CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ESTUDO DAS INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DE ESPESSURA POR ULTRASSOM EM PEÇAS AERONÁUTICAS

Bruno César de Andrade Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientadores:

Maurício Saldanha Motta, D.Sc. (orientador)
José Eduardo Ferreira de Oliveira, D. Sc. (co-orientador)

Rio de Janeiro

Junho de 2012

ESTUDO DAS INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DE ESPESSURA POR ULTRASSOM EM PEÇAS AERONÁUTICAS.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Bruno César de Andrade Silva

Aprovado por:

Presidente, Prof. Maurício Saldanha Motta, D. Sc. (orientador)

Prof. José Eduardo Ferreira de Oliveira, D. Sc. (coorientador) (IFPE)

Prof. Hector Reynaldo Meneses Costa, D. Sc.

Prof. Aline da Rocha Gesualdi, D. Sc. (CEFET/RJ, PPEEL)

Rio de Janeiro

Junho de 2012

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S586 Silva, Bruno César de Andrade
Estudo das incertezas na medição de espessura por ultrassom em peças aeronáuticas / Bruno César de Andrade Silva.—2012.
xi, 82f. + Anexos : il.col. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2012.
Bibliografia : f. 80 – 82
Orientador : Maurício Saldanha da Motta
Co-orientador : José Eduardo Ferreira de Oliveira

1.Engenharia mecânica 2.Tecnologia de materiais 3.Aeronaves 4.Corrosão 5.Medição por ultrassom I.Motta, Mauricio Saldanha da (orient.) II.Oliveira, José Eduardo Ferreira de (co-orient.) III.Título.

CDD 620.1

DEDICATÓRIA

Ao Deus soberano, pela vida, pela saúde, por todos os benefícios que me tem dado e por quem Ele é.

À Paula, minha esposa, pelo amor, compreensão, companheirismo, dedicação e paciência durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais e familiares pelo amor, orações e suporte.

AGRADECIMENTOS

Aos orientadores Maurício Saldanha Motta, D. Sc. e José Eduardo Ferreira de Oliveira, D. Sc. pela orientação, paciência, amizade e conhecimentos transmitidos.

Ao Prof. Luiz Roberto pela amizade, suporte, disponibilidade e paciência durante a realização dos experimentos dentro e fora do CEFET/RJ, extensivo ao aluno de iniciação científica Daniel.

Ao Prof. Hector Reynaldo pela tolerância e suporte prestados durante o programa de mestrado.

Ao meu amigo e irmão Engº. Marcelo Cunha, pela ajuda, suporte e encorajamento.

Aos colaboradores do setor de Testes Não Destrutivos da TAP Manutenção e Engenharia, em especial Srs. Carlos Roberto (Naval), Daniel, Reinaldo, Santana, Alexandre, Marcelo, Mário, André e Cinthya pela ajuda na realização dos ensaios.

Ao Sr. Isaías do setor de usinagem da TAP Manutenção e Engenharia pela fabricação do corpo de prova usado no experimento.

Ao CEFET/RJ pelo apoio durante a elaboração deste trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste sonho.

RESUMO

ESTUDO DAS INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DE ESPESSURA POR ULTRASSOM EM PEÇAS AERONÁUTICAS

Bruno César de Andrade Silva

Orientadores:

Maurício Saldanha Motta, D.Sc. (orientador)

José Eduardo Ferreira de Oliveira, D. Sc. (co-orientador)

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Quando um ponto de corrosão é encontrado na estrutura de uma aeronave um procedimento de remoção deve ser realizado imediatamente para manter a aeronave em condições seguras. Um desbaste em uma peça para remoção de corrosão significa que a peça necessitará ser avaliada antes de ser liberada devido à redução de sua espessura. Nesta dissertação será discutida a utilização do método por ultrassom para verificação de espessura remanescente de um membro estrutural que sofreu desbaste para remoção de corrosão e apresentado os resultados obtidos através de experimentos realizados que visaram detectar as fontes de incerteza deste processo. Com o estudo destas incertezas foi possível propor um fluxograma que robustece a metodologia atualmente utilizada, além de auxiliar na definição de uma zona de conforto para o avaliador dos resultados das medições.

Palavras-chave: Incerteza de medição; Ultrassom; Estruturas de aeronaves.

Rio de Janeiro

Junho de 2012

ABSTRACT

STUDY OF UNCERTANTIES DURING THICKNESS MEASUREMENT BY ULTRASONIC ON AEROSPACE PARTS.

Bruno César de Andrade Silva

Advisors:

Maurício Saldanha Motta, D.Sc. (advisor)

José Eduardo Ferreira de Oliveira, D. Sc. (co-advisor)

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Mechanical Engineering and Materials Technology.

