

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

**UM ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE
MEDIÇÃO APLICÁVEIS AO CONTROLE
DIMENSIONAL DE SUPERFÍCIES LIVRES EM
PEÇAS DE MÉDIO E GRANDE PORTE**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para
obtenção do grau de Mestre em Metrologia

Clídio Richardson Gonçalves de Lima

Florianópolis, 10 de julho de 2006

UM ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO APLICÁVEIS AO CONTROLE DIMENSIONAL DE SUPERFÍCIES LIVRES EM PEÇAS DE MÉDIO E GRANDE PORTE

Clídio Richardson Gonçalves de Lima

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

“MESTRE EM METROLOGIA”

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

ORIENTADOR

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.

COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.

Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. -Ing.

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Cacídio Girardi, Q.

Diretor Industrial da Electro Aço Altona S/A

*A minha vó, mãe, irmãos,
tios, primos, amigos e a
Rafael Gonçalves Santiago (em memória).*

AGRADECIMENTOS

A **Deus** pelo maravilhoso dom de viver e mais esta oportunidade em minha vida.

A minha família que sempre me apoiou em todas as decisões e que, mesmo à distância, torceu e sonhou comigo por mais este objetivo hoje alcançado. Obrigado a todos e saibam que essa realidade é nossa.

À **FUNCAP** – Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro indispensável para a minha estada em Florianópolis.

Ao Professor-Pai e Amigo Gustavo Donatelli pela vasta partilha de conhecimento, paciência e orientação no presente trabalho.

A Christian Raffaello Baldo pelo acompanhamento e co-orientação no presente trabalho.

Ao **Pós-MCI** – Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial e ao **LABMETRO** – Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC. Especialmente a todos os professores: Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Carlos Alberto Flesch, Carlos Alberto Schneider e Marco Antonio Martins Cavaco, à Rosana Vieira, aos alunos e demais colaboradores que sempre me ajudaram.

Ao Sr. Cacídio Girardi e a todo pessoal e unidades da Electro Aço Altona S.A., especialmente a Helton Weiss, pela acolhida na minha estada em Blumenau durante o período de meu estágio e partilha de conhecimento no dia-a-dia industrial.

À Fundação CERTI – Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras sobretudo ao CMI – Centro de Metrologia e Instrumentação pela disponibilidade e atenção, especialmente a Günther Pfeiffer, Mateus Dieckmann, Alexandre Lucas e aos técnicos (laboratórios).

À ASME (American Society of Mechanical Engineers), Robtec, Kotem e FARO pelo suporte dado para a realização dos estudos no presente trabalho.

À família e minha primeira escola de Metrologia **LAMETRO** – Laboratório de Metrologia da UFC, na pessoa do Professor e amigo Antônio Salvador da Rocha e Luiz Soares Jr. pelo apoio em todos os momentos.

Ao pessoal da 'casa', Amigos-Família Moisés, Aquiles, Marcos e a D. Leny pela acolhida na minha estada em Florianópolis.

Aos sempre Amigos-Irmãos da turma 2004 pela partilha de conhecimento e momentos vividos ao longo desses dois anos de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	I
LISTA DE TABELAS	IV
LISTA DE ABREVIATURAS.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
RESUMO.....	IX
ABSTRACT.....	X
1 A MEDIÇÃO NA PRODUÇÃO DE PEÇAS FUNDIDAS	1
1.1 PECULIARIDADES DAS PEÇAS FUNDIDAS.....	2
1.2 PROBLEMÁTICA DA MEDIÇÃO DE FORMAS LIVRES.....	5
1.3 RECURSOS PARA A MEDIÇÃO DE FORMAS LIVRES	6
1.4 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO	7
1.4.1 Objetivo geral	8
1.4.2 Objetivos específicos	8
1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	8
2 INSPEÇÃO POR CONTATO DE FORMAS LIVRES EM PEÇAS DE MÉDIO E GRANDE PORTE	10
2.1 GABARITOS	10
2.2 GRAMINHOS OU TRAÇADORES DE ALTURAS.....	11
2.3 MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS	12
2.3.1 Máquinas de medição por coordenadas cartesianas	13
2.3.2 Braços articulados de medição	17
2.4 VERIFICAÇÃO DE BRAÇOS ARTICULADOS SEGUNDO A NORMA ASME B89.4.22-2004	20
2.4.1 Teste de desempenho do diâmetro efetivo	21
2.4.2 Teste de desempenho da articulação de um único ponto	22
2.4.3 Teste de desempenho volumétrico	26

3 INSPEÇÃO SEM CONTATO DE FORMAS LIVRES DE MÉDIO E GRANDE PORTE	31
3.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FOTOGRAMÉTRICOS	32
3.2 O SISTEMA TRITOP DA GOM MESSTECHNIK	36
3.3 VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS SEGUNDO A NORMA VDI/VDE 2634-2002.....	40
3.3.1 Teste de aceitação	41
3.3.2 Teste de verificação	44
4 ANÁLISE METROLÓGICA DE BRAÇOS ARTICULADOS DE MEDIÇÃO	46
4.1 ANÁLISE DE UM BAM USANDO A NORMA B89.4.22-2004.....	46
4.1.1 Calibração da barra de esferas	47
4.1.2 Teste de desempenho volumétrico segundo ASTM B89.4.22-2004	48
4.1.3 Considerações finais da aplicação da ASME B89.4.22-2004.....	53
4.2 ANÁLISE DE MEDIÇÕES REALIZADAS COM BAM USANDO O ESTUDO DE R&R.....	54
4.2.1 Parâmetro ou cota C-1	56
4.2.2 Parâmetro ou cota C-2	57
4.2.3 Parâmetro ou cota C-3	58
4.2.4 Considerações e recomendações sobre o estudo de R&R.....	60
5 ANÁLISE DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO BASEADO NA FOTOGRAMETRIA	62
5.1 AS MEDIÇÕES DE PEÇAS SOB ENCOMENDA NA ELECTRO AÇO ALTONA	62
5.2 COMPARAÇÃO ENTRE BAM E O SISTEMA TRITOP.....	66
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE MMC E O SISTEMA TRITOP	71
5.4 ANÁLISE COMPARATIVA E RECOMENDAÇÕES.....	79
6 CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
6.1 CONCLUSÕES	83
6.2 OPORTUNIDADES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
REFERÊNCIAS	87

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo (acima) e molde de areia (abaixo) para obtenção de uma peça simples.	3
Figura 2 – Rotores de turbinas tipo Pelton, Francis e Kaplan ^[14]	5
Figura 3 – Algumas peças fundidas pela unidade Sob Encomenda da Altona ^[14] . ..	7
Figura 4 – Alguns gabaritos usados na Electro Aço Altona.	11
Figura 5 – Diversos tipos de traçador de alturas: analógico, analógico com relógio e digitais ^[18]	12
Figura 6 – Diversas máquinas de medição por coordenadas cartesianas ^{[18],[21],[22]}	14
Figura 7 – Diversos braços articulados de medição ^{[24],[25],[26]}	17
Figura 8 – Transformações de coordenadas e volume de trabalho de um braço articulado de medição ^[27]	18
Figura 9 – Diagrama de causa e efeito das principais fontes de erros na medição com BAMs.	19
Figura 10 – Configurações dos BAMs ^[28]	20
Figura 11 – Posições da esfera para o teste SPAT, com base no comprimento radial do BAM ^[28]	23
Figura 12 – Partes que compõe o BAM: ombro, cotovelo e pulso ^[28]	24
Figura 13 – Esquema das cinco primeiras posições do BAM no teste SPAT ^[28]	24
Figura 14 – Distribuição dos 5 pontos no SPAT utilizando um apalpador comutador ^[28]	25
Figura 15 – Posições das barras e divisão do volume esférico em octantes ^[28]	28
Figura 16 – Objeto 3D sendo fotografado gerando imagens 2D.	33
Figura 17 – Processamento das imagens 2D gerando uma reconstrução 3D.	33
Figura 18 – Ponto a ser medido (X) e suas projeções de imagens (x_a e x_b) nos planos de cada câmera (π_a e π_b), como vértices de um triângulo.	34
Figura 19 – Triangulação formada por um único ponto (à esquerda) e múltiplos pontos em comum (à direita), nas imagens obtidas com diferentes posições da câmera ^[39]	35
Figura 20 – Sistema fotogramétrico TRITOP da GOM ^[36]	37
Figura 21 – Pá de uma turbina com os alvos (codificados e não-codificados) e escalas de comprimento utilizados pelo TRITOP ^[36]	37

Figura 22 – Fluxo de trabalho do sistema fotogramétrico TRITOP ^[36]	39
Figura 23 – Nuvem de pontos dos alvos não-codificados capturadas pelo TRITOP ^[36]	39
Figura 24 – Diagrama de causa e efeito das principais fontes de erros de um sistema fotogramétrico.	40
Figura 25 – Cinco comprimentos a serem avaliados no teste de aceitação ^[37]	42
Figura 26 – Arranjo possível para as linhas de medição no teste de aceitação ^{[37],[42]}	43
Figura 27 – Diagrama do erro na medição de comprimento ^[37]	44
Figura 28 – Fixação da barra de esferas e do bloco padrão com dispositivo construído com sistema Alufix (WITTE).	47
Figura 29 – Calibração da barra de esferas através do método da substituição (comparação) com um bloco padrão.	48
Figura 30 – Suporte da barra de esferas nas quatro disposições básicas.	49
Figura 31 – Representação dos desvios encontrados na aplicação da ASME B89.4.22-2004 utilizando um BAM FARO-Platinum.	50
Figura 32 – Gráfico de controle (medidas individuais) dos diâmetros das esferas medidas.	51
Figura 33 – Gráfico de controle do diâmetro das esferas medidas após a exclusão do ponto fora de controle.	52
Figura 34 – Definição dos octantes e marcações no piso para a aplicação da ASME B89.4.22-2004. À esquerda uma ilustração com um BAM Romer e à direita com um BAM FARO	53
Figura 35 – Peça (<i>Support Equalizer</i>) submetida ao estudo de R&R com o BAM FARO-Titanium com as cotas de interesse (C-1, C-2 e C-3).	55
Figura 36 – Definição da cota C-1 e gráficos de controle (média e amplitude).	57
Figura 37 – Definição da cota C-2 e gráficos de controle (média e amplitude).	58
Figura 38 – Definição da cota C-3 e gráficos de controle (média e amplitude).	59
Figura 39 – Pá Francis e nomenclatura específica ^[14]	63
Figura 40 – Pá Francis com (a) – a seqüência de pontos a serem medidos e (b) – malha de pontos e pontos de referência para posicionar a peça numa máquina ferramenta.	64
Figura 41 – Pá Francis com a: (a) malha de pontos (cor verde) alinhada de uma maneira incorreta ao modelo em CAD (cor azul) e (b) malha de pontos alinhada corretamente.	66
Figura 42 – Pá Kaplan e nomenclatura específica ^[14]	66

Figura 43 – Pá Kaplan em CAD e com os alvos de referência sobre sua superfície de interesse.....	67
Figura 44 – Gráfico de controle das diferenças entre os sistemas FARO-Titanium e TRITOP.....	68
Figura 45 – Alguns pontos com desvios atípicos localizados no munhão da pá Kaplan.....	69
Figura 46 – Gráfico de controle das diferenças entre os sistemas após a exclusão dos quatros pontos atípicos.....	69
Figura 47 – Comportamento dos erros nos lados da pá Kaplan.....	70
Figura 48 – Palheta diretriz e nomenclatura específica ^[14]	72
Figura 49 – Posição da palheta e estratégia de apalpação adotada na medição com a MMC.....	72
Figura 50 – Problemática na medição de referência.....	73
Figura 51 – Operação de <i>offset</i> na medição de referência.....	73
Figura 52 – Palheta diretriz montada sobre a MMC, pronta para ser medida com o sistema TRITOP, junto aos padrões de comprimento.....	74
Figura 53 – Desvios com relação ao modelo, informados por ambos os sistemas.....	75
Figura 54 – Palhetas modeladas a partir das coordenadas 3D obtida dos valores nominais (CAD) e os desvios da peça informados por ambos os sistemas de medição.....	76
Figura 55 – Gráfico de dispersão dos desvios informados pelo TRITOP com relação aos desvios medidos pela MMC.....	76
Figura 56 – Gráfico de controle das diferenças entre os desvios informados pelo TRITOP e os desvios de referência, obtidos pela MMC.....	77
Figura 57 – Diferença entre os desvios informados pelo TRITOP e os desvios de referência, obtidos pela MMC.....	78
Figura 58 – Correlação do erro com os desvios informados pela MMC.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Posições da barra de esferas ^[28]	27
Tabela 2 – Comparação qualitativa entre o BAM e o sistema óptico fotogramétrico.	80

LISTA DE ABREVIATURAS

ASCII	Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informações (<i>American Standard Code for Information Interchange</i>)
ASME	Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (<i>American Society of Mechanical Engineers</i>)
BAM	Braço Articulado de Medição (<i>Articulated Arm Coordinate Measuring Machines</i>)
CAD	Desenho Auxiliado por Computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CERTI	Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras
EMA	Erro Máximo Admissível
HTML	Linguagem de Formatação de Hipertexto (<i>Hyper Text Markup Language</i>)
IT	Instrução de Trabalho (Electro Aço Altona)
LIC	Limite Inferior de Controle
LSC	Limite Superior de Controle
MMC	Máquina de Medição por Coordenadas (<i>Coordinate Measuring Machine</i>)
MSA	Análise dos Sistemas de Medição (<i>Measurement Systems Analysis</i>)
ndc	Número de Distintas Categorias (<i>Number of Distinct Categories</i>)
R&R	Repetitividade e Reprodutibilidade
RMS	Valor Quadrático Médio (<i>Root Mean Square</i>)
SPAT	Teste de Desempenho da Articulação de um Único Ponto (<i>Single-Point Articulation Performance Test</i>)
VDE	Associação Alemã de Engenharia Elétrica, Engenharia Eletrônica e Tecnologia da Informação
VDI	Associação Alemã de Engenheiros
VE	Variação do Equipamento (repetitividade)

VA	Varição entre Avaliadores (reprodutibilidade)
VP	Varição da Peça
VT	Varição Total
TOL	Tolerância

LISTA DE SÍMBOLOS

δ_i	desvio vetorial
X_i, Y_i, Z_i	coordenadas medidas
X_a, Y_a, Z_a	coordenadas médias
n	número de medições
L_c	comprimento corrigido (em função da temperatura)
L_m	comprimento medido
α_{BB}	coeficiente de expansão térmica
T_m	temperatura média
D_i	desvio (diferença entre os comprimentos L_{i1} e L_{i2})
L_i	comprimento medido e corrigido (em função da temperatura)
L_{cal}	comprimento calibrado
L_{i1}, L_{i2}	comprimento obtido na primeira e segunda medição de uma mesma posição
x_a	projeção da imagem X no plano imagem da câmera na posição a
x_b	projeção da imagem X no plano imagem da câmera na posição b
π_a	plano imagem a (câmera na posição a)
π_b	plano imagem b (câmera na posição b)
C_a	centro de projeção da câmera na posição a
C_b	centro de projeção da câmera na posição b
s	desvio padrão amostral (medições)
X_{bar}	média das medições
C-1, C-2, C-3	cotas ou parâmetros de interesse
y_p, z_p	coordenadas de um ponto de interesse

y_c, z_0	coordenadas de um ponto coletado pela MMC quando a mesma implementa a correção do raio do sensor na direção de apalpação
y_0, z_0	coordenadas do centro do sensor de apalção da MMC
\varnothing	diâmetro
R^2	quadrado do coeficiente de correlção
mR_{bar}	amplitude média

RESUMO

Com a competitividade inerente ao mercado sem fronteiras, a sustentabilidade de uma empresa envolve, necessariamente, ações de garantia da qualidade do produto e do processo de fabricação. Por sua vez, a garantia da qualidade será efetiva se, e somente se, as informações por ela analisadas forem confiáveis e consistentes, papel esse que cabe à Metrologia. No sub-ramo da metrologia dimensional, pode-se dizer que um dos grandes desafios reside na medição de peças fundidas de médio e grande porte, principalmente aquelas caracterizadas pela presença de superfícies livres.

A metrologia por coordenadas tradicional, adequada a tantos cenários, não pode ser considerada uma solução ótima para a medição de superfícies livres em peças fundidas de médio e grande porte, principalmente pela falta de portabilidade. Nesse caso, os braços articulados de medição e os sistemas baseados em fotogrametria surgem como opções bastante convidativas. O corpo do presente trabalho envolve exatamente a avaliação metrológica e operacional desses sistemas de medição.

Os braços articulados de medição foram avaliados em duas vertentes distintas: caracterização do desempenho metrológico do equipamento conforme a ASME B89.4.22, e análise do processo de medição através de estudos de repetitividade e reprodutibilidade. Esta mostrou que a qualificação dos operadores e a harmonização de métodos são aspectos fundamentais para a qualidade das medições. Aquela identificou que as especificações hoje declaradas pelos fabricantes podem não ser bons descritores do desempenho do equipamento de medição. A análise de um sistema fotogramétrico baseou-se em comparações com um braço articulado de medição e com uma máquina de medição por coordenadas. A concordância dos resultados foi bastante satisfatória para os casos estudados, cabendo ainda salientar que o sistema fotogramétrico apresenta vantagens operacionais significativas.

Cabe destacar que embora todas as análises e recomendações delineadas tenham sido direcionadas para aplicações de uma empresa em particular, acredita-se que elas possam ser sensatamente estendidas e interpretadas para outros casos de similar teor.

ABSTRACT

In today's highly competitive global market, quality assurance activities for products and manufacturing processes play a prominent role in insuring company's health. Since most of these activities rely on data obtained by measurements, their benefit is largely influenced by the quality of the measured data, which is responsibility of the metrology staff. One of the most challenging demands in the branch of dimensional metrology is the measurement of medium- and large-sized cast parts, especially those composed of freeform surfaces.

Although stationary coordinate measuring machines are suitable for a large number of applications, they cannot be seen as a practical solution to those cases where it is difficult to move a part to a stationary equipment. Articulated measuring arms and photogrammetry-based measuring systems fit to this purpose and thus they show up as attractive alternatives to the problem. This work is devoted to the metrological and operational evaluations of these types of measuring systems.

The evaluation of articulated measuring arms was based on the machine performance evaluation according to ASME B89.4.22, and on repeatability and reproducibility studies with production parts. The inadequacy of the current manufacturer's specifications was evidenced by the first analysis, and the importance of focusing on operator's training and measuring method definition was identified by the second analysis. The evaluation of a photogrammetry-based measuring system involved comparative studies with an articulated arm machine and a coordinate measuring machine. These studies demonstrated a reasonable agreement between the measurement results of the optical measuring system and the tactile-based measuring systems for the cases in question. It is worthy of attention, however, the substantial increase in throughput provided by the photogrammetry-based measuring system.

It is important to bear in mind that although all analyses were related to particular applications of a foundry company, the findings and recommendations outlined in this document can be reasonably extended to other similar scenarios.

1 A MEDIÇÃO NA PRODUÇÃO DE PEÇAS FUNDIDAS

A fundição é um dos processos mais antigos usados na fabricação de peças mecânicas. Com o aumento da competitividade e a busca incessante da redução de custos e tempos de produção cresce, cada vez mais, a necessidade de ter pleno conhecimento sobre todas as etapas do processo de fundição, visando torná-lo viável do ponto de vista econômico e operacional.

A medição é a ferramenta através da qual esse conhecimento pode ser alcançado, pois através dela é possível qualificar e quantificar as grandezas físicas envolvidas no processo. Assim, a metrologia¹ se torna extremamente importante para o desenvolvimento tecnológico da fundição, uma vez que ela está na essência de qualquer atividade técnica que sustenta ações de melhoria e garantia da qualidade² de produtos e serviços.

Entretanto, formar uma cultura metrológica e disseminá-la em uma empresa tem sido, até hoje, um grande desafio no Brasil. Isso porque a metrologia é geralmente formalizada apenas para atender os requisitos de normas de sistemas de gestão da qualidade^{[2],[3]}, sendo focada na calibração periódica dos meios de medição dentro de um contexto puramente operacional. Esse restrito cenário tem assegurado à metrologia o estigma de ser uma atividade dispendiosa, sendo a ela atribuídos aspectos negativos como o aumento dos tempos de produção e geração de gargalos entre processos.

¹ Metrologia – Ciência das Medições

² Garantia da Qualidade – Conjunto de atividades, suportadas por métodos de processamento de informação, que têm por objetivo maximizar a qualidade do produto e mantê-la no tempo^[1]

Felizmente, tem-se verificado algumas iniciativas de sucesso buscando reverter esse paradigma, seja através do uso efetivo das informações geradas pelas medições (a metrologia deixa de ser simplesmente uma ferramenta de avaliação passiva, mas passa a ser um meio para a melhoria contínua)^{[4],[5],[6]}, seja através do posicionamento estratégico da função metrologia no organograma da empresa de forma tal que ela tenha maior visibilidade, participe das etapas anteriores à produção propriamente dita e flanqueie a garantia da qualidade com dados confiáveis sobre a qualidade dos produtos e processos^[7].

Dentre as várias ações que fazem parte das iniciativas supramencionadas, destacam-se aquelas relacionadas à definição e avaliação de processos de medição utilizados no controle da qualidade de peças de alto valor unitário, como é o caso das peças fundidas de médio e grande porte.

1.1 PECULIARIDADES DAS PEÇAS FUNDIDAS

No processo de fundição, o metal líquido ou fundido é vertido no interior de um molde contendo uma cavidade com a geometria desejada para a peça final. Tal cavidade nada mais é do que o negativo da peça que se deseja fabricar, apropriadamente modificado para compensar o efeito de contrações e distorções devidas ao resfriamento durante o processo de solidificação^{[8],[9]}.

Geralmente, as peças de médio e grande porte são fundidas em moldes de areia compactada, utilizando modelos de madeira ou resina para definir a cavidade que depois será ocupada pelo metal fundido. A Figura 1 mostra os principais elementos envolvidos neste método de moldagem, para uma peça simples. Na parte superior da figura é representado o modelo (em azul e vermelho), que define a parte externa da peça e as cavidades necessárias para dar suporte ao macho³. Na parte inferior da figura, pode-se observar a cavidade deixada pelo modelo no molde de areia, com o macho já instalado.

³ Machos – Quando o fundido necessitar de regiões ocas, constroem-se modelos separados denominados de machos, que são colocados no interior da cavidade deixado pelo modelo do fundido. O espaço entre a cavidade e o macho será então preenchido pelo metal líquido, que ao solidificar, forma a peça fundida^[10]

A provisão de metal é feita através de canais de alimentação existentes no molde. Terminada a solidificação, a peça fundida é removida destruindo o molde de areia e o macho.

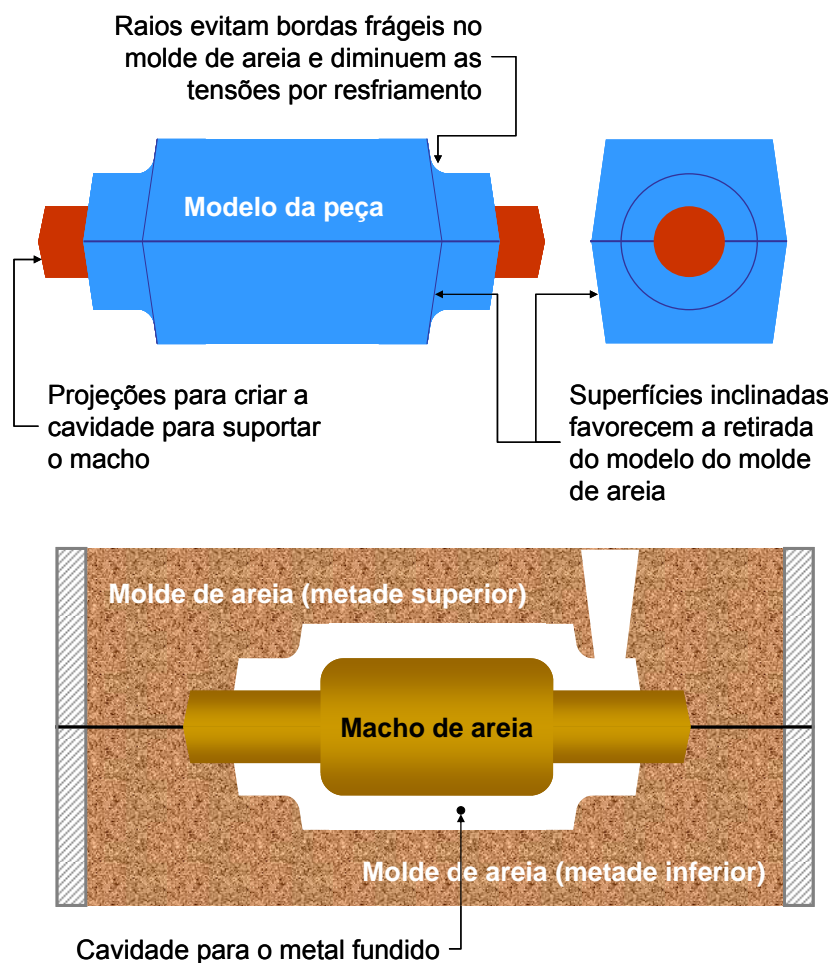


Figura 1 – Modelo (acima) e molde de areia (abaixo) para obtenção de uma peça simples.

Após a retirada do molde, a peça é submetida a operações de corte de canais de alimentação e rebarbação. Entretanto, antes do acabamento já é possível detectar a presença de alguns defeitos típicos dos fundidos. Denomina-se defeito da solidificação toda a heterogeneidade surgida durante a solidificação do metal. Tal heterogeneidade refere-se à estrutura interna do material e pode ser de natureza física (poros, vazios, cavidades de contração, rechupes, trincas, etc.) ou de natureza química (segregações). Primeiramente, é importante conhecer a heterogeneidade composicional e em seguida, os defeitos estruturais específicos^{[10],[11]}.

A inspeção tem como principais objetivos segregar as peças defeituosas e fornecer dados para dar suporte às ações de melhoria^[8]. Ela pode ser de diferentes tipos, segundo a etapa do processo em que está inserida.

- ✓ Inspeção visual: para detectar defeitos visíveis, resultantes das operações de moldagem, confecção e colocação de machos, de vazamento e limpeza.
- ✓ Inspeção dimensional e geométrica: é realizada geralmente em amostras ou pequenos lotes produzidos antes que toda a série de peças seja fundida ou em cada peça produzida, quando se justifica.
- ✓ Inspeção metalúrgica: que inclui análise química (por exemplo espectrometria), exame metalográfico para a observação da microestrutura do material, ensaios para a determinação de propriedades mecânicas (por exemplo ensaio de resistência à tração) e ensaios não-destrutivos para verificar se os fundidos estão isentos de falhas tais como trincas e bolhas.

Do ponto de vista metrológico, a inspeção dimensional e geométrica de peças fundidas apresenta alguns desafios de porte, devido a que estas peças apresentam muitas vezes geometrias complexas. Essa complexidade é devida às características do processo de moldagem, mas também às liberdades que o processo de fundição concede aos projetistas. Em peças de fundição é freqüente:

- ✓ A presença de superfícies inclinadas, necessárias para que a retirada do modelo seja suave, sem prejuízo da integridade do molde de areia (Figura 1). Essas inclinações, tipicamente de 1° a 3°, complicam a definição de referências e determinação de distâncias.
- ✓ A presença de raios de empalme entre superfícies, para evitar quinas frágeis no molde de areia e para melhorar o comportamento do metal durante o processo de solidificação (Figura 1).
- ✓ A elevada rugosidade, típica da superfície de areia do molde.
- ✓ O uso de superfícies com curvaturas complexas e livres, decorrentes das necessidades funcionais da peça ou para melhorar a relação entre a resistência e o peso.

1.2 PROBLEMÁTICA DA MEDIÇÃO DE FORMAS LIVRES

Superfícies de formas livres são extensamente usadas em diversos campos de atuação. Variam de indústrias automotivas e aeroespaciais à área biomédica, desde a concepção de projeto e fabricação de, por exemplo, moldes, modelos, confecção de padrões, produtos plásticos até aplicações de processamento de dados geográficos.

