experimental (conforme ISO 15530-3), onde o processo de medição por CT é tratado como uma caixa preta. O problema é que este tipo de abordagem demanda muito tempo para realização de experimentos.

Diante deste contexto, no próximo capítulo é apresentada a proposta de tese para abordar estas dificuldades a fim de se atingir o objetivo de sistematização do processo de seleção dos parâmetros de configuração de forma a obter resultados adequados em termos da incerteza e o tempo de medição, minimizando esforço experimental.

4 OBJETIVOS

Devido à complexidade inerente a cada etapa do processo de medição dimensional com CT, o escopo deste trabalho se restringe ao processo da preparação da medição e de seleção dos parâmetros de configuração. Esta restrição é justificável já que a intenção é aprimorar a exatidão da medição através da redução da influência do operador no uso do tomógrafo. Entende-se que, durante o processo de planejamento da medição, a contribuição do operador é intensa e, devido à quantidade de variáveis envolvidas este não pode ser considerado um processo trivial. O operador deve ser capaz de relacionar as potencialidades e as limitações do tomógrafo, às influências ambientais, à peça e aos requisitos metrológicos para, então, escolher os parâmetros de medição que o levem a obter uma matriz de voxel que garanta uma medição dimensional de qualidade.

No entanto, os operadores que atuam na indústria não estão familiarizados com os princípios físicos do tomógrafo e não têm tempo para adquirir conhecimento empírico, dificultando ainda mais a definição dos parâmetros de medição. Esta situação acaba exigindo um operador especialista e pode resultar em um processo iterativo. O objetivo desta pesquisa é justamente melhorar o processo de definição dos parâmetros de medição do tomógrafo, reduzindo dessa forma a perda de tempo no processo de planejamento e a execução de medições desnecessárias. Além disso, espera-se melhorar a confiabilidade e reduzir a incerteza dos resultados das medições com CT.

De uma maneira mais específica espera-se demonstrar com esta pesquisa:

- Que é possível sistematizar o processo de seleção dos parâmetros de configuração.
- Que para alguns dos parâmetros podem ser estabelecidas regras analíticas, enquanto que para outros deve ser gerada uma base de conhecimento empírico.
- Que como critério para selecionar a configuração mais adequada, pode ser utilizada a dispersão do erro dos pontos da superfície extraída.

Desta forma, acredita-se que com a sistematização do conhecimento adquirido ao longo da aplicação da CT, operadores com menos experiência, conhecimento e tempo sejam também capazes de

obter resultados robustos para medições com CT, aprender sobre o processo e se tornarem também especialistas.

Os conhecimentos teóricos, adquiridos através da revisão bibliográfica e dos resultados publicados por outras instituições, servirão como base para definição de experimentos cuja finalidade é quantificar a relação entre os fatores de influência e parâmetros de controle. No capítulo 5 é apresentado o método de pesquisa utilizado para geração de conhecimento sobre o processo de medição por CT. Também é apresentada a proposta de um critério quantitativo para seleção dos parâmetros de configuração.

No capítulo 6 os resultados experimentais são apresentados. O capítulo é dividido em duas partes. Na primeira, o desempenho do índice de dispersão é comparado com o desempenho de outros índices de qualidade tradicionalmente usados para qualificar varreduras por CT. Na segunda, os critérios para seleção dos parâmetros de configuração são propostos, acompanhados dos resultados experimentais que ilustram os respectivos critérios.

No capítulo 7 são apresentados os resultados da aplicação da sistemática proposta no capítulo 6 em peças obtidas de dois ramos distintos da indústria.

Por fim, no capítulo 8 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

5 MÉTODOS E MATERIAIS DE PESQUISA

Este capítulo apresenta o procedimento utilizado nesta pesquisa para gerar conhecimento sobre o processo de medição por CT, a fim de se propor recomendações e sistematizar o processo de seleção dos parâmetros de configuração. A geração e sistematização deste conhecimento dependerá do resultado de um conjunto de experimentos executados com base na metodologia conhecida como “planejamento de experimentos (DOE)” [122].

O procedimento proposto é resumido abaixo:

- ***Escolha das variáveis independentes*** – Determinar quais parâmetros de medição devem ser avaliados, em que faixas de valores, e o nível específico (valor) que será empregado em cada ensaio.
- ***Escolha da variável de resposta*** – Escolher e/ou especificar variáveis de resposta que serão utilizadas para avaliar o sistema. Exemplos são os índices de qualidade da matriz de voxel, como resolução, contraste e SNR, além do índice de dispersão que será apresentado neste capítulo.
- ***Especificação e calibração de peças para testes*** – A especificação das peças para teste serve para definir os limites do escopo experimental utilizado nesta pesquisa.
- ***Planejamento dos experimentos*** – Determinar a quantidade de repetições e a sequência dos ensaios e aleatoriedade. Em casos complexos, que envolvem várias variáveis, deve se tentar manter os experimentos o mais simples possível, com um número reduzido de ensaios no começo. À medida que se vai adquirindo conhecimento, novas variáveis são acrescentadas. Com isso é possível reduzir a quantidade total de experimentos.
- ***Execução dos experimentos*** – Monitorar a maior quantidade possível de variáveis, em cada ensaio, para garantir a confiabilidade dos experimentos.
- ***Análise dos resultados*** – Aplicação de métodos estatísticos, como análise das variâncias (ANOVA), para que se possa obter resultados e conclusões de forma objetiva.

O conhecimento adquirido durante a etapa experimental deve ser sistematizado de forma que possa ser, efetivamente, utilizado por metrologistas com pouca experiência e resulte na proposição de um modelo conceitual para um sistema baseado em conhecimento.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS FATORES CONSIDERADOS NA PESQUISA

Conforme vem sendo abordado ao longo deste documento, a cada nova tarefa de medição o operador do tomógrafo se depara com a necessidade de definir uma série de parâmetros. Embora a utilização de uma abordagem experimental para quantificar e caracterizar os efeitos dos parâmetros faça parte do objetivo deste trabalho, é possível descrever alguns efeitos ou fenômenos esperados que justifiquem inclusão, ou mesmo o descarte de alguns parâmetros do escopo da pesquisa.

As variáveis independentes consideradas nesta pesquisa constituem-se dos seguintes parâmetros:

- Diferença de potencial entre o anodo e catodo ou tensão do tubo, U [kV] – Influencia a faixa do espectro de raios X definindo o maior valor energético possível para os fótons emitidos. A interação entre o material da peça e a radiação é diretamente influenciada pelo espectro energético gerado.
- Corrente do tubo, I [μ A] – Determina a intensidade do feixe. Como a estatística de fótons de raios X pode ser descrita por uma distribuição de Poisson, a relação sinal-ruído quântico é proporcional à raiz quadrada da corrente selecionada.
 - O tamanho do ponto focal Br [μ m] é resultante da potência selecionada, *i.e.*, varia de acordo com o valor de corrente e da tensão selecionada limitando a escolha destes parâmetros. Quanto menor for o ponto focal, melhor será a nitidez da imagem. O tamanho do ponto focal deve ser menor do que o tamanho do voxel V_x [44].
- Pré-filtros do feixe, V [mm de Cu ou Al] – Reduzem o espectro de energia, eliminando os fótons de menor energia. São usados com o intuito de reduzir o efeito do artefato de endurecimento de feixe, mas reduzem também a intensidade do feixe.

- Tempo de integração do detector, B [ms] (equivalente ao tempo de exposição de uma câmera fotográfica) – Quanto maior o tempo de integração, maior o brilho. Possibilita redução do ponto focal, uma vez que a corrente pode ser reduzida ao custo de um maior tempo de medição.
- Ganho do fotodiodo do detector, E [pF] – O ganho deve ser o menor possível, aumentado apenas se o valor da corrente do tubo e o ajuste no tempo de integração desejável não melhorar a intensidade da imagem [40]. O ruído da matriz de voxel aumenta com o aumento do ganho.
- Orientação da peça na mesa rotativa, Or - A orientação da peça na mesa rotativa está associada ao artefato de *Feldkamp* apresentado na seção 2.5. Outro aspecto que pode ser levado em consideração é a orientação sobre a mesa rotativa de forma que a quantidade de material penetrada por cada feixe seja a menor possível.
- Distância do tubo de raios X em relação ao centro da mesa rotativa ou posição da mesa rotativa, X [mm] – Responsável pela ampliação Vg da imagem projetada.
 - Definição da área de reconstrução ou região de interesse (ROI) para processamento – O objeto deve estar o mais centralizado o possível em relação ao eixo de rotação (§2.5).
- Quantidade de projeções, P – Quanto maior, melhor a amostragem e melhor a qualidade da matriz de voxel, embora aumente também o tempo de medição. O uso de um número relativamente pequeno de projeções leva a formação de artefatos na matriz de voxel na forma de raias por causa de *aliasing* [13]. Porém, a partir de certo número, não há ganho sensível em qualidade.
- *Binning*, Bn – Consiste em unir pixels vizinhos e formar um pixel maior. Reduz o tamanho da matriz de voxel e o ruído na projeção, mas aumenta o tamanho do voxel.

Alguns parâmetros nem sempre estão disponíveis ao operador ou não faz sentido serem alterados. Por isso estão fora do escopo desta pesquisa, entre eles:

Método de reconstrução – se o sistema disponibilizar, ou se o usuário tiver como reconstruir as imagens separadamente, pode-se escolher entre métodos analíticos (transformada inversa de Radon) ou

aproximações de feixes cônicos como o algoritmo FDK, ou métodos iterativos como o ART. Porém, esta opção normalmente não está disponível.

Filtro matemático usado na reconstrução – caso sejam usados algoritmos derivados do FBP, existe um conjunto de filtros que podem ser escolhidos para o processo de reconstrução. Esta é uma opção interessante quando o tomógrafo é utilizado para múltiplos propósitos. Porém o filtro Sheep-Logan é o mais recomendado quando o interesse está na extração da superfície da peça [35].

Método de interpolação – durante o processo de reconstrução podem ser gerados sub-voxels, *i.e.* divisão do voxel original em unidades menores, para melhorar a imagem. Entretanto, isso aumenta o tempo e a demanda computacional de reconstrução. Além disso, esta opção não está acessível em qualquer tomógrafo.

Para que a influência dos parâmetros citados acima seja adequadamente estudada é importante que as variáveis de resposta escolhidas forneçam informações que possibilitem a obtenção de conclusões práticas.

5.2 UM NOVO ÍNDICE DE QUALIDADE PARA CT

Na seção 3.3 foram apresentados diversos índices de qualidade que a princípio podem ser relacionados com a qualidade do resultado de medição. No entanto, estas relações não são suficientemente diretas. Além disso, o contraste e a SNR não são valores constantes na matriz de voxel e o conceito de resolução obtido através da MTF depende de padrões específicos. O problema de se avaliar apenas parâmetros de imagem é que a avaliação das características geométricas é essencialmente afetada pela definição do *threshold* e pelos algoritmos de amostragem [110, 123]. Por esta razão a comparação direta de valores das características geométricas é uma abordagem normalmente considerada. O problema desta abordagem é que os efeitos ambientais se fundem aos efeitos provenientes da imagem, afetando desta forma a percepção das relações entre os parâmetros de configuração e a qualidade da matriz de voxel. As dificuldades encontradas com a utilização dos índices de qualidade existentes indicaram a necessidade de um novo índice.

Até recentemente, as medições dimensionais com CT eram ajustadas exclusivamente pelo método dos mínimos quadrados. Além

disso, não se acreditava que a CT pudesse fornecer informação relevante sobre o erro de forma. Nas primeiras aplicações dimensionais, as medições eram realizadas em arquivos tipo STL gerados a partir da nuvem de pontos extraída da matriz de voxel usando-se *threshold* global [124]. Mesmo com o processo de extração dos pontos passando a ser feita com *threshold* local, não foi encontrada na revisão bibliográfica uma discussão envolvendo as operações de filtragem ou uso de diferentes tipos de ajuste. Porém, durante o desenvolvimento deste trabalho, foi identificado que era possível obter informações sobre os desvios de forma e que a variação dos parâmetros de configuração resultava também na variação do nível de dispersão dos pontos extraídos [123]. A partir desta observação, uma nova forma de avaliação dos dados obtidos por CT para fins de metrologia dimensional é proposta e descrita a seguir.

5.2.1 Análise gráfica

Uma ferramenta importante para avaliação da superfície medida é a análise gráfica de um perfil ou superfície (*e.g.* gráficos polar na Figura 20). Esta ferramenta é facilmente encontrada em SW dedicados à análise dimensional e consiste basicamente em ampliar o sinal medido, composto por informações sobre a superfície da peça e pelo erro de medição. Quando os desvios de forma da peça são desprezíveis, como no caso de padrões, os erros de medição ficam evidenciados. Como um perfil contido na superfície real de uma peça pode ser modelado como sobreposição de senóides, outra ferramenta gráfica, também muito útil e complementar, é a análise harmônica destes mesmos dados. Identificar as harmônicas dominantes traz informações sobre o processo de fabricação da peça, mas também pode trazer informações úteis sobre efeitos do uso de diferentes parâmetros de configuração ou mesmo entre diferentes SM.

Nardelli *et al* [123] demonstraram que o uso da análise gráfica é uma importante ferramenta para avaliar a qualidade dos dados gerados por CT. Através da comparação de um perfil circular de referência, extraído por uma CMM por contato, com um perfil extraído por um tomógrafo é possível observar um elevado nível de dispersão nos resultados obtidos por CT (Figura 20 inferior - harmônicas circuladas). Porém, através da análise harmônica é possível observar que apesar do elevado nível de dispersão encontrado nas medições por CT a componente dominante da peça, a harmônica de 3 OPR, foi bem reproduzida. Isto indica que conhecendo-se a forma da peça é possível

separar a dispersão resultante da operação de extração. Esta dispersão observada na medição por CT pode então ser quantificada e usada como um índice de qualidade dos dados, partindo-se do princípio que medições dimensionais realizadas sobre superfícies com maiores perturbações terão também maior incerteza.

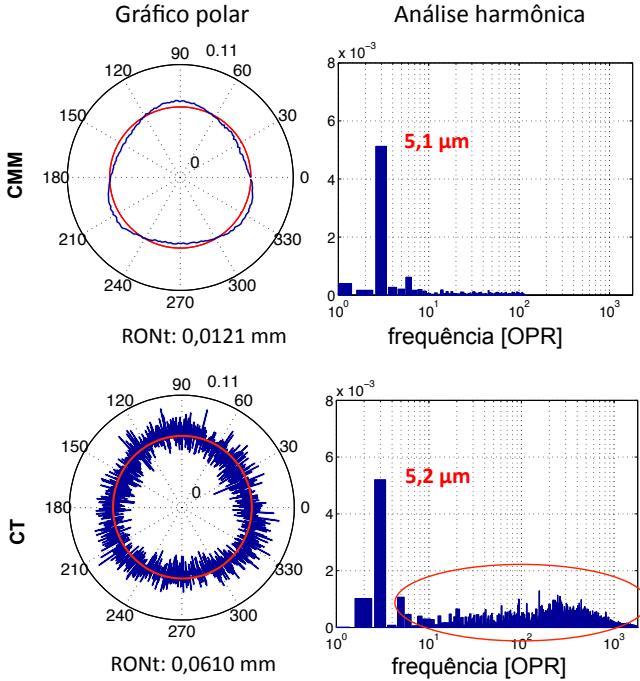


Figura 20. Análise gráfica do perfil circular extraído de uma peça usando uma CMM com sensor por contato (superior) e usando um tomógrafo.

5.2.2 A dispersão do erro dos pontos extraídos

A abordagem proposta (Figura 21) para comparação entre os resultados provenientes de diferentes parâmetros de configuração consiste na análise da dispersão do erro dos pontos que definem o elemento integral extraído [125]. Esta dispersão representa a quantidade de ruído transferido da matriz de voxel, assim como efeitos sistemáticos provenientes de artefatos da imagem. Inicialmente, a análise é realizada por um aplicativo desenvolvido em MATLAB® para a avaliação de perfis circulares [126].

A idéia consiste, basicamente, em subtrair o perfil de referência do perfil medido por CT a fim de se obter o perfil de erro para uma tarefa de medição específica. Esta operação é realizada no domínio do espaço havendo, portanto, necessidade de que alguns pré-requisitos sejam atendidos.

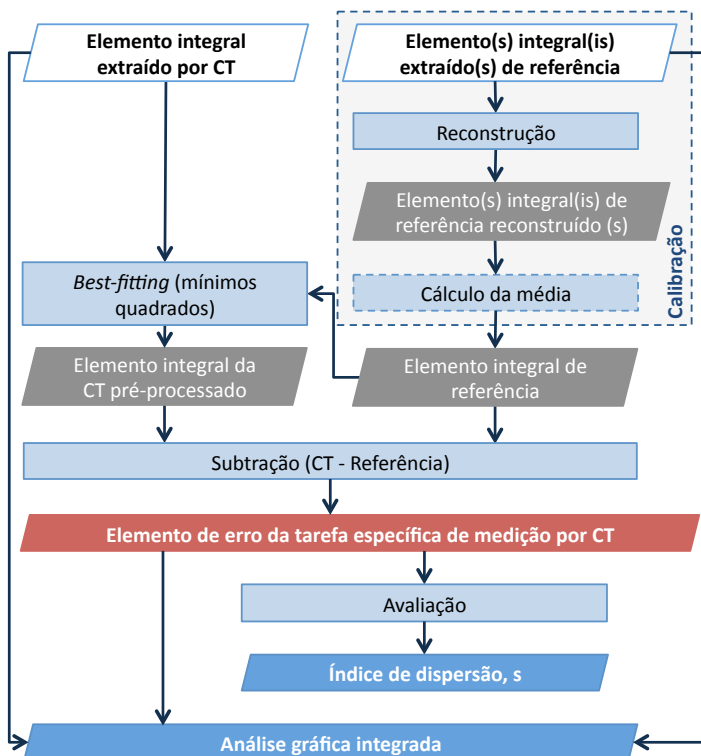


Figura 21. Procedimento para análise do nível de dispersão.

Um pré-requisito importante é que a característica de referência seja extraída sem ocorrência significativa de ruído aleatório ou *aliasing*.

Os pontos extraídos por CT são igualmente espaçados e não estão sujeitos à filtragem morfológica dos apalpadores. O uso de uma CMM táctil como um sistema de medição de referência requer a realização de algumas **operações de reconstrução** para melhorar a comparabilidade com os dados obtidos por CT:

- Os *outliers* devem ser eliminados. Para isso, uma técnica conhecida como análise estatística do perfil utilizando filtragem multi-escala é utilizada [127, 128].
- O espaçamento desigual dos pontos extraídos, típicos da extração com CMM, deve ser corrigido. Esta correção é realizada utilizando-se interpolação *spline* cúbica [129].
- Os efeitos da dilatação mecânica [130], [131] são corrigidos pela operação morfológica inversa conhecida como erosão [132].

Além disso, o número de pontos dos dois perfis deve ser igual, o que pode ser obtido com uma operação de reamostragem, implementada, usando a interpolação *sinc* [133]. Estes pontos também devem ser igualmente espaçados e com coordenadas angulares em comum. Quando a medição de referência tem mais de uma repetição, o perfil de referência é a média dos perfis extraídos.

Com isso o perfil de erro pode ser obtido a partir da subtração do perfil de referência do perfil medido. O uso de um perfil de referência pode ser evitado quando o desvio de forma da característica analisada não é significativo (*e.g.* quando um padrão é usado como peça de teste).

A partir do perfil de erro, uma medida quantitativa, a **dispersão do erro dos pontos extraídos**³⁰ s , pode ser obtida através da média quadrática (rms) do perfil erro.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(m_i - \rho_{meas}) - (r_i - \rho_{ref})]^2} \quad (15)$$

onde, ρ_{meas} é o raio do círculo ajustado por mínimos quadrados obtido a partir dos pontos obtidos da medição por CT; ρ_{ref} é o valor do raio do círculo ajustado por mínimos quadrados (LSCI) a partir dos pontos calibrados; n é o número de pontos do perfil reamostrado; m_i a distância entre cada um dos pontos extraídos após o processo de reamostragem e a origem do círculo medido por CT; r_i são os valores de referência para a distância entre cada ponto extraído e o centro do círculo calibrado. Observa-se que desta forma o deslocamento médio da superfície não está incluso na análise (Figura 22).

³⁰ Para simplificar, este termo é também referido no texto como **índice de dispersão**.