When a corrosion spot is found on an aircraft structure, a removal procedure must be immediately performed to keep the aircraft on safe conditions. A blended out part implies in a particular evaluation before the aircraft delivery due to the thickness reduction. This dissertation will discuss the use of thickness measurement by ultrasonic for remaining thickness verification of a structural member after corrosion removal. In addition will present the results of experiments performed to detect uncertainties associated with this process. Using the study of those uncertainties it was possible to propose a flowchart which improves the current method of measurement, and help in establishing a comfort zone to the evaluator of results.

Keywords: Measurement Uncertainty; Ultrasonic; Aerospace Structures.

Rio de Janeiro

June 2012

Sumário

I Introdução 1

II Revisão Bibliográfica 3

II.1 O Erro de Medição 3

II.2 Fontes de Erros 4

II.2.1 Critério de Chauvenet 5

II.2.2 Critério de Dixon 7

II.3 Incerteza de Medição 8

II.3.1 Avaliação de Incerteza do Tipo A 9

II.3.2 Avaliação das Incertezas do Tipo B 9

II.3.3 Distribuição Retangular 10

II.3.4 Distribuição Triangular 12

II.3.5 Distribuição Normal e t de Student 14

II.3.6 Incerteza Padrão Combinada (u_c) 16

II.3.7 Incerteza Expandida (U) 17

II.3.8 Fator de Abrangência (k) 18

II.3.9 Número de Graus Efetivos de Liberdade 19

II.3.10 Influência da Incerteza de Medição na Tolerância de Processo 20

II.4 Calibração 23

II.4.1 Padrão 24

II.4.2 O Certificado de Calibração 25

II.5 Física do Ensaio por Ultrassom 26

II.5.1 Som 26

II.5.2 Ondas Mecânicas 27

II.5.2.1 Ondas Longitudinais 28

II.5.2.2 Ondas Transversais 28

II.5.2.3 Ondas de Rayleigh 29

II.5.2.4 Ondas de Lamb 30

II.5.3 Frequência, Velocidade e Comprimento de Onda 31

II.5.4 Efeito Piezoelétrico 32

II.5.5 Cristais Piezoelétricos e Transdutores 32

II.5.6 Impedância Acústica e Acoplantes 33

II.5.7 O Ensaio por Ultrassom 35

II.5.7.1 Generalidades 35

II.5.7.2 Medição de Espessura Através do Ensaio por Ultrassom 38

II.5.7.3 Calibração do Ponto Zero 40

III Metodologia 43

III.1 Visão Geral 43

III.2 Procedimento Típico de Remoção e Controle da Corrosão 44

III.3 Experimento realizado 46

III.3.1 Generalidades 46

III.3.2 Medição da Espessura Remanescente Após o Desbaste 48

III.3.2.1 Calibração do Bloco Padrão de Referência 48

III.3.2.2 Calibração do Aparelho de Ultrassom 50

III.3.3 Medição da Espessura no Experimento 51

III.3.4 Testes de Rejeição dos Valores 55

III.3.4.1 Critério de Chauvenet 55

III.3.4.2 Teste Q ou Critério de Dixon 56

III.3.5 Determinação da Incerteza do Procedimento de Medição 57

III.3.5.1 Incerteza Estatística da Amostra (Tipo A) 57

III.3.5.2 Incerteza Herdada da Calibração do Aparelho de Ultrassom 58

III.3.5.3 Incerteza Devida à Resolução do Aparelho de Ultrassom 58

III.3.5.4 Incerteza Devida ao Afastamento da Temperatura de Referência 59

III.3.5.5 Determinação da Incerteza Padrão Combinada (u_c) 59

III.3.5.6 Determinação dos Graus Efetivos de Liberdade (ν_{eff}) 60

III.3.5.7 Determinação da Incerteza Expandida (U) 60

III.3.5.8 Incertezas Adicionais Estimadas 60

III.3.5.8.1 Incerteza Devido à Variação da Quantidade de Acoplante 60

III.3.5.8.2 Incerteza Devido à Variação da Pressão de Apalpação 62

III.3.5.9 Recálculo da Incerteza Expandida 63

III.3.6. Determinação da Incerteza Expandida no Ponto 4 64

III.3.6.1 Incerteza estatística da amostra (Tipo A) 64

III.3.6.2 Incerteza Herdada da Calibração do Aparelho de Ultrassom 64

III.3.6.3 Incerteza Devida à Resolução do Aparelho de Ultrassom 65

III.3.6.4 Incerteza Devida ao Afastamento da Temperatura de Referência 65

III.3.6.5 Determinação da Incerteza Padrão Combinada (u_c) 66

III.3.6.6 Determinação dos Graus Efetivos de Liberdade (ν_{eff}) 66

III.3.6.7 Determinação da Incerteza Expandida (U) 66

III.3.7 Determinação da Incerteza Expandida da Área Sem Desbaste (Ponto 6) 67

III.3.7.1 Incerteza estatística da amostra (Tipo A) 67

III.3.7.2 Incerteza Herdada da Calibração do Aparelho de Ultrassom 67

III.3.7.3 Incerteza Devida à Resolução do Aparelho de Ultrassom 67

III.3.7.4 Incerteza Devida ao Afastamento da Temperatura de Referência 68

III.3.7.5 Determinação da Incerteza Padrão Combinada (u_c) 68

III.3.7.6 Determinação dos Graus Efetivos de Liberdade (v_{eff}) 69

III.3.7.7 Determinação da Incerteza Expandida (U) 69

III.3.8 Erro Sistemático do Procedimento 69

III.3.9 Limite de Danos Aceitáveis pelo Fabricante 70

IV Resultados e Discussão 71

IV.1 Resultado da Medição Realizada na Área Desbastada (Ponto 5) 71

IV.2 Resultado da Medição Realizada no Ponto 4 73

IV.3 Resultado da Medição Realizada na Área sem Desbaste (Ponto 6) 74