A especificação técnica para superfícies de formas livres e curvas está fundamentalmente relacionada com as tolerâncias de perfil de linha e superfície, com ou sem relação a referências. Essas tolerâncias de acordo com a norma ISO 1101^[12], podem ser usadas para definir as exigências em três situações diferentes: somente para forma, para orientação (incluindo forma) e para localização (incluindo forma e orientação)^[13].

Diversas peças fundidas, tais como as turbinas do tipo Pelton, Francis e Kaplan (Figura 2) são projetadas, por razões funcionais, utilizando tais superfícies. É natural, portanto, que em muitas situações práticas haja o interesse e a necessidade de se conhecer com determinada exatidão a forma tridimensional dessas peças. Para tanto, técnicas especiais de medição têm sido desenvolvidas.



Figura 2 – Rotores de turbinas tipo Pelton, Francis e Kaplan^[14].

Comparando as medições de características geométricas regulares em relação às medições de superfícies de formas livres, alguns fatores são de grande importância, tais como: software de medição e de avaliação, fixação da peça, alinhamento (definição do sistema de coordenadas da peça), número e distribuição de pontos amostrados, critérios de avaliação, entre outros. Isto

porque a complexidade das medições de formas livres é muito maior do que medições de superfícies regulares e em alguns casos, não há nenhuma ferramenta disponível para o monitoramento desses fatores de influência mencionados^[13]. Assim, ao contrário de objetos que são compostos de elementos geométricos simples (*features*), tais como, planos, linhas, esferas e cilindros, objetos de formas livres normalmente não apresentam pontos característicos óbvios, sendo assim mais difíceis de definir e modelar matematicamente^[15].

1.3 RECURSOS PARA A MEDIÇÃO DE FORMAS LIVRES

Segundo Kowarschik *et al*^[16], superfície livre pode ser definida como sendo toda e qualquer superfície cuja geometria não pode ser representada por equações matemáticas definidas, sendo então de difícil descrição analítica.

Essas superfícies podem ser medidas através de técnicas de medição com e sem contato. No que diz respeito à análise geométrica dessas superfícies, duas metodologias são normalmente empregadas: comparação direta e indireta^[17].

O princípio básico da comparação direta é verificar o desvio entre a superfície a ser analisada e uma superfície tida como padrão, através da medição das distâncias (folgas) existentes entre as duas quando sobrepostas. A principal desvantagem de se usar superfícies padrão em medições geométricas é a incerteza de medição, que se torna fortemente dependente da habilidade do inspetor e da manutenção e calibração dos próprios padrões.

Já a comparação indireta baseia-se na tecnologia de medição por coordenadas. Nesse caso, as coordenadas de diversos pontos da superfície da peça são determinadas e os erros geométricos são definidos como sendo as diferenças entre os valores medidos e os valores de referência. Como a posição e a magnitude dos erros são fornecidas explicitamente, sua incerteza de medição é geralmente menor que no caso da comparação direta^[17].

Independente da metodologia utilizada, informações sobre a orientação, posição e forma são essenciais para uma caracterização unívoca da superfície livre, exigindo uma análise bastante criteriosa.

1.4 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO

Para a realização deste trabalho, foi decisiva a colaboração da Electro Aço Altona S.A., indústria metalúrgica localizada em Blumenau/SC, que produz peças fundidas, tratadas termicamente e usinadas. A capacidade instalada é 1200 toneladas por mês de componentes fundidos e usinados, que são demandados por setores tais como mineração, dragagem, geração de energia elétrica, entre outros.

Atualmente existem três unidades de negócios em operação na Altona: Repetitivos (URE), Sob Encomenda (USE) e Ligas Especiais (ULE). As análises pertinentes para a consolidação deste trabalho foram concentradas na unidade Sob Encomenda, que se caracteriza pela produção de peças com complexidade e dimensões as mais variadas possíveis. A Figura 3 mostra alguns dos produtos dessa unidade de negócios.



Figura 3 – Algumas peças fundidas pela unidade Sob Encomenda da Altona^[14].

Neste segmento existem alguns questionamentos metrológicos, tornando-se necessária uma avaliação minuciosa dos principais desafios associados às medições de produtos sob encomenda. Hoje o controle dimensional de alguns desses produtos é realizado usando gabaritos, traçadores e braços articulados de medição. Contudo, além dos já conhecidos problemas no que diz respeito ao estabelecimento da rastreabilidade potencial de sistemas de medição por coordenadas e, particularmente, de sistemas articulados tais como os braços de

medição, os tempos de preparação e medição são geralmente elevados. Isso pode resultar em gargalos de produção e atrasos nas entregas, mas também numa maior fadiga dos inspetores pelo trabalho em posições desconfortáveis e maior exposição física a condições agressivas.

1.4.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral dar suporte à indústria metalúrgica e metal-mecânica, visando melhorar a análise dos sistemas de medição aplicáveis ao controle dimensional de superfícies livres em peças fundidas, através de estudos comparativos baseados em técnicas de medição com e sem contato.

1.4.2 Objetivos específicos

Através de uma análise crítica da medição de alguns produtos sob encomenda do segmento de hidrogeração, focam-se os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Avaliar a mais recente metodologia para verificação de braços articulados de medição (norma ASME B89.4.22-2004), uma vez que este dispositivo é um dos utilizados para o controle dimensional das peças.
- ✓ Confrontar tecnologias de medição com e sem contato através de estudos em peças fundidas e fornecer recomendações/boas práticas visando melhorias na medição de tais peças.
- ✓ Identificar uma solução ótima para equipamentos de medição do ponto de vista técnico e econômico.

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente trabalho traz no **Capítulo 2** um levantamento sobre as tecnologias existentes para a inspeção por contato de formas livres e metodologias para medição de peças fundidas.

O **Capítulo 3** traz um levantamento sobre as metodologias existentes para a inspeção sem contato de formas livres através de técnicas ópticas de medição baseadas em fotogrametria. Também é apresentada a norma VDI/VDE 2634-2002 que traz testes para avaliar sistemas ópticos de medição 3D.

No **Capítulo 4** será apresentada e discutida a avaliação metrológica de braços articulados de medição usando a nova norma ASME B89.4.22-2004 e outros estudos estatísticos.

O **Capítulo 5** traz a comparação da medição de duas peças fundidas, utilizando os atuais equipamentos de medição da Altona (braço articulado de medição e máquina de medição por coordenadas) e um sistema óptico de medição baseado em fotogrametria.

Posteriormente serão apresentadas as conclusões do presente trabalho, recomendações e oportunidades futuras.

2 INSPEÇÃO POR CONTATO DE FORMAS LIVRES EM PEÇAS DE MÉDIO E GRANDE PORTE

Neste capítulo serão apresentados alguns instrumentos baseados em tecnologias de medição por contato normalmente empregados para o controle dimensional de peças fundidas, tais como gabaritos, traçadores de altura, máquinas de medição por coordenadas de tipo cartesiano e polar, isto é, braço articulado. Uma abordagem sobre avaliação metrológica de braços articulados de medição também será apresentada uma vez que tal sistema é o empregado para o controle dimensional de algumas peças do segmento de hidrogenação da Altona.

2.1 GABARITOS

Os gabaritos são instrumentos de medição relativamente simples, confeccionados normalmente em aço, podendo ser fabricados pela própria empresa ou setor responsável (próprio mecânico/operador) pelo controle de determinado parâmetro da peça analisada. Dependendo da natureza e necessidade do trabalho a ser realizado, suas formas, tipos e tamanhos variam. A Figura 4 apresenta alguns gabaritos utilizados na Electro Aço Altona.

Os gabaritos podem ser comercialmente encontrados em formatos padronizados tais como: verificadores de raios, de ângulo fixo para ferramentas de corte, escantilhões para roscas (pente de rosca), calibrador de folga, compasso, pente de raio, entre outros.



Figura 4 – Alguns gabaritos usados na Electro Aço Altona.

Gabaritos operam como padrões contra os quais a curva ou superfície é comparada. Assim, sua forma deve apresentar um desvio consideravelmente menor à tolerância da superfície a ser controlada. No caso mais geral, a comparação é realizada visualmente, através da observação do fio de luz entre o gabarito e a peça. Conseqüentemente, trata-se de sistemas de inspeção atributivos, que não têm a capacidade de informar o valor do desvio em cada ponto da superfície controlada.

2.2 GRAMINHOS OU TRAÇADORES DE ALTURAS

A Figura 5 mostra vários modelos de graminho ou traçador de alturas. Trata-se de um instrumento de medição semelhante ao paquímetro, porém realiza seu trabalho sobre um despenho ou plano metrológico.

Esse instrumento é amplamente utilizado tanto em laboratórios de metrologia como nos setores de fabricação. São empregados para medir, traçar peças, auxiliar na verificação de nivelamento, paralelismo, planeza e outros parâmetros^[18].



Figura 5 – Diversos tipos de traçador de alturas: analógico, analógico com relógio e digitais^[18].

No que diz respeito à verificação e ajuste desses instrumentos ressalta-se:

- ✓ A perpendicularidade em relação à base de apoio é de fundamental importância neste tipo de instrumento, por realizar o seu trabalho na posição vertical apoiado em um desempenho. Para verificar esse parâmetro, pode-se utilizar um esquadro padrão e um relógio tipo apalpador fixado no cursor.
- ✓ A calibração da escala é feita com o auxílio de blocos padrão de diferentes comprimentos, de acordo com sua faixa de medição, ou com padrão escalonado vertical. Na calibração utiliza-se a norma ABNT NBR 11309^[19].
- ✓ O ajuste está restrito ao cursor e ao posicionamento do nônio em relação à base de referência.

2.3 MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Como um dos instrumentos metrológicos mais poderosos, as máquinas de medição por coordenadas são usadas extensamente na maioria das indústrias. Há poucas peças cujas formas e/ou dimensões não podem ser medidas com uma MMC^[20]. As melhorias na flexibilidade e na exatidão, acopladas com diminuições de tempo e custo das medições, justificam a rápida aceitação dessas máquinas na metrologia industrial.

Na medição por coordenadas com contato, a informação sobre a geometria da peça é obtida apalpando a superfície em pontos de medição discretos e as coordenadas desses pontos são expressas num sistema de referência pré-determinado. Entretanto, não é possível avaliar os desvios geométricos da peça (por exemplo, desvios de diâmetro, de distância, de posição, de perfil, batimentos, entre outros) diretamente pelas coordenadas dos pontos medidos. Assim, podem-se identificar basicamente duas formas para avaliar, a partir dessas coordenadas, a qualidade geométrica da peça:

- ✓ As coordenadas dos pontos medidos são usadas para estimar, através de um algoritmo de ajuste (por exemplo, mínimos quadrados)^[20], os parâmetros de elementos geométricos ideais, também chamados de elementos substitutos, tais como cilindros, planos, cones e assim por diante. A avaliação de conformidade é realizada comparando esses parâmetros com as especificações de aplicação (por exemplo, tolerâncias de tamanho, posição, orientação, batimento, entre outros).
- ✓ Os pontos medidos são posicionados com relação ao modelo CAD tridimensional da peça, usando algum critério matemático de ajuste (por exemplo, *best-fit*). A partir desse posicionamento podem ser determinados os desvios da superfície real com relação à superfície do modelo, realizando a avaliação de conformidade com as especificações. Esse é o modo mais freqüente quando se trata de superfícies de forma livre.

As máquinas de medição por coordenadas podem ser classificadas em dois tipos básicos, conforme a natureza dos movimentos entre partes móveis. Há assim as que se baseiam em deslocamentos retilíneos mutuamente ortogonais, denominadas de máquinas “cartesianas”, e as que se baseiam em movimentos de rotação, denominadas de “braços articulados”. A seguir serão tratadas as particularidades de ambos os tipos.

2.3.1 Máquinas de medição por coordenadas cartesianas

A Figura 6 apresenta diferentes tipos construtivos de máquinas de medição por coordenadas cartesianas (MMCs).



Figura 6 – Diversas máquinas de medição por coordenadas cartesianas ^{[18],[21],[22]}.

As MMCs modernas podem adquirir a informação sobre a superfície da peça de duas modalidades de apalpação diferentes:

- ✓ Ponto a ponto - O apalpador se aproxima da superfície da peça numa direção que pode ser normal à superfície da mesma ou coincidir com um dos eixos coordenados da máquina, dependendo do modelo da MMC e do software de medição usado. As coordenadas do ponto central do sensor esférico são adquiridas e posteriormente o apalpador se separa da peça, deslocando-se em busca do ponto seguinte. As coordenadas do ponto de contato sensor-peça são obtidas por correção do raio do sensor esférico, a partir das coordenadas adquiridas do centro.
- ✓ Por varredura ou *scanning* - O sensor permanece em contato com a superfície da peça e se desloca em uma direção pré-determinada. Durante essa trajetória, as coordenadas do centro do sensor são adquiridas seqüencialmente. Posteriormente, as coordenadas dos pontos de contato sensor-peça são obtidas por correção do raio do sensor na direção espacial apropriada.

Basicamente, todo o método de medição 3D capaz de adquirir pontos únicos da superfície de uma peça é apropriado para medições de superfícies de formas livres^[13]. As MMCs equipadas com apalpadores do tipo *scanning* podem medir um grande número de pontos na superfície de uma peça num pequeno intervalo de tempo, gerando assim informação mais detalhada sobre a geometria. Porém, no caso específico de peças fundidas em areia, a elevada rugosidade e a

eventual presença de areia na superfície podem induzir o rápido desgaste do elemento sensor e dos componentes móveis do cabeçote apalpador. Por isso, dependendo do caso pode ser preferível sacrificar a densidade de informação e medir ponto a ponto, numa malha suficientemente fechada como para que desvios funcionalmente relevantes possam ser revelados.

Em uma medição com uma MMC é necessário haver a preparação não tão somente da peça submetida à medição como da própria máquina. Tal preparação consiste nas seguintes etapas^[23]:

- ✓ Limpeza da peça - A limpeza da superfície submetida à medição deve ser bem controlada antes e durante as medições. Algumas impurezas podem comprometer toda a confiabilidade do processo de medição e até causar problemas no sensor do apalpador.
- ✓ Estabilização térmica da peça – Deve-se garantir que a peça esteja a uma temperatura suficientemente próxima de 20°C antes de ser iniciada a medição e que permaneça sem variações de temperatura relevantes ao longo de todo o processo de medição. O tempo necessário para estabilização térmica varia conforme o material e tamanho da peça.
- ✓ Fixação da peça - Após a estabilização térmica da peça, é necessário fixá-la na mesa da máquina por meio de um dispositivo de fixação que garanta uma fixação firme da peça sem, no entanto, provocar deformações que venham a alterar as dimensões da mesma. Peças grandes podem não precisar de fixação, mas deve-se cuidar que estejam apoiadas adequadamente para evitar deformações devidas ao próprio peso.

Terminada essa preparação e realizado o planejamento da medição, executa-se a medição propriamente dita, que compreende as seguintes etapas^[20]:

- a. Qualificação do apalpador usando, por exemplo, uma esfera calibrada.
- b. Determinação do sistema de coordenadas da posição da peça em relação ao sistema de coordenadas da máquina.
- c. Medição dos pontos na superfície da peça em relação ao sistema de coordenadas da máquina.

- d. Avaliação dos parâmetros geométricos na peça.
- e. Representação do resultado da medição após a transformação do sistema coordenado no sistema de coordenadas da peça.

Quando adequadamente instaladas e utilizadas, as MMCs são apropriadas para o controle dimensional de peças de geometrias complexas com alta confiabilidade metrológica e incertezas relativamente baixas. No caso particular de peças fundidas de médio e grande porte, caracterizadas por volumes grandes e massas elevadas, é importante ainda refletir sobre:

- ✓ A capacidade da MMC para suportar a massa da peça e a forma em que a mesma é distribuída sobre a mesa da MMC para evitar deformações relevantes nas guias da máquina.
- ✓ Eventuais dificuldades de acesso e manipulação da peça para colocá-la em posição de medição dentro do volume da MMC.
- ✓ Aspectos de segurança dos operadores e da máquina, decorrentes da movimentação de grandes massas.
- ✓ O possível prejuízo na estabilização térmica do laboratório, devido às necessidades de acesso de grandes peças.

Alguns desses problemas podem ser amenizados pela utilização de MMCs de tipo ponte ou lança, nas quais a peça descansa diretamente sobre uma base isolada das guias que determinam a exatidão da MMC. Tipicamente as MMCs tipo ponte têm menor erro máximo admissível (EMA) que as de tipo lança (3 a 6 vezes menores para o mesmo volume de medição). No entanto, o acesso da peça é mais facilitado nas MMCs tipo lança. Os problemas de estabilização térmica podem ser atenuados criando-se uma ante-sala de tamanho apropriado para receber as peças sem necessidade de abrir a porta interna que a vincula com o laboratório.

No entanto, as MMCs tipo cartesianas existentes na atualidade ainda não são adequadas para medir no ambiente de uma fundição típica. Também não resolvem o problema de realizar engenharia reversa em locais remotos. Para satisfazer esses requisitos, um sistema de medição deve ser robusto, fácil de transportar, razoavelmente insensível às vibrações e às variações de

temperatura. Os braços articulados de medição se perfilam como uma solução adequada para atender esses requisitos.

2.3.2 Braços articulados de medição

Os braços articulados de medição (BAMs) usam uma série de articulações compondo 5, 6 ou 7 graus de liberdade e medidores angulares de precisão (*encoders*) para determinar a posição de um apalpador no espaço tridimensional. O posicionamento do apalpador na superfície da peça é feito manualmente e o volume de medição é esférico.

Na Figura 7 são apresentados diferentes tipos de braços articulados de medição.



Figura 7 – Diversos braços articulados de medição^{[24],[25],[26]}.

A Figura 8 mostra as transformações necessárias para chegar desde o sistema coordenado fixo à base até o sistema coordenado associado ao apalpador, bem como uma representação do volume de trabalho esférico desse equipamento.

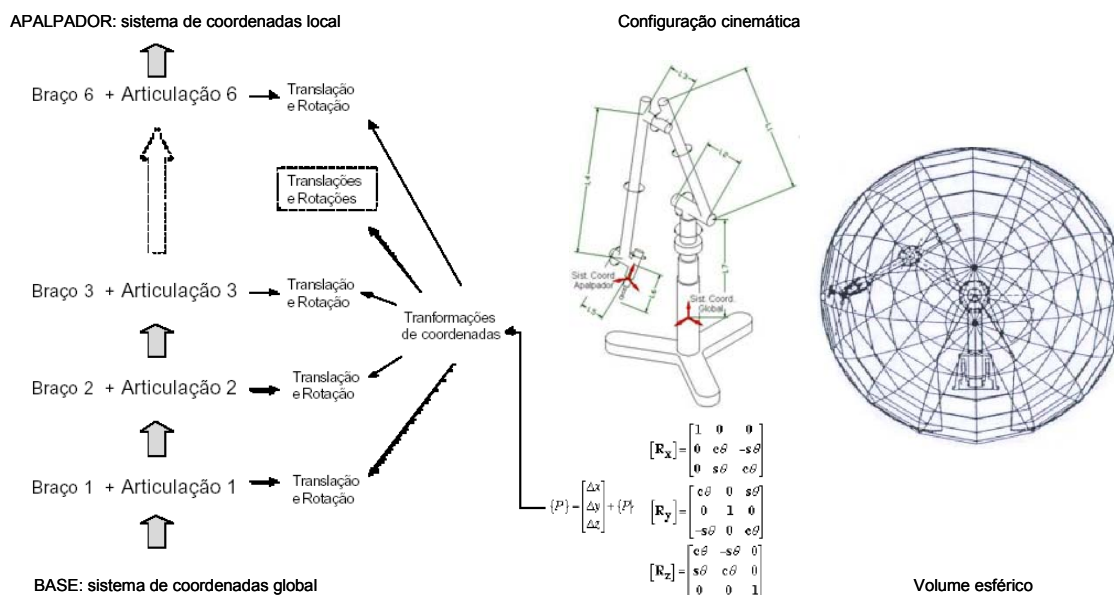


Figura 8 – Transformações de coordenadas e volume de trabalho de um braço articulado de medição^[27].

Devido a sua configuração e características construtivas, os braços articulados de medição possuem algumas características vantajosas que podem ser decisivas em determinadas aplicações^[27]:

- ✓ Grande portabilidade.
- ✓ Relação vantajosa entre o volume de medição e o tamanho do equipamento.
- ✓ Menor custo em relação às máquinas de medição por coordenadas cartesianas.

Dessa forma, medições em campo e em locais de difícil acesso são possíveis do ponto de vista operacional, com relativa facilidade para o usuário. No entanto, os BAMs, como qualquer sistema de medição, estão sujeitos a limitações metrológicas. Na Figura 9 são apresentadas, por meio de um diagrama de causa-efeito, as principais fontes de erros encontradas nos BAMs.

Em geral, as incertezas das medições realizadas com BAMs são maiores que as incertezas das medições executadas em MMCs cartesianas. Fatores tais como a habilidade do operador e a rigidez da fixação do braço com relação à peça são críticos e podem degradar fortemente o desempenho metrológico do

sistema de medição. Valores de repetitividade (95%) entre 0,1 mm e 0,6 mm são comuns para volumes de medição de aproximadamente 2 m (alcance de medição ou diâmetro da esfera de medição).

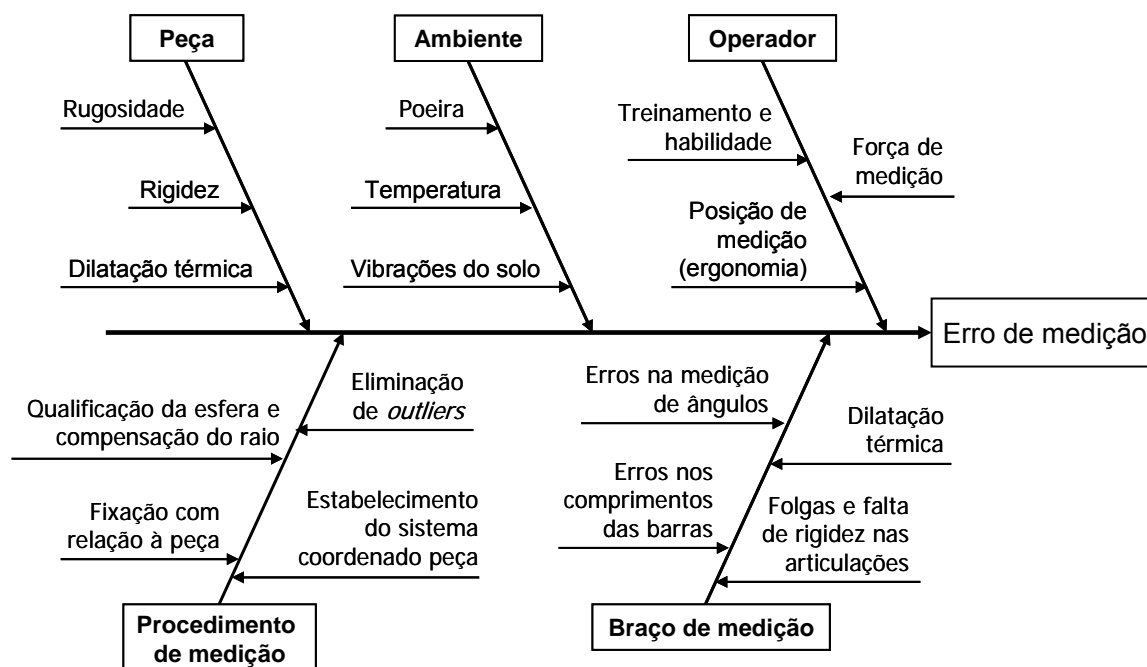


Figura 9 – Diagrama de causa e efeito das principais fontes de erros na medição com BAMS.

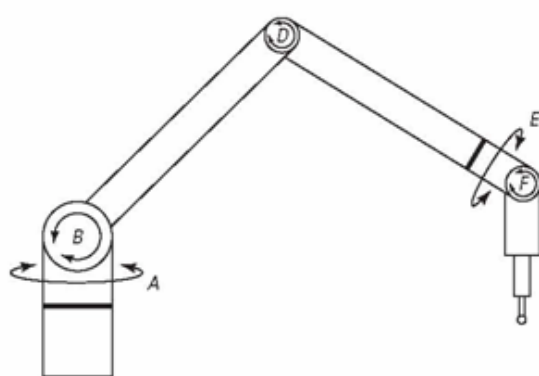
Devido a essas limitações, os braços articulados de medição são apropriados para o controle de peças com tolerâncias amplas, tais como peças plásticas, estampadas e fundidas não acabadas (peças brutas). Por essa razão serão tratados com bastante detalhe no presente capítulo.

Como ainda se trata de uma tecnologia relativamente nova no mercado, até 2004 não existia uma metodologia específica para avaliação de desempenho de BAM. Havia, sim, métodos derivados dos usados na avaliação de MMCs cartesianas, praticadas e aceitas pelos fabricantes de BAMS. Só em agosto de 2005, a ASME publicou sua norma B89.4.22-2004^[28], específica para avaliação de máquinas de medição de braços articulados com volume de medição esférico. Na seção a seguir são explicados e discutidos os testes exigidos pela norma mencionada.

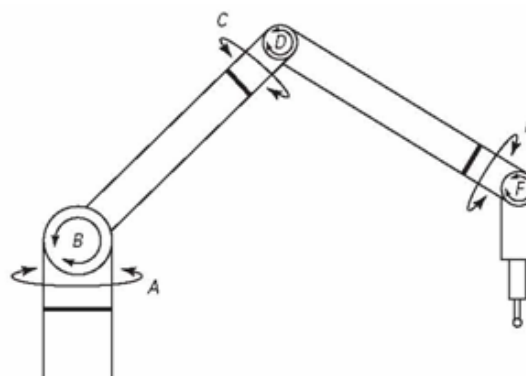
2.4 VERIFICAÇÃO DE BRAÇOS ARTICULADOS SEGUNDO A NORMA ASME B89.4.22-2004

O escopo desta norma refere-se à avaliação de desempenho de braços articulados de medição manuais com até sete articulações, embora configurações com maior número de articulações possam também ser avaliadas^[28]. Apesar da crescente aplicação de BAMS com sensores ópticos, até o presente momento são considerados somente apalpadores de contato.

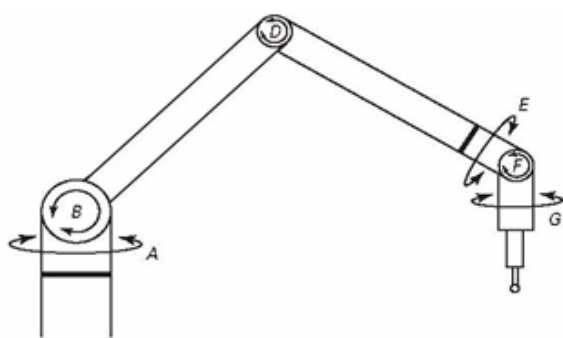
A ASME B89.4.22-2004, além de padronizar a avaliação de desempenho dos BAMS, padroniza aspectos tais como a classificação do tipo de equipamento e as especificações ambientais^[28]. As configurações dos BAMS são definidas de acordo com o número de graus de liberdade. Como mostrado na Figura 10, a norma ASME traz as seguintes configurações:



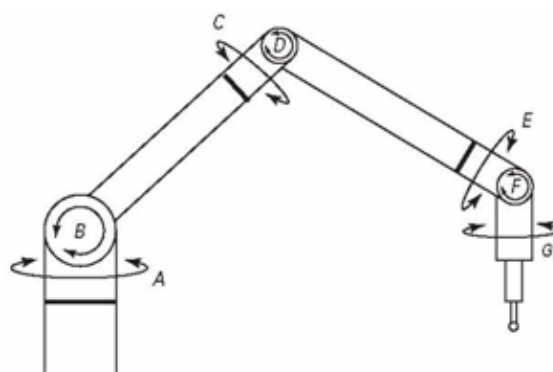
Configuração: 2-1-2 com cinco juntas de rotação (A, B, D, E, F)



Configuração: 2-2-2 com seis juntas de rotação (A, B, C, D, E, F)



Configuração: 2-1-3 com seis juntas de rotação (A, B, D, E, F, G)



Configuração: 2-2-3 com sete juntas de rotação (A, B, C, D, E, F, G)

Figura 10 – Configurações dos BAMS^[28].