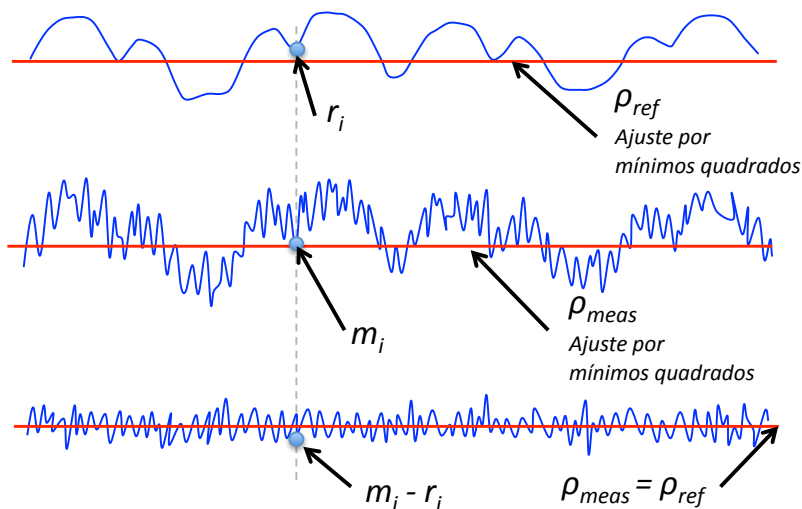


Figura 22. Diagrama para obtenção do elemento de erro da tarefa específica de medição. Elemento integral de referência (superior); Elemento integral da CT pré-processado (meio); Elemento de erro (inferior).

O desempenho do índice de dispersão proposto foi correlacionado com alguns índices de qualidade normalmente usados em aplicações de NDT (§6.1).

5.3 PEÇAS PARA TESTE

Conforme apresentado no capítulo 3, alguns padrões de referência, peças padrão ou peças para testes específicos são normalmente utilizados para avaliar a qualidade da imagem e o desempenho de sistemas de CT em aplicações médicas e de NDT, e, mais recentemente, para avaliação e para verificações periódicas de tomógrafos usados como CMM.

O propósito de se estabelecer requisitos para caracterização de peças para testes é identificar similaridades que possibilitem a transferência do conhecimento para casos reais. Assim, as informações consideradas relevantes para caracterizar a análise dimensional de uma peça usando CT podem ser definidas da seguinte forma:

1. Composição do **material** da peça. Uma das principais preocupações envolvendo medições com CT é a composição

do material do objeto. A absorção dos raios X está diretamente relacionada com o número atômico e a densidade do material.

2. **Espessura** máxima de material a ser atravessada pela radiação. Deve-se estimar para cada objeto a quantidade máxima de material que pode ser atravessada pelos feixes de raios X.
3. **Tamanho**, ou seja, dimensões externas usadas para determinar a ampliação e, conseqüentemente, o tamanho do voxel V_x . Esta característica define a região da faixa de medição a ser avaliada.
4. **Elementos geométricos**: cilindro, esfera, plano, etc. O tamanho e o espaçamento entre os elementos geométricos que compõe cada peça, também são fatores importantes para se analisar, em virtude do efeito do processo de aquisição e reconstrução das imagens.
5. **Tarefa de medição**: amostragem, tipo de ajuste, filtragem do elemento integral extraído.

Embora o processo de medição por CT seja sem contato, com a peça, as medições de referência são normalmente realizadas com sensores por contato. Desta maneira, o tipo de material juntamente com a espessura de parede da peça devem fornecer rigidez suficiente, de forma a evitar deformações significativas durante a calibração.

As peças de teste utilizadas nesta pesquisa tiveram como objetivo representar tarefas de medição simples, de forma a limitar o escopo dos experimentos. Deste modo, a tarefa de medição se restringiu à extração de círculos, tanto em cilindros internos como externos. A complexidade das medições vai desde peças de teste com baixo desvio de forma, passando por peças padrão com desvios de forma intencionalmente fabricados, até chegar às condições reais de peças obtidas da produção (Figura 23). Foi utilizado um conjunto de cilindros escalonados, um padrão de múltiplas ondas, além de peças provenientes de dois ramos distintos da indústria, que foram selecionadas para desmontar a aplicação da sistemática proposta.

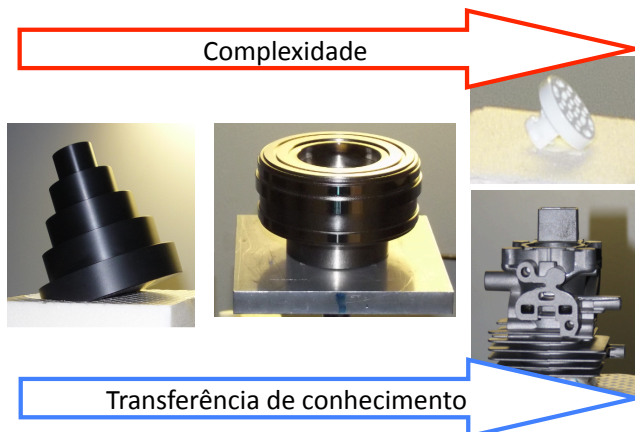


Figura 23. Peças utilizadas nos experimentos.

5.3.1 Cilindros escalonados

O conjunto de cilindros escalonados foi utilizado nos primeiros experimentos para aquisição de conhecimentos básicos. Os cilindros escalonados foram usinados em alumínio e em polioximetileno (POM), um material polimérico. Entre os requisitos fundamentais para a escolha destes materiais estão a boa estabilidade dimensional, boa usinabilidade e baixa higroscopia. A peça é formada por cinco cilindros externos de diferentes diâmetros e um cilindro interno. Assim, em uma única medição é possível avaliar o efeito da penetração da radiação em diferentes espessuras. O tamanho da peça é considerado médio dentro do escopo de aplicações de CT, sendo a dimensão máxima correspondente a 90 mm. Para os estudos apresentados neste trabalho, foram avaliadas três características geométricas: um círculo extraído de um cilindro externo com diâmetro nominal de 26 mm, um círculo extraído de um cilindro externo com diâmetro nominal de 74 mm e um círculo extraído de um cilindro interno com diâmetro nominal de 15 mm (Figura 24). Os diâmetros foram avaliados pelo método de ajuste dos mínimos quadrados.

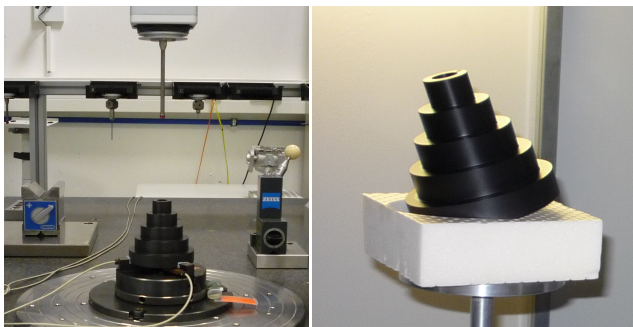
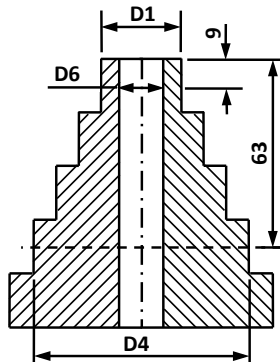


Figura 24. Características geométricas avaliadas (superior), arranjo das medições de referência (inferior esquerda) e arranjo das medições por CT (inferior direita).

A medição de referência da peça foi realizada por extração de linhas circunferenciais com uma CMM com sensor de contato usando o modo de medição ponto-a-ponto (*ca.* 230 pontos). Um apalpador com um diâmetro de 3 mm foi selecionado para a tarefa, sendo realizados três ciclos de medição.

Os perfis extraídos foram exportados como arquivos ASCII pelo software de medição e processados conforme descrito na seção 5.2.

5.3.2 Padrão de múltiplas ondas

Como os desvios de forma dos cilindros escalonados não são significativos para medições por CT e o uso de peças reais calibradas pode estar sujeito a interferências e a artefatos de imagem resultantes de outras características geométricas da peça, optou-se pelo uso de um padrão de múltiplas ondas (MWS). O MWS é um padrão de alumínio

que, entre outras características, possui um cilindro com diâmetro nominal de 80 mm e uma superfície com ondulações sobrepostas propositalmente estruturadas. O MWS foi utilizado para realização de experimentos mais avançados, com o objetivo de avaliar o desempenho do índice de qualidade proposto em uma superfície mais complexa. Este padrão também possui dois cilindros, com erro de forma desprezível, que foram usados como superfície de referência.

As características avaliadas foram dois círculos extraídos de dois cilindros. O "perfil A" foi extraído de uma das superfícies de referência, bem acabada e com desvios de forma insignificantes, cujo diâmetro nominal é de 78 mm. Já o "perfil B" foi extraído do cilindro cujo diâmetro nominal é de 80 mm, possuindo uma superfície estruturada senoidal, contendo as componentes harmônicas de 5, 15, 50, 150 e 500 ondulações por revolução (OPR) com 2 μm de amplitude nominal cada uma. As medições de referência foram realizadas por uma CMM por contato e apalpador esférico com raio de 0,75 mm. Três ciclos de medição foram realizados.

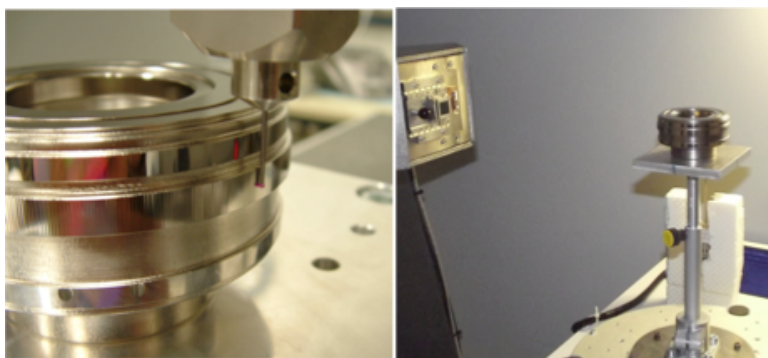
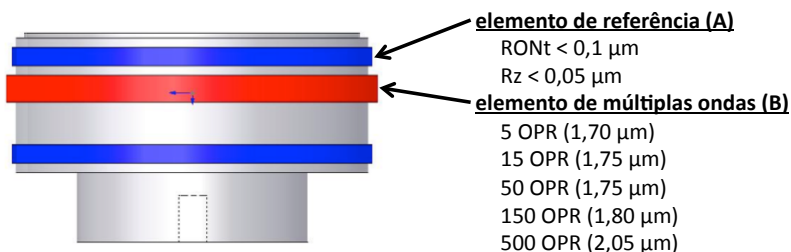


Figura 25. Perfis avaliados: perfil de referência (A) e perfil de múltiplas ondas (B) (imagem superior); Medição com CMM por contato (esquerda inf.); medição com CT (direita inf.).

5.4 PLANEJAMENTO E ANÁLISE EXPERIMENTAL

5.4.1 Sistemas de medição utilizados

O tomógrafo utilizado nos experimentos foi um Metrotom 1500 da Zeiss instalado no laboratório de máquinas-ferramenta (WZL) da RWTH em Aachen. A temperatura ambiental do laboratório é controlada em (20 ± 1) °C. O tomógrafo apresenta uma configuração tradicional de feixe cônico, detector plano e mesa rotativa onde a distância nominal entre tubo e detector é de 1500 mm. A corrente do tubo pode chegar até 1000 μ A e o valor energético dos fótons pode chegar a 225 keV. O detector é de oxissulfeto de gadolínio (Gd_2O_2S) contendo 1024×1024 elementos distribuídos em uma área quadrangular de aproximadamente 409×409 mm². A reconstrução das imagens é baseada no algoritmo FDK e o processo de extração da superfície utiliza valores locais de *threshold*. A especificação para valores de máximo erro admissível na medição de comprimentos é de $\pm (9 + L/50)$ μ m.

A calibração das peças de teste foi realizada por uma CMM com sensor por contato e cabeçote medidor, instalada no mesmo ambiente laboratorial do tomógrafo. A especificação para valores de máximo erro admissível na medição de comprimentos é de $\pm (2,5 + L/300)$ μ m.

5.4.2 Planejamento dos experimentos

O processo para sistematização do conhecimento sobre análise dimensional utilizando CT pode ser considerado relativamente complexo devido ao número de fatores de influência. Mesmo limitando o foco da pesquisa aos parâmetros que podem ser diretamente manipulados pelo usuário, o esforço necessário para investigar o efeito de todos estes parâmetros, sem o uso de uma abordagem sistemática, seria inviável para os recursos disponíveis neste projeto.

Em função desta complexidade, da quantidade de variáveis envolvidas e por se tratar de um processo de medição, *i.e.*, um processo sujeito a erros experimentais, os experimentos foram planejados, conduzidos e analisados através da abordagem estatística, DOE, de modo a reduzir a quantidade de trabalho no laboratório, sem comprometer a validade dos resultados. Esta abordagem é baseada em três princípios bem conhecidos em aplicações metrológicas: o de réplicas, o da aleatoriedade e o da técnica de blocos.

A **réplica** consiste na repetição dos ensaios. Esta repetição permite ao executor uma noção da variabilidade do processo, em um curto espaço de tempo.

A **aleatoriedade** é a base para aplicação de técnicas estatísticas. Consiste em definir uma sequência aleatória para a execução dos ensaios.

A técnica de **blocos** é usada para reduzir o efeito dos fatores não controláveis. O bloco é uma parte do experimento que pode ser caracterizada separadamente. Por exemplo, se um experimento é interrompido em um dia para continuar no outro, cada dia pode ser tratado como um bloco distinto.

A escolha da estratégia experimental foi baseada no conhecimento adquirido durante o estudo dos princípios físicos do sistema de CT, e alinhada com os objetivos do trabalho: promover melhorias à escolha dos valores para os parâmetros de configuração de uma dada tarefa de medição, visando a obtenção de uma imagem de qualidade no menor intervalo de tempo.

Existem diversas opções de estratégias experimentais, amplamente empregadas em pesquisa, que podem ser utilizadas para caracterizar e otimizar o processo de medição por CT. A opção por um plano experimental fatorial, considerando todos os parâmetros de configuração simultaneamente, é completamente inviável. Seriam necessários 512 ensaios ($2^f \rightarrow 2^9 = 512$) para avaliar 9 fatores em apenas dois níveis de cada fator, sem considerar as réplicas. Assim, sempre que possível, *i.e.* quando a interação com outro fator não era considerada significativa, foi utilizada a estratégia unifatorial. O uso de experimentos bifatoriais foi, no entanto, utilizado para avaliar parâmetros onde havia possibilidade de interação. A utilização de experimentos fatoriais com mais de dois fatores não foi julgada necessária.

Por se tratarem de diversos experimentos, os valores atribuídos a cada fator e a configuração experimental serão apresentados juntamente com os resultados.

5.4.3 Análise dos resultados

Um dos principais métodos de análise estatística de resultados experimentais é a análise das variâncias (ANOVA). O objetivo é testar se a influência de um determinado fator excede a variância experimental. O uso de gráficos de média e amplitude (Figura 26) é uma alternativa simples e de fácil compreensão para o uso de ANOVA [134].

A única desvantagem é que não se pode escolher o nível de significância (α).

O nível de significância em gráficos de média é a probabilidade dos valores mais extremos ficarem fora dos limites de controle quando não houver diferença significativa entre as médias dos k subgrupos. Como os limites de controle são fixos, o nível de significância também é fixo. Assim, o nível de significância pode ser deduzido do número de subgrupos k e do tamanho dos subgrupos n .

O gráfico de amplitudes indica se o procedimento experimental apresenta alguma inconsistência. Quando algum ponto estiver fora dos limites de controle significa que há diferenças significativas na repetitividade entre subgrupos (variação dentro do subgrupo) e as possíveis causas devem ser investigadas. Já no gráfico das médias, quando um ponto está fora dos limites de controle, pode-se dizer que há diferença significativa entre subgrupos.

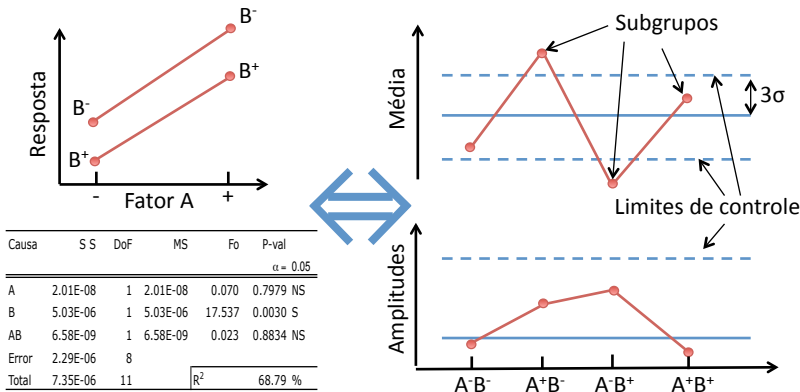


Figura 26. Análise experimental: abordagem tradicional (esquerda); utilizando gráficos de média e amplitude (direita).

5.5 SISTEMATIZAÇÃO DO CONHECIMENTO

O conhecimento adquirido durante a etapa experimental do projeto deve ser sistematizado de forma que possa ser efetivamente utilizado pelos operadores dos tomógrafos industriais. O ideal seria enquadrar a escolha do máximo de parâmetros através de relações analíticas. Neste caso, a escolha dos parâmetros de configuração poderia

ser obtida diretamente a partir da implementação de um algoritmo específico. No entanto, este tipo de solução não parece possível para a seleção de todos os parâmetros.

Por esta razão, um sistema baseado em conhecimento (KBS) pode ser utilizado para dar suporte ao usuário no processo de seleção dos parâmetros de configuração. Estes sistemas são programas de computador pertencentes a um dos ramos da inteligência artificial (AI), que utilizam o conhecimento armazenado em uma base de dados, ou base de conhecimento, uma memória de trabalho e técnicas de inferência para solucionar problemas não-estruturados, cuja solução é difícil de ser obtida por um procedimento lógico. Ou seja, utiliza-se conhecimento humano para solucionar problemas onde normalmente é necessária a inteligência humana para serem solucionados [135].

Não faz parte do escopo deste trabalho a implementação computacional deste sistema, mas sim gerar o conhecimento, e propor o modelo inicial para sistematização deste conhecimento na forma de regras e métodos que possam ser integrados, posteriormente, em um KBS.

5.6 SÍNTESE

Neste capítulo foram utilizados os conhecimentos sintetizados nos capítulos 2 e 3 para definir o escopo experimental desta pesquisa através da definição das variáveis de resposta e dos fatores relevantes para as medições com CT. No entanto, durante o desenvolvimento do trabalho, foi identificada uma lacuna com relação às variáveis de resposta. As análises³¹ estavam normalmente voltadas para a qualidade das imagens, para a comparação de tamanho, ou para medição de distância. As características avaliadas eram associadas principalmente pelo método dos mínimos quadrados. Não estavam sendo consideradas as informações presentes na superfície extraída, o que de certa forma prejudica análises dimensionais mais completas. Isso motivou a proposição de uma nova forma de analisar a qualidade dos resultados obtidos por CT.

A inclusão da análise da dispersão dos pontos resultou na necessidade por experimentos em peças de teste com superfícies mais complexas, como o padrão de múltiplas ondas, mas sem deixar de

³¹ Estas análises englobam tanto resultados obtidos durante este trabalho como publicações de outros autores.

manter as configurações experimentais simples. As análises experimentais, apresentadas no próximo capítulo, foram conduzidas de acordo com a metodologia conhecida como “planejamento de experimentos (DOE)” e analisados utilizando gráficos de controle, uma abordagem simples e de fácil interpretação.

6 SISTEMÁTICA PARA MELHORAR A SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO

Os resultados experimentais apresentados neste capítulo, juntamente com conhecimentos teóricos, obtidos da revisão bibliográfica, foram fundamentais para caracterização dos efeitos produzidos por cada parâmetro. O índice de dispersão (§5.2) foi utilizado como principal variável de resposta, o que possibilitou a simplificação da análise experimental. Desse modo, neste capítulo é apresentada a análise do desempenho do índice de dispersão e a proposta de uma sistemática para seleção dos parâmetros de configuração acompanhada dos resultados experimentais que dão suporte às orientações sugeridas.