IV.4 Comparação de Resultados dos Experimentos 75

IV.5 Proposição de Uma Metodologia para Medição de Espessura por Ultrassom na Área Aeronáutica 75

V Conclusões 77

VI Recomendações para Trabalhos Futuros 79

Referências Bibliográficas 80

Anexo I 83

Anexo II 85

Anexo III 87

I – Introdução

O teste por ultrassom tem sido praticado por diversas décadas. Um exemplo de aplicação deste teste é a aferição de espessura em peças industriais em que os instrumentos foram aperfeiçoados de modo a fazer a coleta de dados mais fácil e melhor (NDT RESOURCE CENTER, 2011). As técnicas derivadas do uso do ultrassom são utilizadas em diversas áreas, destacando-se as aplicações na área de saúde e ensaios não destrutivos (OLIVEIRA, 2008).

Na indústria aeroespacial, a técnica de ensaio por ultrassom desempenha um papel importante tanto para a segurança quanto para o aspecto econômico, visto que para realiza-la, apenas pequenas aberturas de acesso são requeridas, proporcionando inspeções com a aeronave completamente montada (FAA, 1975). No entanto, a cada ano diversas aeronaves comerciais interrompem o seu serviço para realizar um programa de revisões e inspeções em sua estrutura e seus variados sistemas. A parada para manutenção é responsável por garantir o perfeito funcionamento da aeronave e seus sistemas e proporcionar segurança, conforto e pontualidade para os seus operadores e usuários. Dentre os diversos serviços de manutenção executados nas aeronaves, pode-se citar o programa de controle e prevenção da corrosão, que contempla diversos serviços de inspeção e tarefas de prevenção à corrosão nas variadas áreas da estrutura das aeronaves como, por exemplo, fuselagem, asas, estabilizadores, superfícies de controle de voo etc. Quando em uma inspeção de rotina alguma anormalidade é detectada em algum membro estrutural, certas medidas devem ser tomadas de imediato para correção deste problema.

A corrosão é uma das principais inimigas da manutenção aeronáutica, visto que deteriora o membro estrutural e se não corrigida a tempo, pode acarretar na perda do membro afetado e comprometer a segurança de voo. O procedimento genérico para remoção da corrosão de uma parte estrutural aeronáutica consiste na identificação do membro estrutural afetado através dos manuais técnicos, remoção do dano através de métodos específicos, inspeção visual e por testes não destrutivos. Um dos testes não destrutivos executado é a verificação da espessura ou dimensão remanescente de um membro estrutural afetado. A avaliação das condições de resistência da peça é realizada através de comparação com os limites estabelecidos nos manuais técnicos das aeronaves.

No procedimento genérico descrito no parágrafo anterior, as etapas que envolvem a verificação da espessura remanescente de uma peça através do teste por ultrassom e a análise dos resultados obtidos requerem extremo cuidado, pois, podem conter diversos erros oriundos de incertezas não estimadas, acarretando em uma tomada de decisão equivocada.

Nesta dissertação será discutida a utilização do método por ultrassom para verificação de espessura remanescente de um membro estrutural após a remoção de corrosão, os processos adotados pelos operadores de aeronaves e também os resultados obtidos através

de experimentos realizados que visam detectar as fontes de incerteza do processo de medição por ultrassom. Além disso, serão avaliadas essas incertezas para estabelecimento de uma zona de conforto para o técnico ou engenheiro responsável pela avaliação dos resultados das medições, visando mantê-los dentro dos limites de especificação.

II – Revisão Bibliográfica

A metrologia é a ciência da medição e suas aplicações e medição é o processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza, que por sua vez, caracteriza-se pela propriedade de um fenômeno, de um corpo ou de uma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma de um número e de uma referência (VIM, 2008). Quando falamos em mensurando nos referimos à grandeza que se pretende medir, como por exemplo, o diâmetro de um eixo, a temperatura de um ambiente, o torque de uma porca etc.

Assim como em todos os setores da indústria, a metrologia também está presente na manutenção de aeronaves e desempenha uma função relevante durante todo processo de manutenção. Em voo, a metrologia está presente nos instrumentos de controle na cabine de comando, como por exemplo, a altitude, o empuxo dos motores, a temperatura, a velocidade, assim como nos controles de voo, nos sensores etc. Na rotina de manutenção aeronáutica, a metrologia possui grande relevância visto que ajustes de peças, avaliações de danos, inspeções qualitativas e definições de engenharia dependem diretamente dela.