A norma define três tipos de testes: o teste de desempenho do diâmetro efetivo, o teste de desempenho da articulação de um único ponto e o teste de desempenho volumétrico. Apresenta um conjunto de parâmetros para descrever o desempenho do BAM e traz também informações sobre como avaliar a incerteza associada a cada tipo de ensaio de desempenho, no caso de serem aplicadas regras de decisão (conforme ISO 14253-1^[29] e ASME B89.7.3.1^[30]) para avaliar a conformidade ou não do equipamento frente às especificações, por exemplo durante os ensaios de aceitação do BAM.

Os parâmetros são os seguintes: o desvio máximo de um valor de referência (que, se estiver disponível, é o valor calibrado de um artefato), a amplitude dos desvios de um valor de referência, duas vezes a raiz da soma quadrática dos desvios (2RMS), e, no caso do teste de desempenho da articulação de um único ponto (SPAT), duas vezes o desvio padrão da localização do ponto.

2.4.1 Teste de desempenho do diâmetro efetivo

Neste teste o diâmetro de uma esfera calibrada é medido tendo como configuração e procedimento de medição as seguintes recomendações:

- ✓ Uma esfera de referência de 10 mm a 50 mm de diâmetro (calibrada) deve ser montada rigidamente, aproximadamente na metade do alcance do BAM.
- ✓ Cada medição deve ser realizada apalpando em 9 pontos com a seguinte distribuição: 4 pontos no equador, 4 pontos numa latitude de 45 graus (girando em torno do equador) e 1 ponto no pólo.
- ✓ Durante o teste deve ser minimizada a articulação do BAM em cada medição.
- ✓ A esfera deve ser medida 3 vezes na mesma localização.

Os 9 pontos de cada repetição são usados para determinar o diâmetro da esfera usando o software do BAM. Serão informados: o desvio de diâmetro, como sendo a diferença entre os diâmetros da esfera (medido e calibrado) e o máximo desvio de forma encontrado.

Completado o teste, caso os resultados não estejam em conformidade com as especificações declaradas pelo fabricante, é recomendado repeti-lo por inteiro. É necessário observar se o valor encontrado do desvio reflete num erro sistemático e caso os resultados ainda não estejam em conformidade com as especificações, o teste deverá ser cancelado. Havendo uma possível identificação de alguma falha, refaz-se o teste e somente os dados do re-teste serão considerados.

Através deste teste é possível detectar problemas de histerese e possíveis erros no tamanho do apalpador esférico do BAM, atribuíveis à qualificação do apalpador. Tal erro é importante, uma vez que uma dimensão incorreta do apalpador será transferida para todas as características de tamanho (por exemplo, o diâmetro de um furo, a distância entre planos).

2.4.2 Teste de desempenho da articulação de um único ponto

Este teste, conhecido como SPAT, tem como objetivo avaliar a capacidade do BAM para fornecer valores semelhantes da coordenada de um ponto quando o BAM é movimentado o máximo possível para alcançar aquele ponto. O teste agrupa, por conceito, aspectos de repetitividade⁴ e reprodutibilidade⁵, necessários devido à natureza dos BAM.

Visando maximizar a movimentação (articulação) de todos os *encoders* do BAM, o teste deve ser executado usando um artefato em 3 localizações diferentes dentro do volume de trabalho do BAM^[28]. Tais localizações são baseadas num percentual do valor do comprimento do braço (comprimento radial) e são apresentadas na Figura 11:

⁴ *Repetitividade (de resultados de medições) – Grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição*^[31]

⁵ *Reprodutibilidade (dos resultados de medições) – Grau de concordância entre os resultados de medições de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição*^[31]

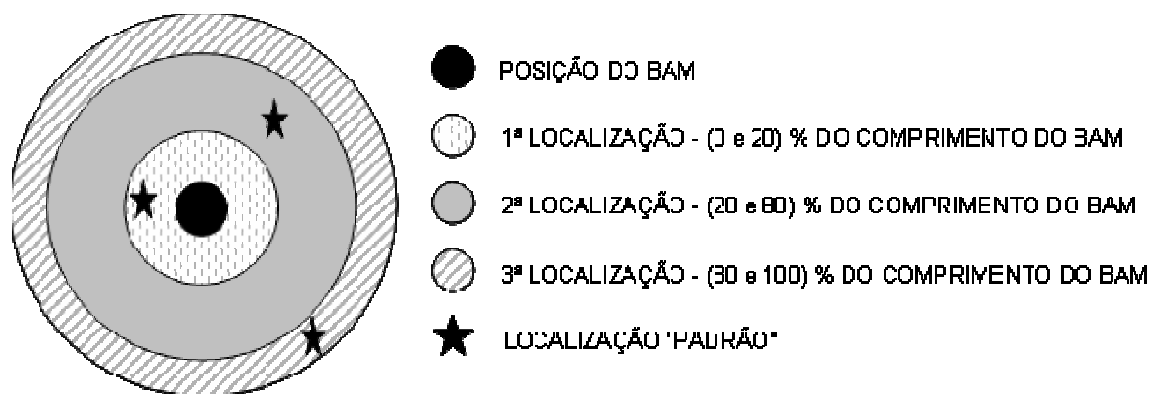


Figura 11 – Posições da esfera para o teste SPAT, com base no comprimento radial do BAM^[28].

A norma apresenta dois métodos distintos para o teste SPAT: um para apalpador rígido e outro para apalpador comutador. Na utilização do apalpador rígido cabe ao operador identificar a ocorrência do toque com a peça, enquanto o sinal para adquirir os ângulos nos *encoders* é dado pelo acionamento de um botão ou pedal. A seguir, cabe ao computador calcular a posição do sensor no sistema de referência pré-determinado. Já o apalpador do tipo comutador é um interruptor elétrico normalmente fechado. Quando o sensor toca a peça ocorre uma pequena deflexão da haste, suficiente para abrir o interruptor e gerar um sinal para que os ângulos sejam lidos nos *encoders*.

Para BAMs com apalpador rígido, o SPAT tem como objetivo a medição das coordenadas do centro do sensor esférico encaixado em uma base cinemática (furo ou soquete cônico), quando o braço é movimentado em 10 configurações geométricas diferentes, visando maximizar as possíveis rotações de suas articulações.

Segundo a norma ASME B89.4.22-2004, a prática tem mostrado que quando o apalpador é mantido em contato com o artefato, a força aplicada pelo operador tende a aumentar. Portanto, após a medição, o contato físico entre o apalpador e o artefato padrão deve ser interrompido.

Para melhor exemplificar como são definidas as posições do BAM, a Figura 12 apresenta uma maneira de identificar as três partes de um braço articulado de medição: ombro, cotovelo e pulso.

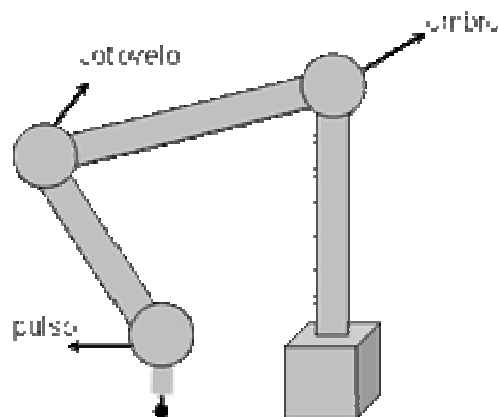


Figura 12 – Partes que compõe o BAM: ombro, cotovelo e pulso^[28].

As 5 primeiras posições são descritas abaixo e mostradas na Figura 13.

- ✓ Cotovelo para baixo à esquerda;
- ✓ Cotovelo para cima à esquerda;
- ✓ Cotovelo para cima;
- ✓ Cotovelo para cima à direita;
- ✓ Cotovelo para baixo à direita.

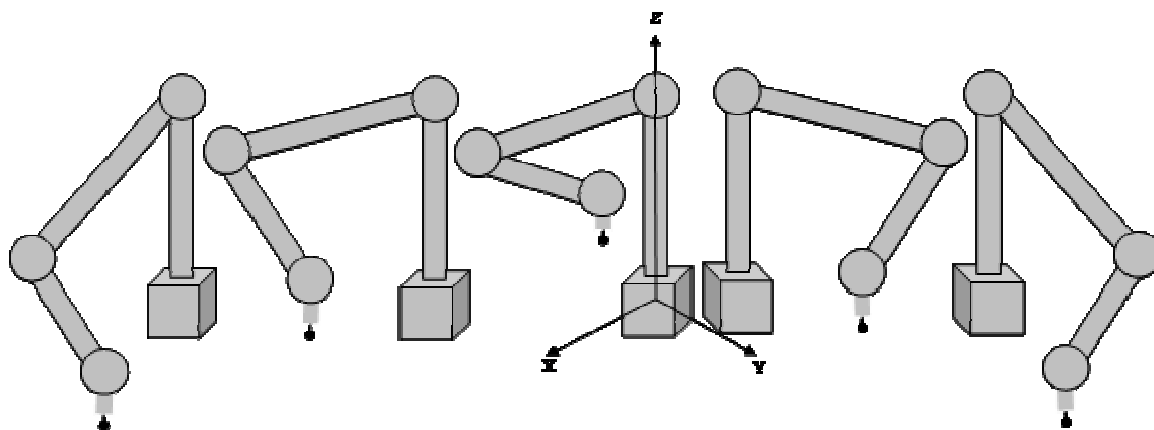


Figura 13 – Esquema das cinco primeiras posições do BAM no teste SPAT^[28].

As outras 5 orientações são obtidas girando o pulso do BAM em aproximadamente 180°. Para cada uma das 10 orientações deve-se registrar a localização do apalpador.

O SPAT utilizando um apalpador comutador tem como objetivo medir a coordenada do centro de uma esfera de referência rigidamente montada, que

tenha um diâmetro entre 10 mm e 50 mm. A localização da esfera deverá ser medida 10 vezes em 3 posições diferentes dentro do volume de trabalho do BAM. Para cada posição da esfera, o BAM é movimentado nas mesmas 10 orientações descritas anteriormente. Para cada uma das 10 orientações do BAM, 4 pontos no equador e 1 ponto no pólo são medidos e ajustados para definir a coordenada do centro da esfera (Figura 14). Nesse teste, o BAM deve ser mantido aproximadamente na mesma orientação para todos os 5 pontos durante a medição do centro da esfera.

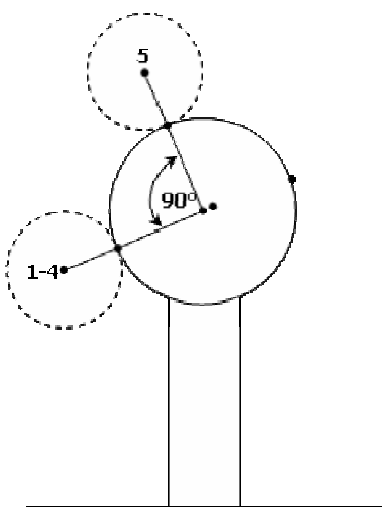


Figura 14 – Distribuição dos 5 pontos no SPAT utilizando um apalpador comutador^[28].

Como resultado da análise de dados tem-se o desvio máximo dos pontos em relação ao valor médio e 2 vezes o desvio padrão da localização dos pontos. O procedimento de cálculo é descrito a seguir:

- ✓ Calcular as médias das coordenadas de localização (X, Y, Z) dos 10 pontos (para apalpador rígido) ou dos 10 centros das esferas calculados (para apalpador comutador).
- ✓ Calcular os desvios vetoriais para cada localização (ponto ou centro de esfera) usada para computar a média, conforme Equação 1:

$$\delta_i = \sqrt{(X_i - X_a)^2 + (Y_i - Y_a)^2 + (Z_i - Z_a)^2} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: X_i , Y_i , Z_i são as coordenadas medidas e X_a , Y_a , Z_a as coordenadas médias; n é número de medições (nesse caso n = 10).

✓ Calcular o desvio máximo $\max(\delta_i)$ e o valor $2S_{\text{SPAT}}$ calculado de acordo com a Equação 2.

$$2S_{\text{SPAT}} = 2\sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{(n-1)}} \quad \text{Equação 2}$$

O parâmetro estatístico $2S_{\text{SPAT}}$ é mais robusto do que o desvio máximo, visto que ele inclui todos os dados e não é estimado exclusivamente por um valor extremo. Além disso, tal parâmetro é útil ao executar uma avaliação de incerteza (Tipo A⁶).

2.4.3 Teste de desempenho volumétrico

O teste de desempenho volumétrico baseia-se na medição da distância entre os centros de duas esferas posicionadas nas extremidades de uma barra, em 20 posições dentro do volume de trabalho do braço articulado de medição^[28]. Para cada posição é necessária a definição dos seguintes parâmetros:

- ✓ Comprimento da barra de esferas – que pode ser curta ou longa com relação ao comprimento radial do BAM.
- ✓ Octante – uma vez que o volume de trabalho do BAM é dividido em oito partes.
- ✓ Inclinação – podendo ser horizontal, vertical ou a 45°.
- ✓ Distância ao centro do BAM – como a barra de esferas encontra-se em relação ao centro do BAM (próxima ou distante).
- ✓ Direção – como a barra de esferas está posicionada (radial ou tangencial).

A Tabela 1 traz as 20 posições para a barra de esferas descritas pela norma. Outras posições são aceitáveis desde que ocupem adequadamente o volume de trabalho do BAM^[28].

⁶ TIPO A – Método de avaliação da incerteza pela análise estatística de séries de observações^[32]

Tabela 1 – Posições da barra de esferas^[28].

Posição	Comprimento (barra de esferas)	Octantes	Inclinação	Distância	Direção
1	Curta	8	Horizontal	Próximo	Radial
2	Curta	5	Horizontal	Próximo	Radial
3	Curta	1 & 2	Horizontal	Distante	Tangencial
4	Curta	4 & 7	45 °	Distante	Tangencial
5	Curta	7 & 3	Vertical	Distante	Tangencial
6	Curta	1 & 5	Vertical	Distante	Tangencial
7	Curta	2	Horizontal	Próximo	Radial
8	Longa	2 & 8	45 °	Próximo	Tangencial
9	Curta	3	Horizontal	Próximo	Radial
10	Longa	1 & 7	45 °	Próximo	Tangencial
11	Curta	1 & 6	45 °	Distante	Tangencial
12	Curta	6 & 3	45 °	Distante	Tangencial
13	Curta	5 & 4	45 °	Distante	Tangencial
14	Curta	3 & 8	45 °	Distante	Tangencial
15	Curta	5 & 2	45 °	Distante	Tangencial
16	Curta	1 & 8	45 °	Distante	Tangencial
17	Curta	2 & 7	45 °	Distante	Tangencial
18	Longa	3 & 4	Horizontal	Próximo	Tangencial
19	Longa	2 & 6	Vertical	Distante	Tangencial
20	Longa	4 & 8	Vertical	Próximo	Tangencial

A norma recomenda o procedimento de teste a seguir:

- ✓ Para cada medição de comprimento entre os centros das esferas, medir 5 pontos por esfera (4 no equador e um no pólo).
- ✓ Fazer com o auxílio de um sensor de temperatura a correção térmica, via software do BAM, se disponível, antes da análise de dados. Deve-se corrigir o comprimento da barra de esferas de acordo com a Equação 3.

$$L_c = L_m [1 - \alpha_{BB} (T_m - 20^\circ\text{C})] \quad \text{Equação 3}$$

Onde: L_c e L_m são os comprimentos corrigido e medido respectivamente, α_{BB} é o coeficiente de expansão térmica da barra de esferas e T_m é a temperatura média durante as medições (a norma recomenda dois registros de temperatura durante o teste, um no início e outro ao término das medições).

Para este teste, o artefato utilizado é uma barra de esferas com comprimento centro a centro calibrado. A norma recomenda utilizar 2 barras calibradas com os seguintes comprimentos:

- ✓ Barra curta: entre 50% e 75% do comprimento radial do BAM.
- ✓ Barra longa: entre 120% e 150% do comprimento radial do BAM.

Neste teste o volume de uma esfera é dividido em 8 octantes aproximadamente iguais como apresentados na Figura 15, ou seja, o plano equatorial é dividido em 4 quadrantes que criam 8 volumes: 4 no hemisfério superior (octantes numerados de 1 a 4) e 4 no hemisfério inferior (octantes numerados de 5 a 8). O raio da esfera é definido pelo comprimento do BAM e centrado na articulação do 1º *encoder*^[28].

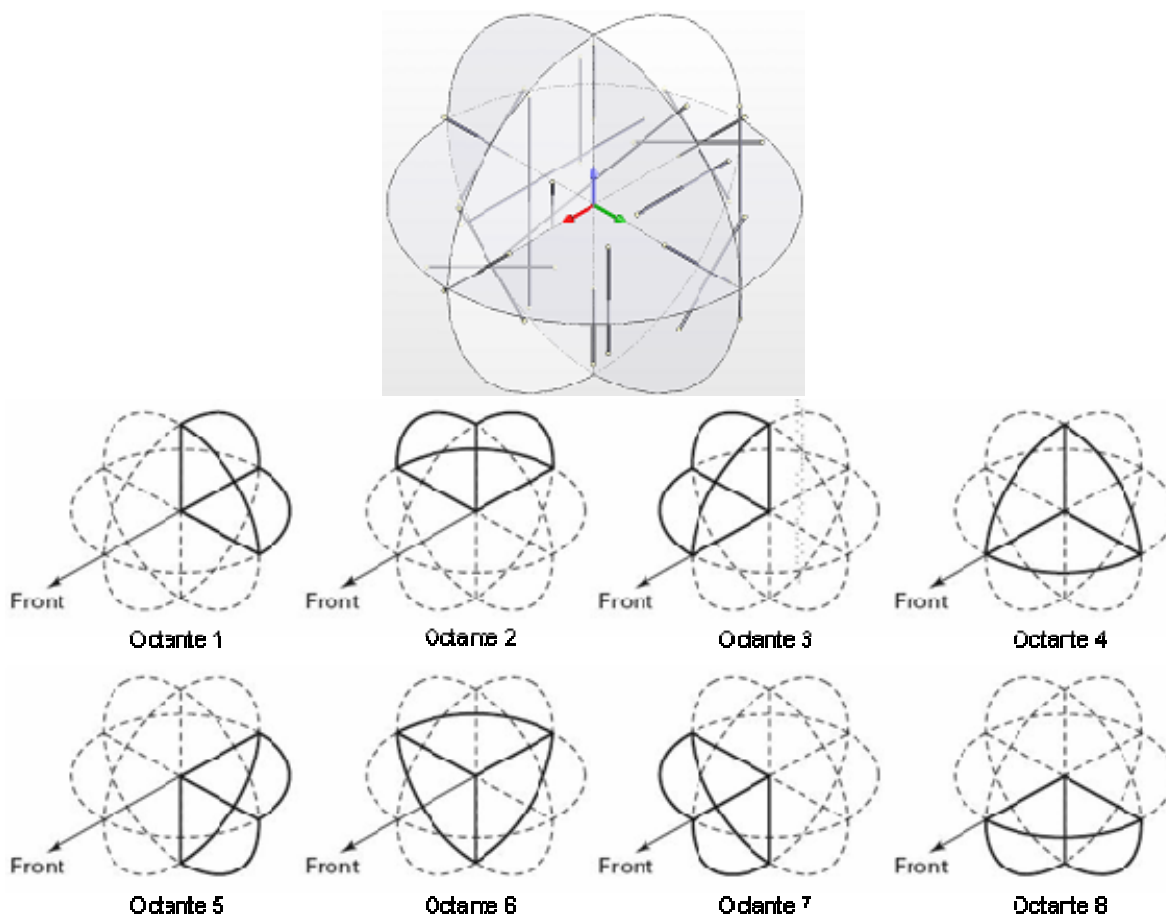


Figura 15 – Posições das barras e divisão do volume esférico em octantes^[28].

A barra de esferas é posicionada em 3 orientações: horizontal, vertical e 45° (inclinada). A distância em que a barra de esferas está do centro do volume de trabalho do BAM é definida como^[28]:

- ✓ Próximo ou dentro da metade do comprimento radial do braço.
- ✓ Distante ou fora da metade do comprimento radial do braço.

Como análise de dados, tem-se que o valor do comprimento centro a centro, L_i , é calculado e registrado para cada posição da barra de esferas e como

resultados são apresentados o desvio máximo encontrado, a amplitude dos desvios e duas vezes o valor médio quadrático da seguinte maneira:

- ✓ O desvio (D_i) é calculado pela diferença entre o valor encontrado (medido e corrigido devido à influência da temperatura) e o valor calibrado, de acordo com a Equação 4:

$$D_i = L_i - L_{cal} \quad \text{Equação 4}$$

- ✓ A amplitude é calculada pela diferença entre os desvios máximo e mínimo encontrados ($D_{m\acute{a}x} - D_{m\acute{i}n}$);
- ✓ O valor 2RMS é calculado de acordo com a Equação 5:

$$2 \times \text{RMS} = 2 \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n}} \quad \text{Equação 5}$$

Nesse caso n é número de medições ($n = 20$).

O parâmetro estatístico RMS é mais robusto do que o desvio máximo, por não ser determinado unicamente por um valor extremo desde que todos os dados sejam incluídos. Além disso, tal parâmetro é útil ao executar uma avaliação de incerteza, pelo fato de representar uma contribuição de incerteza obtida por meio de uma avaliação do Tipo A.

Para cada posição uma medição deverá ser realizada. Se após as 20 posições medidas houver alguma medição “suspeita” (grande diferença entre valores), o procedimento recomendado para conferir tal medição é descrito a seguir:

- ✓ Suponha que L_{i1} e L_{i2} sejam os comprimentos encontrados na primeira e segunda medição de uma mesma posição.
- ✓ Se a diferença entre os valores L_{i1} e L_{i2} for menor que duas vezes o valor encontrado no teste de desempenho da articulação de um único ponto (SPAT), então o valor de L_{i1} é considerado e o valor L_{i2} desconsiderado. Caso contrário, se a diferença entre os valores L_{i1} e L_{i2} for maior que duas vezes o valor SPAT, ambas as medições são descartadas e a medição é repetida. Tal repetição poderá ser feita até 3 vezes.

Se após as 3 repetições a recomendação acima descrita não for atingida, o teste deve ser descontinuado e a falha deverá ser determinada e corrigida. Após a correção do problema, deverão ser refeitos todos os 3 ensaios^[28].

O erro máximo de comprimento é informado, porque tem uma interpretação física simples, um cálculo simples, e define um limite superior para o valor do erro de comprimento que se pode esperar de um BAM. Adicionalmente, este parâmetro estatístico é similar ao valor de desempenho empregado pela norma internacional de avaliação de desempenho de MMCs ISO 10360-2^[33] e permite alguma comparação com uma MMC especificada em tal norma.

A amplitude dos erros de comprimento é informada para comparação com a norma ASME B89.4.1b-2001^[34].

3 INSPEÇÃO SEM CONTATO DE FORMAS LIVRES DE MÉDIO E GRANDE PORTE

As tecnologias baseadas em princípios ópticos de medição se caracterizam pela ausência de contato entre o instrumento de medição e o mensurando⁷. Há diversos sistemas ópticos disponíveis comercialmente para medição de peças de médio e grande porte como as mostradas nas figuras 2 e 3. Dentre essas soluções destacam-se os sistemas topogramétricos, denominados de “digitalização óptica” e os sistemas que operam pela técnica de fotogrametria.

A técnica topogramétrica surgiu da fusão entre as técnicas topométrica e fotogramétrica. Na fotogrametria a relação geométrica é identificada através de imagens fotográficas enquanto na topogrametria a relação geométrica é identificada através de mapas de fase do objeto resultantes de medição topométrica^[35].

Os sistemas topogramétricos com que se teve contato no decorrer da fase experimental desta dissertação operam pela combinação de três técnicas ópticas básicas: luz codificada, projeção de franjas com deslocamento de fase e fotogrametria. A característica principal desses sistemas é sua capacidade de fornecer informação da superfície do objeto medido na forma de nuvens de pontos de até vários milhões de indivíduos. Assim, um alto nível de detalhamento pode ser obtido. No entanto, os sistemas topogramétricos conhecidos pelo autor são complexos e caros, de limitada aptidão para operar no ambiente agressivo de uma fundição. Por essa razão, embora tenham sido acompanhadas as medições de um parafuso de compressor de ar realizadas com um sistema topogramétrico ATOS da GOM Messtechnik^[36], decidiu-se não relatar os resultados neste

⁷ *Mensurando – Grandeza específica submetida à medição*^[31]

documento uma vez que este tipo de equipamento não pertence ao foco do presente trabalho. Para quem deseje maiores detalhes sobre o funcionamento e desempenho destes sistemas, recomenda-se consultar FANTIN^[35].

O presente capítulo é focado na fotogrametria e, particularmente, num sistema de medição comercial que aplica essa técnica para medição de peças de médio e grande porte em pontos pré-determinados da superfície. Na última seção do capítulo é realizada uma explanação sobre a parte 1 da norma VDI/VDE 2634^[37] que especifica as condições para realizar os testes de aceitação e verificação desses sistemas ópticos de medição.

3.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FOTOGRAMÉTRICOS

Uma das técnicas ópticas de medição ponto a ponto que crescentemente vem sendo difundida no meio industrial é a fotogrametria. Essa técnica pode ser definida como sendo a ciência, e arte, de determinar o tamanho e a forma de objetos através análise de duas ou mais imagens bidimensionais gravadas em uma película ou em meios eletrônicos. A ciência é importante, já que a fotogrametria aplica leis da matemática e da física, além do conhecimento técnico dos objetos a serem medidos. Contudo, a componente artística não deve ser negligenciada: a capacidade de obter boas imagens é chave para o sucesso^[38].

A fotografia é um processo de projeção do mundo tridimensional (3D) em imagens planas (2D). A câmera é o dispositivo que faz esta transformação ou mapeamento de posições 3D em espaços 2D como mostrado na Figura 16. Infelizmente, não é possível mapear completamente o mundo tridimensional a partir de uma imagem bidimensional, uma vez que sempre se perde algum tipo de informação como, por exemplo, a profundidade^[39].

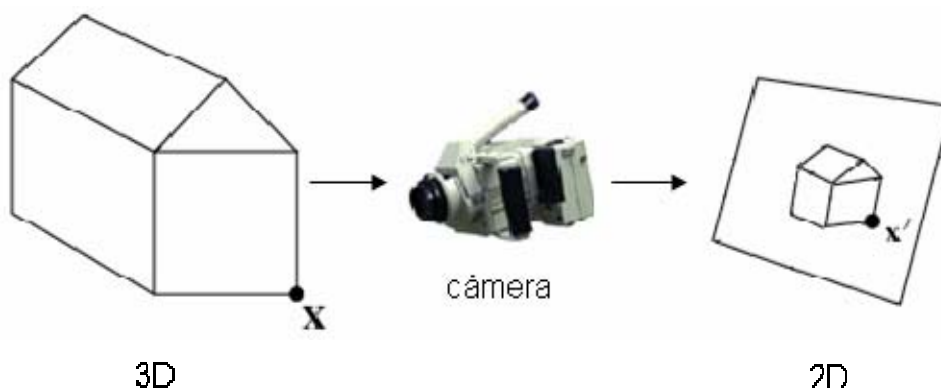


Figura 16 – Objeto 3D sendo fotografado gerando imagens 2D.

A fotogrametria inverte o processo fotográfico citado acima, ou seja, reconstrói a estrutura 3D a partir das imagens 2D, como apresentado na Figura 17. Entretanto, como informações foram perdidas, não se pode reconstruir o objeto 3D com apenas uma imagem 2D. Com um mínimo de duas imagens 2D diferentes (posições ou vistas diferentes) é possível a reconstrução 3D do objeto submetido à medição.