6.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO ÍNDICE DE DISPERSÃO

O objetivo dos estudos experimentais apresentados nesta seção é demonstrar que o índice de dispersão pode ser considerado um critério adequado para a seleção dos parâmetros de configuração. Para isso, o índice proposto deve ser capaz de substituir os tradicionais índices de qualidade da imagem, sendo sensível o suficiente para identificar variações entre configurações. Além disso, os dados experimentais devem apresentar consistência estatística.

6.1.1 Análise da sensibilidade do índice de dispersão

O objetivo deste experimento é avaliar o desempenho do índice de dispersão em condições que se aproximam de casos reais. Para isso será comparado o desempenho do índice de dispersão em duas superfícies com características distintas: um cilindro com desvios de forma intencionalmente fabricado e um cilindro com desvios de forma desprezíveis (§ 5.3.2 – Figura 25). As duas características fazem parte da mesma peça, o padrão de múltiplas ondas, de forma que os dados foram obtidos simultaneamente, tornando desprezível o efeito de fatores que variam com o tempo (*e.g.* temperatura).

Foram avaliados seis conjuntos diferentes de parâmetros de configuração (Tabela 3). A configuração # 1 é uma abordagem mais conservadora, sem compromisso com o tempo de medição. A configuração # 2 é basicamente o mesmo, mas com um *binning* de 2x2

sobre as projeções com a intenção de aumentar a SNR_p da projeção. Isso possibilita a redução no número de projeções e consequentemente do tempo de varredura, porém, resulta num maior tamanho do voxel. Para a configuração # 3 o ganho do detector é aumentado, resultando na necessidade de menor tempo de integração. Para a configuração # 4 a espessura do pré-filtro é reduzida, o que aumenta a intensidade energética, permitindo também que o tempo de integração possa ser reduzido; por outro lado tende a aumentar os efeitos do artefato endurecimento de feixe. A configuração # 5 tem um pré-filtro mais espesso e por isso houve a necessidade de aumentar o ganho do detector para compensar a redução na intensidade. Finalmente, para a configuração # 6 a tensão do tubo e da espessura do pré-filtro foram reduzidas. O MWS foi medido cinco vezes com cada configuração, em ordem aleatória.

Tabela 3. Configurações utilizadas.

Parâmetros	Símbol	Conjuntos de parâmetros de CT					
		1	2	3	4	5	6
Tensão	U [kV]	225	225	225	225	225	150
Corrente	I [μ A]	420	420	420	420	420	630
Tempo de integração	B [ms]	2000	2000	1000	1500	1500	1500
Ganho	E [pF]	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0
Pré-Filtros, Cu	V [mm]	1,00	1,00	1,00	0,50	1,50	0,25
Posição em X	X [mm]	350	350	350	350	350	350
Material	M	Al	Al	Al	Al	Al	Al
Orientação	Or	0°	0°	0°	0°	0°	0°
Qtd. Projeções	P	1440	720	1440	1440	1440	1440
Binning	Bn	1	2	1	1	1	1
Ponto focal	Br [μ m]	94,5	94,5	94,5	94,5	94,5	94,5
Ampliação	Vg	4,29	4,29	4,29	4,29	4,29	4,29
Tamanho do voxel	Vx [μ m]	93,3	186,7	93,3	93,3	93,3	93,3
Tempo de aquisição	t [min]	48	24	24	36	36	36

O nível de dispersão dos pontos extraídos entre as seis configurações foi avaliado por duas abordagens diferentes. No “perfil A” (§ 5.3.2 – Figura 25) foi calculado diretamente, enquanto que no “perfil B” (§ 5.3.2 – Figura 25) foi obtido pela subtração de um perfil de referência (Tabela 4).

Tabela 4. Valores obtidos para o índice de dispersão.

Característica		Conjuntos de parâmetros de CT					
		1	2	3	4	5	6
perfil A	s_A [μ m]	2,1	3,4	2,7	2,0	2,8	1,9
perfil B	s_B [μ m]	3,1	4,5	3,7	3,5	4,0	3,3

Observando a análise gráfica do “perfil A” (Figura 27 e Figura 28) é possível identificar um nível muito mais elevado de dispersão nos dados obtidos por CT do que pela CMM táctil. Porém, os perfis obtidos por CT apresentam componentes harmônicas ao longo de todo o espectro. Também é possível observar que a amplitude média destas componentes harmônicas variam entre as configurações.

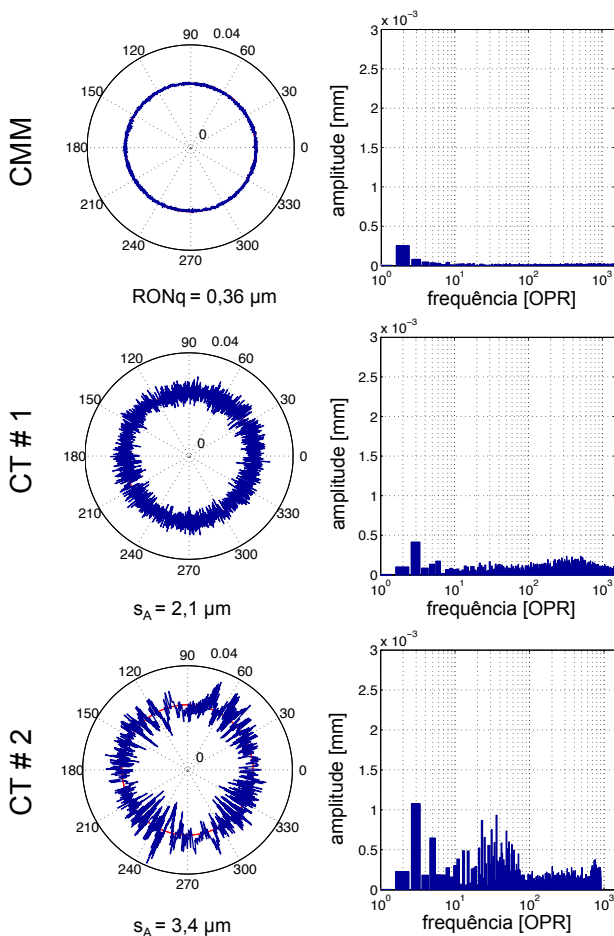


Figura 27. Análises gráficas do “perfil A” para CMM e configurações 1 e 2.

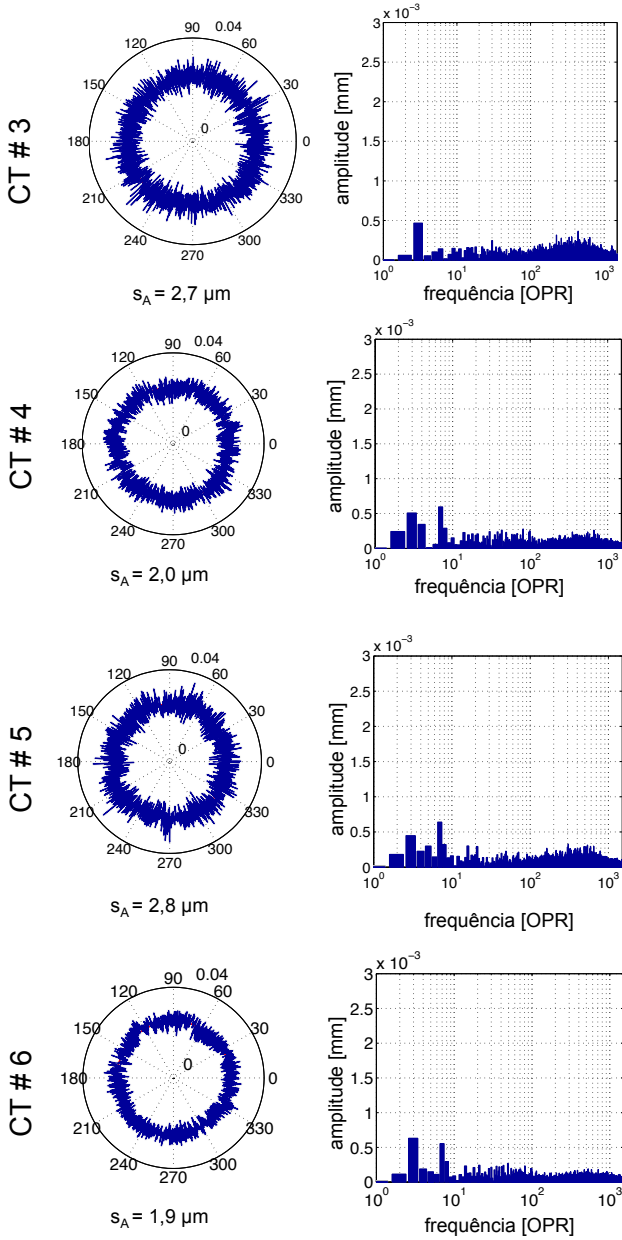


Figura 28. Análises gráficas do “perfil A” configurações 3, 4, 5 e 6.

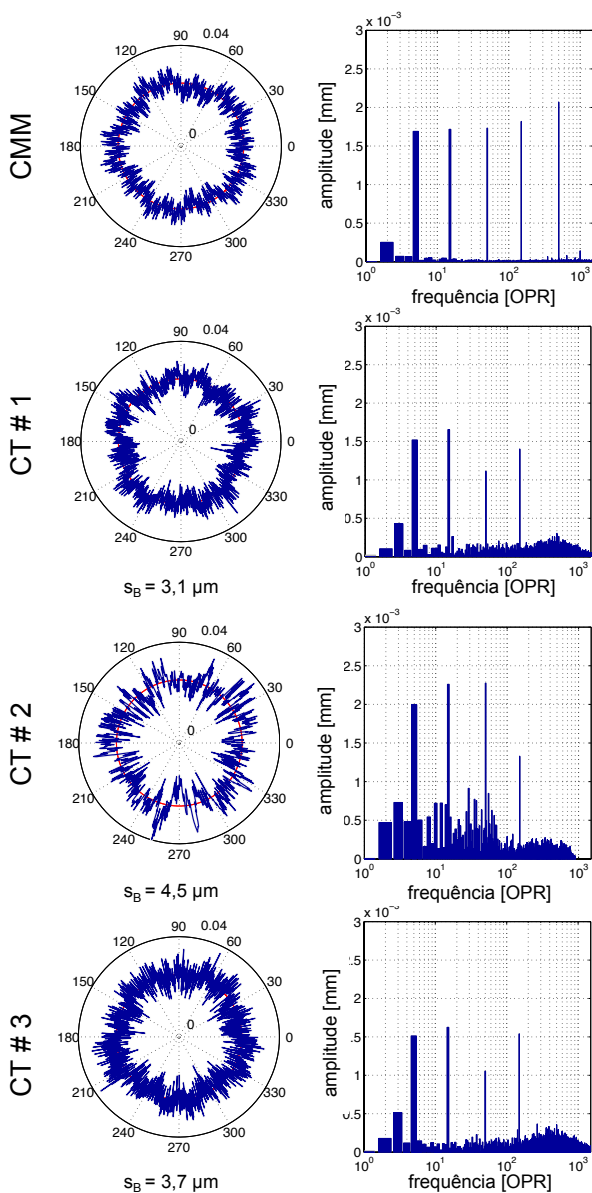


Figura 29. Análises gráficas do “perfil B” para CMM e configurações 1, 2 e 3.

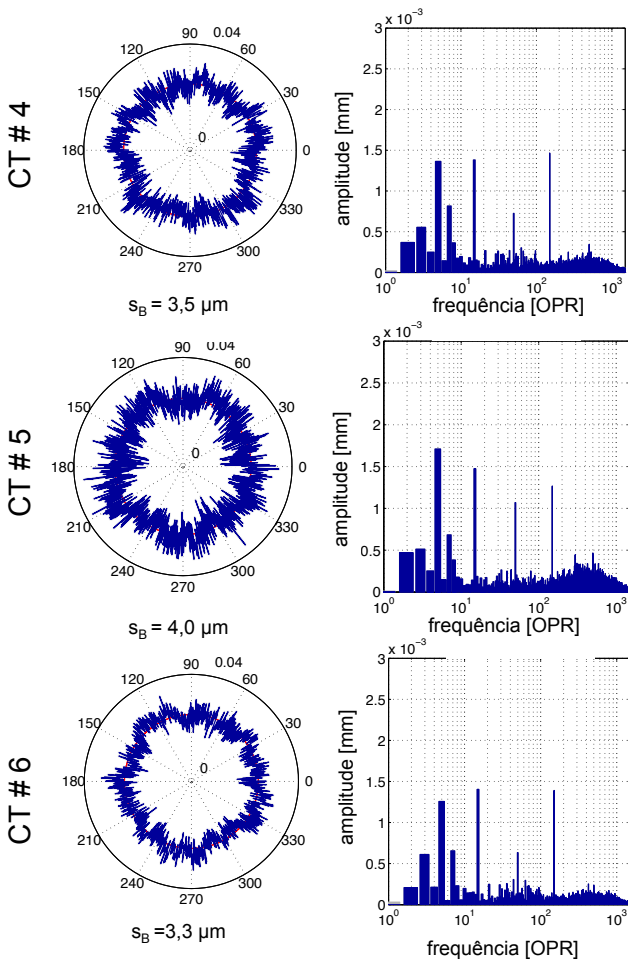


Figura 30. Análises gráficas do “perfil B” para configurações 4, 5 e 6.

O efeito da dispersão dos pontos também é facilmente observado na análise gráfica do “perfil B” (Figura 29 e Figura 30). As harmônicas dominantes da peça podem ser distinguidas facilmente no domínio da frequência. Pode-se observar que a componente harmônica de 2 OPR tem amplitude semelhante à observada no “perfil A”, indicando que seja um provável efeito da medição na CMM.

No entanto, também pode ser observado que as harmônicas dominantes do “perfil B” são irregularmente atenuadas nas medições por CT. A harmônica de 500 OPR, *e.g.*, foi quase que completamente atenuada. Esse comportamento nas harmônicas dominantes pôde ser observado em todas as configurações avaliadas por CT. A atenuação da componente de 500 OPR confirma que, com os sistemas CT atuais, a detecção de estruturas de alta frequência, tais como rugosidade, não é viável.

Além disso, a ocorrência de *aliasing* também pode ser observada, principalmente na análise gráfica da configuração # 2. A análise gráfica de ambos os perfis apresentam componentes harmônicas entre 10 e 100 OPR com amplitudes superiores às harmônicas entre 100 e 1000 OPR, o que evidencia a ocorrência de *aliasing*. Este efeito pode estar relacionado ao aumento do tamanho do voxel que implica uma menor resolução espacial.

Torna-se claro, em relação à análise gráfica que o nível de dispersão e os seus efeitos apresentam uma notável variação entre configurações. No entanto, esses efeitos são semelhantes nos perfis A e B.

A comparação do nível de dispersão entre configurações foi realizada utilizando gráficos de controle. Para cada perfil, os gráficos da média e amplitude foram construídos a partir de 30 medições divididas em seis subgrupos de tamanho 5. Cada subgrupo representa uma configuração. Como a componente repetitividade é isolada dentro dos subgrupos, esta é a única fonte de variação envolvida no cálculo dos limites de controle (§5.4.3).

Os gráficos de amplitude de ambos os perfis (Figura 31 – Inferior) mostram todos os valores dentro dos limites de controle, evidenciando assim, um processo de medição consistente. No entanto, os valores do gráfico das médias (Figura 31 – superior) apresentam uma variação significativa entre subgrupos para um nível de significância de 96,6% ($\alpha = 0.017$).

Além disso, pode-se observar que os resultados de ambos os perfis estão correlacionados, mas a média geral para o “perfil B” está deslocada, tendo valores mais elevados para a dispersão. A razão para esta mudança pode estar relacionada ao fato do sistema de CT não ter sido capaz de medir harmônicas de alta frequência (Figura 29), o que também pode ser atribuído para justificar também a maior variância dos resultados obtidos com o “perfil B”.

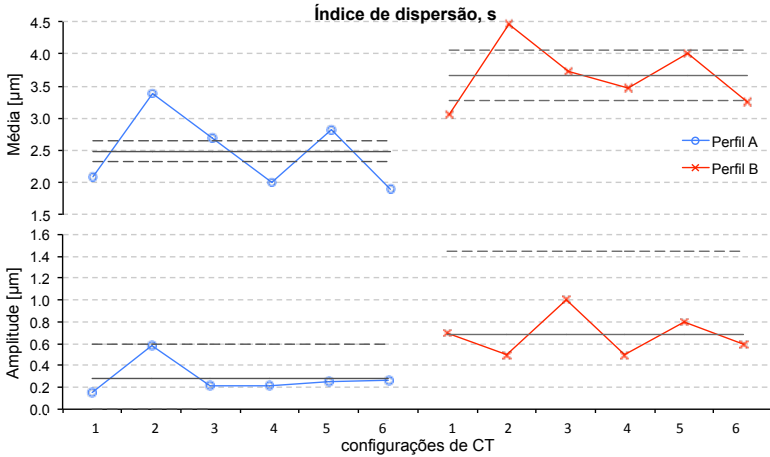


Figura 31. Gráfico de média e amplitude do índice de dispersão: “perfil A” na esquerda e “perfil B” na direita.

6.1.2 Análise da correlação entre índices de qualidade

Para este estudo foi analisada a correlação entre o índice de dispersão e outros índices de qualidade normalmente utilizados em aplicações de NDT (§3.3). A peça utilizada foi o cilindro escalonado de POM (§5.3.1). Foram utilizadas 51 configurações diferentes (Apêndice A).

Os resultados (Figura 32) demonstram que o contraste das projeções C_p e a relação sinal-ruído das projeções SNR_p mostram dependência mútua quando os parâmetros de configuração variam. Por outro lado, não se pode afirmar que a dispersão dos pontos extraídos s_{D1} para o diâmetro $D1$ tenha relação linear tanto com contraste C_p quanto com SNR_p . Pode-se observar que para valores muito baixos de C_p e SNR_p a s_{D1} tem expressivo aumento. Além disso, é interessante observar que os parâmetros de qualidade das projeções SNR_p e C_p também apresentam alguma dependência linear com a SNR_{Ix} . Dessa forma, o uso de índices como contraste C_p e SNR_p pode evitar a escolha de parâmetros que comprometam significativamente a qualidade da medição, mas são pouco sensíveis para um refinamento do processo de seleção dos parâmetros.

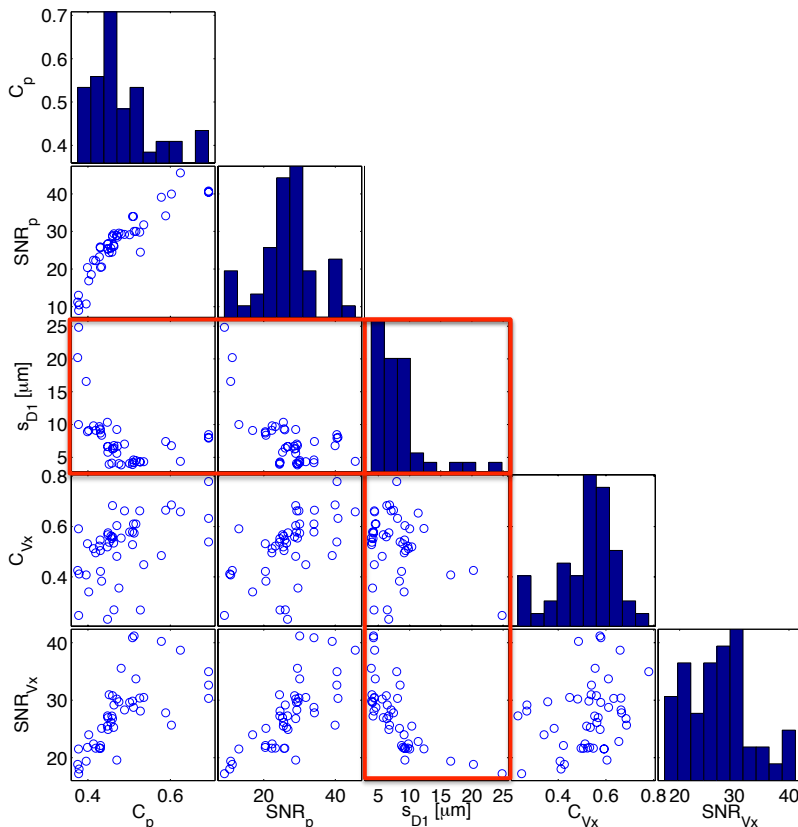


Figura 32. Análise de correlação entre o contraste, relação sinal-ruído e o índice de dispersão da superfície extraída.