II.1. O Erro de Medição

O erro de medição é caracterizado pela diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência (VIM, 2008). É importante salientar que por menor que o erro possa se apresentar, ele estará sempre presente em qualquer medição. Como não é possível a realização de uma “medição perfeita”, uma vez que toda ela sofre influências, não se consegue obter um valor verdadeiro para uma grandeza qualquer. Em função disso, existe sempre presente, mesmo que em quantidade que muitas vezes não se consegue mensurar, “o erro de medição”, que por sua vez, é a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência, conforme apresentado na Figura II.1 (VIM, 2008).

$$E = R - V \tag{2.1}$$

O erro de medição pode ser desmembrado em duas parcelas: o erro sistemático (E_S) e o erro aleatório (E_A), conforme Equação 2.2.

$$E = E_S + E_A \tag{2.2}$$

O “erro sistemático” é um componente do erro de medição que é causado por fontes conhecidas ou desconhecidas. Em medições repetidas, o “erro sistemático” permanece constante ou varia de maneira previsível, podendo-se aplicar uma correção para compensá-lo quando o mesmo é proveniente de fonte conhecida. Essa compensação pode assumir diferentes formas, tais como a adição de um valor ou a multiplicação por um fator, ou a aplicação de uma equação. O “erro aleatório” é outra componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. O “erro aleatório” de um conjunto de medições repetidas formam uma distribuição que pode ser assumida por sua esperança matemática ou valor esperado, o qual é geralmente assumido como sendo zero, e por sua variância.

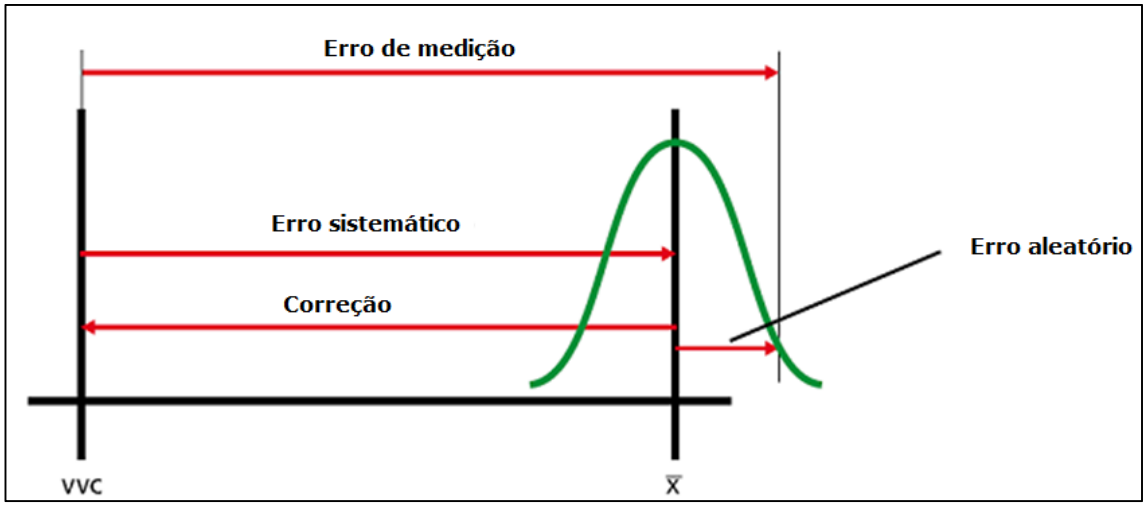


Figura II.1. Representação gráfica do erro de medição (COUTO, 2002). Figura adaptada.

II.2. Fontes de Erros

O comportamento metrológico do sistema de medição é influenciado por perturbações externas e internas. Fatores externos podem provocar erros, alterando diretamente o comportamento do sistema de medição ou agindo diretamente sobre a grandeza a medir.

De acordo com a Figura II.2, de uma maneira geral, o resultado e, consequentemente, a qualidade da medição são influenciadas pelos seguintes itens: matéria-prima, meio ambiente, método, metrologista e pelo equipamento responsável pela medição.

Alguns critérios de aceitação dos valores medidos foram desenvolvidos como, por exemplo, o Critério de Chauvenet, o Critério de Dixon e o Critério de Grubbs. Dentre os critérios de aceitação, o mais simples é o Critério de Chauvenet, que será usado nesta dissertação e detalhado no Tópico II.2.1 a seguir.