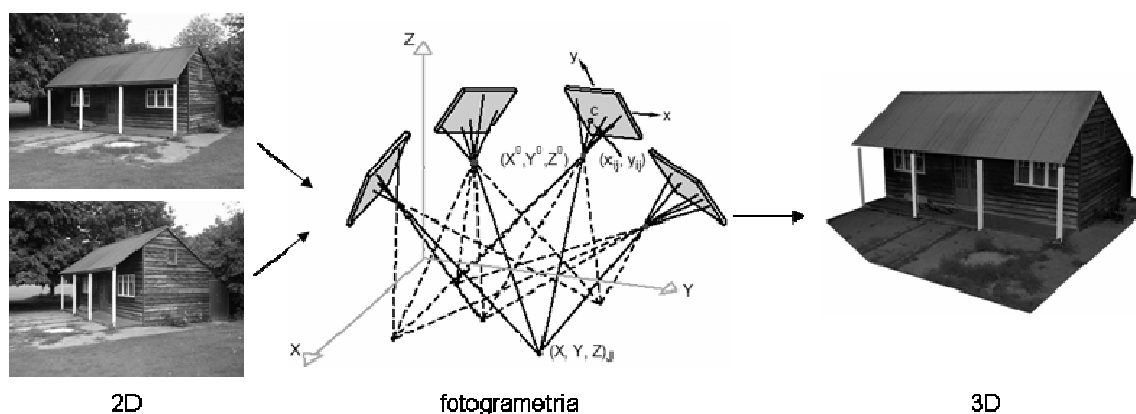


Figura 17 – Processamento das imagens 2D gerando uma reconstrução 3D.

Com mais de duas imagens 2D podem ser obtidas informações extras, melhorando a qualidade da reconstrução. As coordenadas 3D dos pontos de interesse são o resultado final da técnica fotogramétrica^[39].

A fotogrametria é tida como uma técnica passiva de triangulação, uma vez que não depende de fontes ativas tais como projetores de franjas ou lasers. A aplicação da técnica fotogramétrica parte do conhecimento dos pontos homólogos (imagens de um mesmo ponto captadas por câmeras diferentes), permitindo o

cálculo das coordenadas tridimensionais do objeto através do Princípio da Triangulação. Por esse princípio, os vértices de um triângulo, como mostrado na Figura 18, são definidos pelo ponto a ser medido (X – ponto com coordenadas 3D), e suas projeções de imagens (x_a e x_b) nos planos imagens de cada câmera (π_a e π_b).

Conhecendo-se os pontos homólogos e as várias disposições geométricas da câmera, é possível calcular a posição 3D de cada um dos pontos. A partir de um ponto em uma imagem pode-se calcular a reta que contém todos os pontos do espaço que podem gerar esta projeção. Idealmente, tendo-se duas imagens de um mesmo ponto, é possível determinar sua posição no espaço através da intersecção das retas geradas a partir de cada imagem, como mostrado na Figura 18. Os parâmetros C_a e C_b são os centros de projeção da câmera nas posições a e b, respectivamente.

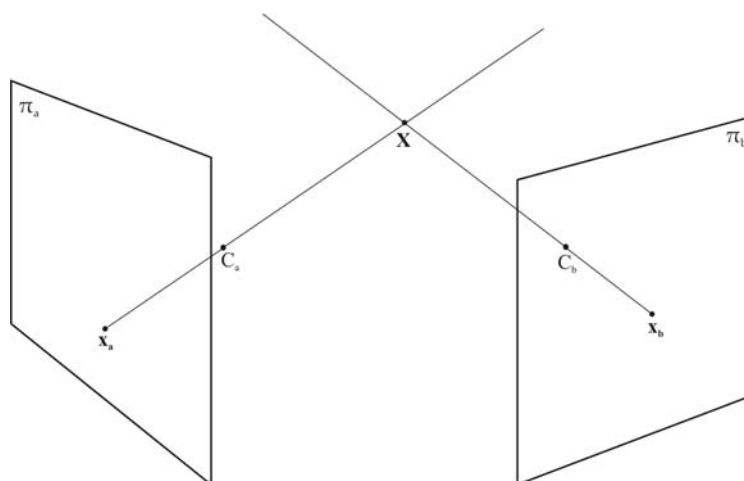


Figura 18 – Ponto a ser medido (X) e suas projeções de imagens (x_a e x_b) nos planos de cada câmera (π_a e π_b), como vértices de um triângulo.

A afirmação acima vai ao encontro do que diz o princípio fundamental da fotogrametria: “duas perspectivas do mesmo objeto guardam entre si certa relação geométrica”^[35]. Dessa forma, algoritmos especiais identificam as posições de pontos homólogos em cada imagem e usam as informações da posição e orientação da câmera para calcular as coordenadas 3D de um grande número de pontos sobre a peça submetida à medição^[40].

A Figura 19 mostra a aquisição de imagens obtidas de duas posições diferentes da câmera. À esquerda, a triangulação é formada por um único ponto e à direita, por múltiplos pontos.

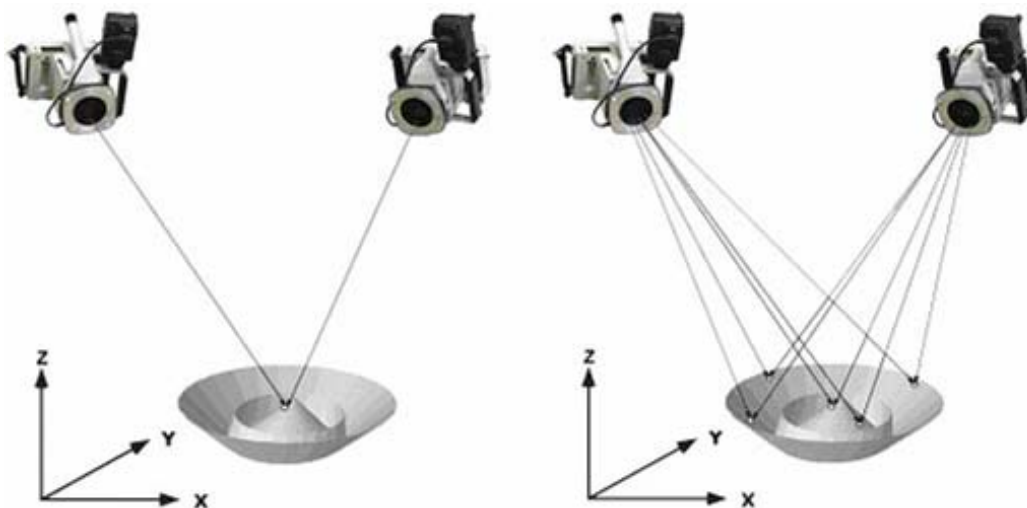


Figura 19 – Triangulação formada por um único ponto (à esquerda) e múltiplos pontos em comum (à direita), nas imagens obtidas com diferentes posições da câmera^[39].

A seguir são descritos os passos necessários para a medição de geometrias com essa técnica óptica:

- ✓ Aquisição das imagens: pode ser realizado tanto por uma única câmera que se localiza sucessivamente em diferentes pontos do espaço (vistas diferentes) como por duas ou mais câmeras.
- ✓ Processamento de imagens: o processamento deve identificar os pontos homólogos das imagens adquiridas. Posteriormente, algoritmos matemáticos calculam a posição 3D de cada ponto de interesse na superfície do objeto.
- ✓ Análise dos resultados: as coordenadas dos pontos podem ser usadas para comparar o objeto medido com seu tamanho e forma de projeto (por exemplo, por comparação com o modelo CAD) ou com uma nuvem de pontos adquirida previamente (por exemplo, na avaliação de desgaste de ferramenta)^[41].

Um problema relevante na medição por fotogrametria é a determinação do tamanho do objeto medido. A nuvem de pontos tridimensional, obtida como resultado do processamento das imagens 2D das câmeras, não poderá ser

comparada com a geometria alvejada para o objeto a menos que as coordenadas entre os pontos possam ser expressas em unidades de comprimento. Para que isso seja possível, a imagem deve incluir características de dimensões conhecidas, que permitam ajustar a escala da nuvem de pontos ao tamanho do objeto medido. Sistemas modernos utilizam padrões de comprimento de diversas formas (geralmente unidimensionais), equipados com marcas de referência que possam ser reconhecidas pelo sistema fotogramétrico. Esses padrões devem ser calibrados, atribuindo assim a necessária rastreabilidade às medições realizadas com o sistema.

Os sistemas fotogramétricos apresentam vantagens indiscutíveis para medições em campo e para tarefas de engenharia reversa. Podem ser transportados facilmente, não precisam de suportes pesados e, na maioria dos casos, permitem realizar a medição em posição confortável. Devido ao baixíssimo tempo requerido para registrar cada imagem, não são afetados pelas vibrações ambientais nem por deslocamentos relativos entre a peça e o sistema de medição. Além disso, os efeitos da temperatura sobre o instrumento podem ser considerados desprezíveis. Isso os torna fortes candidatos para medição de peças fundidas de médio e grande porte no ambiente fabril.

A seguir será feita uma descrição do sistema de medição fotogramétrico utilizado no presente trabalho, o TRITOP.

3.2 O SISTEMA TRITOP DA GOM MESSTECHNIK

O sistema TRITOP permite medir as coordenadas tridimensionais de pontos específicos definidos por alvos ou marcadores na superfície de uma peça. Com esse sistema podem ser medidos objetos de 0,1 m a 20 m de comprimento. Segundo a VDI/VDE 2634-2002^[37], o erro máximo admissível é de 0,02 mm/m.

O TRITOP é composto por (Figura 20):

- ✓ Uma câmera fotográfica digital de alta resolução.
- ✓ Um laptop com software para processamento dos dados obtidos.
- ✓ Dois ou mais padrões de comprimentos calibrados.

- ✓ Alvos codificados e não-codificados de diversos tipos.



Figura 20 – Sistema fotogramétrico TRITOP da GOM^[36].

A Figura 21 mostra uma pá de turbina Kaplan preparada para medição, com os alvos aderidos e os padrões de comprimento dispostos sobre a superfície que se deseja medir.

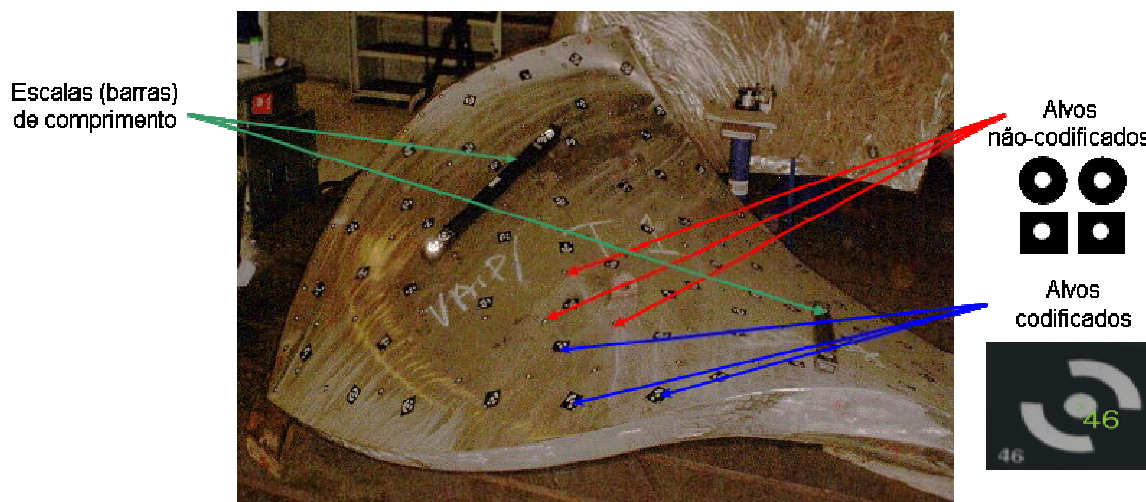


Figura 21 – Pá de uma turbina com os alvos (codificados e não-codificados) e escalas de comprimento utilizados pelo TRITOP^[36].

Existem dois tipos de alvos que são utilizados: alvos codificados e não-codificados. Ambos os tipos podem ser de papel auto-adesivo ou de material magnético, sendo estes últimos de maior espessura.

Os alvos codificados apresentam um desenho diferenciado, que é reconhecido pelo sistema, simplificando assim a identificação dos pontos homólogos. O sistema não determina as coordenadas tridimensionais dos pontos marcados com esses alvos, mas usa a informação de sua posição para compor a nuvem de pontos a partir da seqüência de fotografias.

Os alvos não-codificados apresentam formas simples e com eles se marcam os pontos de interesse. As coordenadas retornadas pelo sistema correspondem a um ponto no centro do alvo, situado sobre sua superfície. A espessura do alvo pode ser compensada por software, mas em peças rugosas o alvo fica geralmente sobre a superfície definida pelas cristas do perfil.

As barras ou padrões de comprimento possuem alvos codificados nas extremidades, para demarcar o comprimento calibrado. São colocadas próximas ou sobre a peça que se deseja medir, sem ser necessário que estejam numa disposição particular. O comprimento calibrado deve ser informado ao software, para que este possa atribuir uma escala adequada à nuvem de pontos.

O fluxo de trabalho do sistema óptico de medição TRITOP, apresentado na Figura 22, é dividido em quatro etapas^[36].

A captura das imagens começa com uma série de 4 tomadas sucessivas da mesma região da peça, na qual deve haver pelo menos 5 alvos codificados. Em cada uma das tomadas a câmera é girada em aproximadamente 90°. A partir das imagens obtidas, o sistema corrige possíveis distorções da lente e outros efeitos ópticos. Posteriormente são obtidas, a partir de diversas posições, tantas fotografias como sejam necessárias para abranger toda a região de interesse da peça medida.



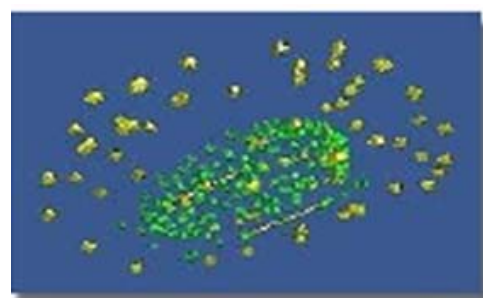
1ª etapa: colocação dos alvos



2ª etapa: captura das imagens



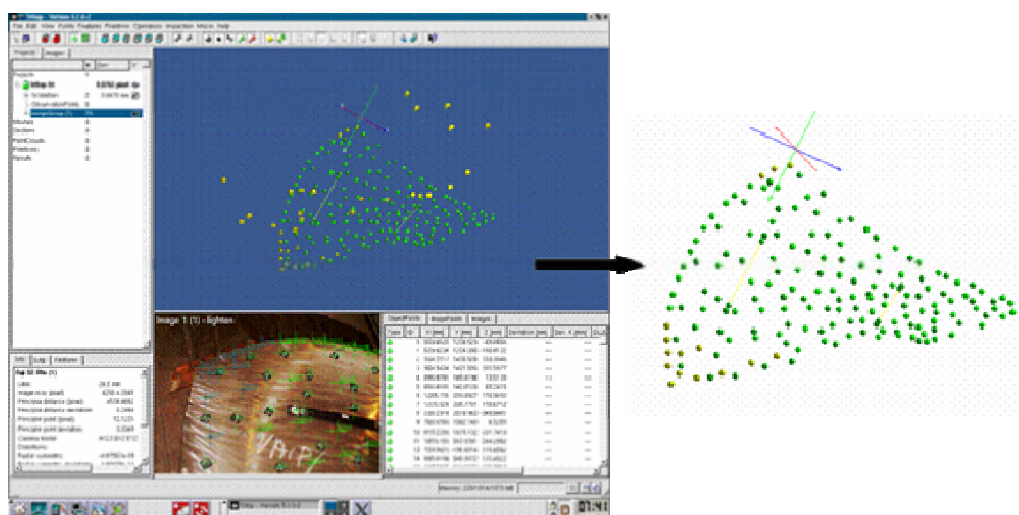
3ª etapa: processamento das imagens



4ª etapa: apresentação dos resultados

Figura 22 – Fluxo de trabalho do sistema fotogramétrico TRITOP^[36].

As imagens obtidas são salvas na memória e processadas para obter as posições das quais as imagens foram obtidas (posições das câmeras) e as posições dos alvos não-codificados, num sistema de referência comum. Após correções, o resultado da medição é uma nuvem de pontos formada pelas coordenadas, capturadas como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Nuvem de pontos dos alvos não-codificados capturadas pelo TRITOP^[36].

Após definido o sistema de referência da peça e transformadas as coordenadas, os novos pontos representando a superfície da peça podem ser comparados ao modelo CAD e exportados em formatos padrões típicos, como por exemplo, HTML, ASCII.

3.3 VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS SEGUNDO A NORMA VDI/VDE 2634-2002

As medições realizadas por fotogrametria estão afetadas por diversas fontes de erros, que contribuem na incerteza de medição. Na Figura 24 são apresentadas, de uma maneira geral, as principais causas de erros na medição com sistemas fotogramétricos. Algumas delas são próprias do princípio de medição, tais como a resolução do sistema que capta as imagens bidimensionais, a textura e cor do objeto a medir, a iluminação ambiente, o número e orientação das tomadas fotográficas. Outras fontes atuam também em medições geométricas realizadas por contato (por exemplo, temperatura da peça e definição do sistema de referência). Entretanto, é interessante destacar que o desempenho metrológico dos sistemas fotogramétricos não é completamente conhecido. Conseqüentemente, a avaliação da incerteza de medições realizadas com esses sistemas não é sólida o suficiente para garantir a rastreabilidade num sentido estrito.

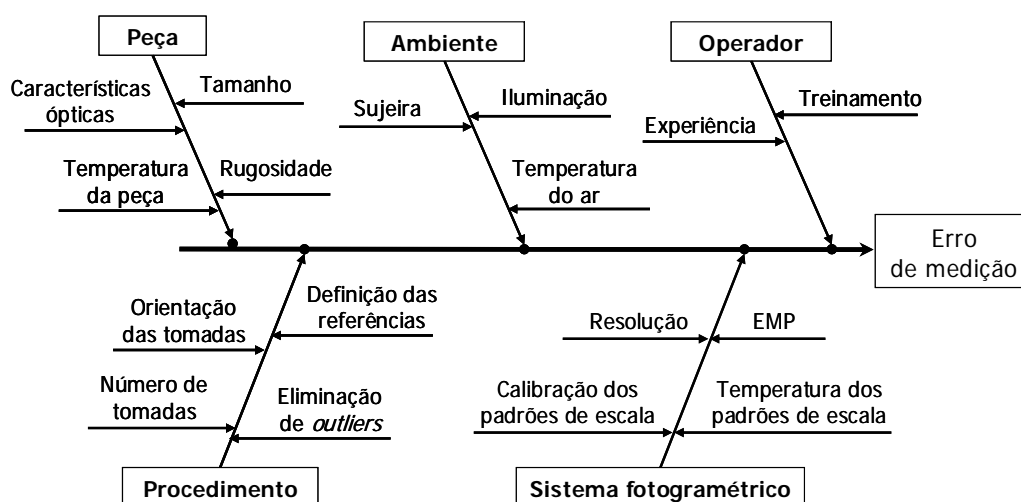


Figura 24 – Diagrama de causa e efeito das principais fontes de erros de um sistema fotogramétrico.

A norma alemã VDI/VDE 2634^[37] estabelece métodos/procedimentos para avaliar o desempenho metrológico de sistemas de medição ópticos. Ela é dividida em duas partes:

- ✓ A parte 1 está relacionada aos sistemas de visão com amostragem ponto a ponto e descreve métodos de aceitação e verificação para avaliação de incertezas de sistemas ópticos de medição 3D. A definição do parâmetro de qualidade denominado erro máximo admissível para a medição de comprimento é similar ao apresentado na ISO 10360-2^[33]. Testes separados de erros de 'apalpação' não são requeridos uma vez que esse efeito já está considerado na determinação do erro de medição de comprimento. Essa parte será comentada.
- ✓ A parte 2 é dedicada aos sistemas de digitalização óptica de superfícies e não será tratada aqui por estar fora do escopo do presente trabalho.

Nos testes de aceitação e verificação de sistemas ópticos de medição 3D, são utilizados, como já mencionado, artefatos calibrados. Tais artefatos são projetados de modo que suas propriedades não tenham nenhum efeito significativo no valor do parâmetro de qualidade a ser determinado. Um teste é feito para verificar se os erros de medição se encontram dentro dos limites especificados pelo fabricante ou pelo usuário.

Para ambos os testes (aceitação e verificação) o erro máximo admissível para a medição de comprimento é o parâmetro de qualidade a ser determinado. Esse parâmetro é descrito em termos de um limite dependente do comprimento. A seguir serão fornecidos maiores detalhes sobre os testes de aceitação e verificação propostos pela norma.

3.3.1 Teste de aceitação

O teste de aceitação serve para verificar o atendimento à especificação do equipamento óptico, como um acordo contratual entre o fabricante e o usuário. Neste teste, o sistema óptico de medição 3D deve ser instalado e operado de acordo com as condições de operação particulares para as finalidades da aceitação. Tempos de aquecimento (estabilização do equipamento) têm que ser levados em consideração e as condições ambientais devem corresponder às

condições de operação do sistema óptico. Também deve ser assegurado que a montagem e o dispositivo de fixação dos artefatos sejam adequados^[37].

Um relatório será gerado baseado na conclusão do teste de aceitação, resumindo os resultados desse teste. Recomenda-se gravar todos os valores medidos nesse relatório da aceitação.

O parâmetro de qualidade é determinado usando um artefato unidimensional que deve ter as características apropriadas para ser apalpadas ou sondadas (sensor óptico). Os exemplos de artefatos apropriados são blocos padrão com marcações circulares e padrões escalonados.

As dimensões do artefato devem ser conhecidas com uma incerteza menor do que 1/5 (um quinto) do erro máximo admissível especificado pelo fabricante para o sistema óptico de medição 3D a ser testado. Um certificado de calibração do artefato é requerido e deve ser usado para verificar a rastreabilidade do artefato usado aos padrões nacionais.

O parâmetro de qualidade, ou seja, o erro de medição de comprimento, deve obedecer ao especificado pelo fabricante sem levar em consideração o arranjo dos artefatos dentro do volume de medição.

Um volume de medição de $(2000 \times 2000 \times 1500) \text{ mm}^3$ (comprimento x largura x altura) é recomendado para o teste de aceitação. O artefato será colocado ao longo de linhas de medição e um teste com pelo menos cinco comprimentos (Figura 25) será realizado em cada uma dessas linhas de medição^[37].

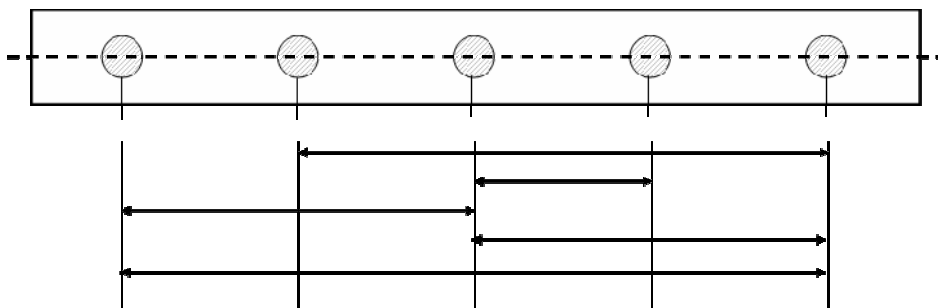


Figura 25 – Cinco comprimentos a serem avaliados no teste de aceitação^[37].

A Figura 26 mostra um possível arranjo das linhas de medição no volume de medição do sistema óptico. O comprimento da barra deve ser similar à menor aresta do volume de trabalho, mas superior a 2/3 do comprimento da diagonal^[37].

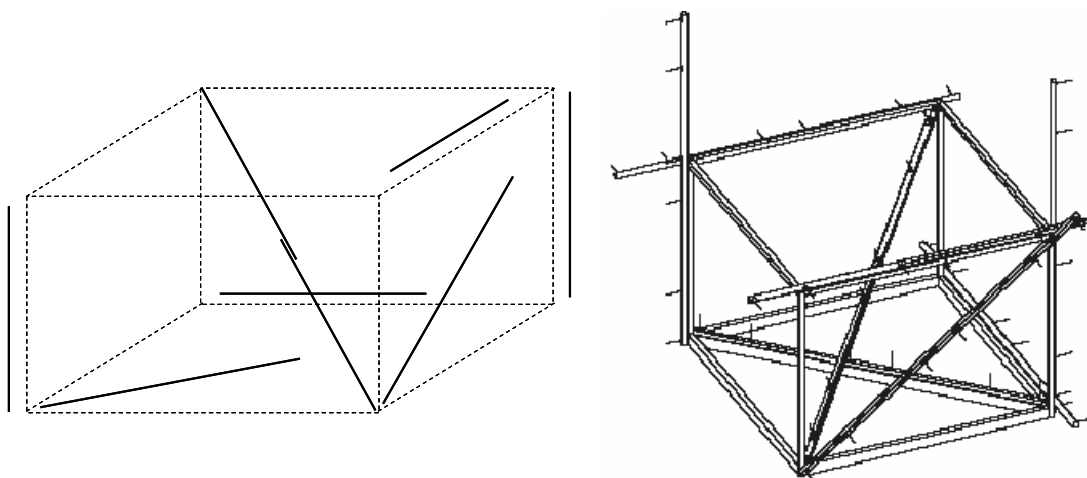


Figura 26 – Arranjo possível para as linhas de medição no teste de aceitação^{[37],[42]}.

As linhas de medição podem ser gravadas uma depois da outra em jogos separados de imagens. O arranjo do sensor e as definições da escala do fabricante devem ser mantidos durante todas as medições e os modos e condições de operação devem ser semelhantes.

Como resultado do teste, é calculado o erro de medição pela diferença entre o valor medido e o valor calibrado da distância correspondente. Essa diferença é dada pela Equação 6^[37].

$$\Delta l = l_m - l_c \quad \text{Equação 6}$$

Onde l_m o comprimento medido, l_c o comprimento calibrado e Δl a diferença entre tais comprimentos.

O valor limite do erro máximo admissível (E), ou seja, o parâmetro de qualidade para o erro na medição de comprimento, é dado pela Equação 7.

$$E = A + K.L \leq B \quad \text{Equação 7}$$

Onde A, K e B são constantes e L é o comprimento a ser medido. A Figura 27 mostra a distribuição desse erro para os distintos comprimentos medidos.

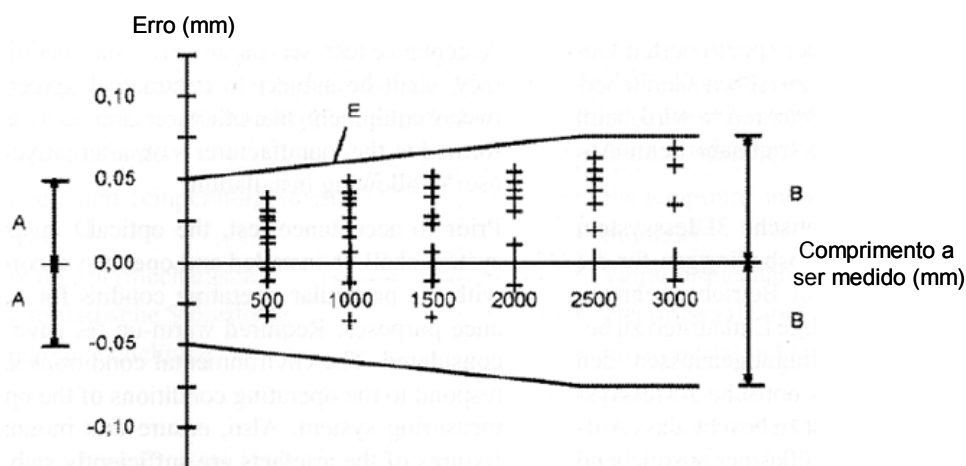


Figura 27 – Diagrama do erro na medição de comprimento^[37].