A SNR_{vx} da matriz de voxel é o índice que mais se aproximou dos resultados obtidos com índice de dispersão s_{D1} . Porém, não é possível identificar correlação entre os resultados do contraste da matriz de voxel C_{vx} e do índice de dispersão.

Um aspecto importante a respeito da análise da dispersão do erro dos pontos extraídos é a boa correlação entre geometrias internas s_{D1} e externas s_{D6} , (Figura 33 – esquerda) bem como entre elementos de tamanho e espessura de tamanhos distintos, como s_{D1} e s_{D4} (Figura 33 – direita).

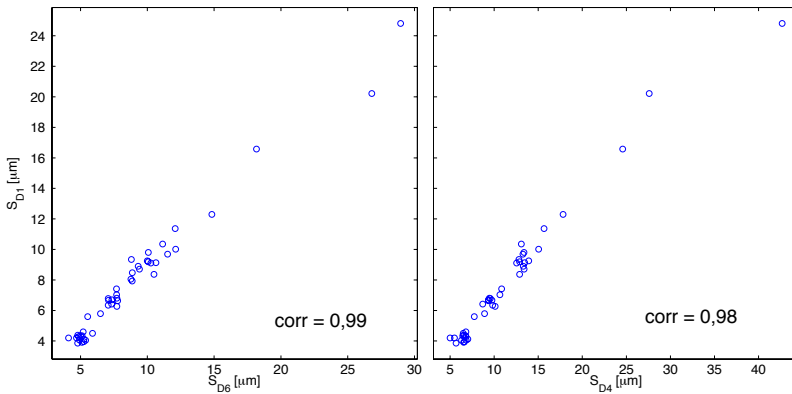


Figura 33. Análise de correlação do índice de dispersão da superfície extraída entre as três características avaliadas.

6.1.3 Considerações sobre o índice proposto

O índice de dispersão unido as análises gráficas das características extraídas, é apresentado como um novo critério para definição dos parâmetros de configuração. A superfície integral extraída, resultado da operação de extração, engloba os efeitos práticos da qualidade da imagem sobre o algoritmo de extração da superfície disponível. O índice de dispersão não apresenta um nível de correlação significativo em relação aos índices de qualidade consolidados em outras áreas de aplicação da CT. No entanto, um baixo nível de correlação foi observado em relação a SNR da matriz de voxel. Assim, é possível relacionar as características da imagem que mais atuam sobre os métodos de extração da superfície. Também foi demonstrado que o índice de dispersão pode ser usado em peças reais, com desvios de forma significativos. O estudo de sensibilidade do índice de dispersão usando um MWS pode ser considerado um caso extremo, em função do tamanho e da densidade da peça, além das componentes de alta frequência na superfície da peça.

6.2 MÉTODO PARA SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO

A proposta para a sistematização do conhecimento adquirido nesta pesquisa consiste no estabelecimento de sete regras para orientação do processo de seleção de nove parâmetros de configuração de um tomógrafo. Algumas regras são simples e fáceis de se implementar analiticamente, enquanto para outras há a necessidade de uma base de dados empírica. As regras são numeradas de acordo com a sequência em que devem ser executadas.

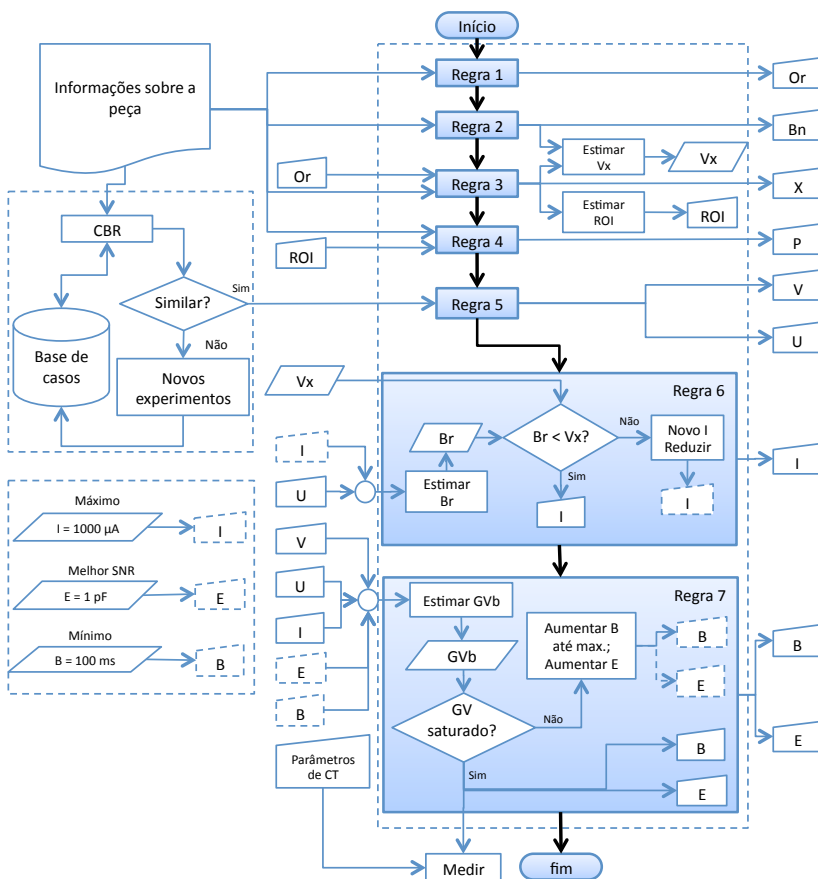


Figura 34. Processo para seleção dos parâmetros de configuração de CT.

As primeiras regras dependem apenas das especificações da peça, as mesmas informações apresentadas na seção 5.3 (material, espessura, tamanho, geometria e tarefas de medição). A partir daí, as informações obtidas com a escolha de um determinado parâmetro são usadas para alimentar a regra de escolha de outros parâmetros. No fluxograma apresentado na Figura 34, o fluxo de informação para definição de cada regra ocorre da esquerda para direita. Os parâmetros de configuração são representados pelos indicadores definidos na seção 5.1.

Os critérios de decisão para escolha de cada regra são apresentados a seguir. Para demonstrar o efeito da variação de cada parâmetro de configuração foram realizados experimentos com os cilindros escalonados (§5.3.1), utilizando o índice de dispersão obtido com o diâmetro externo $D1$ do cilindro escalonado como variável de resposta.

6.2.1 Orientação da peça na mesa rotativa

A escolha da orientação da peça sobre a mesa rotativa, uma tarefa aparentemente simples, pode influenciar significativamente o resultado de uma medição. O primeiro cuidado é em relação à espessura atravessada pela radiação. Quanto maior a espessura, maiores os efeitos de *beam hardening*. O segundo e mais importante está relacionado aos artefatos de Feldkamp, gerados pela amostragem incompleta do domínio de Radon. Além disso, não se pode esquecer da fixação da peça no tomógrafo, de modo a evitar deformações na superfície da peça e, ao mesmo tempo, garantir que a peça não se desloque durante a medição.

Para caracterização do efeito da orientação da peça sobre a mesa rotativa na qualidade da medição, foi realizado um estudo experimental, onde todos os parâmetros foram mantidos constantes, variando-se apenas a inclinação do eixo de simetria da peça (Tabela 5).

Tabela 5. Parâmetros usados para estudo sobre influência da orientação da peça.

Parâmetros	símbolo	conjuntos de parâmetros de CT			
		1	2	3	4
Tensão	U [kV]	225	225	225	225
Corrente	I [μ A]	380	380	380	380
Tempo de integração	B [ms]	2000	2000	2000	2000
Ganho	E [pF]	0,5	0,5	0,5	0,5
Pré-Filtros, Cu	V [mm]	2,00	2,00	2,00	2,00
Posição em X	X [mm]	500	500	500	500
Material	M	POM	POM	POM	POM
Orientação	Or	0°	18°	45°	90°
Qtd. Projeções	P	720	720	720	720
<i>Binning</i>	Bn	1	1	1	1
Ponto focal	Br [μ m]	85,5	85,5	85,5	85,5
Ampliação	Vg	3,00	3,00	3,00	3,00
Tamanho do voxel	Vx [μ m]	133,3	133,3	133,3	133,3
Tempo de aquisição	t [min]	24	24	24	24
Índice de disp. médio	s_{D1} -bar [μ m]	7,93	8,05	8,48	14,91
amplitude, S_{D1}	R	0,51	0,52	0,74	0,21

Os resultados demonstram que a variação do índice de dispersão não foi considerada significativa entre as três primeiras configurações para um nível de significância ($\alpha = 0,026$) (Figura 35 – direita). Porém, com o eixo de simetria da peça na orientação horizontal, o índice de dispersão tem significativo aumento (Figura 35 – esquerda).

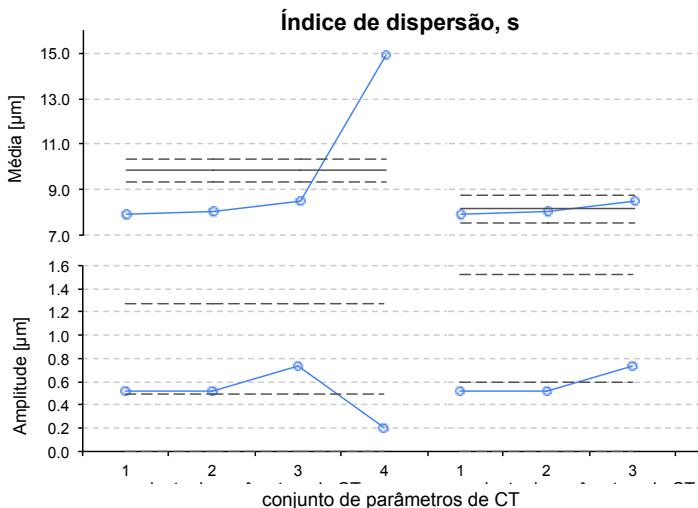


Figura 35. Gráfico de média e amplitude do índice de dispersão do D1 para diferentes orientações.

O valor encontrado para o índice de dispersão da configuração #4 pode ser atribuído ao artefato de Feldkamp (§2.5). Dependendo da orientação da peça (Figura 36), algumas regiões da imagem não são adequadamente reconstruídas e o resultado é a perda de nitidez e efeitos que se assemelham a reflexo de luz. No caso da configuração #1 estes artefatos estão predominantes nos planos, enquanto que na configuração #4, a predominância é na superfícies dos cilindros. Quando a peça está inclinada, estes artefatos aparecem apenas nas quinas.

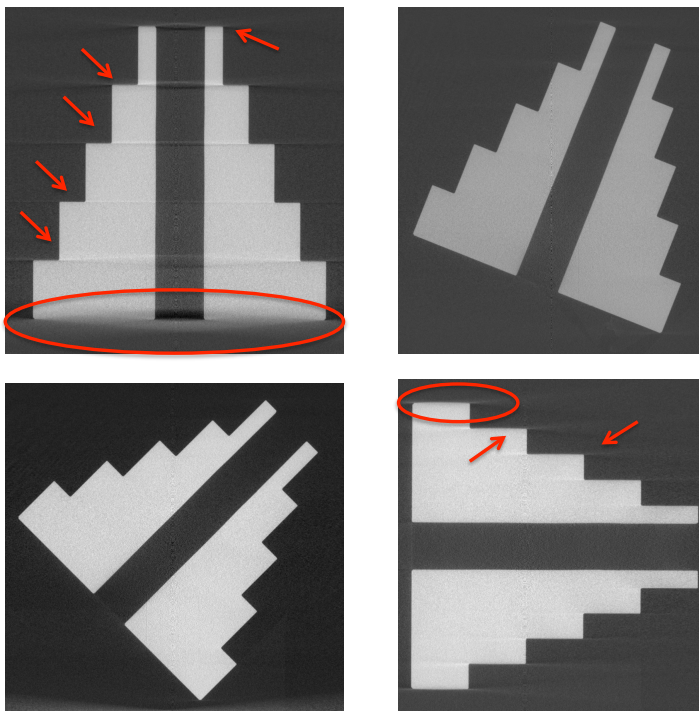


Figura 36. Artefatos de Feldkamp devido à orientação da peça.

Assim, as recomendações para a escolha da orientação da peça na mesa rotativa podem ser expressas através da seguinte regra:

Regra #1: Definição da orientação do objeto na mesa rotativa.

Identificar como as características geométricas que se deseja medir são influenciadas pela orientação, levando-se em consideração os efeitos do artefato de Feldkamp:

- Cilindros: melhores resultados são obtidos quando o eixo do cilindro está orientado paralelo ao eixo de rotação da mesa rotativa. Porém, quando inclinados a dispersão dos pontos não tende a um aumento significativo. Peças mais densas e espessas estão mais sujeitas à variação de dispersão quando inclinadas. A qualidade da medição é significativamente reduzida quando o eixo do cilindro é posicionado a 90° do eixo da mesa rotativa.

- Esferas: superfícies arredondadas possuem apenas um ponto cuja normal é paralela ao eixo de rotação da mesa rotativa e por isso não devem sofrer influência significativa dos efeitos do artefato de Feldkamp.

- Planos: mesmo fora do escopo experimental, pode-se afirmar que os melhores resultados são obtidos quando a normal do plano está inclinada em relação ao eixo de rotação da mesa rotativa.

- Cones: deve-se evitar orientações em que as normais dos pontos que fazem parte da região de interesse da medição sejam paralelos ao eixo de rotação da mesa rotativa.

Quando se deseja medir planos e cilindros na mesma peça, a orientação deverá priorizar a regra de posicionamento do plano desde que o eixo do cilindro não fique a 90° do eixo de rotação da mesa. A regra geral é inclinar a peça de forma que as características geométricas de interesse fiquem orientadas de 10° a 45° em relação ao eixo da mesa rotativa.

Uma vez definida a melhor orientação para as características geométricas de interesse, é sempre importante considerar a orientação que resulte em uma menor espessura de penetração dos raios X, especialmente quando a peça for densa ou volumosa.

6.2.2 Parâmetros que influenciam o volume de dados

O volume de dados de uma medição por tomografia pode ser basicamente influenciado pela escolha de três parâmetros: uso de *binning*, a ampliação e a quantidade de projeções (§5.1).

Regra #2: Sobre o uso de *binning*.

Embora parâmetros de qualidade da imagem como SNR apresentem eventualmente melhores resultados com o uso de *binning*, a resolução espacial é reduzida. Para o tomógrafo estudado não foi identificada uma melhora significativa com o uso de *binning*. Inclusive, na medição do MWS (§6.1.1), o uso de *binning* apresentou resultado negativo. Dessa forma, recomenda-se evitar o uso de *binning*, a menos

que o objetivo seja reduzir o tamanho da matriz de voxel e o tempo de medição, e um pior desempenho metrológico seja aceitável.

Regra #3: Definir a posição da mesa rotativa no eixo x.

Com base nas dimensões da peça ou na região de interesse (ROI) e na orientação sobre a mesa rotativa, a imagem deve ser ampliada o máximo possível (§5.1).

Regra #4: Determinar a quantidade de projeções.

A literatura [28, 35] recomenda, para o caso de feixes paralelos e detector unidimensional, que o número mínimo de projeções seja ao menos igual ao número de pixels necessário para adquirir a imagem da seção do objeto.

Como projeções paralelas necessitam apenas 180° de rotação, uma adaptação para feixes cônicos pode ser expressa da seguinte forma:

$$P \cong 2 \cdot N_{pixel} \quad (16)$$

Esta relação foi avaliada em um estudo onde a única variação entre configurações foi em relação à quantidade de projeções (Tabela 6). O número de projeções da configuração #2 foi escolhido de forma que correspondesse, aproximadamente ao dobro da quantidade de pixels da ROI da característica avaliada. Para a configuração #1 subtraiu-se 360 projeções e para a configuração #3 foram adicionadas 360 projeções.

Os resultados experimentais (Figura 37) indicam que esta relação possui uma boa harmonização entre o tempo de medição e a dispersão dos pontos extraídos. Conforme esperado, a configuração #3 apresentou o melhor resultado. Porém, a melhora no resultado não é proporcional ao acréscimo no tempo. A diferença entre as configurações #2 e #3 não pode ser considerada significativa para um nível de significância ($\alpha = 0,022$). A equação (16) pode, dessa maneira, ser usada como recomendação geral. A menos que o objetivo seja diminuir a dispersão, apesar do aumento do tempo de aquisição.

Porém, não se pode descartar um estudo experimental mais detalhado com a finalidade de otimizar esta escolha.

Tabela 6. Parâmetros usados para estudo sobre influência da quantidade de projeções.

Parâmetros	símbolo	conj. de parâmetros de CT		
		1	2	3
Tensão	U [kV]	225	225	225
Corrente	I [μ A]	100	100	100
Tempo de integração	B [ms]	2000	2000	2000
Ganho	E [pF]	1,0	1,0	1,0
Pré-Filtros, Cu	V [mm]	0,50	0,50	0,50
Posição em X	X [mm]	450	450	450
Material	M	POM	POM	POM
Orientação	Or	18°	18°	18°
Qtd. Projeções	P	360	720	1080
Binning	Bn	1	1	1
Ponto focal	Br [μ m]	22,5	22,5	22,5
Ampliação	Vg	3,33	3,33	3,33
Tamanho do voxel	Vx [μ m]	120,0	120,0	120,0
Tempo de aquisição	t [min]	12	24	36
Rel. sinal-ruído proj.	SNR _p	28,9	28,9	28,9
Contraste	C _p	0,18	0,18	0,18
Rel. sinal-ruído	SNR _{Vx}	19,6	26,8	30,2
Índice de disp. médio	s _{D1-bar} [μ m]	9,25	6,34	5,60
amplitude, S _{D1}	R	0,76	0,49	0,40

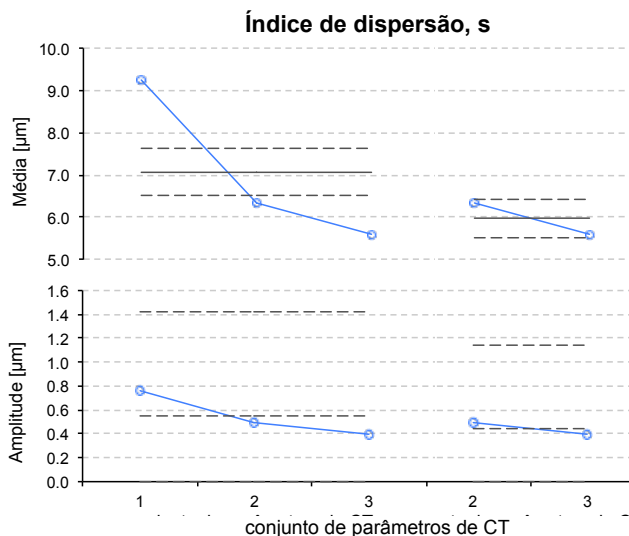


Figura 37. Gráfico de média e amplitude do índice de dispersão do D1 para estudo da variação da quantidade de projeções.

6.2.3 Ajuste do espectro de raios X

A princípio, a discretização da equação (5) apresentada na seção 2.2 sugere que a escolha dos valores de tensão e a seleção do pré-filtro possam ser obtidas por meio de simulação das projeções. Porém, entre a atenuação da radiação e a geração da matriz de voxel, o processo de medição, que pode variar de 20 minutos até mais de uma hora, está sujeito à influência de diversos fenômenos físicos e processamentos computacionais (§ 3.2) que dificultam a criação de um modelo com utilidade prática. Além disso, os dados do espectro energético do tubo de raios X (Figura 3) e a curva de eficiência do detector (Figura 7) não são constantes. Estas curvas são resultantes de ensaios realizados pelo fabricante dos componentes.

A tensão e o pré-filtro são dois parâmetros que estão diretamente relacionados com a interação entre radiação e material. Por esta razão, os efeitos destes parâmetros foram avaliados através de um estudo conduzido com uma peça de POM e outra de alumínio. Foram delineados experimentos bifatoriais para verificar a existência de interação significativa entre estes parâmetros.

Para o estudo com o cilindro escalonado de POM foram avaliadas seis configurações. Foram selecionados três níveis para os valores de tensão e dois níveis para o pré-filtro (Tabela 7). O tempo de medição foi mantido o mesmo para as seis configurações e a corrente foi ajustada de forma que os valores de nível de cinza máximo também se mantivessem constantes entre as configurações.