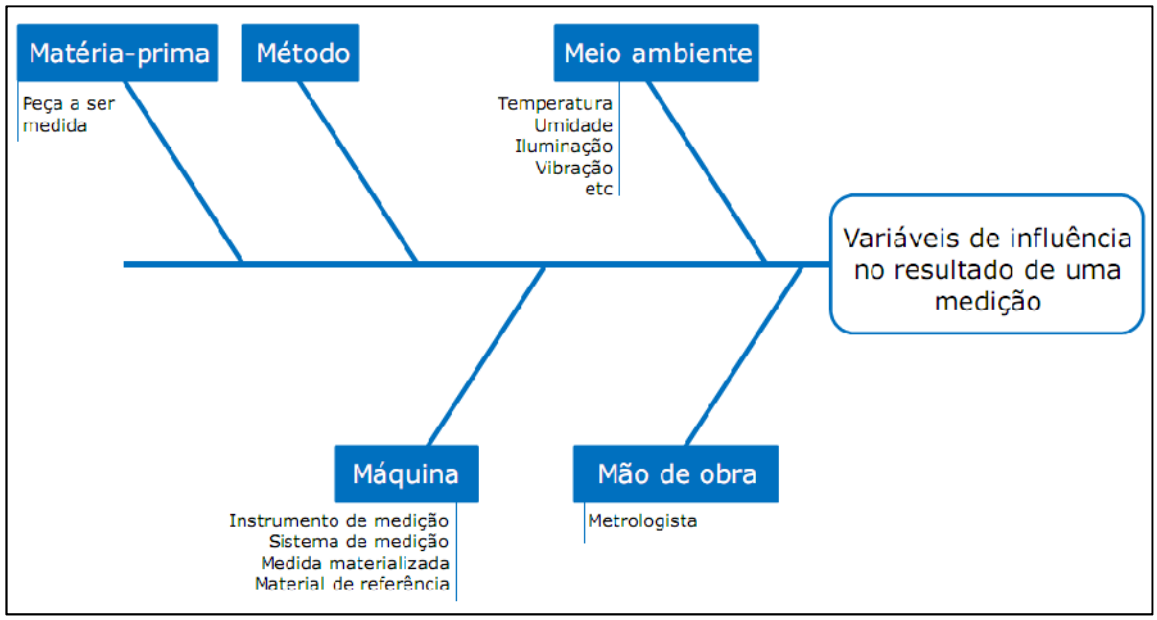


Figura II.2. Principais fontes de erros de medição (OLIVEIRA, 2008). Figura adaptada.

II.2.1. Critério de Chauvenet

Quando se realiza uma sequência de n medições de um mesmo objeto, é possível que certos valores da amostra apresentem dispersão acima do máximo permitido, de acordo com critérios específicos. Em geral, tais resultados podem ser atribuídos a determinados fatores que geram distorções significativas, afetando sensivelmente a média aritmética dos valores, e, consequentemente, a exatidão e a repetitividade do processo. É razoável, portanto, se utilizar de certos critérios que analisam cada ponto da amostra, a fim de se verificar se eles deverão ou não fazer parte da mesma. O Critério de Chauvenet é um dos métodos mais simples e mais usados para realizar essa verificação. A Equação 2.3 apresenta o referido critério.

$$r = \frac{|x_i - \bar{X}|}{S(x)} \tag{2.3}$$

Onde,

r é o índice a ser encontrado para comparação;

x_i é o valor a ser testado;

$\bar{X}$ é a média aritmética da amostra; e

$S(x)$ é o desvio-padrão amostral.

Considere R_C como sendo o limite de rejeição de Chauvenet. O valor "x_i" deverá ser excluído do conjunto amostral, se o valor de "r" for maior do que o valor de "R_C" (VUOLO, 1996), obtido da Tabela II.1.

Tabela II.1. Determinação da variável R_c em função do número de medições realizadas (LINK, 2000).

n	2	3	4	5	6	7	10	15	25	50	100
R_c	1,15	1,38	1,54	1,65	1,73	1,80	1,96	2,13	2,33	2,57	2,81

Considerando desvios $\theta = (x_i - x_{mv})$, onde x_{mv} é o valor médio verdadeiro, a probabilidade de ocorrer um desvio com módulo maior que R_c é dada por:

$$P_0 = \int_{-\infty}^{-R_c} G(\theta)d\theta + \int_{+R_c}^{+\infty} G(\theta)d\theta \quad (2.4)$$

Considerando-se n medições, o valor médio para o número de resultados, tais que $|\theta| > R_c$ é dado por:

$$\overline{nf} = p_0 \times n \quad (2.5)$$

Para um dado R_c, espera-se que em média, $\overline{nf}$ resultados ocorram fora dos limites de Chauvenet $(|\theta| > R_c)$. Nesse critério, o valor R_c é calculado de forma que o número esperado de resultados fora dos limites seja 0,5. Logo: $\overline{nf} = p_0 \times n = 0{,}5$. Daí tem-se:

$$p_0 = \frac{1}{2.n} \quad (2.6)$$

Substituindo-se a Equação 2.6 na Equação 2.4, obtém-se:

$$p_0 = 1 - \int_{-R_c}^{+R_c} G(\theta)d\theta = \frac{1}{2.n} \quad (2.7)$$

Os valores de R_c poderão ser calculados em função do número de medições, se a distribuição $G(\theta)$ for conhecida.