3.3.2 Teste de verificação

A verificação de sistema ópticos de medição 3D serve para assegurar a concordância a longo prazo dos limites do erro de medição de comprimento com o especificado pelo usuário. Através da comparação dos resultados de sucessivas medições de verificação é possível analisar tendências com respeito às variações nas características do instrumento. Isto permite concluir o que está acontecendo, resgatando tanto o plano de manutenção preventiva do sistema óptico de medição 3D quanto o intervalo de verificação. Condições e modo de operação precisam ser os mais semelhantes possíveis para análise de tendências^[37].

Antes da verificação, o sistema de medição deve ser colocado em operação como descrito em seu manual de instruções. Como no teste de aceitação, o tempo de aquecimento do equipamento e as condições ambientais também devem ser considerados. Cabe salientar que para ambos os testes, a norma recomenda que, se houver desvios significantes da temperatura média do artefato ou do sistema de medição em relação à temperatura de referência, deve ser aplicada a correção apropriada.

O procedimento recomendado para a verificação de sistemas ópticos é análogo ao apresentado anteriormente. Entretanto o parâmetro de qualidade, erro de medição de comprimento, deve ser especificado pelo usuário para satisfazer sua necessidade. O usuário pode reduzir tanto o número de linhas de medição como o número das seções do teste.

As distâncias entre as características medidas são calculadas e comparadas às distâncias calibradas. As amplitudes das diferenças entre as distâncias medidas e calibradas não devem exceder o parâmetro de qualidade especificado pelo usuário. No caso de erros adicionais ocorrerem para não mais de uma linha de medição, as medições de todos os comprimentos do teste desta linha de medição particular podem ser repetidas uma vez. Se o parâmetro de qualidade for excedido, o sistema de medição deverá ser 'marcado' como utilizável para somente um tamanho limitado e a ação corretiva apropriada deverá ser realizada^[37].

O intervalo de verificação deve ser especificado individualmente pelo usuário do sistema óptico de medição 3D. Tal intervalo é determinado pelos componentes do sistema, pela incerteza de medição requerida e pelas condições ambientais que variam no local onde o instrumento é usado.

A verificação deve ser executada de acordo com uma programação especificada, dependendo da estabilidade dos componentes dos instrumentos e incluir inspeções visuais (para verificar danos). Por fim, semelhante ao teste de aceitação, será gerado um relatório baseado na conclusão do teste de verificação resumindo os resultados do mesmo. Também é recomendado gravar todos os valores medidos no relatório de verificação^[37].

4 ANÁLISE METROLÓGICA DE BRAÇOS ARTICULADOS DE MEDIÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas duas aplicações relacionadas a braços articulados de medição:

- ✓ A primeira refere-se à aplicação da norma ASME B89.4.22-2004, especificamente o teste de desempenho volumétrico, segundo descrito na seção 2.4.3.
- ✓ A segunda, por sua vez, foi realizada visando atender um requisito metrológico da ISO/TS 16949^[3] utilizando a metodologia proposta pelo MSA^[43], através de três estudos de repetitividade e reprodutibilidade (R&R), utilizando um BAM da Electro Aço Altona. Tais estudos permitem avaliar o BAM em condições reais de aplicação, revelando a influência de fatores que não estão considerados no teste de desempenho volumétrico.

4.1 ANÁLISE DE UM BAM USANDO A NORMA B89.4.22-2004

Foi realizada nas dependências da Fundação CERTI uma aplicação da norma ASME B89.4.22-2004, utilizando um BAM FARO-Platinum de 2,4 m de comprimento (diâmetro da esfera). O experimento contou com o apoio da empresa FARO Technologies Inc., que emprestou o BAM e disponibilizou um operador qualificado para realizar as medições.

Esse BAM possui seis *encoders* numa configuração 2-2-2. O fabricante informa as seguintes especificações, avaliadas conforme o método 2σ ^[24]:

- ✓ Repetitividade (teste da esfera) = $\pm 0,020$ mm

- ✓ Repetitividade (teste do cone) = $\pm 0,025$ mm
- ✓ Desempenho (barra de esferas) = $\pm 0,036$ mm

No teste foi utilizada uma única barras de esferas com comprimento aproximado de 1m, em substituição às duas barras de esferas recomendadas na norma:

- ✓ Barra curta com comprimento entre 600 e 900 mm
- ✓ Barra longa com comprimento entre 1,440 e 1,800 m

A barra de esferas é de invar, material que tem um coeficiente de expansão térmica de $1,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

4.1.1 Calibração da barra de esferas

A calibração da barra de esferas foi realizada utilizando a máquina de medição por coordenadas Mitutoyo Beyond-A916 da Fundação CERTI, por comparação com um bloco padrão de comprimento nominal de 1 m.

A barra de esferas foi fixada sobre apoios prismáticos Alufix (WITTE), posicionados a 0,234 m das extremidades. O bloco padrão foi posicionado ao lado e fixado no mesmo dispositivo (Figura 28).

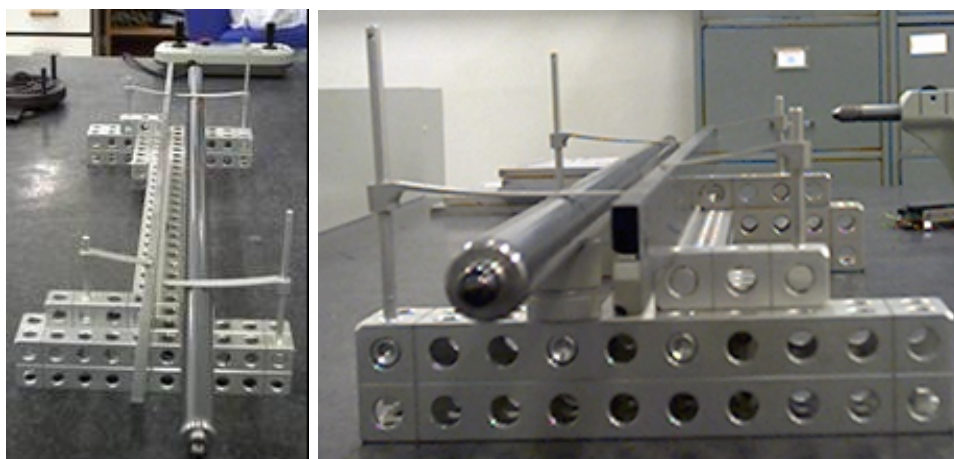


Figura 28 – Fixação da barra de esferas e do bloco padrão com dispositivo construído com sistema Alufix (WITTE).

A incerteza da MMC para a medição desse comprimento é $\pm 2,5 \mu\text{m}$. O valor do comprimento do bloco padrão apresenta uma incerteza de $\pm 0,8 \mu\text{m}$. A

configuração e os parâmetros do sistema de apalpação utilizado foram: uma esfera de apalpação de 5 mm, uma haste de apalpação de 30 mm, apalpador Renishaw TP-200 com cabeçote indexado PH-10M. A força de medição foi 0,2 N.

O alinhamento foi realizado segundo Figura 29. Primeiro, apalparam-se os 5 pontos na face de medição do bloco padrão, definindo o plano XZ, depois 2 pontos definindo uma reta no plano YZ e finalmente 1 ponto na face superior do mesmo. Após a definição do sistema coordenado, um ponto foi tomado no centro de cada extremidade do bloco padrão para definir o comprimento medido e calcular a correção.

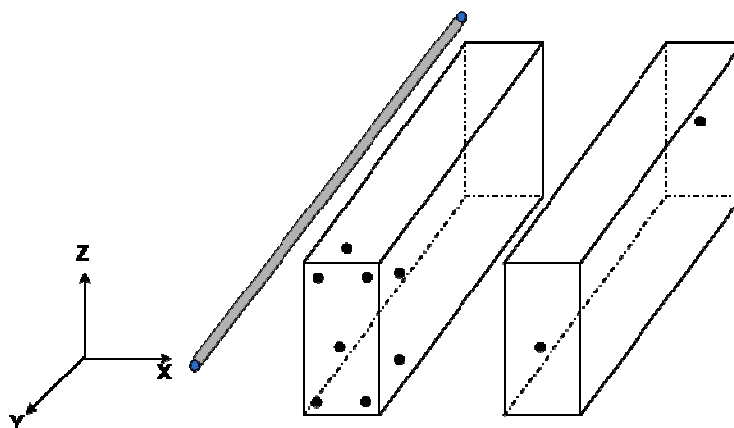


Figura 29 – Calibração da barra de esferas através do método da substituição (comparação) com um bloco padrão.

As esferas da barra foram apalpadas em 9 pontos: 8 no equador e 1 no pólo. Após aplicar a correção calculada acima ao comprimento medido entre esferas, obteve-se o comprimento calibrado da barra de esferas ($1054,093 \pm 0,005$) mm.

4.1.2 Teste de desempenho volumétrico segundo ASTM B89.4.22-2004

A barra de esferas foi montada num suporte construído com elementos de fixação Alufix (WITTE)^[44]. O suporte foi projetado para fixar a barra em todas as posições requeridas pela norma, ilustradas na Figura 15. Previu-se que o suporte fosse rígido o suficiente para minimizar os deslocamentos das esferas da barra, tanto os de corpo rígido como os de origem elástica, durante a apalpação com o

braço de medição. A Figura 30 mostra o suporte com a barra posicionada nas quatro posições básicas.

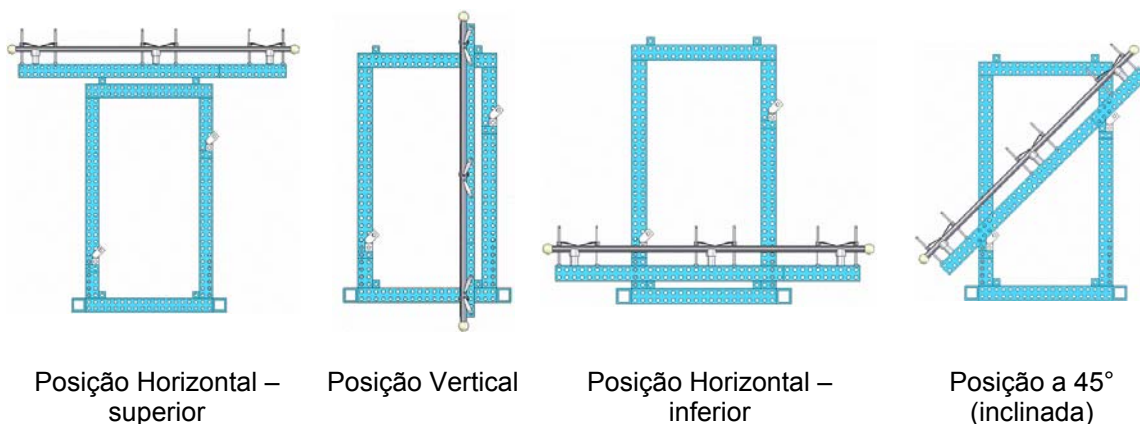


Figura 30 – Suporte da barra de esferas nas quatro disposições básicas.

O experimento foi realizado numa sala normal, sem climatização técnica. Durante o mesmo, a temperatura se manteve estável em torno de 22,5°C. Considerando que o software do BAM realiza automaticamente a compensação por temperatura e que a barra apresenta uma dilatação desprezível por ser de invar, pode-se afirmar que o desvio com respeito à temperatura de referência não afeta os resultados de forma relevante. Também não houve controle de vibração, como recomendado, mas o ambiente era estável o suficiente como para não comprometer os resultados.

Foram medidas as distâncias centro a centro das esferas da barra de esferas e os valores encontrados foram comparados com o valor calibrado, como recomendado pela ASME B89.4.22-2004. Através dessa comparação, foram determinados os desvios, processando-os numa planilha de cálculo específica.

O gráfico, como mostrado na Figura 31, apresenta os desvios encontrados para cada uma das vinte posições da barra de esferas no volume de medição. O gráfico gerado:

- ✓ Tem limites definidos pelo valor de RMS (0,059 mm), somado e subtraído do valor zero.
- ✓ O maior desvio encontrado entre o valor medido e o valor calibrado foi de 0,096 mm (valor absoluto) e corresponde à posição 3.
- ✓ A amplitude entre os desvios é da ordem de 0,170 mm.

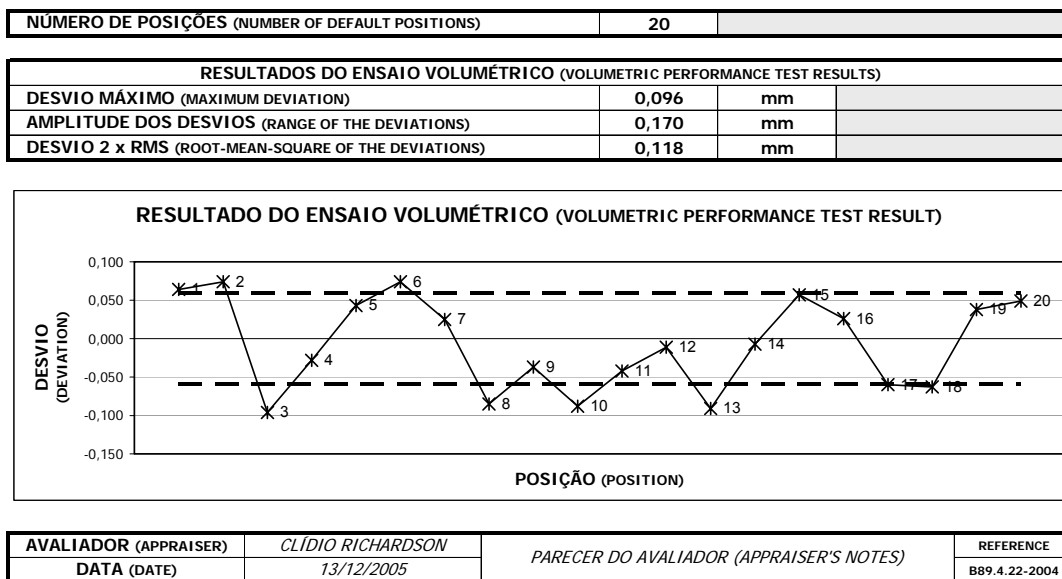


Figura 31 – Representação dos desvios encontrados na aplicação da ASME B89.4.22-2004 utilizando um BAM FARO-Platinum.

A análise dos pontos que apresentam maior erro positivo mostrou que:

- ✓ Os pontos 1 e 2 apresentaram desvios próximos. Isso se deve provavelmente a que as posições da barra são ambas horizontais, próximas e radiais e necessitam de uma expressiva movimentação tanto do ombro como do cotovelo do BAM.
- ✓ Os pontos 6 e 15 correspondem a posições que diferem apenas na inclinação (vertical e 45° respectivamente). Para atingir as esferas, o BAM deve movimentar os *encoders* de maneira análoga, destacando-se a articulação do ombro.
- ✓ Os pontos 5, 6, 19 e 20 correspondem a posições verticais da barra. Para medir essas posições, o BAM deve movimentar principalmente o ombro.

Para os pontos com desvios negativos observou-se que:

- ✓ Os pontos 8 e 10 apresentaram desvios próximos, porque as posições correspondentes são análogas (45°, próximas e tangenciais). Ambas as posições envolvem a movimentação do ombro e do *encoder* localizado próximo à base do BAM.

- ✓ Os pontos 3 e 13 correspondem a posições que diferem apenas na inclinação (horizontal e 45° respectivamente). Para atingir as esferas, o BAM deve movimentar o ombro e o *encoder* próximo à base.

Embora a análise anterior seja baseada em suposições, evidencia a existência de possíveis associações entre os erros detectados e a disposição das articulações do BAM. Assim, será possível usar o teste como ferramenta de diagnóstico, auxiliando na identificação das causas de erros expressivos.

A norma ASME B89.4.22-2004 recomenda que para se obter uma medição adequada da distância entre centros de esferas é necessário fixar a barra de esferas de forma rígida. Uma das maneiras de observar se houve ou não alguma deflexão significativa durante a medição é através do monitoramento dos diâmetros das esferas medidas. Esse diâmetro pode informar sobre a deflexão transversal ao eixo da barra, mas não diz respeito ao deslocamento axial.

Com os valores dos diâmetros das esferas medidas um gráfico de controle foi gerado (Figura 32). Esse é denominado de gráfico de indivíduos (medidas individuais) e, na presente aplicação, teve como limites o valor de três vezes o desvio padrão das medições ($3s$)^[45].

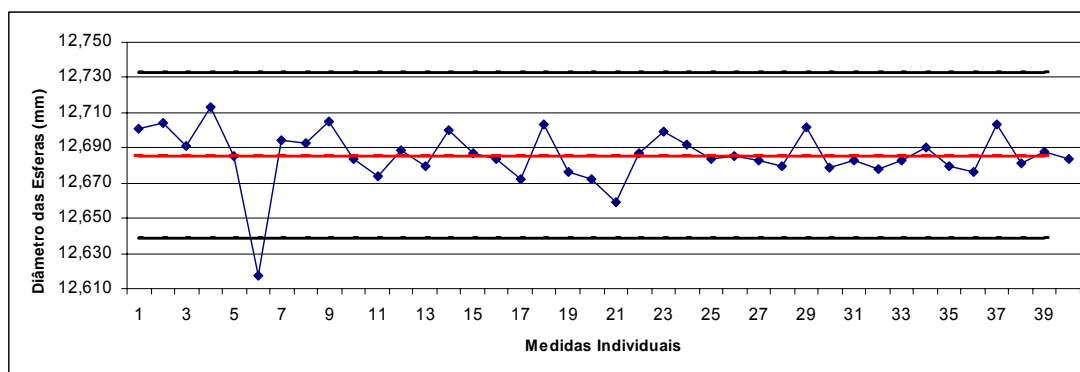


Figura 32 – Gráfico de controle (medidas individuais) dos diâmetros das esferas medidas.

Os parâmetros estatísticos calculados foram:

- ✓ Média das medições (X_{bar}) = 12,686 mm
- ✓ Desvio padrão das medições (s) = 0,016 mm
- ✓ Limite superior de controle (LSC) = $X_{\text{bar}} + 3.s = 12,732$ mm
- ✓ Limite inferior de controle (LIC) = $X_{\text{bar}} - 3.s = 12,639$ mm

O ponto fora de controle (ponto 6) diz respeito a uma das esferas, da barra de esferas, pertencente à posição 18 (horizontal, tangencial e próxima do centro do volume de medição). O valor encontrado para diâmetro foi de 12,617 mm, significativamente menor que o valor médio. Trata-se então de uma variação por causa especial.

Removeu-se o ponto fora de controle acima mencionado, obtendo-se os seguintes parâmetros estatísticos:

- ✓ Média das medições (X_{bar}) = 12,687 mm
- ✓ Desvio padrão das medições (s) = 0,011 mm
- ✓ Limite superior de controle (LSC) = $X_{\text{bar}} + 3.s = 12,721$ mm
- ✓ Limite inferior de controle (LIC) = $X_{\text{bar}} - 3.s = 12,654$ mm

A Figura 33 apresenta o gráfico com os novos limites calculados após a exclusão do ponto fora de controle.

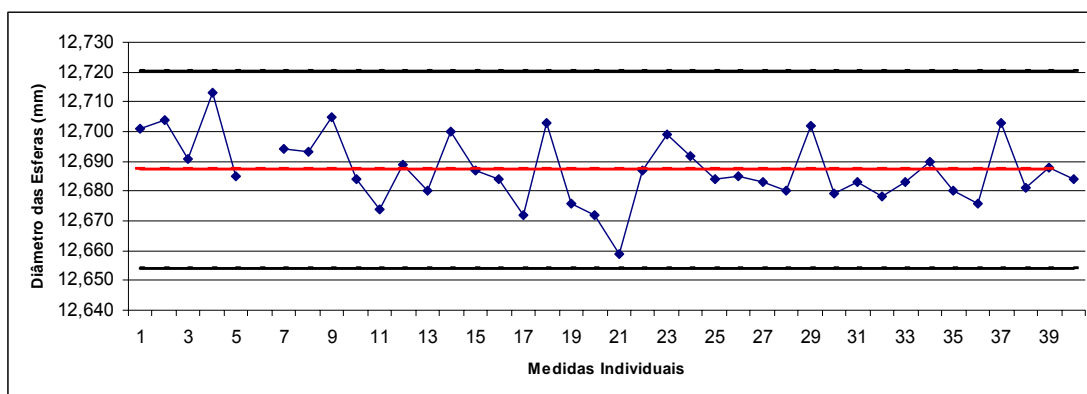


Figura 33 – Gráfico de controle do diâmetro das esferas medidas após a exclusão do ponto fora de controle.

O novo gráfico mostra que os diâmetros das esferas estão sob controle estatístico. Assim, pode-se calcular o erro médio de estimação do diâmetro das esferas, como sendo o diâmetro médio menos o valor calibrado (12,700 mm). É possível afirmar então que o erro na determinação do diâmetro da esfera está entre $-46 \mu\text{m}$ e $+21 \mu\text{m}$, sendo $-13 \mu\text{m}$ o erro médio.

As conseqüências desta análise são:

- ✓ A medição do comprimento da barra na posição 18, embora não mostre desvios excessivos (Figura 31), deveria ser realizada novamente. Isso

não foi possível devido a que o processamento de dados foi realizado após a retirada do BAM.

- ✓ Pode-se observar que o erro médio de medição de comprimentos ($-8 \mu\text{m}$) é da mesma ordem que o erro médio de estimação de diâmetro. Assim, fica difícil saber se o último se deve aos erros de medição do BAM ou é produzido, total ou parcialmente, pela elasticidade do suporte e da barra. Portanto, seria necessário redesenhar o suporte para maior rigidez ou tomar maiores cuidados na apalpação das esferas.

4.1.3 Considerações finais da aplicação da ASME B89.4.22-2004

Terminada a aplicação, pôde-se observar que a metodologia proposta pela ASME é fácil de ser executada e depois de montado todo o aparato para a aplicação da norma, como por exemplo, definição dos octantes numa esfera imaginária ou marcações no piso (conforme a Figura 34), o experimento (desempenho volumétrico) leva em média 1 h para ser realizado.

Para ser garantida uma aplicação eficaz da norma é necessário garantir que o BAM e a barra estejam rigidamente fixados a uma base comum. Isso foi levado em conta na presente aplicação, mas os resultados mostraram que a rigidez do suporte e da fixação do braço deveria ser melhorada. O ideal seria dispor de uma instalação permanente para esse tipo de verificação.



Figura 34 – Definição dos octantes e marcações no piso para a aplicação da ASME B89.4.22-2004. À esquerda uma ilustração com um BAM Romer e à direita com um BAM FARO.

Outro elemento de destaque é a importância de realizar o processamento de dados imediatamente após a aquisição dos mesmos. Isso permitiria identificar os pontos atípicos imediatamente, produzindo as necessárias repetições sem causar atrasos e retrabalhos onerosos.

4.2 ANÁLISE DE MEDIÇÕES REALIZADAS COM BAM USANDO O ESTUDO DE R&R

A norma ISO/TS 16949 traz, no item 7.6, a recomendação de que estudos estatísticos devem ser realizados para analisar a variação existente nos resultados de cada tipo de sistema de medição e equipamento de teste^[46].

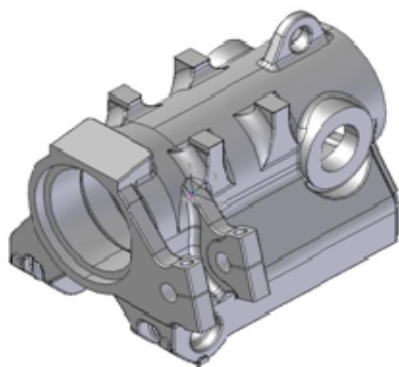
Seguindo a recomendação acima, realizou-se na empresa Electro Aço Altona S.A. três estudos de R&R das medições utilizando braço articulado de medição modelo FARO-Titanium. Tais estudos tiveram como objetivos avaliar a capacidade do BAM em medir características usinadas sob condições reais de utilização.

Como citado anteriormente, os estudos foram realizados conforme as recomendações do manual de análise dos sistemas de medição MSA (*Measurement System Analysis*)^[43]. Foram usadas cinco peças, que foram medidas por dois operadores, duas vezes cada.

Os estudos permitem:

- ✓ Estimar o desvio padrão do erro de repetitividade ou variação devida ao sistema de medição em operação normal.
- ✓ Estimar a contribuição dos operadores do sistema de medição para a variação total do processo de medição ou erro de reprodutibilidade.
- ✓ Verificar a importância das tendências e inconsistências entre as medições feitas por diferentes operadores.

Para a realização dos estudos foram selecionadas cinco unidades da peça suporte de compensação (*Support Equalizer*), ilustrada na Figura 35 juntamente com os parâmetros de interesse.



- ✓ C-1 = $(685,0 \pm 0,5)$ mm
- ✓ C-2 = $(244,0 \pm 0,5)$ mm
- ✓ C-3 = $\emptyset (316,00 \pm 0,25)$ mm

Figura 35 – Peça (*Support Equalizer*) submetida ao estudo de R&R com o BAM FARO-Titanium com as cotas de interesse (C-1, C-2 e C-3).

Cabe salientar que as cotas de interesse (C-1, C-2 e C-3) foram definidas conforme o Plano de Qualidade da empresa.

O braço articulado de medição FARO-Titanium é semelhante ao anteriormente utilizado (FARO-Platinum) e também possui seis *encoders* numa configuração 2-2-2, sendo que a diferença está na faixa de medição e nos valores de erros especificados. O fabricante informa as seguintes especificações (método 2σ) para o modelo utilizado (faixa de medição de 3,0 m)^[24]:

- ✓ Repetitividade (teste da esfera) = $\pm 0,076$ mm
- ✓ Repetitividade (teste do cone) = $\pm 0,086$ mm
- ✓ Desempenho (teste da barra de esferas) = $\pm 0,122$ mm

Foram selecionados dois operadores que usualmente realizam as medições com o sistema de medição a ser analisado (FARO-Titanium). Para evitar a influência dos desvios de forma da peça, marcaram-se os pontos nos quais os operadores deveriam fazer contato com as superfícies envolvidas na medição. Ambos os operadores usaram a mesma estratégia de medição.

Em virtude da peça escolhida para o presente estudo ser de porte médio (aproximadamente 800 kg) e, ainda, devido à indisponibilidade de se ter todas as peças simultaneamente no local para a realização de tal estudo, as medições foram realizadas na seqüência a seguir:

- ✓ Foi obtida do operador 1 a medida da primeira peça e registradas as leituras no formulário para coleta de dados. A mesma tarefa foi realizada pelo operador 2.
- ✓ Em seguida, obteve-se do operador 1 a repetição das leituras da primeira peça e, mais uma vez, essas medições foram registradas no formulário para coleta de dados. O mesmo procedimento foi realizado pelo operador 2.
- ✓ Repetiu-se o ciclo das duas medições descritas acima para as outras quatro peças.

A avaliação dos dados baseia-se no método da média e da amplitude, compreendendo uma análise numérica e uma gráfica. A primeira é baseada em índices calculados com relação à tolerância da característica sob análise, enquanto a segunda usa gráficos de controle de médias e amplitudes que permitem avaliar a tendência entre os operadores e a consistência das medições respectivamente^[43].

Os resultados obtidos serão apresentados e comentados a seguir na análise de cada parâmetro ou cota.