Os resultados (Figura 38) não demonstram haver influência significativa com a variação da tensão para um nível de significância ($\alpha = 0,032$). Porém, com o uso de pré-filtro, a dispersão dos pontos extraídos aumenta expressivamente. Também pode-se observar que com o uso de pré-filtros a variação dentro dos subgrupos aumentou.

Tabela 7. Parâmetros usados para estudo sobre influência do espectro de radiação na peça de POM.

Parâmetros	símbolo	conjuntos de parâmetros de CT					
		1	2	3	4	5	6
Tensão	U [kV]	125	175	225	125	175	225
Corrente	I [μ A]	100	72	56	950	380	240
Tempo de integração	B [ms]	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Ganho	E [pF]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Pré-Filtros, Cu	V [mm]	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00
Posição em X	X [mm]	450	450	450	450	450	450
Material	M	POM	POM	POM	POM	POM	POM
Orientação	Or	18°	18°	18°	18°	18°	18°
Qtd. Projeções	P	720	720	720	720	720	720
<i>Binning</i>	Bn	1	1	1	1	1	1
Ponto focal	Br [μ m]	12,5	12,6	12,6	118,8	66,5	54,0
Ampliação	Vg	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
Tamanho do voxel	Vx [μ m]	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
Tempo de aquisição	t [min]	24	24	24	24	24	24
Rel. sinal-ruído proj.	SNR _p	24,49	29,54	31,75	20,44	23,22	25,87
Contraste	C _p	0,122	0,157	0,194	0,095	0,099	0,12
Rel. sinal-ruído	SNR _{v_x}	28,13	29,75	30,5	22,12	21,69	21,64
Índice de disp. médio	S _{D1-bar} [μ m]	4,285	4,047	4,343	8,706	9,694	9,192
amplitude, S _{D1}	R	0,029	0,326	0,592	1,289	0,636	0,748

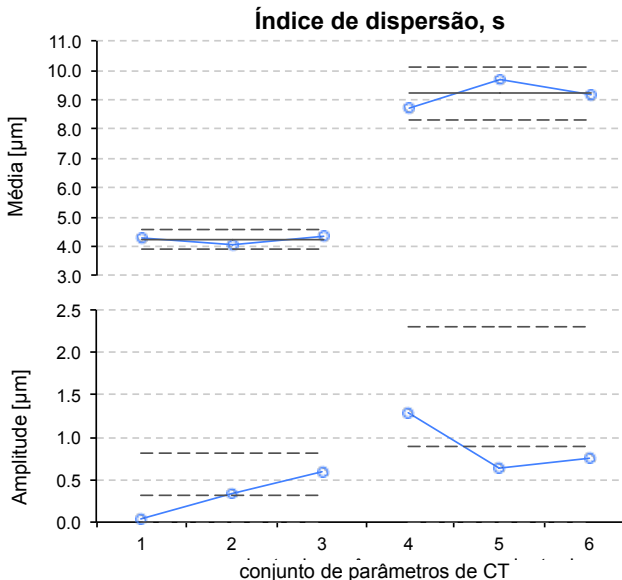


Figura 38. Gráfico de média e amplitude do índice de dispersão do D1 para variação do espectro de raios X no cilindro escalonado de POM.

Para o estudo com o cilindro escalonado de alumínio foi delineado um experimento bifatorial semelhante (Tabela 8).

Tabela 8. Parâmetros usados para estudo sobre influência do espectro de radiação na peça de alumínio.

Parâmetros	símbolo	conjuntos de parâmetros de CT					
		1	2	3	4	5	6
Tensão	U [kV]	125	175	225	125	175	225
Corrente	I [μ A]	100	72	56	950	380	240
Tempo de integração	B [ms]	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Ganho	E [pF]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Pré-Filtros, Cu	V [mm]	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00
Posição em X	X [mm]	450	450	450	450	450	450
Material	M	Al	Al	Al	Al	Al	Al
Orientação	Or	18°	18°	18°	18°	18°	18°
Qtd. Projeções	P	720	720	720	720	720	720
<i>Binning</i>	Bn	1	1	1	1	1	1
Ponto focal	Br [μ m]	12,5	12,6	12,6	118,8	66,5	54,0
Ampliação	Vg	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
Tamanho do voxel	Vx [μ m]	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
Tempo de aquisição	t [min]	24	24	24	24	24	24
Rel. sinal-ruído proj.	SNR _p	34,5	39,5	37,0	25,9	29,6	32,7
Contraste	C _p	0,36	0,35	0,38	0,22	0,24	0,28
Rel. sinal-ruído	SNR _{Vx}	21,70	19,42	28,55	21,78	25,29	22,25
Índice de disp. médio	S _{D1-bar} [μ m]	2,34	2,22	2,56	5,02	5,33	5,35
amplitude, S _{D1}	R	0,14	0,05	0,11	0,35	0,37	0,53

Os resultados (Figura 39) foram semelhantes aos obtidos com a peça de POM. Não se pode afirmar que há diferença significativa entre os valores de tensão para um nível de significância de ($\alpha = 0,035$). Embora o uso de pré-filtro esteja relacionado à melhora dos efeitos do artefato *beam hardening*, o contraste C_p, a SNR_p e a dispersão dos pontos extraídos pioraram com o uso de pré-filtro.

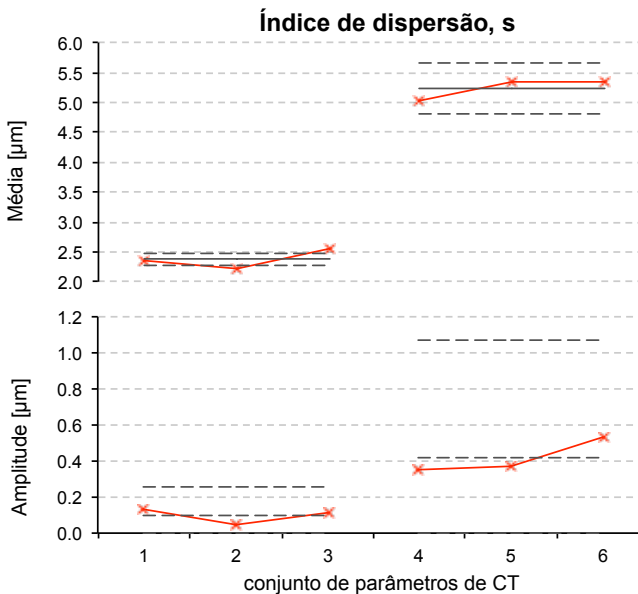


Figura 39. Gráfico de média e amplitude do índice de dispersão do D1 para variação do espectro de raios X no cilindro escalonado de POM.

Como as peças de teste são relativamente simples em termos de geometria e variação de espessura atravessada pela radiação, sofreram menos influências dos efeitos do *beam hardening*. Dessa maneira, propõe-se que a escolha destes parâmetros seja baseada em resultados experimentais de peças similares, armazenados em uma base de conhecimento. Assim, a regra #5 pode ser apresentada da seguinte forma:

Regra #5: Determinar tensão e selecionar pré-filtro.

Identificar peça similar, acessar base de dados e selecionar parâmetros adequados. Na hipótese de não haver caso semelhante, realizar novos experimentos.

No entanto, como recomendações gerais, pode-se sugerir que os valores de tensão variem entre 100 e 150 kV para peças plásticas e entre 150 a 225 kV para peças de alumínio.

A escolha da espessura do pré-filtro de cobre é um pouco mais difícil de generalizar. A decisão entre usar ou não o pré-filtro influencia muito mais o resultado da medição do que a escolha da espessura do

pré-filtro. Assim, para peças de alumínio pode-se considerar o uso de pré-filtros de cobre variando entre 0,25 mm e 1,5 mm. Para peças de plástico, melhores resultados têm sido obtidos quando não se usa pré-filtro. Materiais de menor densidade, como o alumínio, deveriam ser considerados também para uso como pré-filtro.

Aqui cabe ressaltar que estes parâmetros, por terem uma grande influência no espectro de energia, são os mais susceptíveis a influenciar a definição do *threshold* e, conseqüentemente, gerar um desvio sistemático de deslocamento médio da superfície.

6.2.4 Ajuste da intensidade da imagem

Embora a escolha de tensão e o pré-filtro também influenciem na intensidade da imagem, estes parâmetros não devem ser escolhidos com esta motivação, mas sim com o propósito de encontrar uma relação adequada entre as propriedades da peça (*e.g.* densidade do material, quantidade de material a ser atravessada) e o espectro de radiação gerado. A intensidade da imagem deve ser ajustada por outros três parâmetros: corrente do tubo, tempo de integração e ganho do detector.

O efeito da escolha destes parâmetros pode ser demonstrado por um experimento bifatorial entre tempo de integração e ganho. Como o ajuste de cada um destes parâmetros está relacionado com o valor utilizado pelos outros dois, não faz sentido a realização de um experimento com três fatores. Além disso, a influência do valor da corrente não é significativa enquanto o ponto focal for mantido menor que o tamanho do voxel [44]. Assim, o valor da corrente foi escolhido como o máximo possível, sendo limitado pela saturação dos níveis de cinza do detector ou pelo tamanho do ponto focal em relação ao tamanho do voxel (Tabela 9).

Tabela 9. Parâmetros usados para estudo sobre influência dos parâmetros usados para ajustar a intensidade da imagem.

Parâmetros	símbolo	conjuntos de parâmetros de CT			
		1	2	3	4
Tensão	U [kV]	225	225	225	225
Corrente	I [μ A]	500	100	500	250
Tempo de integração	B [ms]	500	2000	500	2000
Ganho	E [pF]	0,5	0,5	1,0	1,0
Pré-Filtros, Cu	V [mm]	0,50	0,50	0,50	0,50
Posição em X	X [mm]	450	450	450	450
Material	M	POM	POM	POM	POM
Orientação	Or	18°	18°	18°	18°
Qtd. Projeções	P	720	720	720	720
<i>Binning</i>	Bn	1	1	1	1
Ponto focal	Br [μ m]	112,5	22,5	112,5	56,3
Ampliação	Vg	3,33	3,33	3,33	3,33
Tamanho do voxel	Vx [μ m]	120,0	120,0	120,0	120,0
Tempo de aquisição	t [min]	6	24	6	24
Rel. sinal-ruído proj.	SNR _p	34,1	39,9	29,2	45,6
Contraste	C _p	0,36	0,31	0,20	0,40
Rel. sinal-ruído	SNR _{v_x}	27,82	25,68	28,31	38,71
Índice de disp. médio	s _{D1} -bar [μ m]	7,42	6,78	7,03	4,38
amplitude, S _{D1}	R	0,05	0,14	0,37	0,13

A configuração #4 resultou na menor dispersão dos pontos extraídos. Foi também a configuração com melhor SNR e contraste, porém com maior tempo de aquisição. A comparação entre as configurações #1 e #2 e principalmente entre as configurações #3 e #4 demonstra melhora significativa ($\alpha = 0,026$) nos resultados com o aumento do contraste e principalmente com o aumento do tempo (Figura 40). No entanto, os resultados da configuração #2 demonstram que o aumento do tempo de integração não resulta necessariamente em um bom resultado. A diferença entre as configurações #2 e #4 é que a perda de intensidade por causa da redução do ganho na configuração #4 foi compensada com o aumento da corrente.

O pior resultado foi obtido com a configuração #1. Ambos, o aumento do ganho e o curto tempo de integração resultam em aumento de ruído na imagem. O resultado é pior, inclusive, que o obtido com a configuração #3, onde foi obtido o menor contraste e a menor SNR. Nota-se que o único parâmetro alterado entre as configurações #1 e #3 é o ganho.

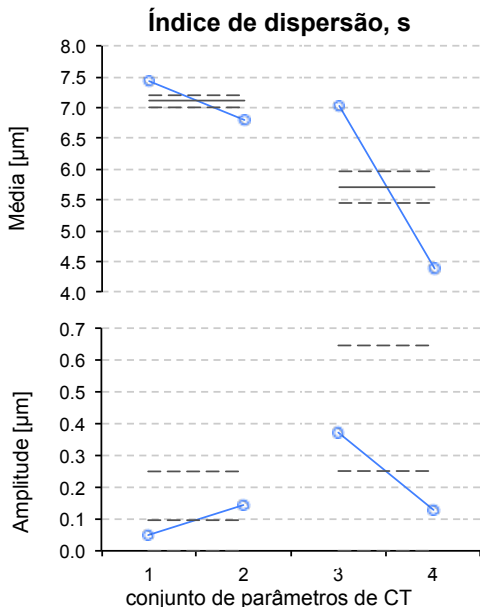


Figura 40. Gráfico de média e amplitude do índice de dispersão do D1 para ajuste de intensidade.

Assim, a recomendação é iniciar pela escolha do valor da corrente de acordo com a regra #6, deixando ganho e tempo de integração para o final.

Regra #6: Determinar o valor de corrente.

O valor inicial da corrente do tubo deve ser o maior possível, desde que o ponto focal seja menor que o tamanho do voxel.

Regra #7: Selecionar tempo de integração e ganho do detector.

Com relação ao ganho, existe um valor que irá fornecer a menor dispersão dos pontos extraídos. Este valor pode ser identificado experimentalmente e mantido para as demais medições.

Dessa forma, o último parâmetro a ser selecionado é o tempo de integração. O valor deve, inicialmente, estar ajustado no mínimo possível. Como regra geral, o tempo de integração pode ser aumentado até que o nível de cinza de fundo da projeção atinja o limite de linearidade do detector. Porém, isso pode resultar em uma configuração muito onerosa em relação ao tempo de medição. Assim como no caso da

escolha do número de projeções, um estudo de similaridade deve ser considerado, a fim de otimizar a seleção deste parâmetro.

6.2.5 Recomendações gerais

A qualidade de uma medição está diretamente relacionada com os procedimentos executados na preparação para medição e durante o processo de medição. A seguir, são apresentadas recomendações gerais de boas práticas:

- A peça deve ter uma fixação rígida sobre a mesa rotativa a fim de se evitar perda de nitidez na imagem reconstruída. Porém deve-se ter cuidado para não deformar a peça.
- Os elementos de fixação devem ter baixa densidade, uma vez que a dispersão Compton originada no elemento de fixação pode influenciar a medição da peça.
- Deve-se usar elementos de fixação com tamanho proporcional ao da peça. Elementos de fixação muito grandes podem limitar a ampliação da imagem.
- Antes da primeira medição do dia deve-se considerar um tempo extra (*ca.* 30 minutos) para aquecimento e atendimento da condição de estabilidade do tubo. O objetivo é evitar variações na posição do ponto focal durante a medição.
- Minimizar a deriva térmica da peça antes e durante a medição. Uma sugestão é tentar acondicionar antecipadamente a peça que será usada na medição seguinte dentro do tomógrafo.
- Monitoramento das condições térmicas. A correção dos efeitos de dilatação térmica é uma questão que ainda demanda estudos. A princípio, não há recomendações, inclusive por parte de fabricantes, para se efetuar este tipo de correção. Porém é importante manter o registro e o controle de estabilidade da temperatura no interior do tomógrafo.
- Realização de verificações periódicas é uma forma de avaliar se os fatores de escala se mantêm estáveis ao longo do tempo.

Além disso, a tarefa de medição (operador de verificação) deve ser bem definida, de forma a explorar todo o potencial do tomógrafo. Uma prática comum, observada entre usuários acostumados com CMM por contato, é a subamostragem da característica geométrica de interesse (característica integral extraída), a qual deve ser evitada.

6.3 DISCUSSÃO SOBRE A COMPLETUDE DA SISTEMÁTICA PROPOSTA

Neste capítulo foi apresentada uma primeira proposta para viabilizar a sistematização do conhecimento adquirido durante o desenvolvimento deste trabalho. A expectativa é de que a continuidade deste trabalho resulte na implementação de um sistema baseado em conhecimento. Prevendo a utilização de ferramentas pertencentes ao ramo da inteligência artificial, *e.g.* raciocínios baseados em casos e sistemas especialistas, as recomendações foram apresentadas na forma de um fluxograma (Figura 34) e descritas na forma de regras.

Algumas regras como a regra #3, escolha da posição da mesa, e a regra #6, escolha do valor da corrente, já estão praticamente finalizadas e prontas para serem implementadas. A princípio estas regras deveriam ser válidas para qualquer tomógrafo com a configuração apresentada neste documento.

A regra #1 é de fundamental importância para a configuração de tomógrafo estudada, *i.e.*, que utiliza o algoritmo FDK para reconstruções. Neste capítulo foram apresentadas recomendações para se evitar os efeitos do artefato de Feldkamp. Porém, este problema pode ser solucionado através de simulações da orientação da peça, aliadas a algoritmos de análise da imagem no domínio de Radon. Outra solução seria a mudança na trajetória relativa da peça em relação aos componentes do tomógrafo de forma a atender os requisitos de Tuy-Smith. No entanto, a implementação destas soluções vai muito além do escopo deste trabalho. Uma forma simples de se evitar este artefato nas características estudadas é análise qualitativa da matriz de voxel, como apresentado na Figura 36.

Com relação à regra #2, sobre o uso ou não do *binning*, os resultados experimentais não foram totalmente conclusivos, mas para o tomógrafo estudado, melhores resultados foram obtidos com o não uso do *binning*. Estudos em outros tomógrafos com detectores diferentes devem ser considerados.

A regra #4, que trata da definição da quantidade de projeções, também pode ser considerada em estágio avançado de conclusão. A regra geral poderia ser avaliada em outros tomógrafos e as alternativas de melhoria da dispersão da redução poderiam ser extrapoladas. Mas, como este é um parâmetro que influencia diretamente tempo e qualidade do resultado, é sempre difícil se estabelecer uma regra.

O mesmo é válido para a regra #7. Aumento do ganho pode possibilitar a redução do tempo de integração. Porém, no caso do tomógrafo estudado, aumento do ganho não apresentou bons resultados. Já o aumento do tempo de integração, assim como o da quantidade de projeções, podem aumentar significativamente o tempo de medição, não resultando necessariamente em ganho significativo de qualidade. Assim, a regra de seleção destes parâmetros deve oferecer algum tipo de flexibilidade. Um comprometimento entre tempo e qualidade da superfície extraída deve ser considerado. No fluxograma é apresentada a regra geral, indicada para quando o tempo de aquisição das imagens não é um critério crítico.

Com relação à regra #5, algumas importantes conclusões experimentais foram obtidas. O uso de pré-filtros em geral aumenta o ruído na matriz de voxel, embora reduza os artefatos de *beam hardening*. Os valores de tensão, por outro lado, não influenciaram de maneira significativa a dispersão dos pontos na superfície extraída. Algumas recomendações gerais foram apresentadas, mas a solução prática inicial consiste na formação de uma base de dados compostas por casos semelhantes. É importante destacar também que o uso de pré-filtros e a variação dos valores da tensão, por alterar a natureza do nível de cinza na imagem, podem resultar em um deslocamento sistemático da superfície. Conforme antecipado no capítulo 3, os erros sistemáticos devem ser corrigidos.

No próximo capítulo são apresentadas duas aplicações com peças provenientes da indústria.

7 APLICAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas duas aplicações que retratam a utilização da sistemática apresentada neste trabalho em casos reais, de peças obtidas de dois ramos distintos da indústria. Na primeira aplicação foi utilizada uma peça plástica de precisão, enquanto na segunda um fundido de alumínio. A propósito, ambas as peças são atualmente inspecionadas por CT.

7.1 APLICAÇÃO 1 – PEÇA PLÁSTICA

Esta aplicação tem como objetivo demonstrar a viabilidade em se utilizar uma base de casos para selecionar os parâmetros de configuração (conforme proposto em §6.2). Assim, será apresentada uma comparação do nível de dispersão dos pontos extraídos, obtido com duas configurações de parâmetros de CT, em duas peças com características semelhantes. Uma peça de teste, o cilindro escalonado de POM, e o disco de cerdas de uma escova de dentes elétrica, fabricada também em POM pelo processo de injeção.

7.1.1 Procedimento experimental

As características avaliadas do cilindro escalonado são os diâmetros D1 e D6 (Figura 24). Já para o disco de cerdas, as características avaliadas são um diâmetro externo e um diâmetro interno (Figura 41). Foram utilizados operadores de verificação semelhantes para ambas as peças, variando apenas o número de pontos extraídos em função do tamanho de voxel. O procedimento experimental para obtenção dos valores de referência do cilindro escalonado é apresentado na seção 5.3.1.