II.2.2. Critério de Dixon

O critério de Dixon para rejeição de valores suspeitos de uma população é também conhecido como Teste Q, onde o valore de Dixon define-se como a relação entre o valore suspeito e o valor mais próximo a este e a diferença entre o maior e o menor valore do conjunto em questão (OLIVEIRA, 2008).

Para realização do teste calcula-se o valor de $Q_{calculado}$ e compara-o com o valor de $Q_{tabelado}$. A Equação 2.8 mostra o critério de rejeição deste teste.

$$Q_{calculado} \geq Q_{tabelado} \tag{2.8}$$

O Teste Q utiliza estatística através da tabela de Dixon onde se encontram os valores críticos que são comparados com os valores retirados da amostra. Para isso, é importante que o teste obedeça a seguinte ordem:

- Ordenar os valores da amostra em ordem crescente;
- Calcular o valor de Q;
- Comparar o valor de Q com o valor crítico da tabela de Dixon.

A Equação 2.9 mostra como deve ser realizado o cálculo do valor de $Q_{calculado}$ para uma amostra contendo entre 3 e 7 valores e a Tabela II.2 mostra os valores críticos de Q ($Q_{tabelado}$).

$$Q_{calculado}^{3\leftrightarrow7} = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1} \tag{2.9}$$

Tabela II.2. Valores críticos de Q (P = 0,05), confiabilidade de 95% (OLIVEIRA, 2008).

n	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor crítico	0,970	0,829	0,710	0,628	0,569	0,608	0,564	0,530

II.3. Incerteza de Medição

Como mencionado anteriormente, nenhuma medição é perfeita. Isso se deve ao fato de existir uma incerteza da medição que se caracteriza pela dúvida existente no resultado de qualquer medição. Essa incerteza é definida como sendo um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas (VIM, 2008). A incerteza é um conceito chave para a expressão do resultado da medição (MAURIS, 2006). Compreende componentes provenientes de efeitos sistemáticos, tais como componentes associadas a correções e valores atribuídos a padrões, assim como a incerteza definicional. Algumas vezes tais efeitos sistemáticos não são corrigidos, sendo incorporados componentes de incerteza associada (VIM, 2008). A incerteza de medição é tão importante que um resultado de medição não é considerado satisfatório ou completo se a mesma não for informada. Ela fornece segurança ao resultado da medição (FIDÉLIS, 2010). A incerteza geralmente engloba muitas componentes, algumas delas podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo A que é a incerteza estatística, e outras por uma avaliação do Tipo B caracterizada pela atribuição de uma distribuição probabilística.

A metodologia adotada para a expressão da incerteza de medição é padronizada de acordo com o “Guia para expressão da incerteza de medição” – ISO GUM. O ISO GUM provê as bases para o uso das medições e suas incertezas (SLEELE, 2006). Ele recomenda o uso de uma incerteza padronizada combinada para expressar a incerteza de medição (WOOD et al., 1998). A Figura II.3 apresenta a estrutura esquemática para determinação da incerteza de medição (ISO GUM, 2003).