4.2.1 Parâmetro ou cota C-1

Conforme mostrado na Figura 36, a amplitude obtida pelo operador 2 na peça 2, quando analisada em conjunto com o valor da média correspondente, evidência a existência de um erro grosseiro numa das duas repetições. Se esse valor espúrio fosse substituído por um valor possível, o qual não pôde ser feito por razões de operação da planta, uma redução da amplitude média seria possível, reduzindo conseqüentemente a distância entre os limites de controle. Essa correção também aumentaria o valor da média do operador 2 na peça 2, consolidando a percepção de que há uma tendência entre os operadores

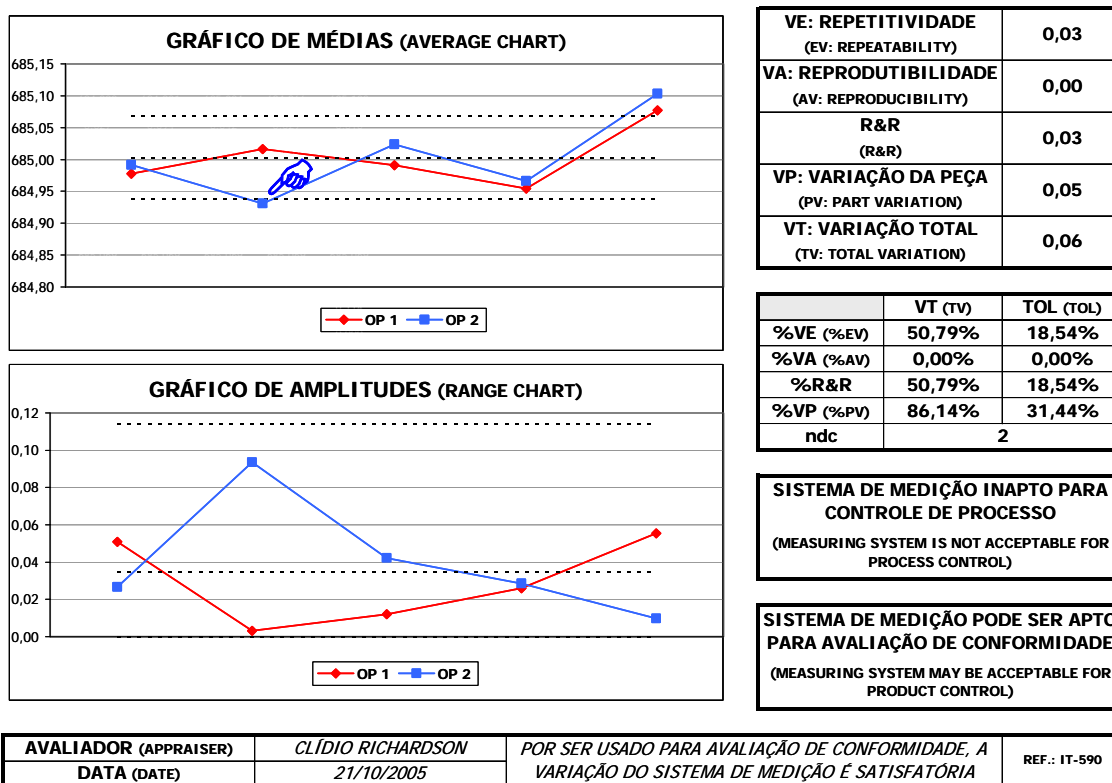
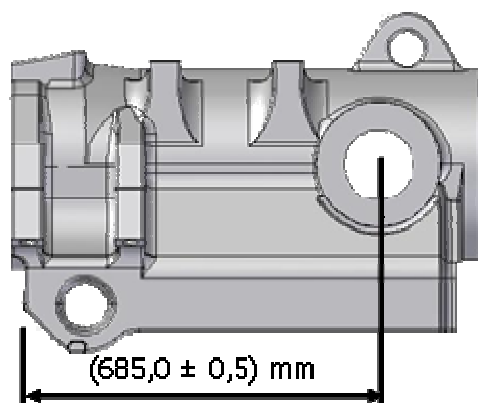


Figura 36 – Definição da cota C-1 e gráficos de controle (média e amplitude).

O valor de R&R em relação à tolerância do parâmetro analisado (1 mm) foi de 18,54%, indicando processo de medição marginalmente capaz.

4.2.2 Parâmetro ou cota C-2

O gráfico de médias da Figura 37 mostra claramente uma tendência entre as medições feitas pelos distintos operadores de aproximadamente 0,07 mm. Em função dessa tendência a componente de reprodutibilidade (VA = 0,05) domina o

valor de R&R em relação à tolerância (1 mm), que foi de 33,82%. Isso evidencia um processo de medição com excessiva variação para a avaliação de conformidade.

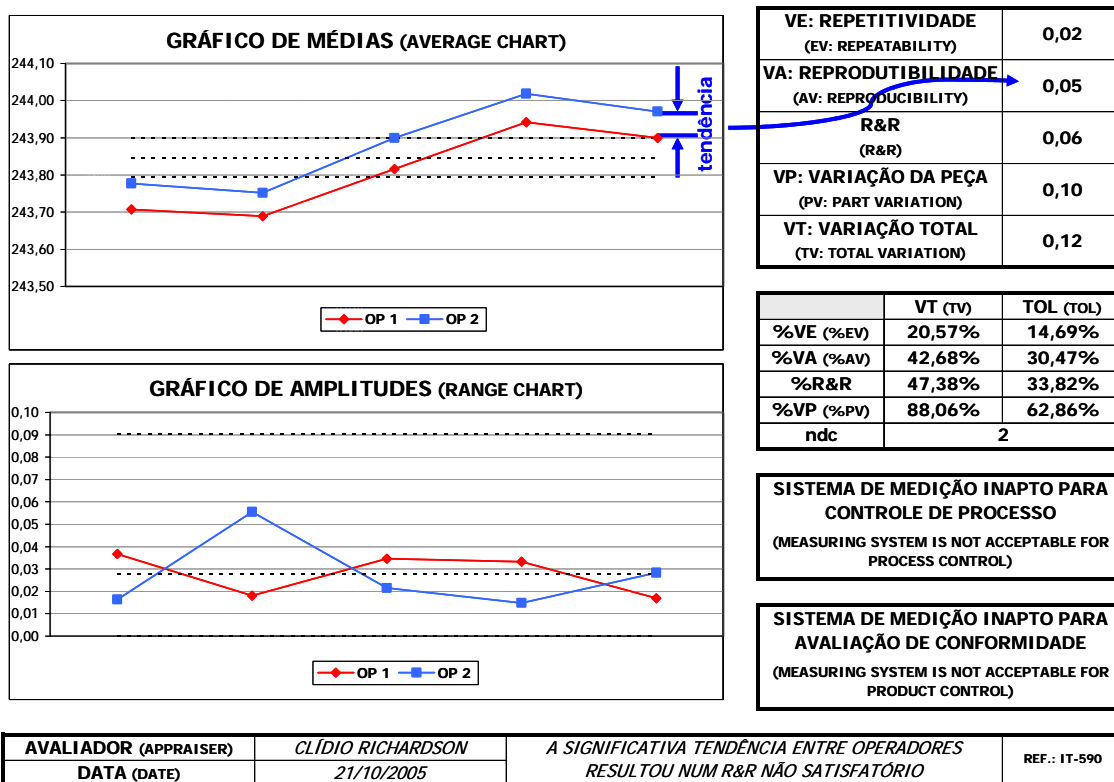
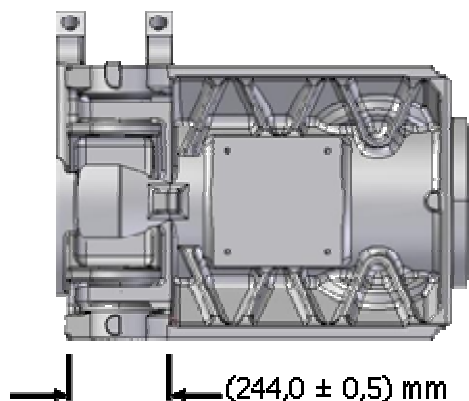


Figura 37 – Definição da cota C-2 e gráficos de controle (média e amplitude).

4.2.3 Parâmetro ou cota C-3

No gráfico de amplitudes da Figura 38 pode-se observar a presença de um ponto próximo do limite superior de controle, indicando um possível valor atípico.

No gráfico das médias pode-se constatar uma tendência de aproximadamente 0,03 mm entre as medições feitas pelos operadores. Por ser essa tendência menor que no caso anterior, a componente dominante no valor do R&R é a repetitividade (VE = 0,03). A razão do índice R&R pela tolerância evidencia um processo de medição com baixa capacidade para a tarefa de medição em análise (R&R = 45,48%).

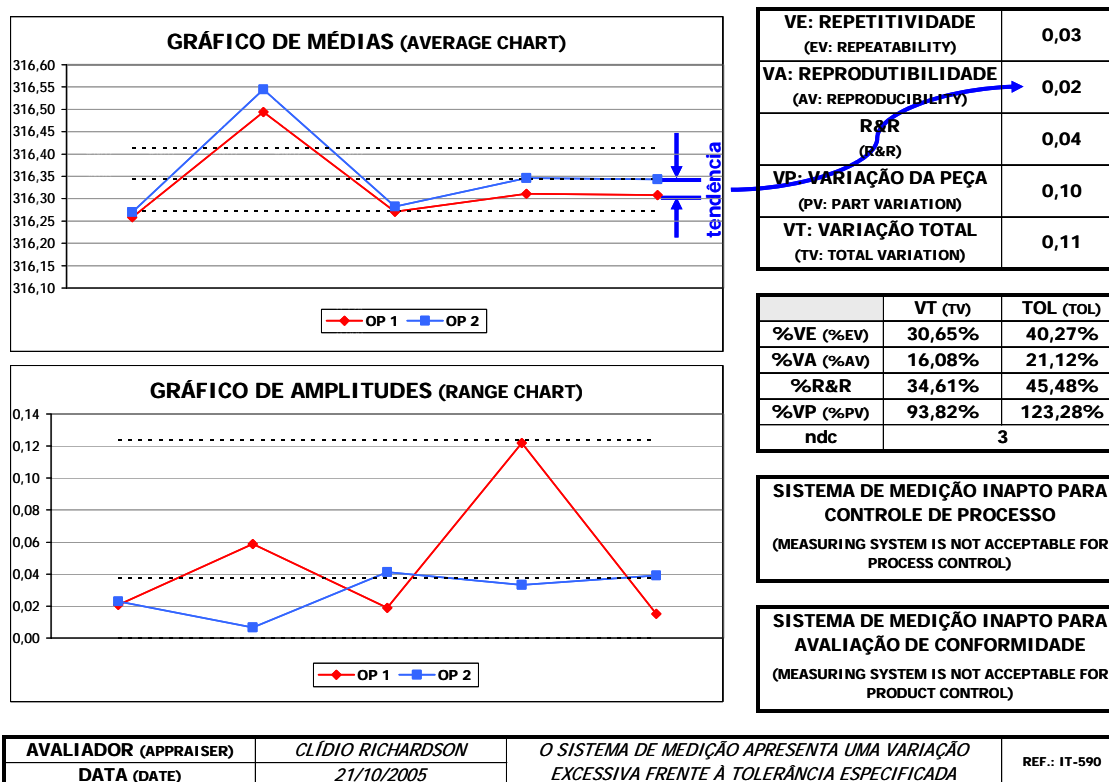
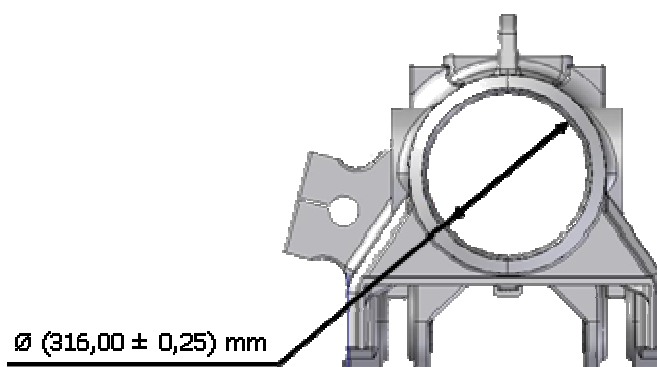


Figura 38 – Definição da cota C-3 e gráficos de controle (média e amplitude).

4.2.4 Considerações e recomendações sobre o estudo de R&R

Para os três parâmetros avaliados (C-1, C-2 e C-3) as peças usadas durante o estudo não representavam a faixa esperada de variação do processo assim, as percentagens baseadas na variação total (VT) não devem ser consideradas. O mesmo vale para o número de categorias distintas (ndc).

A análise conjunta dos três estudos permite revelar que:

- ✓ Ambos os operadores produziram valores atípicos. Se isso acontece num estudo, acontece certamente no dia-a-dia das medições para controle de produto.
- ✓ Para todas as cotas, as médias do operador 1 são sempre menores que as médias do operador 2, demonstrando que a tendência entre eles não depende de quais sejam os elementos de referência usados para definir a cota.
- ✓ Eliminando os valores atípicos, os desvios padrão de repetitividade das três cotas estariam entre 0,025 mm e 0,030 mm, embora nenhuma cota supere os 700 mm. Esses valores são bastante semelhantes com o erro máximo de medição de comprimento informado pelo fabricante do braço.

Mesmo tendo sido medidas apenas características simples como: comprimento, diâmetro e posição, a variação total atribuída ao processo de medição (incluindo a variação devida aos operadores) supera as especificações dadas pelo fabricante, relativas ao comportamento do instrumento em testes específicos.

Assim, pode-se concluir que o BAM ensaiado não deveria ser utilizado para a inspeção de características usinadas com tolerância inferior a 1 mm. O campo de aplicação deveria estar limitado a características brutas ou usinadas com tolerâncias mais abertas.

A partir da experiência, cabe expressar as recomendações a seguir:

- ✓ Fazer uma análise de compatibilidade das estratégias de medição adotadas com as especificações contidas nos desenhos. Por exemplo, nas características de posição, adotar um número maior de pontos na

definição do centro do furo, para tornar mais estável a posição desse centro e reduzir a incerteza.

- ✓ As condições severas de uso do BAM indicam a necessidade de verificações mais freqüentes, as quais poderiam ser realizadas pela própria empresa usando uma barra de esferas e um suporte adequado, conforme a norma ASME B89.4.22-2004 ou procedimento simplificado.
- ✓ Em função da tendência significativa entre operadores, sugere-se que seja dada uma especial atenção à capacitação dos operadores e padronização dos procedimentos.

5 ANÁLISE DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO BASEADO NA FOTOGRAMETRIA

Neste capítulo serão apresentados dois estudos de caso, cujo objetivo foi analisar o desempenho metrológico e operacional de um sistema de medição fotogramétrico, com relação às necessidades de medição de peças de hidrogeração produzidas na Altona.

O primeiro estudo de caso diz respeito a uma comparação da medição em uma peça fundida (superfície bruta ou não usinada) utilizando um braço articulado de medição e um sistema óptico de medição. O segundo estudo, por sua vez, envolveu uma peça fundida e usinada. Nele usou-se uma máquina de medição por coordenadas para obter as medições de referência e o mesmo sistema óptico de medição do estudo anterior.

Antes da apresentação dos estudos, será descrito como são realizadas as medições na Altona, especificamente no segmento de hidrogeração.

5.1 AS MEDIÇÕES DE PEÇAS SOB ENCOMENDA NA ELECTRO AÇO ALTONA

Atualmente a avaliação de conformidade de peças fundidas para hidrogeração e outras peças de grande porte para indústria de mineração e de dragagem é realizada utilizando um braço articulado de medição.

Dependendo do resultado dessas medições, pode-se tomar a decisão de executar um retrabalho, por exemplo esmerilhar, preencher com solda, ou liberar a peça para usinagem ou envio ao cliente. Também se podem usar os resultados

das medições para garantir o correto posicionamento das peças nas máquinas-ferramentas.

Para que essas tomadas de decisão sejam possíveis, as coordenadas dos pontos devem ser comparadas com os valores nominais da peça. Isso é normalmente realizado de forma computacional, contra o modelo nominal. Pode-se afirmar que o maior desafio é conseguir uma adequada orientação espacial dos pontos medidos com relação ao modelo CAD. Caso essa orientação relativa não seja bem realizada, podem-se induzir aparentes erros de medição, que não tem sua origem em desvios reais da superfície da peça. Por sua vez, esses desvios aparentes podem gerar decisões erradas sobre retrabalho e sucateamento de peças de alto custo.

A seguir será descrito como é realizada, na Altona, a medição de uma peça do segmento de hidrogeração, especificamente de uma pá Francis. A Figura 39 mostra a peça e define a nomenclatura específica.

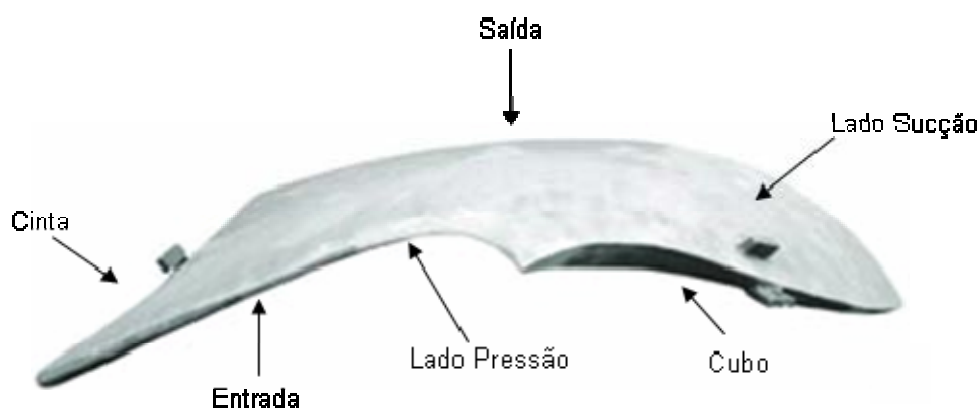


Figura 39 – Pá Francis e nomenclatura específica^[14].

Antes de ser iniciada a medição propriamente dita, selecionam-se alguns pontos sobre uma superfície de interesse para que estes sejam utilizados como referência (pontos na cor azul, mostrados na Figura 40). Tais pontos estão localizados, normalmente, nas bordas da saída, do cubo e da cinta. No lado da entrada não é feita nenhuma referência, uma vez que é sobre esse lado que vai o canal de alimentação (processo de fundição) e sempre há excesso de material.

No que diz respeito à inspeção dos pontos, é montada uma seqüência que deve ser obedecida onde, por exemplo, cada lado da peça tenha uma numeração

própria. A Figura 40 (a) mostra os pontos numerados na cor vermelha e os de cor azul representam os pontos de referência citados anteriormente. Em seguida, é feita a marcação de uma malha de pontos sobre as superfícies de pressão e sucção da peça, como representado na Figura 40 (b). Essas marcações podem ser numeradas de acordo com as especificações do cliente ou segundo critérios próprios da Altona.

Entre os pontos da malha encontram-se seis pontos de referência, usados para garantir um posicionamento eficaz da peça numa máquina-ferramenta. Tais pontos são combinados entre a empresa e o cliente e, nesse exemplo, são situados no lado pressão e estão em destaque na Figura 40 (b).

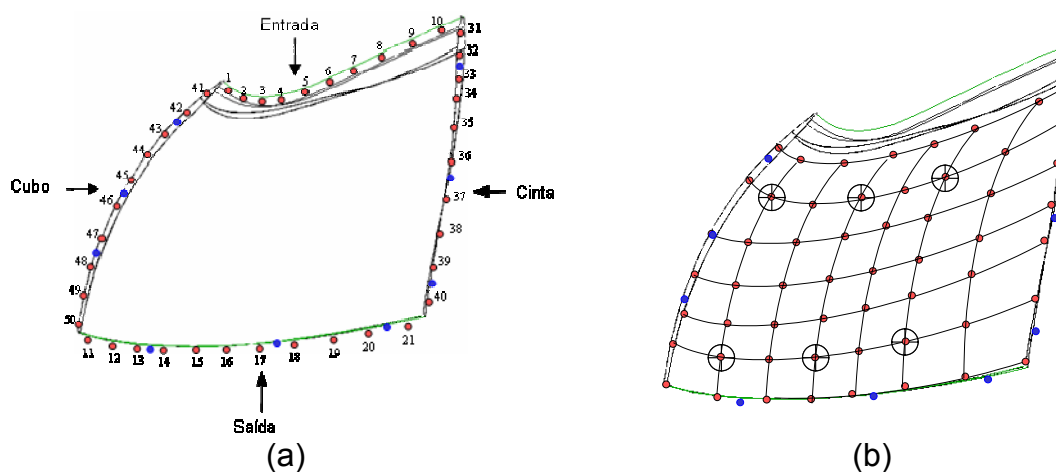


Figura 40 – Pá Francis com (a) – a seqüência de pontos a serem medidos e (b) – malha de pontos e pontos de referência para posicionar a peça numa máquina ferramenta.

Terminada a definição dos pontos de referência, inicia-se a medição. Ela é realizada por partes da seguinte maneira: primeiramente mede-se um lado da peça (por exemplo, o lado pressão), posteriormente mede-se o outro lado (por exemplo, o lado sucção). Os pontos de cor azul, situados nas bordas, servirão de referência para quando for realizada a medição do outro lado da peça.

Com o braço articulado de medição, apalpações são feitas nos pontos que formam a malha (pontos de cor vermelha na Figura 40 – b). Após cada apalpação, é realizado o registro desse ponto sendo possível acompanhar, passo a passo, a captura de cada ponto selecionado.

Pode ser o caso de ter que realizar duas medições completas em cada lado da peça avaliada:

- ✓ Na 1ª medição é avaliada como se encontra a quantidade de material na superfície analisada, ou seja, é observado se na peça há excesso ou falta de material. Dependendo da quantidade encontrada, faz-se uma recuperação dessa superfície através de esmerilhamento (caso haja excesso de material) e/ou soldagem (caso haja falta de material).
- ✓ Na 2ª medição é verificada se a recuperação, citada acima, está em conformidade com a especificação do cliente. Quando as especificações são atendidas, faz-se o relatório de medição e a peça é encaminhada para o depósito, para um posterior envio ao cliente.

No relatório de medição constam as seguintes informações:

- ✓ O ponto medido e a quantidade de sobremetal (medição da peça bruta ou não usinada) para cada ponto comparado com o modelo em CAD (especificação do cliente).
- ✓ A tolerância, máxima e mínima, para cada ponto ou lado medido, por exemplo, para uma pá Francis (pressão, sucção, cinta, cubo, entrada e saída).
- ✓ A informação sobre esmerilhar ou soldar a peça e o quanto é preciso soldar ou esmerilhar em cada região.

A Figura 41 mostra o efeito que o alinhamento incorreto pode ter sobre os resultados da medição.

À esquerda, na Figura 41 (a), observa-se um alinhamento incorreto, para o qual não foram usados todos os pontos medidos. Pode-se observar que predomina uma rotação de corpo rígido da nuvem de pontos com referência ao modelo sólido. Quando a nuvem de pontos e o modelo estão corretamente alinhados, Figura 41 (b), os desvios entre ambos são minimizados e desaparecem os padrões sistemáticos.

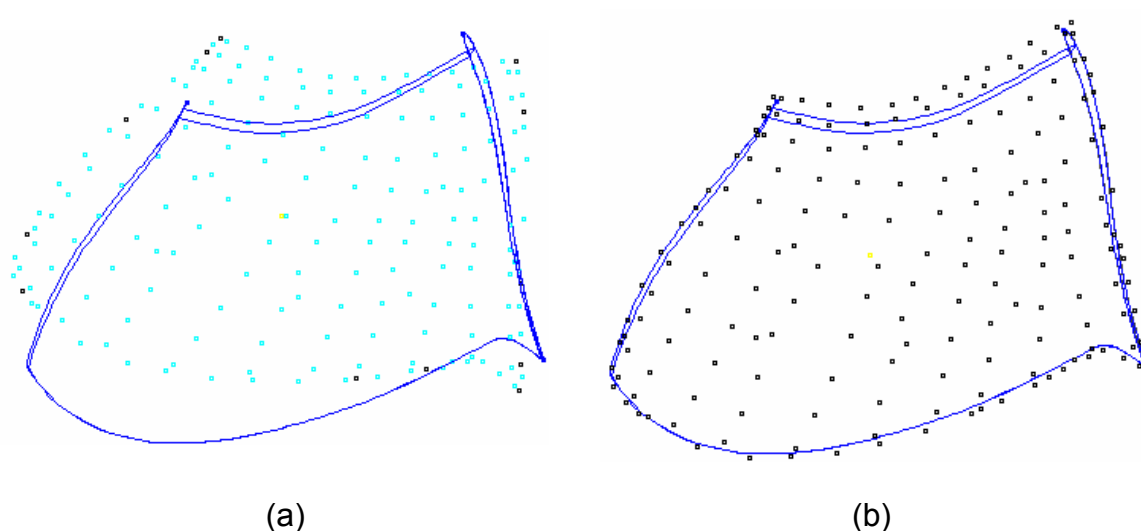


Figura 41 – Pá Francis com a: (a) malha de pontos (cor verde) alinhada de uma maneira incorreta ao modelo em CAD (cor azul) e (b) malha de pontos alinhada corretamente.

5.2 COMPARAÇÃO ENTRE BAM E O SISTEMA TRITOP

Como citado, este estudo é uma comparação da medição de uma peça fundida (não usinada) do segmento de hidrogeração, especificamente de uma pá Kaplan, utilizando dois dispositivos de medição: um braço articulado de medição e um sistema de medição óptico TRITOP. A Figura 42 apresenta uma pá Kaplan semelhante a que foi submetida ao estudo bem como as respectivas partes que a compõem.



Figura 42 – Pá Kaplan e nomenclatura específica^[14].

A peça utilizada no estudo apresentava superfície bruta de fundição, com exceção do munhão, que é usinado. Vários alvos de medição foram colocados nas superfícies de interesse da peça (perfil hidráulico, borda e munhão) como mostrado na Figura 43. Foram usados alvos codificados magnéticos e alvos não-codificados auto-adesivos.

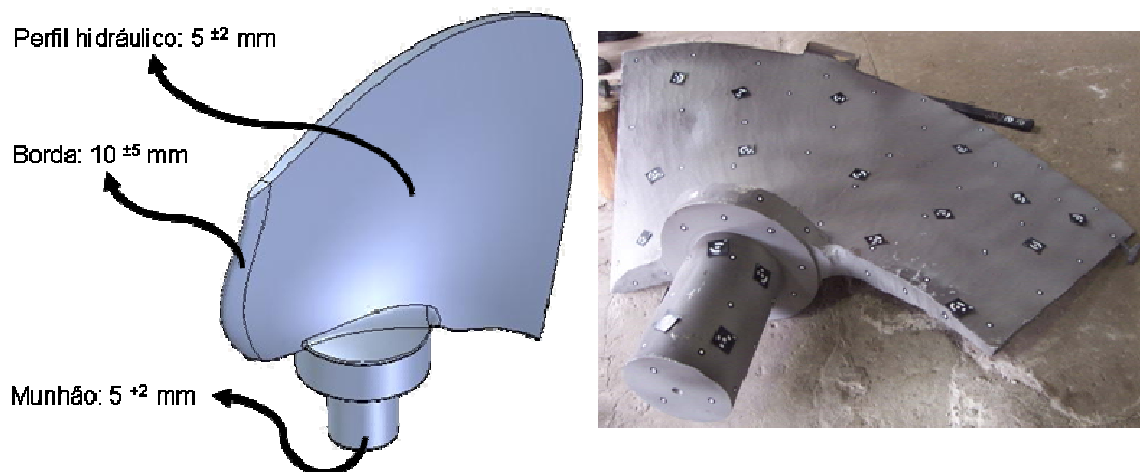


Figura 43 – Pá Kaplan em CAD e com os alvos de referência sobre sua superfície de interesse.

A medição foi realizada através dos seguintes passos:

- a. Colocaram-se os alvos codificados e não-codificados no munhão, nas bordas e em uma das superfícies da pá Kaplan.
- b. Mediu-se a peça de um lado com o sistema óptico TRITOP, usando o procedimento já descrito.
- c. Em seguida, o mesmo lado foi medido com o BAM, apalpando no centro dos alvos não-codificados.
- d. Virou-se a peça com ajuda de uma empilhadeira, repetindo as atividades (a), (b) e (c) para o lado da peça que ficou exposto.
- e. Após as medições, as coordenadas dos pontos medidos por ambos os sistemas foram exportadas e tratadas separadamente no software SmartFit 3D^[47] para o ajuste dos pontos ao modelo CAD da peça.