Calibração: As características do disco de cerdas foram calibradas utilizando uma CMM com sensor por contato esférico (\varnothing 1 mm) e cabeçote do tipo medidor. Os perfis de circularidade foram extraídos com amostragem de aproximadamente 3.100 pontos para o diâmetro externo e 200 pontos para o diâmetro interno. Foram realizados três ciclos de medição. As medições foram realizadas em condições ambientais controladas. A temperatura ambiente especificada para o laboratório é $(20 \pm 0,5)$ °C e a umidade relativa é (50 ± 10) %.

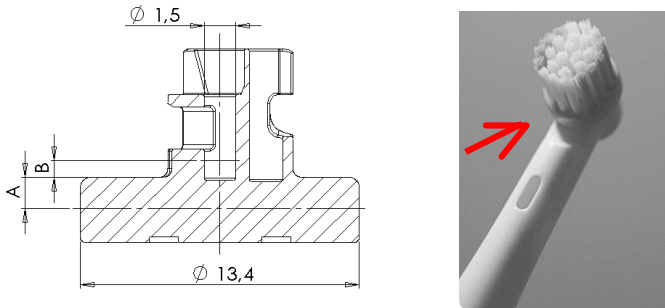


Figura 41. Características do disco de cerdas avaliadas. Diâmetro interno na seção B (0,8 mm) e diâmetro externo na seção A (1,4 mm).

Operação de extração por CT: Serão comparados dois conjuntos de parâmetros de configurações que exploram as lacunas deixadas pela sistemática proposta (Tabela 10).

Para os parâmetros regidos pelas regras 1, 2, 3 e 6 foram definidos os mesmos valores para cada conjunto de parâmetros de configurações.

Regra #1: Eixo do cilindro na vertical: medição de um cilindro.

Regra #2: Conforme recomendado, não foi utilizado *binning*.

Regra #3: Máxima ampliação, limitada pelo curso do eixo e não pelo tamanho da peça.

Regra #6: Ponto focal menor do que o tamanho do voxel ($Br \sim 39 \mu\text{m}$).

Já para os parâmetros regidos pelas regras 4, 5 e 7, critérios diferentes foram aplicados. Nas escolhas apresentadas a seguir, será observado que na configuração #1 não há preocupação com o tempo de medição, ao contrário da configuração #2.

Regra #4: Dois critérios distintos foram usados.

Considerando que $N_{\text{pixel}} \sim 360$, na configuração #1 foi utilizada uma quantidade maior de projeções, conforme a relação: $P = 3 \times N_{\text{pixel}} = 1080$.

Já na configuração #2 foi utilizada a relação: $P = 2 \times N_{\text{pixel}} = 720$ (conforme apresentado em §6.2.2).

Regra #5: Como a base de dados não existe ainda, foram escolhidas duas configurações com espectros de energia diferentes. Na configuração #1 foi ajustado um valor energético máximo maior,

150 keV. Porém, o pré-filtro de 0,25 mm de cobre elimina os fótons com valores energéticos mais baixos. Na configuração #2 o valor máximo do espectro de energia é um pouco menor, 100 keV, e como não foi usado pré-filtro, os fótons de menor energia não foram eliminados. A diferença básica entre estas duas configurações é que na configuração #1 a atenuação é menor do que na configuração #2, o que resulta em perda de contraste nas projeções da configuração #1.

Regra #7: O ganho do detector, em ambas as configurações, foi mantido em 1 pF. Na configuração #1 o tempo de integração foi o maior possível, visando a redução do ruído nas projeções. Já na configuração #2 o tempo de integração escolhido corresponde à metade, visando redução do tempo.

Tabela 10. Parâmetros de configuração utilizados no aplicação 1, tanto para a peça de teste quanto para o disco de cerdas.

config. #	Tensão U [kV]	Corrente I [μ A]	Tempo de integração B [ms]	Ganho do detector E [pF]	Pre-filtro, Cu V [mm]	Projeção P	Tamanho do voxel V_x [μ m]	Tempo t [min.]
1	150	265	2000	1.0	0.25	1080	40	36
2	100	395	1000	1.0	0.00	720	40	12

O software de medição Calypso v5.0 foi usado para extrair os pontos da superfície. Este software utiliza algoritmos de *threshold* local. O perfil externo foi extraído com 1800 pontos e o interno com 225 pontos em função de limitações devido ao tamanho de voxel.

Operação de filtragem: Os perfis extraídos não foram filtrados.

Operação de associação: O diâmetro externo foi ajustado pelo método do mínimo círculo circunscrito (MCCI) e o diâmetro interno pelo método do máximo círculo inscrito (MICI).

Operação de avaliação: As características avaliadas são o diâmetro externo do perfil circular localizado na seção A (1,4 mm), com um valor nominal de $(13,40 \pm 0,05)$ mm, e o diâmetro interno do perfil circular localizado na seção B (0,8 mm), com um valor nominal de $(1,500 \pm 0,015)$ mm.

7.1.2 Resultados

Os resultados da análise do nível de dispersão indicam haver uma diferença significativa entre as configurações (para um nível de significância $\alpha = 0,003$). Os resultados das características internas

apresentaram uma variação maior do que as características externas. Principalmente no caso das medições do disco de cerdas, pode-se observar que embora haja uma diferença nos valores das médias, não é possível afirmar que esta diferença é significativa, uma vez que os valores estão dentro dos limites de controle. Esta variação pode estar relacionada a uma amostragem menor da superfície, devido à relação entre o tamanho da característica avaliada e o tamanho de voxel da imagem. Também, pode-se observar que os resultados obtidos com o cilindro escalonado apresentaram médias globais menores do que as do disco de cerdas embora as diferenças relativas entre configurações sejam equivalentes. Esta diferença pode estar relacionada com o tamanho das características avaliadas e o tamanho do voxel. O diâmetro interno do disco de cerdas é apenas 1,5 mm contra 15 mm do cilindro escalonado.

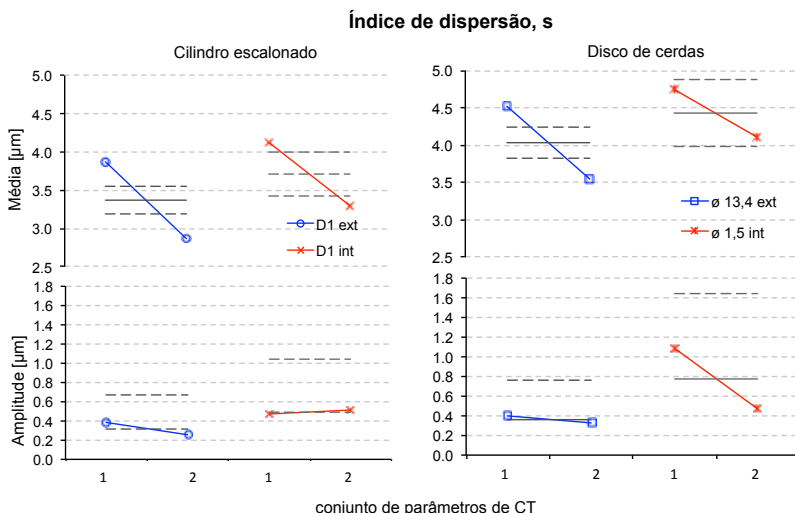


Figura 42. Nível de dispersão entre cilindro escalonado (esquerda) disco de cerdas (direita).

O efeito do nível de dispersão dos pontos extraídos no resultado da medição pode ser ilustrado através da análise gráfica do diâmetro externo do disco de cerdas (Figura 43). A análise das componentes de frequência indicam que as componentes dominantes da peça foram bem reproduzidas nas medições por CT, em ambas as configurações. Porém, por ter um nível de dispersão maior, as medições por CT utilizando a configuração #1 tendem a ajustar diâmetros maiores.

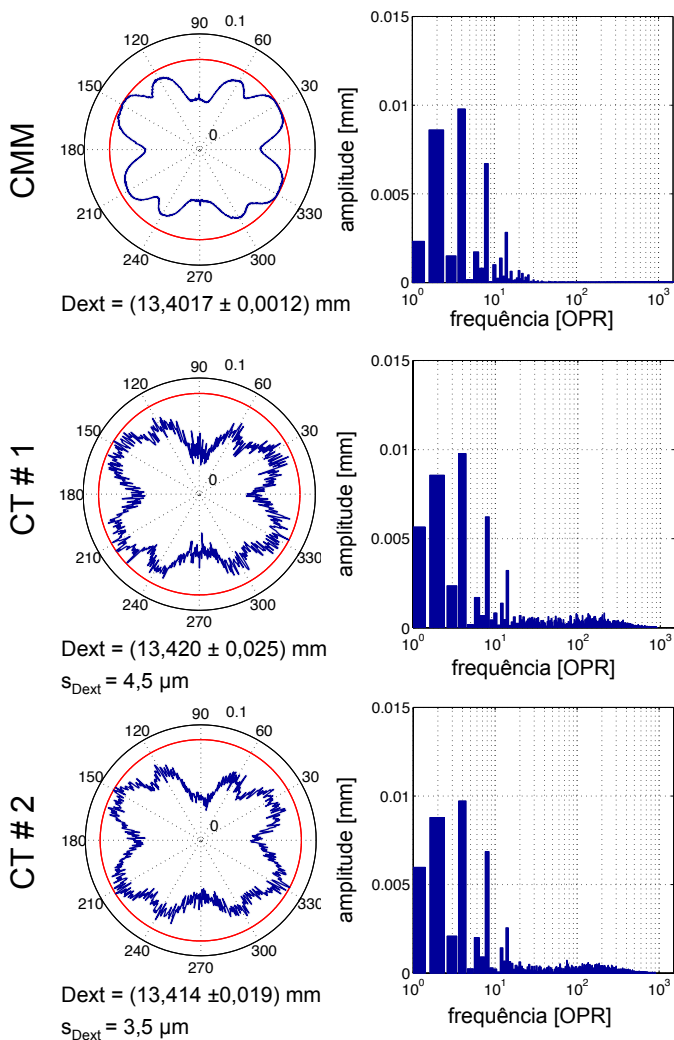


Figura 43. Análise gráfica do perfil extraído do disco de cerdas: CMM por contato (superior); Configuração #1 por CT (meio); Configuração #2 por CT (inferior).

7.1.3 Análise dos resultados

A comparação entre características similares de peças diferentes aponta para a possibilidade de criação de uma base de dados para orientação da seleção dos parâmetros. Embora os resultados apresentem algumas diferenças em termos absolutos, as conclusões sobre os parâmetros que resultam em uma menor dispersão dos pontos extraídos foram as mesmas para ambas as peças. Esta é uma conclusão importante para a decisão sobre o uso de um KBS, como ferramenta de apoio ao usuário de CT, conforme abordado na seção 5.5.

Sobre os resultados obtidos com os parâmetros escolhidos, vale a pena ressaltar a importância da escolha dos parâmetros que influenciam o espectro de energia (tensão do tubo e pré-filtro, abordados pela regra #5). Com base nos resultados obtidos no capítulo 6, pode-se atribuir a estes parâmetros um maior nível de dispersão na configuração #1. É importante observar que, mesmo com o uso de maior número de projeções e com um maior tempo de integração, o que leva a um tempo de medição três vezes maior, a dispersão foi superior. Com base nos resultados apresentados em §6.2.3, pode-se justificar uma maior dispersão na configuração #1 devido ao uso de pré-filtro.

A análise gráfica ilustra que quando ajustes baseados em extremos funcionais são utilizados em medições com excessiva dispersão dos pontos extraídos, a incerteza de medição aumenta consideravelmente. Neste caso, uma alternativa de alteração no operador de verificação seria o uso de um filtro passa baixa de 50 UPR para reduzir a incerteza. Esta é, no entanto, uma decisão difícil para o metrologista uma vez que os operadores de especificação não definem o tipo de filtro que deve ser usado nas medições. À medida que sistemas de medição com distintos princípios de funcionamento começam a se difundir, principalmente em relação aos sensores por contato, surge também a demanda por operadores de verificação cada vez mais completos.

7.2 APLICAÇÃO 2 – FUNDIDO DE ALUMÍNIO

Nesta aplicação a sistemática proposta para a escolha dos parâmetros de configuração é comparada com os parâmetros que são utilizados na indústria para avaliar um pequeno fundido de alumínio.

7.2.1 Procedimento experimental

A peça selecionada para este estudo é a carcaça de um motor de combustão interna obtida pelo processo de fundição de alumínio, antes de passar pelo processo de usinagem (Figura 44).

Calibração: As características de interesse foram calibradas em uma CMM tipo portal cujo sistema de apalpação é constituído por um cabeçote do tipo medidor. A estratégia de medição usada na calibração do diâmetro maior consiste na extração de um perfil circular com ~ 3600 pontos associados pelo método dos mínimos quadrados. Os pontos do círculo foram adquiridos por contato contínuo (*scanning*). As medições foram realizadas em condições ambientais controladas. A temperatura ambiente especificada para o laboratório é $(20,0 \pm 0,3) ^\circ\text{C}$ e a umidade relativa é $(50 \pm 10) \%$.

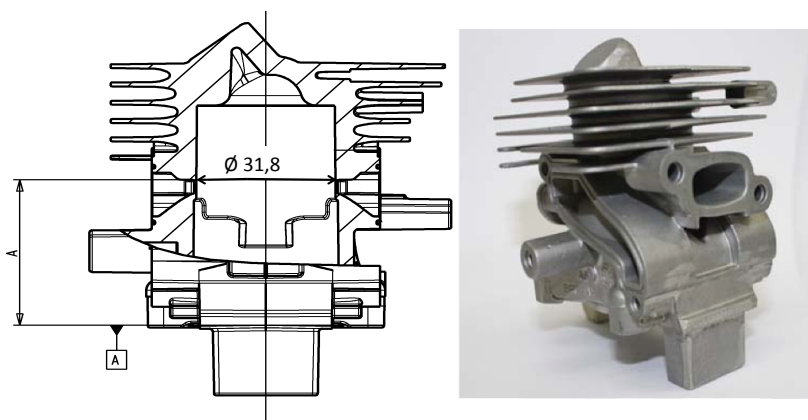


Figura 44 - Características selecionadas para a aplicação 2.

Operação de extração por CT: Os valores da configuração # 1 são os utilizados atualmente pelo fabricante da peça, obtidos por processo de interação ao longo do tempo. Já o critério de escolha para os valores da configuração # 2 seguiu a sistemática apresentada no capítulo 6 (Tabela 11).

Abaixo é apresentado o descritivo dos critérios usados para respeitar as recomendações e regras do capítulo 6:

Regra #1: Eixo do cilindro na vertical.

Regra #2: Conforme recomendado, não foi utilizado *binning*.

Regra #3: Máxima ampliação.

Regra #4: Foi utilizada a relação: $P = 2 \times N_{pixel} = 1022$, arredondado para 1080.

Regra #5: Tensão e pré-filtros foram escolhidos com a intenção de aumentar o contraste da projeção e permitir redução do tempo de integração.

Regra #6: Ponto focal menor do que o tamanho do voxel.

Regra #7: A capacitância do detector em ambas as configurações foi mantida em 1 pF.

Tabela 11. Configurações selecionadas.

config. #	Tensão U [kV]	Corrente I [μ A]	Tempo de integração B [ms]	Ganho do detector E [pF]	Pre-filtro, Cu V [mm]	Projeção P	Tamanho do voxel V_x [μ m]	Tempo t [min.]
1	215	520	1000	1,0	1,00	1080	131,8	18,0
2	180	720	800	1,0	0,25	1080	131,8	14,4

O software Calypso foi utilizado para extração dos pontos da superfície. Os perfis circulares foram extraídos com a maior quantidade de pontos possível (em função do tamanho do voxel) aproximadamente 1200 pontos para o diâmetro.

Operação de filtragem: Os perfis extraídos não foram filtrados.

Operação de associação: Todos os perfis foram associados pelo método dos mínimos quadrados.

Operação de avaliação: o círculo interno na seção A (18 mm), cujo diâmetro nominal é $(31,8 \pm 0,3)$ mm (Figura 44 - esquerda).

7.2.2 Resultados

Pode-se observar que os perfis obtidos com ambas as configurações de parâmetros de CT apresentaram resultados bem semelhantes, tanto em relação ao nível de dispersão quanto em relação à forma do perfil. Porém, em comparação com os resultados obtidos com a CMM por contato, a forma do perfil apresenta algumas diferenças relevantes. A amplitude das componentes de frequência entre a 5^a e a 30^a harmônicas são superiores ao esperado para dispersão dos pontos.

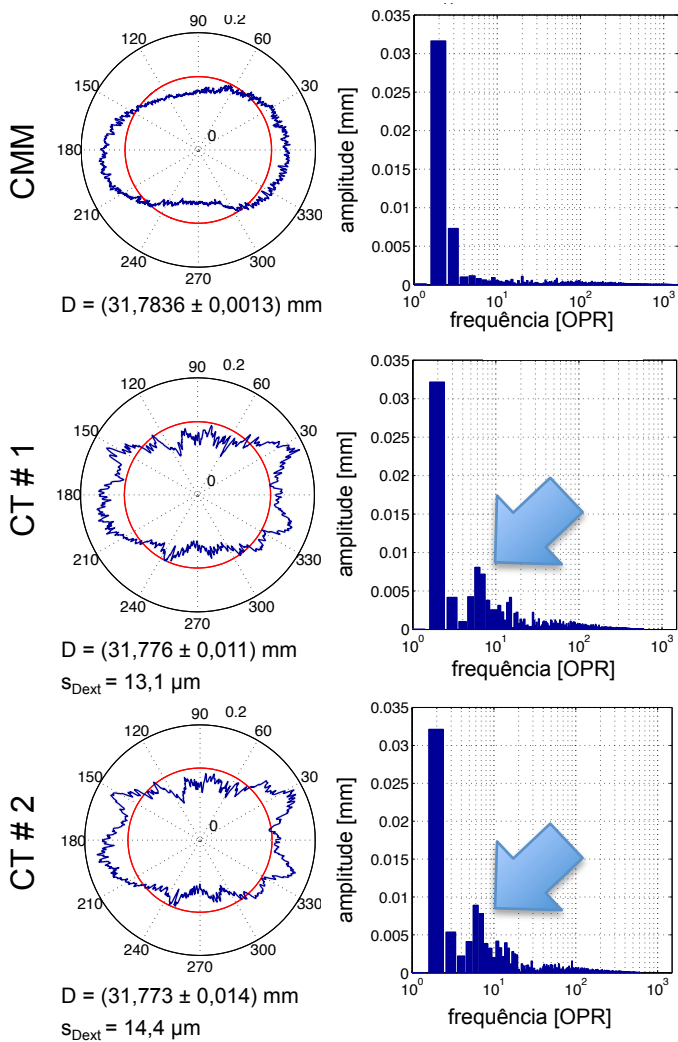


Figura 45. Análise gráfica do perfil extraído do cilindro de motor: CMM por contato (superior); configuração #1 por CT (meio); configuração #2 por CT (inferior).

7.2.3 Análise dos resultados

Sobre os parâmetros escolhidos nesta aplicação, ambas as configurações apresentaram nível de dispersão semelhantes. Como em ambiente industrial o tempo de medição é sempre um critério importante, a análise da dispersão dos pontos da superfície extraída pode ser considerada uma ferramenta útil para melhoria das medições por CT. Foi possível uma redução de 20% no tempo de aquisição das imagens, sem piorar a qualidade metrológica.

Quando se tem uma peça calibrada, a análise gráfica dos perfis extraídos pode ser utilizada como ferramenta para avaliar as influências da qualidade da imagem no processo de extração da superfície. Embora o processo de extração da superfície utilizado seja relativamente robusto à variação dos níveis de cinza na imagem, pode-se atribuir à presença de artefatos a possível causa das distorções observadas no perfil extraído. Uma hipótese é a ocorrência do efeito de *beam hardening* em um peça com geometria complexa (Figura 46), o que torna esta peça também mais susceptível aos efeitos do artefato de Feldkamp. Além do erro na medição de forma, estas distorções no perfil extraído podem, inclusive, resultar em erro de posicionamento das características.