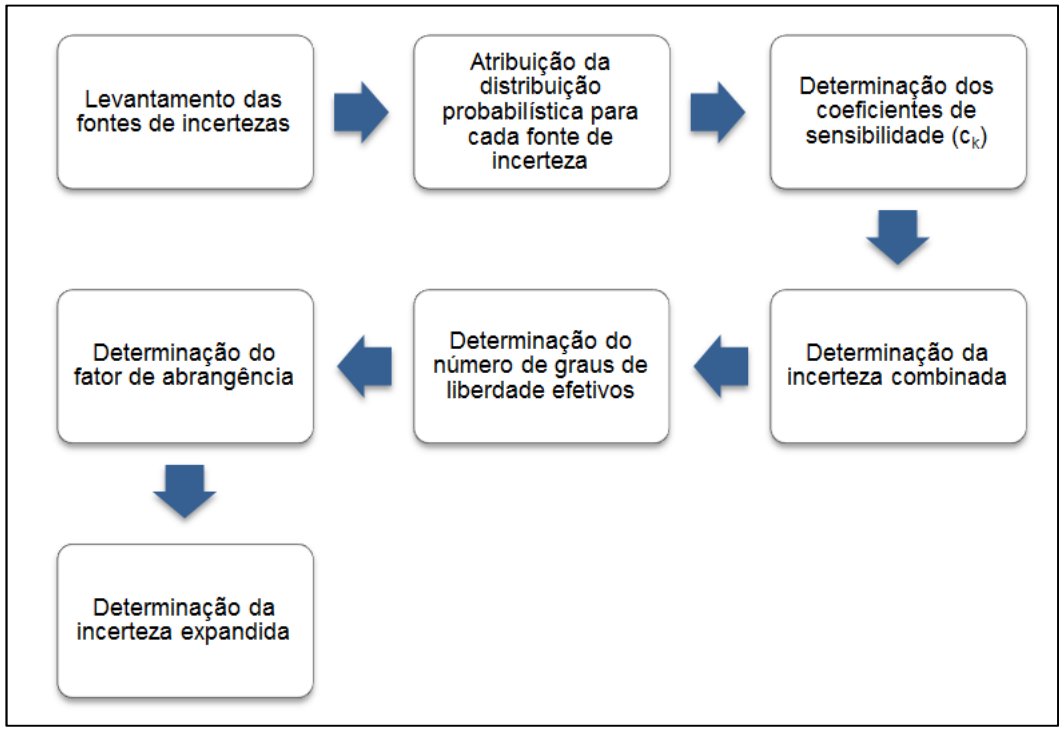


Figura II.3 – Método de determinação da incerteza de medição (ISO GUM, 2003).

É importante ressaltar que nem todas as fontes identificadas de incerteza durante uma avaliação da incerteza contribuem significativamente para a incerteza padrão combinada; de fato, na prática é provável que somente um pequeno número de incertezas contribua (EA-4/16, 2003).

II.3.1. Avaliação de Incerteza do Tipo A

A componente da incerteza do Tipo A é um tipo de incerteza avaliada estatisticamente a partir do desvio-padrão (S), conforme Equação 2.10. Corresponde a uma avaliação de uma componente da incerteza de medição por uma análise estatística dos valores medidos, obtidos sob condições definidas de medição. A influência que ela exerce sobre o resultado é tipicamente aleatória.

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}} \qquad (2.10)$$

Onde $\bar{X}$ é a média aritmética amostral dada pela Equação 2.11.

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (2.11)$$

II.3.2. Avaliação das Incertezas do Tipo B

A avaliação da incerteza do Tipo B corresponde à avaliação de uma componente da incerteza de medição determinada por meios diferentes daquele adotado para a avaliação do Tipo A. Por não serem obtidas por método estatístico, essas incertezas são chamadas de incertezas do Tipo B, sendo atribuídas distribuições probabilísticas ao valor do desvio. Existe uma necessidade de quantificação dessas incertezas através de meios mais simples do que uma investigação minuciosa das diversas fontes de incertezas, visto que tal processo demandaria um custo e tempo bastante elevados, tornando-se completamente inviáveis para os diferentes sistemas de medição. Para a realização do levantamento das possíveis fontes responsáveis pela variabilidade do resultado da medição, deve-se basear em informações do tipo (OLIVEIRA, 2008):

- Dados de medições anteriormente realizadas;
- Experiência adquirida com medições idênticas;
- Conhecimento adquirido com o equipamento e material, objeto da medição;

- Especificações do fabricante; e
- Dados de certificados de calibração.

A Equação 2.12 define a forma como a incerteza do Tipo B é apresentada.

$$u_B = \frac{q}{w} \tag{2.12}$$

Onde:

u_B é a incerteza padronizada do Tipo B;

q é o estímulo causador do desvio; e

(w) refere-se ao divisor para a distribuição de probabilidade associada ao desvio, dentre as quais, as mais utilizadas são a distribuição retangular e a distribuição triangular, representadas pelas Figuras II.4 e II.5, respectivamente. Assim sendo, toda incerteza que não for do Tipo A será considerada do Tipo B.

II.3.3. Distribuição Retangular

Em diversos casos, pode ser possível estimar o limite superior e o inferior para uma dada grandeza de influência. Neste caso, pode-se afirmar que a probabilidade de que o valor da grandeza esteja dentro do valor compreendido por a_- (limite inferior) até a_+ (limite superior) é igual a um e, consequentemente, que a probabilidade do valor da grandeza estar fora deste intervalo é zero. Como não se conhece o comportamento da grandeza dentro do intervalo, considera-se que é igualmente provável que o referido valor esteja em qualquer lugar dentro dele. Este conceito refere-se à distribuição conhecida como distribuição retangular, representada na Figura II.4.

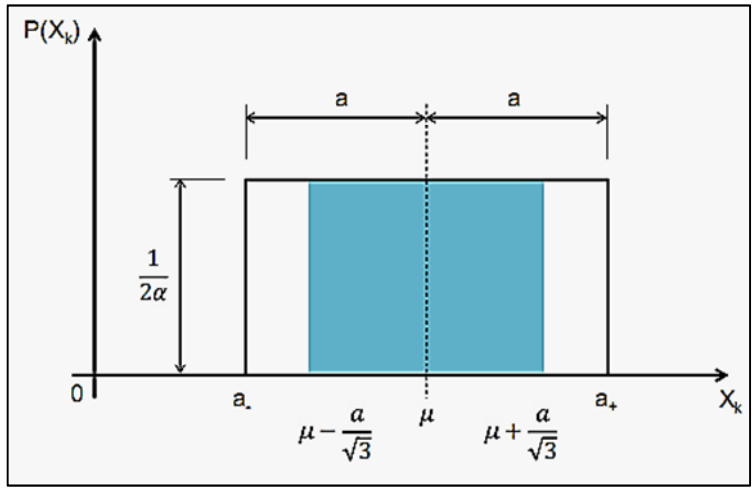


Figura II.4. Distribuição retangular.