A análise preliminar dos dados brutos mostrou que ambos os sistemas haviam gerado valores atípicos. No caso do TRITOP, uma parte desses valores era devida a manchas de tinta no piso da oficina em que foi realizada a medição,

que o sistema identificou como sendo alvos. Após aplicar técnicas simples de remoção de pontos espúrios, restaram para efetuar a comparação 118 pontos medidos por cada sistema.

O ajuste dos pontos contra o modelo foi feito através de um algoritmo de mínimos quadrados, sem levar em consideração as tolerâncias indicadas para a peça. Cada medição foi tratada de forma independente, resultando em um conjunto de valores dos desvios medidos pelo sistema correspondente em cada alvo não-codificado. O desvio da peça é estimado pelo módulo de um vetor normal à superfície do modelo CAD que passa pelo ponto 3D medido. O desvio é positivo se o ponto está “fora” do modelo (material em excesso) e negativo se está “dentro” (falta material).

Para comparar ambos os conjuntos de resultados foi criada uma variável, calculada como sendo o valor medido pelo BAM subtraído do respectivo valor do mesmo ponto medido com o sistema TRITOP. O gráfico de controle de valores individuais da Figura 44 mostra o comportamento dessas diferenças.

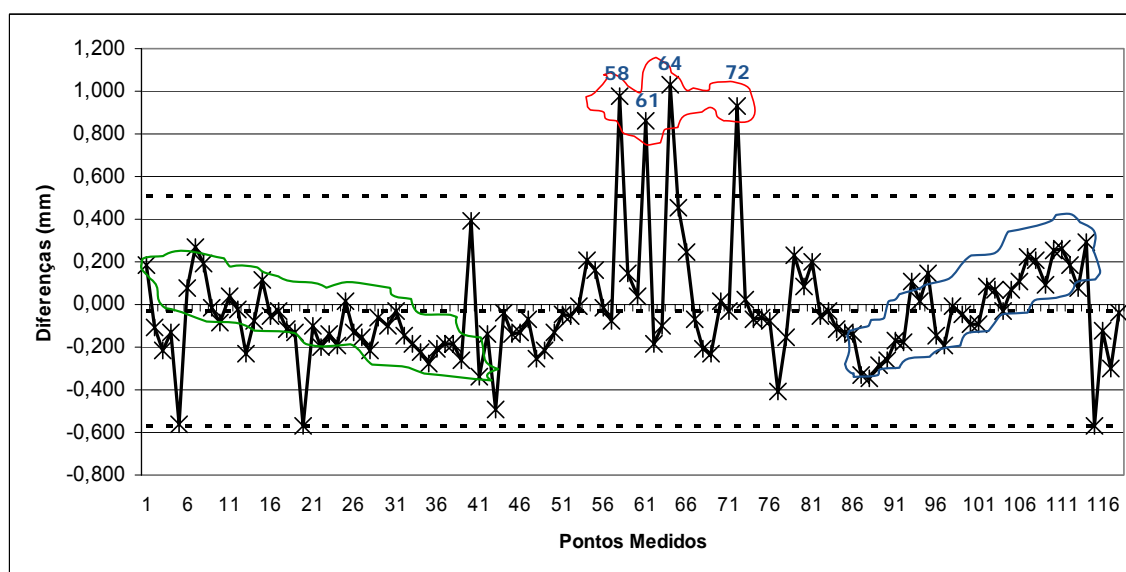


Figura 44 – Gráfico de controle das diferenças entre os sistemas FARO-Titanium e TRITOP.

Foram encontrados os seguintes parâmetros estatísticos:

- ✓ Diferença média = -0,031 mm
- ✓ Desvio padrão das diferenças = 0,262 mm

A concordância média entre as medições dos sistemas FARO e TRITOP é bastante satisfatória, com um desvio médio relativo desprezível frente à tolerância da peça. Porém, há pontos nos quais as diferenças apresentam valores relativamente altos. No gráfico de controle fica evidente a presença de quatro pontos com desvios altos (pontos 58, 61, 64 e 72 na Figura 45), localizados no munhão, aparentemente na região de superposição das imagens da parte superior e inferior da peça.

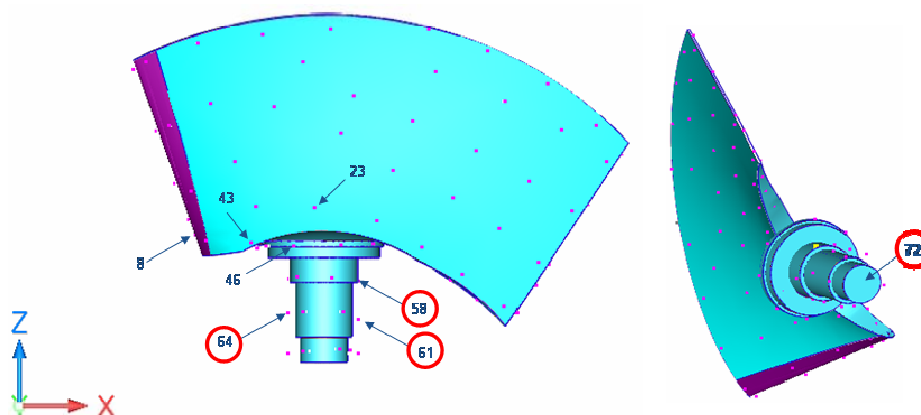


Figura 45 – Alguns pontos com desvios atípicos localizados no munhão da pá Kaplan.

Foi feita a exclusão dos quatro pontos atípicos encontrados na análise anterior e a otimização por mínimos quadrados. Obteve-se então, o gráfico apresentado na Figura 46.

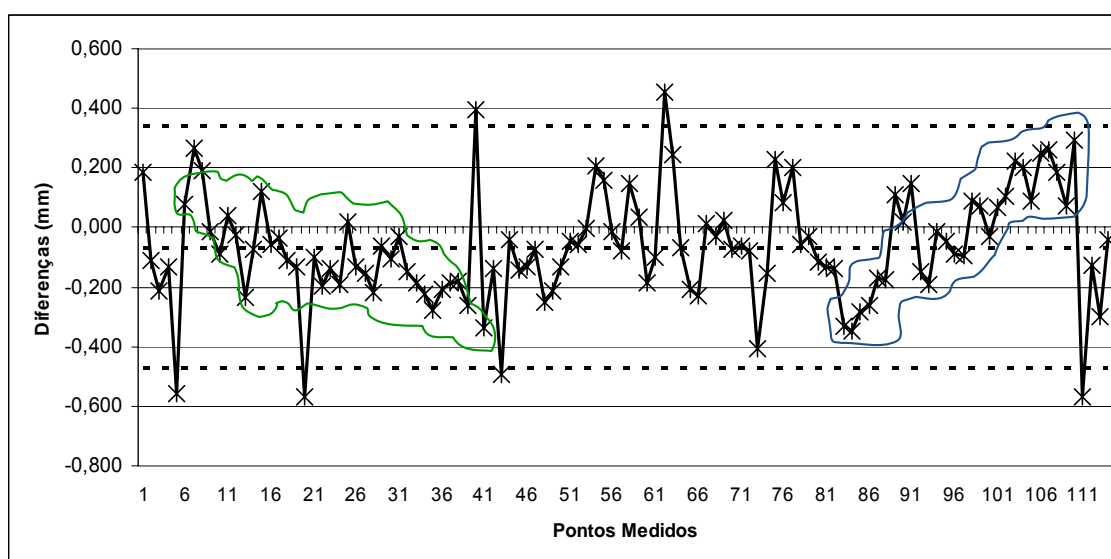


Figura 46 – Gráfico de controle das diferenças entre os sistemas após a exclusão dos quatro pontos atípicos.

Após a exclusão desses pontos, foram encontrados os seguintes parâmetros estatísticos:

- ✓ Diferença média = -0,066 mm
- ✓ Desvio padrão das diferenças = 0,188 mm

Em ambos os gráficos (figuras 44 e 46) pode-se perceber a presença de tendências nos valores das diferenças: uma decrescente (contorno verde) e outra crescente (contorno azul). Quando interpretadas em função da ordem com que os pontos foram transferidos da pá para o gráfico de valores individuais, é possível associar essas tendências com o comportamento do erro nos lados de sucção e pressão (Figura 47). Analisadas em conjunto, essas diferenças resultam num aparente engrossamento da pá no setor próximo à aresta de saída e um aparente afinamento da pá no setor próximo à aresta de entrada.



Figura 47 – Comportamento dos erros nos lados da pá Kaplan.

O autor suspeita que esse problema possa ser causado pela medição separada de ambos os lados da pá. Deve-se lembrar que as nuvens de pontos obtidas pela medição do lado sucção e do lado pressão são integradas para formar uma única nuvem 3D, que representa a pá completa. Para acoplar as duas metades, usam-se alguns dos pontos definidos nas bordas, que podem ser medidos de ambos os lados. A capacidade de reproduzir as medições desses pontos é crítica para que o processo de composição não introduza erros que afetem a espessura da pá. Uma possível solução seria posicionar a peça na posição vertical, pois dessa maneira não seria necessário virá-la nem compor as

medições realizadas em cada lado. Essa recomendação é válida para o sistema fotogramétrico, mas também para o BAM.

Contudo, deve-se observar que não é possível definir como cada um dos sistemas de medição envolvidos aporta às diferenças detectadas. De fato, o estudo realizado é uma comparação na qual nenhum dos sistemas pode ser considerado como referência metrológica. Assim, os resultados não são conclusivos no sentido de validar a utilização do sistema fotogramétrico na produção de peças sob encomenda da Altona. Por essa razão realizou-se um segundo estudo em condições mais controladas. Os resultados desse estudo são apresentados na seção a seguir.

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE MMC E O SISTEMA TRITOP

Visando avaliar metrologicamente o sistema TRITOP, foi projetado um experimento no qual as condições de medição e a medição de referência pudessem ser mais bem controladas.

O ideal teria sido calibrar a peça num laboratório da Rede Brasileira de Calibração, para assim garantir a rastreabilidade da medição de referência. No entanto, isso foi impossível devido às dificuldades de transportar a peça e pela pouca disponibilidade de tempo para executar o experimento. Assim, decidiu-se:

- ✓ Usar, como peça de teste, uma palheta diretriz fundida com as superfícies usinadas (Figura 48).
- ✓ Realizar a medição de referência em uma máquina de medir por coordenadas de tipo portal (Mitutoyo BEYOND A1212), propriedade da Electro Aço Altona, após verificar que os erros de posicionamento e perpendicularidade estavam conforme especificação.
- ✓ Realizar todas as medições no próprio laboratório de medição por coordenadas da empresa, num período caracterizado por condições estáveis no que diz respeito à temperatura e vibração.



Figura 48 – Palheta diretriz e nomenclatura específica^[14].

A peça foi montada com o eixo da seção no plano vertical, acessível por todos os lados (Figura 49). Foram colocados alvos não-codificados auto-adesivos sobre o perfil hidráulico da palheta, conforme uma malha ortogonal, demarcando os pontos a serem medidos por ambos os sistemas de medição.

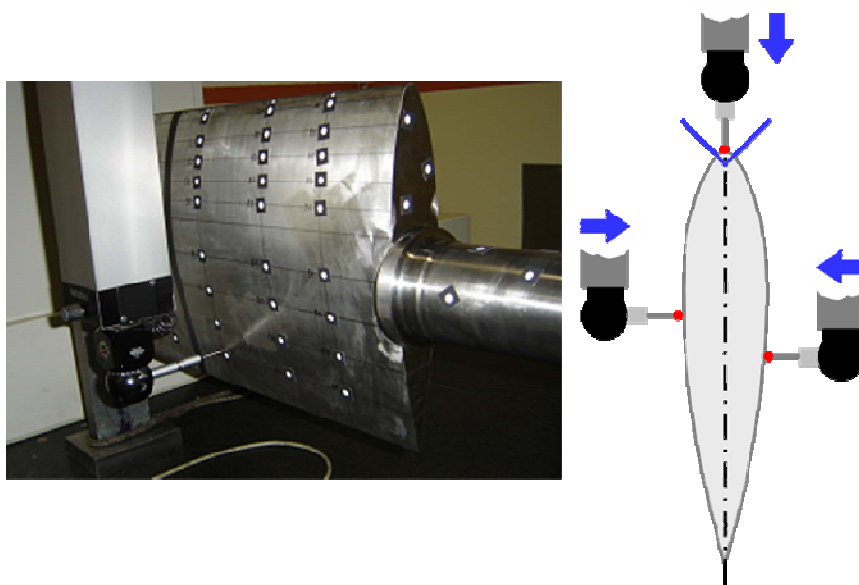


Figura 49 – Posição da palheta e estratégia de apalpação adotada na medição com a MMC.

Primeiramente os alvos não-codificados foram apalpados com a MMC Mitutoyo BEYOND A1212. A apalpação foi na direção que mais se aproxima à normal da superfície no local e realizada de maneira manual, aproximadamente no centro do alvo.

O processo de medição de referência deveria ter coletado as coordenadas do ponto (y_P, z_P) , conforme ilustrado na Figura 50.

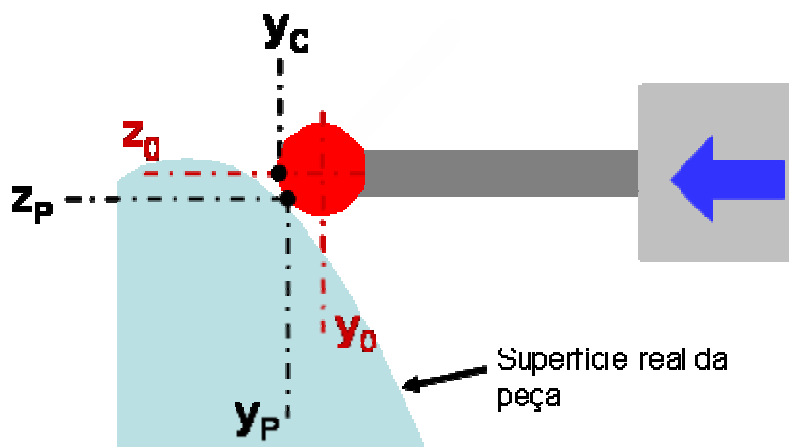


Figura 50 – Problemática na medição de referência.

Porém, o software instalado na MMC implementa a correção do raio do sensor na direção de apalpação, o que teria resultado na coleta do ponto (y_C, z_0) , introduzindo assim um erro na medição do desvio. Por isso, preferiu-se coletar as coordenadas do centro do sensor (y_0, z_0) e determinar o desvio como a distância entre esse ponto e a superfície de um novo modelo CAD, obtido por *offset* do modelo nominal com o valor do raio do sensor, conforme mostrado na Figura 51.

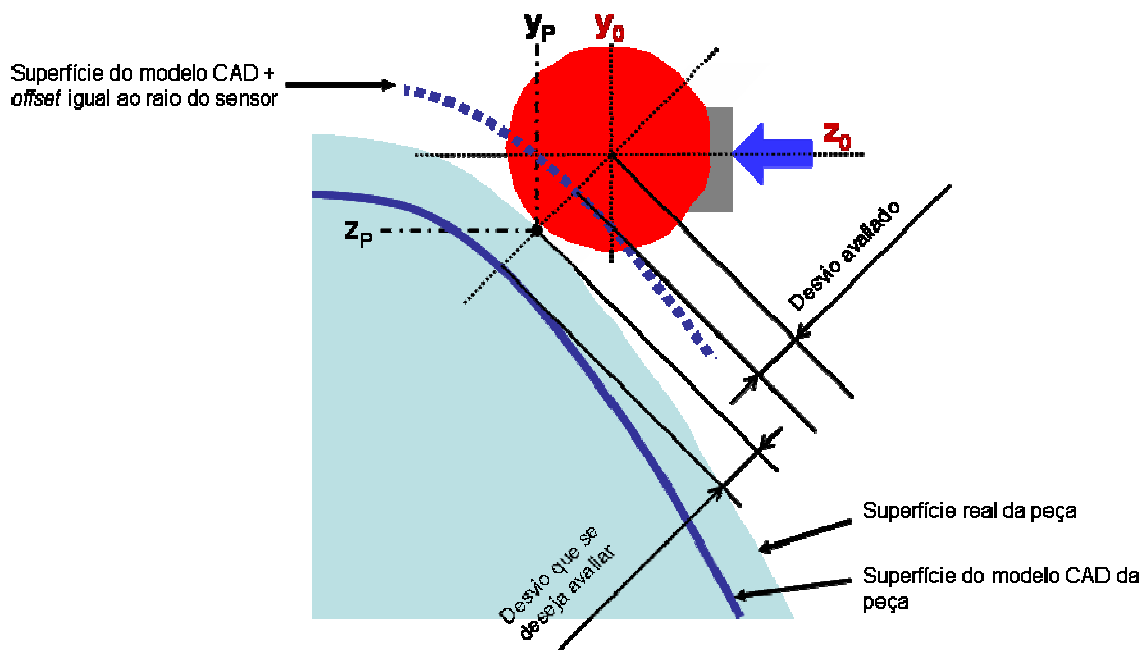


Figura 51 – Operação de *offset* na medição de referência.

As coordenadas dos pontos medidos na MMC foram exportadas em formato ASCII, para realizar o processamento no software do sistema TRITOP.

Em seguida, os mesmos alvos foram medidos usando o sistema óptico da seguinte maneira:

- ✓ A peça foi medida na mesma posição usada para se obter os desvios de referência na MMC.
- ✓ Foram usados dois padrões ópticos de comprimento e vários alvos magnéticos codificados, colados na própria peça, na mesa da MMC e no suporte. Cabe ressaltar que na região de maior curvatura utilizaram-se alvos com menores dimensões.

A Figura 52 mostra como a palheta diretriz submetida ao estudo foi montada juntamente com os alvos sobre a mesma e os padrões de comprimento.

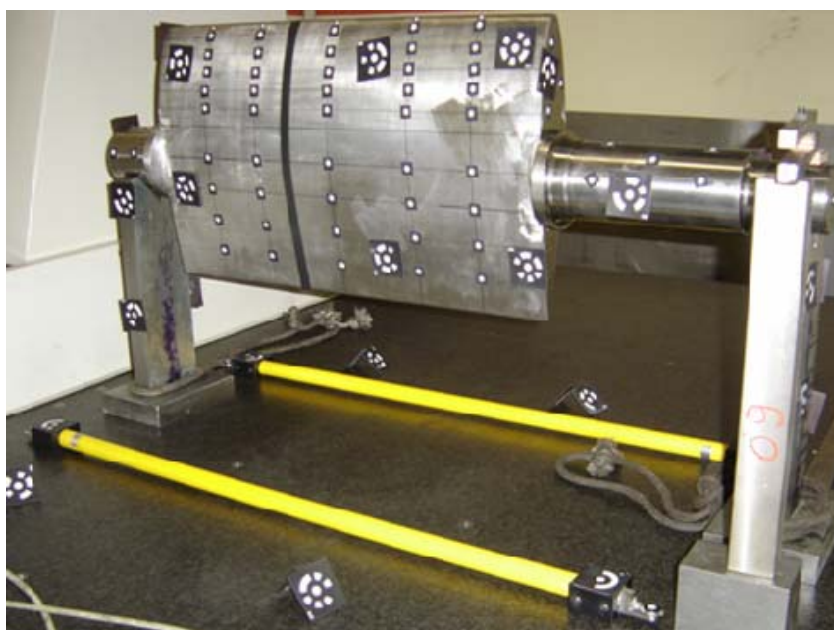


Figura 52 – Palheta diretriz montada sobre a MMC, pronta para ser medida com o sistema TRITOP, junto aos padrões de comprimento.

Na comparação foram usados somente os pontos situados no perfil hidráulico. Após harmonizá-los e eliminar os pontos atípicos, sobraram 104 pontos para serem processados. Todos os processamentos foram realizados no software do TRITOP. Utilizou-se o algoritmo de *best-fit* (critério de mínimos quadrados)

para ajustar os pontos medidos por cada um dos sistemas de medição separadamente ao modelo CAD correspondente.

Embora a localização dos pontos medidos por ambos os sistemas não seja exatamente a mesma (estima-se um erro posicional máximo de $\varnothing 2$ mm), a curvatura da superfície nos locais de medição é suficientemente pequena como para que o erro do TRITOP possa ser estimado através da diferença entre o desvio detectado com o TRITOP e o desvio detectado com a MMC.

Através do gráfico mostrado na Figura 53 são apresentados os desvios encontrados no estudo. O desvio médio observado pelos dois sistemas é positivo ($\approx 0,25$ mm), indicando excesso de material na maioria dos pontos.

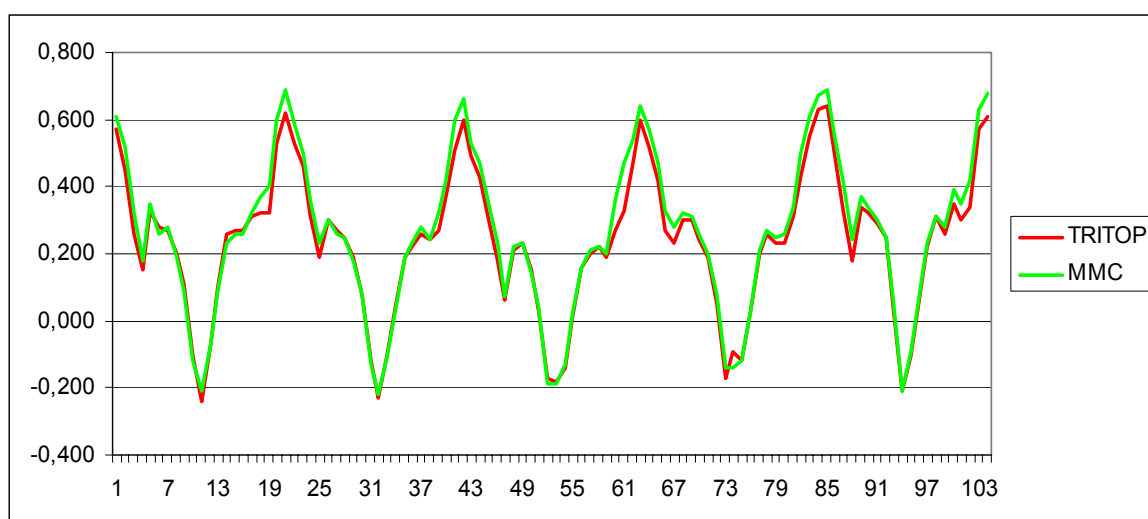


Figura 53 – Desvios com relação ao modelo, informados por ambos os sistemas.

Com esses desvios, nuvens de pontos foram geradas e visualizadas através do software MATLAB. A Figura 54 mostra as palhetas diretrizes, medidas por ambos os sistemas, modeladas a partir das coordenadas (X, Y, Z) obtidas dos valores nominais em CAD.

As figuras 53 e 54 mostram que, em geral, os desvios informados pelo TRITOP apresentam boa concordância com os desvios obtidos pelo sistema de medição de referência. Ambos os sistemas informam a existência de um padrão cíclico, conforme o qual os desvios negativos acontecem sempre no topo do perfil (borda arredondada) e os positivos na parte inferior do perfil.

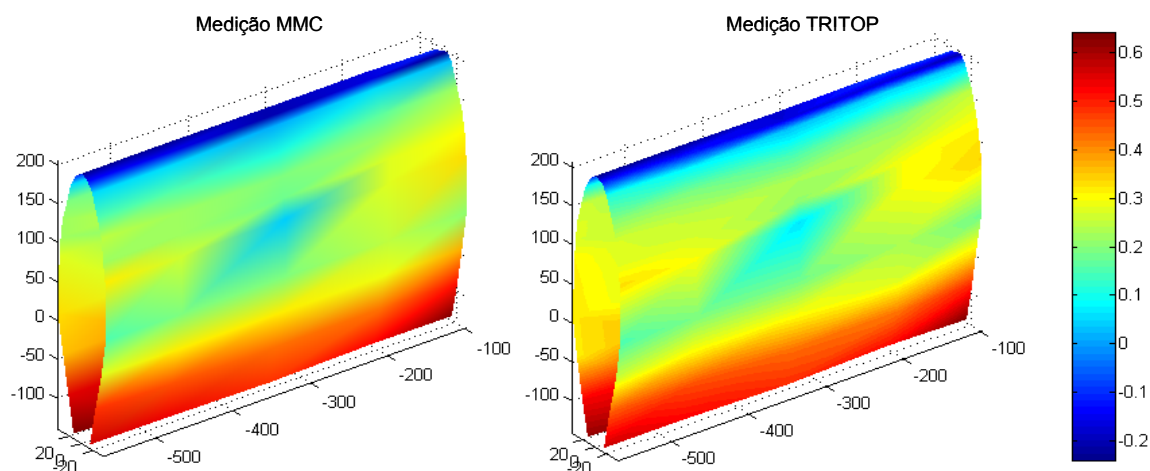


Figura 54 – Palhetas modeladas a partir das coordenadas 3D obtida dos valores nominais (CAD) e os desvios da peça informados por ambos os sistemas de medição.

A Figura 55 apresenta o gráfico de dispersão dos desvios informados pelo TRITOP com referência aos valores obtidos pela MMC. Nele pode-se observar a presença de um ponto atípico (circundado em vermelho). A reta de regressão foi destacada com um traço contínuo; a resposta ideal, através de uma reta pontilhada a 45°.

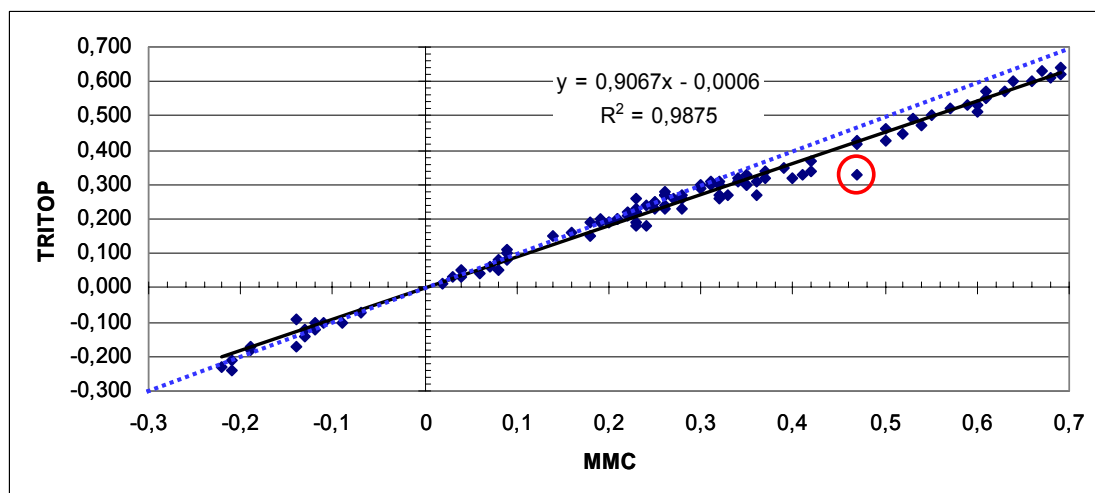


Figura 55 – Gráfico de dispersão dos desvios informados pelo TRITOP com relação aos desvios medidos pela MMC.

A partir desse gráfico pode-se concluir que:

- ✓ A correlação entre os desvios informados por ambos os sistemas é altamente significativa ($R^2 = 0,9875$), indicando um comportamento linear do sistema fotogramétrico.

- ✓ O sistema TRITOP apresenta uma ligeira tendência a subestimar os desvios positivos (excesso de material) e superestimar os desvios negativos (falta de material). Esse comportamento caracteriza um erro de ganho.
- ✓ O erro sistemático constante é desprezível ($-0,6 \mu\text{m}$).

Uma análise mais detalhada é possível subtraindo os desvios informados pelo TRITOP dos respectivos valores medidos pela MMC. Com eles gerou-se o gráfico de controle das diferenças ou erros, mostrado na Figura 56.