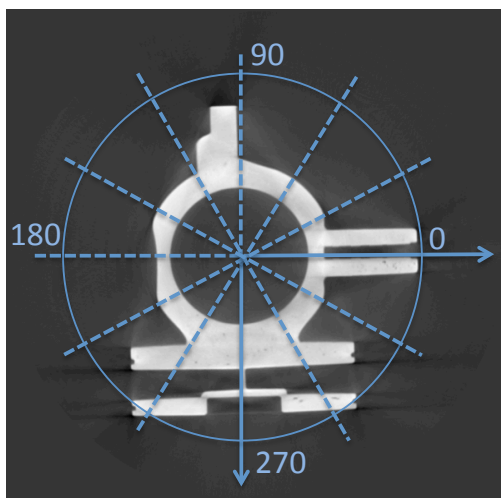


Figura 46. Seção da matriz de voxel onde o perfil circular foi extraído.

7.3 DISCUSSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada, através de duas aplicações em peças com características bem distintas, a maneira como a sistemática exposta no capítulo 6 pode ser empregada em aplicações cotidianas de CT na indústria. Foi mostrado (aplicação 1) que a dispersão dos pontos extraídos pode ser minimizada a partir de uma seleção adequada dos parâmetros de configuração. A possibilidade de se usar uma base de casos reduz a perda de tempo no processo de planejamento e a execução de medições desnecessárias. No entanto, foi demonstrado ainda (nas duas aplicações) que o tempo de aquisição das imagens também pode ser reduzido, sem que o nível de dispersão da superfície extraída seja comprometido.

Conforme apresentado nos resultados, a influência da dispersão é mais severa em operadores de verificação que utilizam ajustes baseados em extremos funcionais. Uma prática comum na indústria é, no entanto, o uso de operadores de verificação simplificados (*e.g.* uso do ajuste por mínimos quadrados quando MCCI é requerido) para minimizar o efeito da dispersão dos pontos ou de distorções (conforme observado na aplicação 2). Se por um lado esta prática reduz a incerteza introduzida pelo SM, por outro, ela introduz a incerteza do método³² no resultado de medição.

Outro aspecto importante sobre o uso de peças padrão para este tipo de análise é a qualidade da calibração, principalmente quando são peças obtidas da produção. Os erros na medição de referência aparecem como componentes de frequência que não fazem parte da peça, indicando um nível de dispersão maior.

Além da dispersão dos pontos extraídos, o deslocamento médio da superfície, quando não corrigido, é uma fonte de incerteza significativa. O deslocamento médio da superfície também é influenciado pela seleção dos parâmetros de configuração, levando a uma incorreta definição do *threshold*. Porém, como este tipo de erro pode decorrer também de erro de escala (definição da relação pixel/mm), da qualidade de eixos e guias, da presença de gradientes térmicos, entre outros, a sistemática proposta não pode ser utilizada para minimização do deslocamento médio da superfície.

Apesar destes desvios característicos, observados em medições por CT, os resultados obtidos até o momento podem ser considerados

³² Componente de incerteza devido à incorreta implementação do operador de verificação.

satisfatórios e promissores. Além do índice de dispersão, as características apresentadas foram medidas e a incerteza de medição foi estimada de acordo com a diretriz ISO 15530-3. A descrição do procedimento utilizado está fora do escopo deste trabalho, porém os valores encontrados podem ser usados para ilustrar a aplicação da CT na metrologia dimensional (para maiores detalhes acessar [104, 105]). Os valores de incerteza para a peça da aplicação 2 correspondem a menos de 5% do valor da tolerância. Já com relação às medições da peça do caso 1, embora a incerteza seja alta comparada à tolerância ($\sim 48\%$ para a configuração #2), a componente sistemática não foi corrigida, o que indica a possibilidade de redução da incerteza da medição. A correção do erro sistemático reduziria a incerteza para $\sim 7,5 \mu\text{m}$ (*ca.* 15% do intervalo de tolerância).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O constante desenvolvimento tecnológico possibilitou a expansão do campo de aplicação da CT para metrologia dimensional. A possibilidade de uma análise holística em peças com geometrias complexas faz com que a CT seja considerada uma tecnologia promissora, no âmbito da metrologia dimensional industrial. No entanto, a escolha dos parâmetros de configuração da medição por tomografia pode não apenas influenciar significativamente os resultados da medição como também o tempo necessário para aquisição das imagens. A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento da pesquisa, além de recomendações para trabalhos futuros.

8.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos durante a execução deste trabalho confirmaram as expectativas iniciais a respeito da possibilidade de promover melhorias operacionais em medições dimensionais obtidas por tomografia computadorizada, atuando na orientação da seleção dos parâmetros de configuração.

O método proposto para quantificar a qualidade da tomografia, a análise da dispersão dos pontos extraídos, se mostrou fundamental para aquisição e sistematização do conhecimento adquirido experimentalmente. Esta abordagem pode ser considerada uma forma indireta de qualificação da matriz de voxel, uma vez que envolve a fusão de várias características da imagem como contraste, ruído, resolução, e presença de artefatos, em apenas um índice de qualidade. Outra vantagem é que este tipo de análise é também robusto a diferenças de temperatura e outras causas de deslocamento médio da superfície.

A análise gráfica dos pontos extraídos, tanto no domínio do espaço como no domínio da frequência, é uma ferramenta muito útil em se considerando a natureza das medições por CT. Quando uma superfície calibrada é avaliada, é possível identificar distorções resultantes de artefatos na imagem ou a ocorrência de *aliasing*. Além disso, esta análise fornece informação significativa sobre a influência da dispersão dos pontos na operação de associação e na operação de filtragem. Assim, o potencial da CT para efetiva inspeção de

especificações geométricas de produtos, de acordo com o comitê técnico ISO/TC 213, pode ser investigado. Até então, não foi encontrada na revisão bibliográfica uma discussão envolvendo as operações de filtragem ou uso de diferentes tipos de ajustes.

Mesmo considerando que erros devido ao deslocamento médio da superfície também influenciam a qualidade da medição – e que, conseqüentemente, o índice de dispersão proposto não representa uma correlação direta com a incerteza de medição – a redução da dispersão dos pontos extraídos leva a resultados de medição melhores e mais confiáveis. Este é, especialmente, o caso para operadores de verificação por zona (e.g. a posição de uma superfície em relação a um conjunto de *datums*) ou especificações de tamanho que usem associação por zona (e.g. diâmetro ajustado por MCCI).

O conhecimento adquirido durante o desenvolvimento deste trabalho permitiu a estruturação de um conjunto de recomendações para assessorar o usuário de um tomógrafo. Apesar das limitações dos requisitos de escolha de alguns dos parâmetros, uma importante contribuição foi dada para a criação de um KBS. Foram identificados os parâmetros que podem ser escolhidos a partir de regras analíticas e uma seqüência eficiente para definição dos parâmetros com base no fluxo de informações.

Foi demonstrado, através da aplicação 1, que é possível utilizar uma base de casos com peças de testes representativas para selecionar a configuração para peças semelhantes. Este resultado é considerado essencial para caracterizar a viabilidade de implementação de um KBS. Além disso, as evidências de correlação entre características semelhantes abrem a perspectiva de simplificação da base de dados.

Finalmente, a expectativa é que os métodos e a forma de análise apresentados neste trabalho possam, efetivamente, contribuir na orientação de usuários de CT; auxiliar fabricantes na otimização de hardwares e softwares de seus sistemas; e auxiliar metrologistas na identificação das fontes de erro das medições.

8.2 OPORTUNIDADES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram encontradas algumas dificuldades que podem se tornar oportunidades para trabalhos futuros.

A evidência de que as conclusões que definem a escolha dos melhores parâmetros de configuração podem ser transferidas para peças similares sugere que a base de casos pode ser alimentada com peças de teste. Dessa maneira, pode-se propor como sequência deste trabalho o desenvolvimento de um conjunto de peças modulares, onde a espessura de material penetrado possa ser variada para uma mesma característica avaliada.

A dificuldade na obtenção de resultados reprodutíveis sugere efeitos de influências térmicas não corrigidas. É necessário que a estabilidade das condições de medição seja assegurada durante a varredura de uma peça. Uma oportunidade de trabalho é identificar as variações térmicas presentes no interior do tomógrafo e estudar uma alternativa para correções destes efeitos.

Neste estudo, o desempenho metrológico da nuvem de pontos, usada para comparação com CAD de referência estava fora do escopo da pesquisa. Porém, este tipo de análise é muito atrativa para usuários de tomografia, sobretudo para finalidade de engenharia reversa e prototipagem rápida. Este tipo de aplicação normalmente utiliza um processo de extração da superfície por *threshold* global. Desse modo, uma oportunidade para trabalho futuro é o desenvolvimento de métodos e técnicas para avaliar o desempenho metrológico da CT para medição de superfícies com formas livres.

Uma das maiores dificuldades em se utilizar simuladores no estudo da seleção dos parâmetros de configuração era a carência por um índice de qualidade adequado. Para implementar os conceitos apresentados neste trabalho em uma matriz de voxel obtida por simulação, é necessário que esta matriz de voxel “sintética” possa ser “lida” pelos SW de análise, disponíveis no mercado. O desenvolvimento de um simulador em conjunto com o índice de qualidade proposto é uma oportunidade para estudar os efeitos de cada parâmetro, separadamente.

Por fim, o desenvolvimento de um KBS deve ser concluído e implementado ao término do projeto “CTmetro”. A seleção de alguns parâmetros de configuração (*e.g.* pré-filtro e tensão) ainda necessitam de critérios mais objetivos. Entre as próximas atividades está a seleção e implementação de ferramentas que aplicam sistemas especialistas ou raciocínio baseados em casos para criação do KBS. O ideal é que este sistema seja integrado com o *software* operacional do tomógrafo. O objetivo final é que o tomógrafo forneça automaticamente os valores para os parâmetros de configuração. Para isso, a identificação de similaridade entre peças, apresentada neste documento na forma de requisitos, também deve ser um processo automatizado.

8.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

O LABMETRO/UFSC e a Fundação CERTI possuem um histórico no desenvolvimento de diversos projetos de pesquisa nos campos de metrologia e qualidade industrial, sobretudo no que diz respeito a medições por coordenadas. Com o início da utilização da tomografia computadorizada como CMM surgiu a oportunidade de desenvolvimento de pesquisa na aplicação de uma nova tecnologia à metrologia dimensional. Esta oportunidade foi viabilizada através do projeto CTmetro³³ que foi conduzido em parceria com o laboratório de máquinas-ferramenta (WZL) da Universidade de Aachen através do programa de cooperação entre Brasil e Alemanha BRAGECRIM. A parceria possibilitou a troca de conhecimentos entre as instituições e viabilizou o intercâmbio de estudantes brasileiros e alemães, incluindo o estágio de doutorado “sanduiche” do autor. Com isso, uma vantagem adicional foi contar com a disponibilidade do tomógrafo instalado em Aachen para realização dos experimentos relativos a este trabalho, uma vez que a instalação do tomógrafo no Brasil ocorreu apenas em outubro de 2011.

Este trabalho teve uma importante contribuição sobre os resultados obtidos durante a primeira fase do projeto CTmetro, onde pode-se listar:

- A apresentação de um modelo qualitativo.
- A proposição de um novo índice de qualidade – o índice de dispersão.
- O planejamento e análise de experimentos para geração de conhecimento.
- Os requisitos para criação de novas peças de teste – que resultaram em um tema para dissertação de mestrado.
- O modelo inicial para sistematização do conhecimento.

Vale destacar também a relevância deste trabalho para a UFSC, uma vez que este trabalho marca o início das atividades de pesquisa e desenvolvimento sobre o tema no Brasil.

³³ “*Methods for fast setup and robust dimensional measurements with industrial X-ray computed tomography*”

REFERÊNCIAS

- [1] W. K. ROENTGEN, **On A New Kind of Rays**, Würzburg Physical and Medical Society, 1895.
- [2] J. RADON, **Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten**, Ber. Sächs. Akad. Wiss, vol. 69, 1917.
- [3] G. N. HOUNSFIELD, **Method and Apparatus for Measuring X- or Y-Radiation Absorption or Transmission at Plural Angles and Analyzing The Data**, United States Patent 3,778,614, 1973.
- [4] G. N. HOUNSFIELD, **Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I.**, British Journal of Radiology, vol. 46, 1973.
- [5] A. M. CORMACK, **Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications**, Journal Applied Physics, vol. 34, no. 9, pp. 2722–2727, 1963.
- [6] A. HABERMEHL, **Method and apparatus for testing materials such as disease in living trees**, United States Patent 4,283,629, 1981.
- [7] C. SAUERWEIN, M. SIMON, **25 Years Industrial Computer Tomography in Europe**, International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Berlin, Germany, 2003.
- [8] M. H. GROCHAU *et al.*, **Sedimentary cyclicity from X-ray CT images in Campos Basin offshore Brazil**, The Leading Edge, vol. 29, no. 7, p. 808, Jul. 2010.
- [9] H. ALVES, **Análise da Porosidade de Sedimentos Geológicos Usando a Técnica de Microtomografia Computadorizada**, Dissertação de mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro - RJ, 2012.
- [10] A. DE CASTRO MACHADO, **Estudo de Parâmetros Microestruturais de Rochas - Reservatório para diferentes Resoluções utilizando Microtomografia Computadorizada 3D**, Dissertação de mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro - RJ, 2012.
- [11] S. AKIN, A. R. KOVSCEK, **Computed tomography in petroleum engineering research**, Geological Society, Special Publications; vol. 215; p. 23-38, London, 2003.
- [12] B. LONDON, R. N. YANCEY, J. A. SMITH, **High-resolution X-ray computed tomography of composite materials**, Mater Eval, vol. 48, pp. 604–608, May 1990.

- [13] J. DE CASTRO PESSÔA, **Microtomografia com Raio X e Processamento de Imagem na Obtenção da Porosidade do Concreto**, Tese de doutorado, UERJ, Nova Friburgo – RJ, 2011.
- [14] ASM HANDBOOK, **Nondestructive Evaluation and Quality Control**, Volume 17, ASM International, 1992.
- [15] A. WECKENMANN, P. KRAEMER, **Computed tomography for application in manufacturing metrology**, Key Eng Mater., vol. 437, pp. 73–78, 2010.
- [16] I. EFFENBERGER, J. KROLL, A. VERL, **Innovative Solutions for 3D Computer Tomography Data Evaluation in Industrial Applications**, International Colloquium on Surfaces, vol. XII, Chemnitz, Germany, 2008.
- [17] M. BARTSCHER, U. NEUSCHAEFER-RUBE, **Computed Tomography - A Highly Potential Tool for Industrial Quality Control and Production near Measurements**. VDI BERICHT, 2004.
- [18] CARL ZEISS IMT, **METROTOM Computed Tomography**. Disponível em: <<http://www.zeiss.com/imt>> Acesso em: 25 mar 2009.
- [19] WERTH MESSTECHNIK, **Multisensor Coordinate Measurement Machines**. Disponível em: <<http://www.werthmesstechnik.de/indexenglish.htm>> Acesso em: 25 mar 2009.
- [20] HANS WÄLISCHMILLER, **RayScan 200**. Disponível em: <<http://www.waelischmiller.com/PDFs/PRO-G75u76-Be-i.pdf>> Acesso em: 25 mar 2009.
- [21] NIKON, **Nikon-Metrology Products**. Disponível em: <http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/X-ray-and-CT-Inspection> Acesso em: 30 mar 2010.
- [22] PHOENIX X-RAY, **Nanotom**. Disponível em: <<http://www.phoenix-xray.com/en/products/nanotom/nanotom.html>> Acesso em: 25 mar 2009.
- [23] YXLON.CT Universal, **CT based X-ray Inspection System for a wide inspection item spectrum**. Disponível em: <[http://www.yxlon.com/yxlon/yxlon cms.nsf/REFFileUpload/id1211C34E76738173C12573A0005796E3/\\$FILE/Y.CT%20Universal-En.pdf](http://www.yxlon.com/yxlon/yxlon cms.nsf/REFFileUpload/id1211C34E76738173C12573A0005796E3/$FILE/Y.CT%20Universal-En.pdf)> Acesso em: 25 mar 2009.
- [24] NORTH STAR IMAGING, **X View CT - Industrial Computed Tomography Systems**. Disponível em: <<http://www.xviewct.com>> Acesso em: 25 mar 2009.

- [25] M. BARTSCHER, **Industrial Computed Tomography, an Emerging Coordinate Measurement Technology with High Potentials**, NCSL International Workshop Symposium, Orlando, USA, 2008.
- [26] H. SCHWENKE, U. NEUSCHAEFERRUBE, T. PFEIFER, H. KUNZMANN, **Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering**, CIRP Annals, vol. 51, no. 2, pp. 685–699, 2002.
- [27] J. C. DE OLIVEIRA LOPES, R. SANTIN, **Metrotomografia: Inovação no Controle de Qualidade de Peças de Alta Complexidade Técnica**, Revista Ferramental, Fev, 2008.
- [28] A. C. KAK, M. SLANEY, **Principles of computerized tomographic imaging**. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 1988, p. 329.
- [29] R. SCHMITT, B. DIETRICH, S. POLLMANN, **Virtual Flight through the Workpiece**. International Colloquium on Surfaces, vol. XII, Chemnitz, Germany, 2008.
- [30] E. HECHT, **Optics**, Benjamin Cummings, 2002.
- [31] BIPM, **SI, The International system of units**. Bureau international des poids et mesures, p. 180, 2006.
- [32] R. A. QUINN, C. C. SIGL, **Radiography in modern industry**, Eastman Kodak Co, p. 166, 1980.
- [33] ASTM E 1165-04, **Standard Test Method for Measurement of Focal Spots of Industrial X-Ray Tubes by Pinhole Imaging**, American Society for Testing and Materials, 2004.
- [34] S. WEBB, **The Physics of medical imaging**. Taylor & Francis, 1988.
- [35] T. M. BUZUG, **Computed tomography**, Springer Verlag, 2008.
- [36] J. HSIEH, **Computed Tomography**, Wiley, 2009.
- [37] ASTM E 1441 – 00, **Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging**, American Society for Testing and Materials, 2000.
- [38] ISO 15708-1, **Non-destructive testing — Radiation methods — Computed tomography — Part 1: Principles**. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2002.
- [39] M. BERGER, J. H. HUBBELL, S. SELTZER, J. COURSEY, **XCOM: Photon Cross Section Database** (version 1.2). NIST, 1999.
- [40] YXLON, **Digital Flat-panel Detectors From the Series Y.Panel XRD**. Disponível em: <http://www.yxlon.com/x-ray_components/detectors/flat_panels> Acesso em: 10 Abr 2009.

- [41] BIR, **Choosing x-ray detectors**. Disponível em: <http://www.bio-imaging.com/Choosing_x-ray_detectors.asp> Acesso em: 04 Mar 2009.
- [42] PERKINELMER, **XRD 1621 NA - Digital X-Ray Detector**. Disponível em: <http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/Datasheets/DTS_XRD1621AN.pdf> Acesso em: 10 Abr 2009.
- [43] VARIAN, **Flat Panel X-ray Imaging**, Disponível em: <<http://www.varian.com/media/xray/products/pdf/Flat%20Panel%20Xray%20Imaging%2011-11-04.pdf>>, Acesso em: 11 Nov 2004.
- [44] C. ZEISS, **Metrotom – User Manual**, 2010.
- [45] J. KUMAR, A. ATTRIDGE, P. K. C. WOOD, M. A. WILLIAMS, **Analysis of the Effect of Cone-Beam Geometry and Test Object Configuration on The Measurement Accuracy of a Computed Tomography Scanner Used for Dimensional Measurement**, Meas. Sci. Technol., vol. 22, 2011.
- [46] D. WEIß, H. LETTENBAUER, **Optimized CT metrology through adaptive image processing techniques**, International Colloquium on Surfaces, vol. XII, Chemnitz, Germany, 2008.
- [47] T. G. FEEMAN, **The Mathematics of Medical Imaging**. Springer Verlag, 2009.
- [48] L. A. FELDKAMP, L. C. DAVIS, J. W. KRESS, **Practical Cone-beam Algorithm**, J. Opt. Soc. Am. A, vol. 1, Nr. 6, 1984.
- [49] H. TUY, **An Inversion Formula for Cone-Beam Reconstruction**, SIAM Journal on Applied Mathematics, Vol.43, pp. 546-552, 1983.
- [50] B. SMITH, **Image Reconstruction from Cone-Beam Projections: Necessary and Sufficient Conditions and Reconstruction Methods**, IEEE Trans. Med. Imaging, vol. MI-4, 14–25, 1985.
- [51] J. HILLER, S. KASPERL, T. SCHON, S. S. D. WEISS, **Comparison of Probing Error in Dimensional Measurement by Means of 3D Computed Tomography with Circular and Helical Sampling**, 2nd International Symposium on NDT, Hamburg, Germany, 2010.
- [52] N. OTSU, **A threshold selection method from gray-level histograms**, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 9, Nr. 1, 1979.
- [53] J. CANNY, **A Computational Approach to Edge Detection**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 8, Nr. 6, 1986.
- [54] VOLUME GRAPHICS, **VGStudio Max 2.1 – User Manual**, 2009.