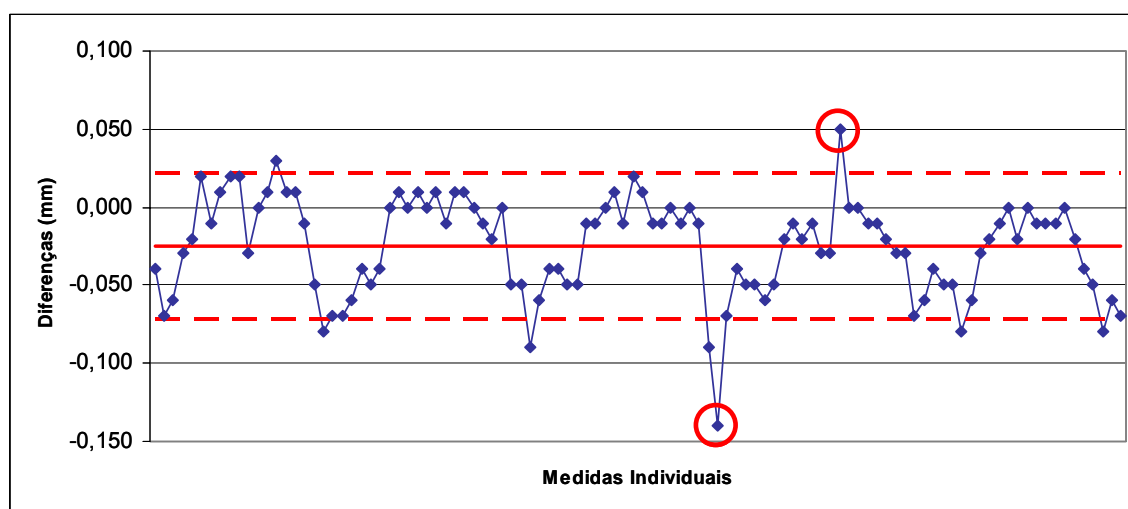


Figura 56 – Gráfico de controle das diferenças entre os desvios informados pelo TRITOP e os desvios de referência, obtidos pela MMC.

Para a análise das medições, foram considerados os seguintes parâmetros estatísticos:

- ✓ Média das diferenças (X_{bar}) = $-0,025 \text{ mm}$
- ✓ Amplitude média (mR_{bar}) = $0,018 \text{ mm}$
- ✓ Limite superior de controle (LSC) = $X_{\text{bar}} + 3 \cdot mR_{\text{bar}} / 1,128 = 0,022 \text{ mm}$
- ✓ Limite inferior de controle (LIC) = $X_{\text{bar}} - 3 \cdot mR_{\text{bar}} / 1,128 = -0,072 \text{ mm}$

No gráfico é possível observar que:

- ✓ Há dois pontos atípicos, muito provavelmente devidos à medição de referência (um deles já foi identificado na figura 55).

- ✓ Repete-se o padrão cíclico já observado nos desvios com relação ao modelo CAD, porém, com sinal invertido.
- ✓ Os desvios informados pelo TRITOP apresentam uma diferença média de -0,025 mm com relação à MMC.

A Figura 57 foi obtida plotando os mesmos dados da figura 56, mas de forma tridimensional. Pode-se observar que no topo da palheta o sistema óptico TRITOP tem tendência a produzir erros positivos, informando maior quantidade de material que a MMC, mas nas laterais, informa menos material.

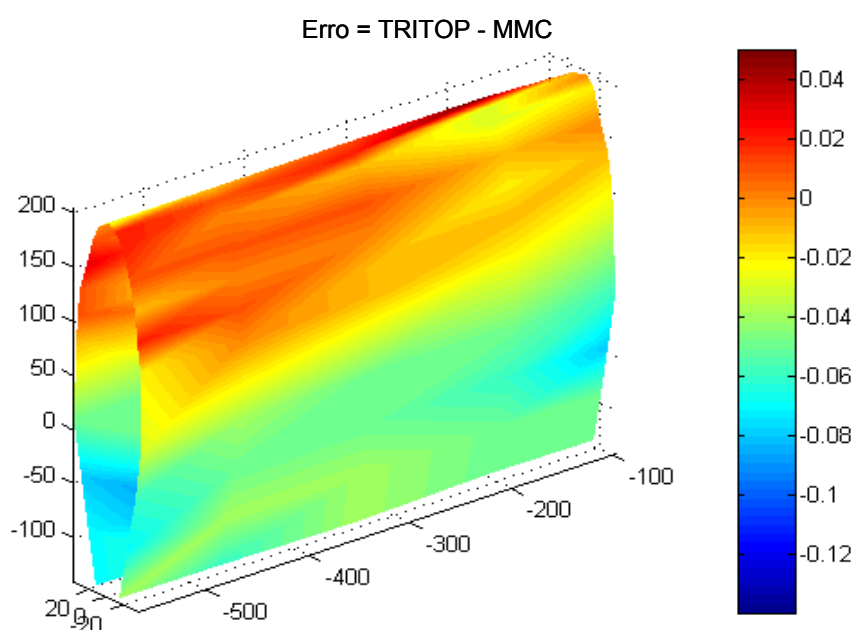


Figura 57 – Diferença entre os desvios informados pelo TRITOP e os desvios de referência, obtidos pela MMC.

Essa afirmação é confirmada pelo diagrama de dispersão da Figura 58. Embora o coeficiente R^2 apresente um valor relativamente baixo, fica evidente que há correlação negativa entre a diferença e os valores informados pela MMC. Novamente ficam em evidência os dois pontos atípicos já mencionados.

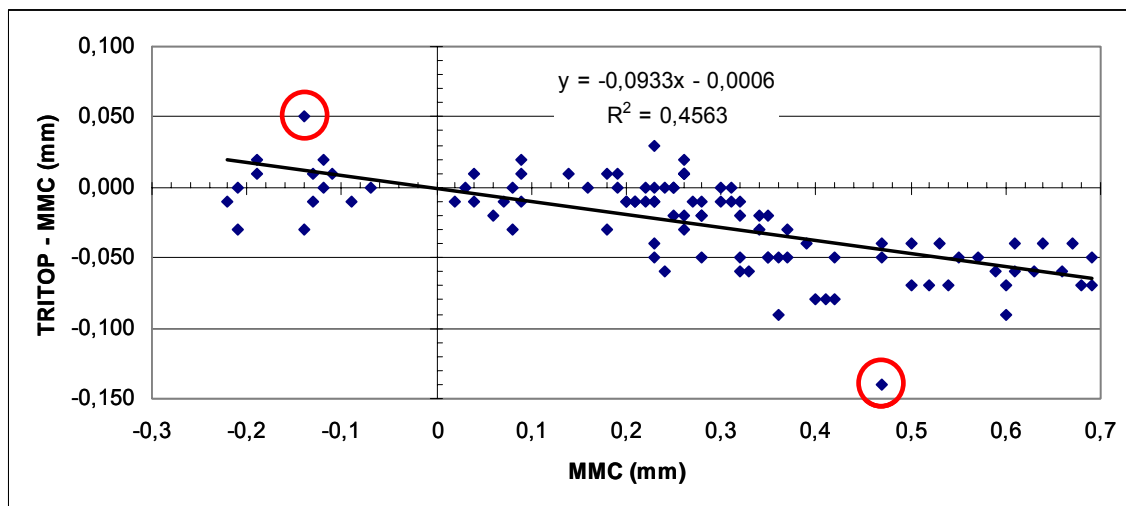


Figura 58 – Correlação do erro com os desvios informados pela MMC.

Os resultados obtidos até o momento permitem concluir que os erros atribuíveis ao sistema óptico são pequenos se comparados com os desvios apresentados pela peça com referência ao modelo CAD, sendo linearmente dependentes destes, com constante de proporcionalidade aproximadamente igual a -0,09. A partir desses resultados, pode-se afirmar que o sistema TRITOP é metrologicamente adequado para medição de peças fundidas ou usinadas de formas livres, com tolerâncias de perfil iguais ou maiores de 0,5 mm (amplitude total).

Cabe destacar que os valores do erro resultaram baixos o suficiente como para tornar questionável a medição de referência. O estudo realizado pode ser caracterizado como aceitável para fins de validação do sistema óptico, mas em futuros estudos seria aconselhável calibrar a peça num laboratório acreditado que forneça resultados com menores incertezas de medição. Um experimento semelhante ao relatado nesta seção, mas usando uma peça calibrada com baixa incerteza, permitiria estimar a incerteza da medição executada com o sistema fotogramétrico através da análise estatística dos erros.

5.4 ANÁLISE COMPARATIVA E RECOMENDAÇÕES

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de uma comparação qualitativa entre o BAM e o sistema óptico fotogramétrico TRITOP.

Tabela 2 – Comparação qualitativa entre o BAM e o sistema óptico fotogramétrico.

Característica	Sistema de medição	
	BAM	Sistema óptico
Erro Máximo Admissível (EMA)	≈ 0,172 mm (para BAM FARO Titanium – Ø 3,7 m, segundo método 2σ)	≈ 0,02 mm/m (para TRITOP segundo VDI/VDE 2634-2002)
Volume de medição	Mediano (Ø 3,7 m para BAM FARO Titanium)	Grande (Comprimentos até 20 m e área até 10 m x 10 m)
Preço	Menor (US\$ 40.000 FOB para BAM FARO Titanium com alcance 3,7 m)	Maior (US\$ 70.000 FOB para o sistema TRITOP)
Capacidade de medir formas livres	Sim	Sim
Capacidade de medir desvios geométricos conforme ISO 1101	Sim	Não (Limitação do software do TRITOP)
Capacidade de acessar geometrias internas e reentrâncias	Maior	Menor (região de oclusão)
Portabilidade (peso e volume)	Menor	Maior (pode-se realizar a medição sem necessidade de levar o laptop)
Tempo de preparação para medição da peça	Igual	Igual
Tempo de montagem	Maior	Menor
Montagem	Mais complexa (deve ser rígida)	Não precisa
Tempo de medição	Maior	Menor
Exposição do operador a posições não ergonômicas e risco de acidentes	Maior	Menor

Pode-se observar que o sistema TRITOP é uma opção convidativa para medição de peças fundidas medianas e grandes. Suas principais vantagens são: a portabilidade, a ausência de problemas associados à fixação, a rapidez com que a peça é preparada e medida e, conseqüentemente, a baixa exposição do

operador a posturas desconfortáveis e situações de risco. Assim, é apropriado para realizar medições no local em que a peça é fabricada e executar tarefas de engenharia reversa em localizações remotas ou adversas. Conforme avaliações relatadas acima, podem-se esperar incertezas de medição suficientemente baixas, dadas as tolerâncias comuns das peças fundidas.

No entanto, pelo seu maior preço, dificuldade de acessar reentrâncias e incapacidade de lidar com tolerâncias de forma, posição e orientação, outras que as de perfil, o sistema óptico TRITOP não deveria ser considerado um substituto do BAM. Assim, a melhor opção parece ser dispor de ambos os sistemas, utilizando-os alternativamente conforme a tarefa a realizar.

Com base nas potencialidades dos softwares de medição utilizados, surge ainda a possibilidade de utilizar ambos os sistemas numa única tarefa de medição, trabalhando de forma colaborativa. Porém, antes de aplicar esse método deve-se considerar de que forma as nuvens de pontos geradas pelos dois sistemas podem ser referenciadas a um único sistema coordenado, sem produzir desvios sistemáticos entre as mesmas que afetem drasticamente a qualidade dos resultados.

Em todas as medições realizadas com o BAM e com o sistema óptico apareceram dados atípicos. A identificação e eliminação desses pontos atípicos antes de alinhar a peça com o modelo CAD e/ou tomar decisões sobre a conformidade com as especificações é de vital importância. Recomenda-se examinar cuidadosamente as nuvens de pontos em busca de pontos afastados ou situados em regiões não envolvidas na análise. Isso pode ser feito usando os recursos gráficos do software de medição, mas também com ajuda de um gráfico de controle dos desvios.

Uma última recomendação diz respeito ao ambiente em que as medições são realizadas. Não há dúvida que a portabilidade do BAM e do sistema óptico fazem possível a execução de tarefas de engenharia reversa em campo e também a medição no chão-de-fábrica, onde a peça é produzida. Porém, embora factíveis, as medições realizadas em condições adversas ou agressivas limitam o desempenho e encurtam a vida útil dos sistemas de medição, além de expor os operadores a riscos e gerar desconforto e fadiga. Por essa razão, recomenda-se

criar uma sala na qual possa ser realizada a medição de peças com o BAM e o sistema óptico. A seguir apresentam-se algumas recomendações para o projeto dessa sala de medidas:

- ✓ Localizar a sala perto do setor de ensaios não-destrutivos, podendo inclusive estar fisicamente integrada com o mesmo. No possível, instalá-la longe de fontes de calor, impactos e vibrações expressivas.
- ✓ Definir espaço suficiente para medição com BAM, com sistema óptico e eventualmente com outros sistemas, tais como traçadores e graminhos.

Para as necessidades da Electro Aço Altona, 50 m² poderiam ser suficientes.

- ✓ Chumbar no piso uma placa de aço de espessura razoável (≈ 30 mm) e tamanho apropriado (4 m x 5 m), para apoiar com segurança as peças e fixar solidamente o braço de medição por meio de uma base magnética.
- ✓ Fornecer meios para fixar as pás e peças similares na posição vertical, evitando os problemas derivados de compor a nuvem de pontos que representa à peça a partir de duas ou mais nuvens de pontos, obtidas em medições separadas.
- ✓ Prover um sistema de climatização para manter a temperatura da sala em valores aceitáveis (21 ± 4)°C.
- ✓ Manter pressão positiva para minimizar a entrada de poeira.
- ✓ Criar uma ante-sala de tamanho adequado, para permitir a entrada e saída de peças sem prejuízo expressivo da climatização.
- ✓ Instalar uma talha para movimentar as peças dentro da sala e até a ante-sala de entrada/saída.

6 CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho foram apresentados e discutidos alguns assuntos sobre a medição geométrica na indústria metalúrgica, especificamente a fundição. Como os braços articulados de medição são comumente usados na medição de peças fundidas, metodologias propostas para verificação metrológica desses equipamentos foram apresentadas visando garantir a qualidade das medições. Por outro lado, em virtude da metrologia óptica ser cada vez mais aplicada no meio industrial, foi apresentado e avaliado um sistema óptico de medição baseado em fotogrametria.

A seguir serão apresentadas as principais conclusões encontradas bem como possíveis recomendações para estudos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

O controle dimensional e geométrico de peças fundidas é chave na garantia da qualidade de fornecimento de componentes de hidrogeração, dragagem e outros. Essas peças podem apresentar superfícies com as mais variadas geometrias (formas livres ou complexas) e como em um processo de fundição dificilmente há homogeneidade superficial, alguns defeitos podem surgir que comprometam a confiabilidade das medições. Assim, a geração de soluções de medição robustas é um objetivo desafiador e de retorno econômico certo.

Nesta dissertação foram exploradas duas soluções para medição de peças fundidas de dimensões medianas e grandes, o braço articulado de medição e um sistema óptico que aplica fotogrametria. Em ambos os casos, usaram-se modelos

definidos de alguns fabricantes de renome. Para os experimentos com braço de medição foram usados os modelos Platinum e Titanium da Faro. O sistema fotogramétrico utilizado foi o TRITOP, da empresa GOM. Por essa razão, os resultados informados não devem ser interpretados como descrevendo o comportamento de “todos os BAM” ou de “todos os sistemas fotogramétricos”, senão como uma amostra do que pode ser conseguido com esses tipos de sistemas de medição geométrica.

No que diz respeito à tecnologia de medição com braço articulado de medição, foi apresentada, executada e discutida a sistemática de avaliação proposta pela norma ASME B89.4.22-2004. Ela é reconhecida internacionalmente para a avaliação de desempenho de BAMs e devido a sua recente publicação, ainda é pouco utilizada. Da pesquisa realizada sobre os principais fabricantes de BAMs, poucos afirmam seguir tal norma enquanto outros, ainda trazem suas especificações de acordo com o método dois sigma (método declarado por fabricantes). Em breve deve ser publicada a norma VDI/VDE 2617-9⁸, aumentando os esforços em padronizar metodologias para avaliar BAMs. Seguindo estas normas, os fabricantes de BAMs poderão especificar seus equipamentos de uma maneira padronizada e garantir aos usuários a comparabilidade dos mesmos.

Foi realizada uma aplicação prática da norma ASME B89.4.22-2004 (teste de desempenho volumétrico) e os resultados do experimento foram facilmente interpretados com auxílio de planilhas e gráficos. A partir da análise dos resultados, mostrou-se que cuidados especiais precisam ser tomados para garantir a rigidez do suporte das barras de esferas e da fixação do braço em avaliação. Foram propostos e testados indicadores e ferramentas para identificar dados atípicos e verificar o efeito da flexibilidade nos resultados do teste, tais como o gráfico com erros de comprimento da barra e o gráfico de controle dos desvios na medição dos diâmetros das esferas.

Apresentou-se também o estudo de R&R realizado na Electro Aço Altona através de uma aplicação prática do braço articulado de medição. Uma das

⁸ VDI/VDE 2617 – parte 9 - Draft 09.02.2006 – Accuracy of coordinate measuring machines; characteristic parameters and their checking. Acceptance and reverification tests for articulated arm coordinate measuring machines (in preparation)

conclusões desse estudo é que o BAM não pode ser utilizado para o controle de parâmetros com tolerâncias estreitas. Apesar de terem sido medidos apenas parâmetros simples, observou-se que a variação total atribuída ao processo de medição supera as especificações dadas pelo fabricante, relativas ao comportamento do BAM em testes específicos de medição de comprimentos em condições controladas. Mostrou-se que uma fração importante da variação detectada é decorrente das diferenças entre operadores, a qual leva à necessidade de melhorar os treinamentos e harmonizar os procedimentos de medição. Cabe ressaltar que como o posicionamento do apalpador do braço articulado de medição sobre a peça em análise é feito manualmente, este equipamento é sensível aos operadores.

Outro ponto relevante apresentado no trabalho diz respeito à utilização de métodos ópticos de medição. Devido principalmente à velocidade de medição, grande quantidade de detalhes capturados e portabilidade, estes sistemas estão sendo cada vez mais empregados para o controle dimensional de superfícies de formas livres de médio e grande porte. Nos estudos comparativos (BAM x TRITOP e MMC x TRITOP) foi observado o razoável grau de concordância entre os sistemas, uma vez que a diferença encontrada entre eles é pequena frente à tolerância da peça submetida à medição.

Na comparação entre o BAM e o sistema TRITOP observou-se que ambos os sistemas conseguem ter um desempenho adequado, embora os dois gerassem dados atípicos que precisaram de atenção especial para serem identificados e expurgados. Mostrou-se também que erros de medição relevantes podem estar associados à medição separada das duas metades da peça, pela necessidade de gerar uma referência comum para as duas nuvens de pontos. Esse problema poderia ser evitado, como mencionado anteriormente, medindo-se a peça numa posição vertical o que não tão somente facilitaria a medição propriamente dita, mas também diminuiria a exposição do operador em posições não ergonômicas e o tempo da mesma.

O segundo estudo envolveu medições feitas numa MMC de tipo portal, que foram consideradas como referência para determinar os erros próprios do sistema TRITOP. Esse experimento foi realizado na sala da MMC, em condições de limpeza e climatização adequadas. O estudo mostrou que o desempenho

metrológico do sistema fotogramétrico é completamente aceitável para medição de peças fundidas e/ou usinadas com tolerâncias de $\pm 0,25$ mm ou mais amplas.

Por fim, como o tempo de medição é de extrema importância em uma indústria, observou-se que o tempo necessário para uma completa medição com o sistema TRITOP foi da ordem da metade do necessário com os métodos por contato: BAM e MMC. O parâmetro tempo aliado com a avaliação da confiabilidade metrológica do sistema óptico, podem ser decisivos para a aquisição de tal equipamento.

6.2 OPORTUNIDADES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em virtude de algumas dificuldades encontradas ao longo da realização do presente trabalho, oportunidades de melhorias podem ser propostas para possíveis aplicações futuras. Tais oportunidades podem ser:

- ✓ Analisar a possibilidade de criar um procedimento de verificação rápida de braços articulados usando uma barra de esferas como padrão, em conformidade com a norma ASME B89.4.22-2004.
- ✓ Desenvolver um artefato para verificação rápida de braços articulados, bem como de um suporte para tal artefato. Este deveria ter um baixo custo uma vez que o utilizado no presente trabalho tem um valor elevado (Alufix – WITTE) e poucas empresas no Brasil o possuem.
- ✓ Analisar a repetitividade e a reprodutibilidade das medições realizadas com equipamentos baseados na fotogrametria.
- ✓ Desenvolver uma metodologia de fácil e rápida aplicação para avaliar, de maneira confiável, a incerteza das medições realizadas com equipamentos baseados na fotogrametria.
- ✓ Avaliar a possibilidade de realizar medições de peças nas quais seja necessário envolver um braço de medição e um sistema óptico.

REFERÊNCIAS

- [1] DONATELLI, G. D. **Curso Avançado de Metrologia para Gestores Industriais – A Metrologia na Cadeia de Valor da Empresa**. Seminário, Fundação CERTI, março de 2006.
- [2] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9001, Quality Management Systems – Requirements**, 2000.
- [3] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 16949, Quality Management Systems – Particular Requirements for the Application of ISO 9001:2000 for Automotive Production and Relevant Service Part Organizations**, 2002.
- [4] BALDO C. R., DONATELLI, G. D., et al. **Metrology and Manufacturing Process Improvements in a Medium-sized Brazilian Company**, VIII International Symposium on Measurement and Quality Control, Erlangen, Germany, October 2004.
- [5] BALDO, C. R. **A Interação entre o Controle de Processos e a Metrologia em Indústrias de Manufatura**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [6] SILVA, A. C. **Uma Sistemática para Garantia da Qualidade Metrológica Aplicada em Ambiente Industrial**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [7] BALDO, C. R., DONATELLI G. D. **Posicionamento Estratégico da Função Metrologia na Electro Aço Altona**, Proposta de Projeto de Extensão, Laboratório de Metrologia e Automatização, 2004.
- [8] CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica – Processos de Fabricação e Tratamento**. Volume II 2ª Edição, São Paulo, Ed. McGraw-Hill, 1986.

- [9] **Centro de Informação Metal Mecânica – CIMM**. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br>>. Acesso em: novembro de 2005.
- [10] FILHO, M. P. C.; DAVIES, G. J. **Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas**. Rio de Janeiro – Livros Técnicos e Científicos, São Paulo – Ed. Universidade de São Paulo, 1978.
- [11] SILVA, G. M. **Fundido em Aço ou Forjado? Uma Avaliação Realística**. Caderno Técnico 50, Revista Fundição & Matérias Primas. Março/Abril 2004. Disponível em: <http://www.abifa.org.br/cadernos_tecnicos.asp>. Acesso: novembro de 2005.
- [12] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1101, Geometrical Product Specifications (GPS): Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out**, 2004.
- [13] THOMPSON, E. H. **Photogrammetry**, The Royal Engineers Journal, 76(4), 1962.
- [14] **Electro Aço Altona S.A.** Site disponível em: <<http://www.altona.com.br>>. Acesso: novembro de 2005.
- [15] WOLOVICH, W., ALBAKRI, H., YALCIN, H. **The Precise Measurement of Free-form Surfaces**, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 124, 2002.
- [16] KOWARSCHIK, R.; KÜHMSTEDT, P.; SCHREIBER, W. **3-Coordinate Measurement with Structured Light**, Fringe 93, 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, p. 204 – 208, Bremen, Alemanha, 1993.
- [17] NEROSKY, L. A. R. **Medição de Formas Livres através da Integração de um Sensor Óptico tipo "Folha de Luz" em um Braço de Medição**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

- [18] **Mitutoyo America Corporation.** Site disponível em: <<http://www.mitutoyo.com>>. Acesso: dezembro de 2005 e **CD de Treinamento Interativo sobre Instrumentos para Metrologia Dimensional.** Mitutoyo e Instituto Tecnológico – ITUC da PUC-RJ.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11309 – Traçador medidor de altura.** Junho de 1990.
- [20] BOSCH, J. A. **Coordinate Measuring Machines and Systems.** Ed. Marcel Decker, 1995.
- [21] **Hexagon Metrology GmbH.** Site disponível em: <<http://www.brownandsharpe.com>>. Acesso: dezembro de 2005.
- [22] **Carl Zeiss Inc.** Site em disponível em: <<http://www.zeiss.com>>. Acesso: dezembro de 2005.
- [23] SOUSA, A. R. **Formação Regular de Metrologistas 3D – FORMA 3D.** Módulo 1, Metrologista 3D – Nível C. Resende, 2004.
- [24] **FARO Technologies Inc.** Site disponível em: <<http://www.faro.com>>. Acesso: outubro de 2005 e **FARO Technologies – TRID FARO do Brasil.** Site disponível em: <<http://www.trid.com.br>>. Acesso: outubro de 2005.
- [25] **Romer CimCore Hexagon Metrology.** Site disponível em: <<http://www.romer.com>> ou <<http://www.cimcore.com>>. Acesso: outubro de 2005.
- [26] **Immersion Corporation.** Site disponível em: <<http://www.immersion.com>>. Acesso: dezembro de 2005.
- [27] SOUSA, A. R.; OROSCO, D. B.; GIAMMUSSO, L. **Avaliação da Incerteza Volumétrica de Braços de Medição Por Coordenadas.** Congresso METROLOGIA-2003 – Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), Recife, 2003.

- [28] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B.89.4.22-2004 – Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines**, 2004.
- [29] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14253-1, Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications**, 1998.
- [30] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B89.7.3.1, Guidelines for Decision Rules: Considering Measurement Uncertainty Determining Conformance to Specifications**, 2001.
- [31] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM)**, 3ª Ed, Rio de Janeiro, 2003.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) e INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. Terceira Edição Brasileira (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement). Edição Revisada. Rio de Janeiro, Agosto, 2003.
- [33] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360, Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and Reverification Tests for Coordinate Measuring Machines (CMM) – Part 2 MMCs used for measuring size**, 2001
- [34] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B89.4.1b, Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines, volumetric performance specification for cartesian MMCs**, 2001.

- [35] FANTIN, A. V. **Medição de Formas Livres Tridimensionais por Topogrametria**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- [36] GOM – OPTICAL MEASURING TECHNIQUES. **Catálogo – Industrial 3D Measurement Technology. Quality Control and Inspection Utilizing the ATOS 3D Scanner**, 2004 e site disponível em: <<http://www.gom.com>>. Acesso: novembro de 2005.
- [37] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK. **VDI/VDE 2634-Part 1, Optical 3D measuring systems – Imaging systems with point-by-point probing**, 2002.
- [38] FRYER, J. G. **Close Range Photogrammetry and Machine Vision – Introduction**, Edited by K. B. Atkinson, Whittles Publishing, 1996.
- [39] **Geodetic Systems, Inc.** Site disponível em: <<http://www.geodetic.com>>. Acesso: outubro de 2005.
- [40] REICH, C.; RITTER R.; THESING J. **3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection**. Optical Engineering 39 (01), p. 224 – 231, Roger A. Lessard; Ed., Jan 2000.
- [41] COOPER, J. A. R., ROBSON, S. **Close Range Photogrammetry and Machine Vision – Theory of Close Range Photogrammetry**, Edited by K. B. Atkinson, Whittles Publishing, 1996.
- [42] RAUTENBERG U., WIGGENHAGEN M. **Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt 1**.
- [43] Automotive Industry Action Group (AIAG). **Análise dos Sistemas de Medição**. Terceira Edição (Measurement Systems Analysis – MSA). 3ª Edição, 2004.
- [44] **Horst Witte Gerätebau**. Site disponível em: <<http://www.horst-witte.de>>. Acesso: dezembro de 2005.

- [45] WHEELER D. J. **Advanced Topics in Statistical Process Control**, SPC Press, Knoxville, Tennessee, 1995.
- [46] DONATELLI, G. D. **Curso Avançado de Metrologia para Gestores Industriais – Avaliação e Supervisão dos Processos de Medição**. Seminário, Fundação CERTI, março de 2006.
- [47] **KOTEM Technologies Inc.** Site disponível em: <<http://www.kotem.com>>. Acesso: novembro de 2005.