- [55] H. LETTENBAUER, A. LOTZE, S. KUNZMANN, **Method and device for identifying material boundaries of a test object**, United States Patent 8,045,806, 2008.
- [56] C. REINHART, **Industrial Computer Tomography–A Universal Inspection Tool**, 17th World Conference on Nondestructive Testing (WCNDT), Shanghai, China, 2008.
- [57] Y. TAN, K. KIEKENS, J.-P. KRUTH, A. VOET, **Material dependent thresholding for dimensional X-ray computed tomography**, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Berlin, Germany, June 2011.
- [58] C. HEINZL, J. KASTNER, B. GEORGI, H. LETTENBAUER, **Comparison of surface detection methods to evaluate cone beam computed tomography data for three dimensional metrology**, International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Lyon, France, June 2007.
- [59] J.-P. KRUTH, M. BARTSCHER, S. CARMIGNATO, R. SCHMITT, L. DE CHIFFRE, **Computed tomography for dimensional metrology**, CIRP Annals, vol. 60, Nr. 2, 2011.
- [60] S. GONDROM, **3D Reconstructions of Micro-Systems Using X-Ray Tomographic Methods**, 16th World Conference on Nondestructive Testing (WCNDT), Montreal, Canada, 2004.
- [61] A. WECKENMANN, P. KRAEMER, J. HOFFMANN, **Manufacturing Metrology – State of The Art and Prospects**, 9th International Symposium On Measurement And Quality Control (ISMQC). Madras, India, 2007.
- [62] E. NEUSER, A. SUPPES, **nanoCT® Visualizing internal 3D structures with submicrometer resolution**, International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Lyon, France, June 2007.
- [63] E. SAVIO, L. DE CHIFFRE, R. SCHMITT, **Metrology of freeform shaped parts**, CIRP Annals, vol. 56, no. 2, pp. 810–835, 2007.
- [64] H. SCHWENKE, F. WALDELE, **R&D Activities of PTB in the Field of Coordinate Metrology**, Simposio de Metrología, Querétaro, Mexico, 2006.
- [65] SKYSCAN, **SkyScan1174 compact micro-CT**. Disponível em: <<http://www.skyscan.be/products/1174.htm>> Acesso: 15 Set 2011.
- [66] W. FRANZ, S. KLUMPP, **Precision in Plastic: Metrotomography at Gaudlitz**, Innovation: SPECIAL Metrology, Carl Zeiss Magazine no. 10, Oct.-2008.

- [67] D. K. LEHMANN, K. BROCKDORF, D. NEUBER, **High Resolution Computed Tomography for Metrology**, ASPE Proceedings, Dallas USA, 2007.
- [68] D. LAZARO, S. LEGOUPIL, G. BLOKKEEL, B. JEANNE, **Metrology of steel micro-nozzles using X-ray microtomography**, International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Lyon, France, June 2007.
- [69] A. WECKENMANN, K. PHILIPP, **3D Computed Tomography for Dimensional Metrology**, VIIIth International Science Conference Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biala, Poland, 31.03.-02.04. 2008)., pp. S. 37–44, 2008.
- [70] C. REINHART, C. POLIWODA, T. GUNTHER, **How Industrial Computer Tomography Accelerates Product Development in the Light Metal Casting and Injection Moulding Industry**, 10th European conference and exhibition on nondestructive testing (ECNDT) Moscow, Russia, 2010.
- [71] M. BARTSCHER, U. HILPERT, U. NEUSCHAEFER-RUBE, **Industrielle Computertomographie auf dem Weg zur Koordinatenmesstechnik**, PTB-Mitteilungen 117, 2007.
- [72] A. FLISCH, **Industrial CT in reverse engineering applications**, Computed Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology, DGZfP Proceedings BB67, Berlin, Germany, 1999.
- [73] N. SCHUHMANN, **Industrial application of Computerized Tomography**, Computed Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology, DGZfP Proceedings BB67, Berlin, Germany, 1999.
- [74] A. BERNARD, A. FISCHER, **New Trends in Rapid Product Development**, CIRP Annals, vol. 51, no. 2, pp. 635–652, 2002.
- [75] N. BLESSING, K. KOCH, **Rapid Prototyping meets 3D Measurement Methods for Rapid Product Development**, Disponivel em: <http://www.garpa.org/assets/CS2000_de_ncg_garpa.pdf>, Acesso em: 04-Oct.-2000.
- [76] ISO/TS 17450-1:2005, **Geometrical product specifications (GPS) — General concepts —Part 1:Model for geometrical specification and verification**. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2005.

- [77] ISO/DTS 14406:2010, **Geometrical product specifications (GPS)—Extraction**. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010.
- [78] H. LETTENBAUER, D. WEIß, **X-ray image acquisition, processing and evaluation for CT- based dimensional metrology**, 52nd Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau, 2007.
- [79] H. KUNZMANN, T. PFEIFER, R. SCHMITT, H. SCHWENKE, A. WECKENMANN, **Productive Metrology - Adding Value to Manufacture**, CIRP Annals, vol. 54, no. 2, pp. 155–168, 2005.
- [80] M. BARTSCHER, U. HILPERT, J. GOEBBELS, G. WEIDEMANN, **Enhancement and Proof of Accuracy of Industrial Computed Tomography (CT) Measurements**, CIRP Annals, vol. 56, no. 1, pp. 495–498, 2007.
- [81] A. WECKENMANN *et al*, **Multisensor data fusion in dimensional metrology**, CIRP Annals, vol. 58 Nr. 2, pp. 701-721, 2009.
- [82] P. KRAEMER, A. WECKENMANN, **Multi-energy image stack fusion in computed tomography**, Meas. Sci. Technol., vol. 21, 2010.
- [83] R. CHRISTOPH, W. RAUH, **Measuring precisely and traceably using x-ray computed tomography**. International Colloquium on Surfaces, vol. XII, Chemnitz, Germany, 2008
- [84] ISO/TS 17450-2: 2002, **Geometrical product specifications (GPS) — General concepts — Part 2: Basic tenets, specifications, operators and uncertainties**, vol. 17450, no. 2. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2002.
- [85] U. ZSCHERPEL, U. EWERT, K. BAVENDIEK, **Possibilities and Limits of Digital Industrial Radiology: - The new high contrast sensitivity technique - Examples and system theoretical analysis**, International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Lyon, France, June 2007.
- [86] ASTM E 1570 – 00, **Standard Practice for Computed Tomographic (CT) Examination**. American Society for Testing and Materials, 2000.
- [87] A. A. MICHELSON, **Studies in Optics**. Univ. of Chicago, 1927.
- [88] H.-C. SAEWERT, D. FIEDLER, M. BARTSCHER, F. WALDELE, **Obtaining dimensional information by industrial CT scanning – present and prospective process chain**, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Berlin, Germany, June 2003.

- [89] VDI/VDE 2617 Blatt 13, **Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung; Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensoren - VDI/VDE 2630 Blatt 1.3 Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik**. 2009.
- [90] VDI/VDE2617 - 6.2, **Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristics and their testing; Guideline for the application of DIN EN ISO 10360 for coordinate measuring machines with CT-sensors**. 2005.
- [91] J. HILLER, T. O. J. FUCHS, L. M. REINDL, **Einfluss der Bildqualität röntgentomographischer Abbildungen auf Koordinatenmessungen: Grundlagen, Messungen und Simulationen**, Technisches Messen, vol. 78, Aug. 2011.
- [92] M. M. MALIK, C. HEINZL, **Visual Exploration for Parameter Studies of Industrial CT Dataset Series**, Vienna University of Technology, Institute of Computer Graphics and Algorithms, technical report, 2008.
- [93] VIM, **Vocabulário Internacional de Metrologia**. INMETRO, 2009.
- [94] ISO 15708-2:2002, **Non-destructive testing - Radiation methods - Computed tomography - Part 2: Examination practices**. International Organization for Standardization, Genova, Switzerland, 2002.
- [95] VDI/VDE 2630 part 1.1, **Computed tomography in dimensional measurement – Basics and Definitions**, COMMITTEE DRAFT Stand. 2007.
- [96] VDI/VDE 2630 part 1.4, **Computed tomography in dimensional measurement – measurement procedure and comparability**. 2007.
- [97] VDI/VDE 2630 part 1.2, **Computed tomography in dimensional measurement – Influencing variables on measurement results and recommendations for computed tomography dimensional measurements**. 2007.
- [98] H. LETTENBAUER, B. GEORGI, **Means to Verify the Accuracy of CT Systems for Metrology Applications (In the Absence of Established International Standards)**, International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Lyon, France, June 2007.
- [99] K. KIEKENS *et al*, **A Test Object for Calibration and Accuracy Assessment in X-Ray CT Metrology**, 10th International Symposium On Measurement And Quality Control (ISMQC), Osaka, Japão, 2010.

- [100] GUM, **Guia para a expressão da incerteza de medição**, no. 3. Rio de Janeiro: INMETRO e ABNT, 2003, p. 120.
- [101] JCGM 101:2008, **Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method**, 2nd ed. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, 2008.
- [102] U. HILPERT, M. BARTSCHER, M. NEUGEBAUER, J. GOEBBELS, G. WEIDEMANN, C. BELLON, **Simulation-aided computed tomography (CT) for dimensional measurements**, International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Lyon, France, June 2007.
- [103] ISO/TS 15530-3:2004, **Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate Measuring Machines (CMM): Techniques for Determining the Uncertainty of Measurement – Part 3: Use of Calibrated Workpieces or Standards**, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2004.
- [104] F. A. ARENHART, G. D. DONATELLI, **An experimental method for assessing the contribution of the production process variations to the task-specific uncertainty of coordinate measurements**, Measurement, vol. 45, Nr. 3, 2011.
- [105] V.C. NARDELLI, G.D. DONATELLI, F.A. ARENHART, M.C. PORATH, **Uncertainty Evaluation of Computed Tomography Measurements Using Multiple Calibrated Workpieces**. in II CIMMEC, Natal, Brazil, September 2011.
- [106] ISO 14253-2:1998, **GPS — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment —Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification**. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.
- [107] S. CARMIGNATO, **Preliminary Results of the ‘CT Audit’Project: First International Intercomparison of Computed Tomography Systems for Dimensional Metrology**, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Berlin, Germany, June 2011.
- [108] A. WECKENMANN, P. KRAEMER, **Assessment of Measurement Uncertainty Caused in the Preparation of Measurements Using Computed Tomography**, IMEKO XIX World Congress, Lisbon, Portugal, 2009.

- [109] R. SCHMITT, C. NIGGEMANN, **Uncertainty in measurement for x-ray-computed tomography using calibrated work pieces**, Meas. Sci. Technol., vol. 21, p. 9, 2010.
- [110] K. KIEKENS, F. WELKENHUYZE, Y. TAN, P. BLEYS, A. VOET, J.-P. KRUTH, **A test object with parallel grooves for calibration and accuracy assessment of industrial computed tomography (CT) metrology**, Meas. Sci. Technol., vol. 22, 2011.
- [111] K. KIEKENS, Y. TAN, J.-P. KRUTH, A. VOET, W. DEWULF, **Parameter dependent thresholding for dimensional X-ray computed tomography**. International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Berlin, Germany, 2011.
- [112] V. C. NARDELLI, G. D. DONATELLI, C. A. SCHNEIDER, C. NIGGEMANN, R. SCHMITT, **Reproducibility of Dimensional Measurements Performed by Computed Tomography**, 10th International Symposium on Measurement and Quality Control (ISMQC), Osaka, Japan, 2010.
- [113] M. REITER, C. HEINZL, D. SALABERGER, D. WEISS, J. KASTNER, **Study on Parameter Variation of an Industrial Computed Tomography Simulation Tool Concerning Dimensional Measurement Deviations**, 10th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), Moscow, Russia, 2010.
- [114] R. THIERRY *et al*, **Monte Carlo simulations of a high-resolution X-ray CT system for industrial applications**, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 583, 2007.
- [115] J. ALLISON *et al*, **Geant4 developments and applications**, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 53, no. 1, pp. 270–278, 2006.
- [116] C. BELLON, **aRTist–Analytical RT Inspection Simulation Tool**, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Lyon, France, 2007.
- [117] G. JAENISCH, C. BELLON, **aRTist–Analytical RT Inspection Simulation Tool for Industrial Application**, Proceedings of the 17th World Conference on Non-Destructive Testing, Shanghai, China, 2008.
- [118] P. WENIG, **Examination of the Measurement Uncertainty on Dimensional Measurements by X-ray Computed Tomography**. Proceedings of 9th European Congress on Non-Destructive Testing, Berlin, Germany, 2006.
- [119] S. REISINGER, S. KASPERL, M. FRANZ, J. HILLER, **Simulation-Based Planning of Optimal Conditions for Industrial Computed**

- Tomography**, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Berlin, Germany, June 2011.
- [120] M. REITER *et al*, **Improvement of X-Ray image acquisition using a GPU based 3DCT simulation tool**, 9th International Conference on Quality Control by Artificial Vision, Wels, Austria, 2009.
- [121] M. BARTSCHER *et al*, **Achieving traceability of industrial computed tomography**, Proc. of 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII), St. Petersburg, Russia, 2009.
- [122] D. C. MONTGOMERY, **Design and analysis of experiments**, 5th ed. John Wiley & Sons Inc, 2001, p. 684.
- [123] V. C. NARDELLI, F. A. ARENHART, G. D. DONATELLI, M. C. PORATH, **Using Calibrated Parts and Integral Surface Analysis to Investigate Dimensional CT Measurements**, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (DIR), Berlin, Germany, June 2011.
- [124] C. REINHART, C. POLIWODA, T. GÜNTHER, **Modern voxel based data and geometry analysis software tools for industrial CT**, Proc. 16th World World Conference on NDT (WCNDT), Montreal, Canada, 2004.
- [125] V. C. NARDELLI *et al*, **Feature-Based Analysis for Quality Assessment of X-Ray Computed Tomography Measurements**, Meas. Sci. Technol. vol. 23, 2012.
- [126] F. A. ARENHART, G. D. DONATELLI, M. DE C. PORATH, V. C. NARDELLI, **Design And Implementation of an Application for the Analysis of Extracted Circumferential Lines**, presented at the II CIMMEC, Natal, Brazil, 2011.
- [127] F. L. PROBST, F. A. ARENHART, G. D. DONATELLI, R. SCHMITT, S. NISCH, **Experimental Evaluation of Techniques for Outlier Recognition and Elimination on Form Measurement Profiles**, 10th International Symposium on Measurement and Quality Control (ISMQC), Osaka, Japan, 2010.
- [128] B. MURALIKRISHNAN, J. RAJA, **Computational surface and roundness metrology**. Springer Verlag, 2009.
- [129] C. DE BOOR, **A practical guide to splines**. 2001.
- [130] S. GROEGER, M. DIETZSCH, M. GERLACH, S. JEß, **Real mechanical profile' — the new approach for nano-measurements**, J. Phys.: Conf. Ser., vol. 13, pp. 13–19, Sep. 2005.

- [131] ISO 14660-1:1999, **Geometrical Product Specifications (GPS) -- Geometrical features - Part 1: General terms and definitions**. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.
- [132] ISO/TS 16610-40:2006, **Geometrical product specifications (GPS) - Filtration - Part 40: Morphological profile filters: Basic concepts**. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.
- [133] A. V. OPPENHEIM, R. W. SCHAFER, **Digital signal processing**. Prentice Hall, 1975, p. 585.
- [134] D. J. WHEELER, R. W. LYDAY, **Evaluating the Measurement Process**, SPC Press, Knoxville, USA, 1990.
- [135] R. ENGELMORE, E. FEIGENBAUM, P. FRIEDLAND, **Knowledge-based systems in Japan**, World Technology Evaluation Center (WTEC), Baltimore, USA, 1993.

APÊNDICE A – EXPERIMENTOS PRELIMINARES

Este apêndice é complementar à seção 6.1.2 do presente trabalho.

<i>set up</i>	<i>U [kV]</i>	<i>I [μA]</i>	<i>B [ms]</i>	<i>E [pF]</i>	<i>V [mm]</i>	<i>X [mm]</i>	<i>Or [graus]</i>	<i>P</i>	<i>Bn</i>
1	125	100	2000	1.0	0.00	450	0	720	1 x 1
2	125	100	2000	1.0	0.50	450	0	720	1 x 1
3	125	300	2000	1.0	0.50	450	0	720	1 x 1
4	125	300	2000	1.0	0.50	450	18	720	1 x 1
5	125	100	2000	1.0	1.00	450	0	720	1 x 1
6	125	100	2000	1.0	2.00	450	0	720	1 x 1
7	125	950	2000	1.0	2.00	450	0	720	1 x 1
8	175	72	2000	1.0	0.00	450	18	720	1 x 1
9	175	72	2000	1.0	0.50	450	0	720	1 x 1
10	175	140	2000	1.0	0.50	450	0	720	1 x 1
11	175	140	2000	1.0	0.50	450	18	720	1 x 1
12	175	72	2000	1.0	1.00	450	0	720	1 x 1
13	175	72	2000	1.0	2.00	450	0	720	1 x 1
14	175	380	2000	1.0	2.00	450	18	720	1 x 1
15	225	56	2000	1.0	0.00	450	0	720	1 x 1
16	225	56	2000	1.0	0.50	450	0	720	1 x 1
17	225	100	2000	1.0	0.50	450	0	720	1 x 1
18	225	100	2000	1.0	0.50	450	18	720	1 x 1
19	225	56	2000	1.0	1.00	450	0	720	1 x 1
20	225	56	2000	1.0	2.00	450	0	720	1 x 1
21	225	240	2000	1.0	2.00	450	0	720	1 x 1
22	125	100	2000	1.0	0.00	450	18	720	1 x 1
23	125	300	2000	1.0	0.50	450	18	720	1 x 1
24	125	950	2000	1.0	2.00	450	18	720	1 x 1
25	175	72	2000	1.0	0.00	450	18	720	1 x 1
26	175	140	2000	1.0	0.50	450	18	720	1 x 1
27	175	380	2000	1.0	2.00	450	18	720	1 x 1
28	225	56	2000	1.0	0.00	450	18	720	1 x 1
29	225	100	2000	1.0	0.50	450	18	720	1 x 1
30	225	240	2000	1.0	2.00	450	18	720	1 x 1
31	125	100	2000	1.0	0.00	450	18	720	1 x 1
32	125	950	2000	1.0	2.00	450	18	720	1 x 1
33	175	72	2000	1.0	0.00	450	0	720	1 x 1
34	175	380	2000	1.0	2.00	450	0	720	1 x 1
35	225	56	2000	1.0	0.00	450	18	720	1 x 1
36	225	240	2000	1.0	2.00	450	18	720	1 x 1
37	225	380	2000	0.5	2.00	500	0	720	1 x 1
38	225	380	2000	0.5	2.00	500	18	720	1 x 1
39	225	380	2000	0.5	2.00	500	45	720	1 x 1
40	225	380	2000	0.5	2.00	500	90	720	1 x 1
41	225	100	2000	1.0	0.50	450	18	360	1 x 1
42	225	100	2000	1.0	0.50	450	18	720	1 x 1
43	225	100	2000	1.0	0.50	450	18	1080	1 x 1
44	225	500	500	0.5	0.50	450	18	720	1 x 1
45	225	100	2000	0.5	0.50	450	18	720	1 x 1
46	225	500	500	1.0	0.50	450	18	720	1 x 1
47	225	250	2000	1.0	0.50	450	18	720	1 x 1
48	225	56	2000	1.0	0.00	450	0	720	1 x 1
49	225	56	2000	1.0	0.00	450	0	720	2 x 2
50	225	56	2000	1.0	0.00	450	18	720	1 x 1
51	225	56	2000	1.0	0.00	450	18	720	2 x 2