Nesta distribuição, a função $p(x)$ é uma reta horizontal variando de a_- até a_+, com intervalo $2a$. Como a área do retângulo é unitária, $p(x)$ é dada pela Equação 2.13. Por sua vez, a abscissa do ponto médio da distribuição é obtida através da Equação 2.14 (POTTER, 2000).

$$p(x) = \frac{1}{2a} \tag{2.13}$$

$$u(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx = \int_{0}^{2a} x\frac{1}{2a}dx \tag{2.14}$$

O resultado da Equação 2.12 é apresentado pela Equação 2.15 (LINK, 2000).

$$u(x) = \frac{1}{2a} \times \frac{x^2}{2}\Big|_0^{2a} = \frac{4a^2}{4a} = a \tag{2.15}$$

A região da Figura II.4 demarcada em tom de azul corresponde a uma probabilidade de aproximadamente 68%. A distância entre o ponto médio e a linha correspondente a essa probabilidade é representada pela Equação 2.16 (LINK, 2000). O primeiro termo desta equação é obtido através da Equação 2.17, cujo resultado é mostrado na Equação 2.18 (POTTER, 2000).

$$\lambda^2 = \mu(x^2) - [\mu(x)]^2 \tag{2.16}$$

$$\mu(x^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2\, p(x)dx = \int_{0}^{2a} \frac{1}{2a}dx \tag{2.17}$$

$$\mu(x^2) = \frac{1}{2a} \times \frac{x^3}{3}\Big|_0^{2a} = \frac{8a^2}{6a} = \frac{4a^2}{3} \tag{2.18}$$

Substituindo-se as Equações 2.16 e 2.18 em 2.17, obtém-se a Equação 2.19. O valor da incerteza de medição padronizada com aproximadamente 68% de confiabilidade da

grandeza “x”, considerando-se uma distribuição retangular é obtida extraindo-se a raiz quadrada de λ na Equação 2.19, obtendo-se, portanto, a Equação 2.20.

$$\lambda^2 = \frac{4a^2}{3} - a^2 \tag{2.19}$$

$$\lambda^2 = \frac{a^2}{\sqrt{3}} \tag{2.20}$$

II.3.4. Distribuição Triangular

Existem situações, no entanto, que mesmo havendo o desvio, a probabilidade de que o mesmo encontre-se próximo da média é maior que nos extremos a_- e a_+. Em tais situações é mais prudente substituir a distribuição retangular por uma distribuição triangular, conforme Figura II.5.

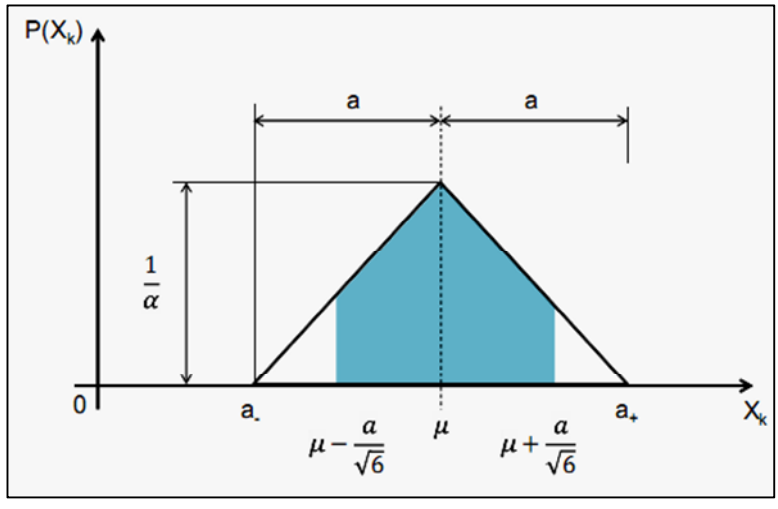


Figura II.5. Distribuição triangular.

Neste caso, como a função $p(x)$ não é continua no intervalo compreendido de a_- até a_+, ou seja, no intervalo de 0 até $2a$, a integração deverá ocorrer nos intervalos de a_- ao centro, ou seja de 0 até a, e do centro até a_+, ou seja, de a até $2a$. Para o intervalo de 0 até a, a função de densidade de probabilidade $p_1(x)$ é dado pela Equação 2.21. Já para o trecho de a até $2a$, a Equação 2.22 apresenta o valor da função densidade de probabilidade $p_2(x)$ para este intervalo (LINK, 2000).

$$\frac{p_1(x)}{x} = \frac{1/a}{a} \therefore p_1(x) = \frac{x}{a^2} \quad (2.21)$$

$$\frac{p_2(x)}{(2a-x)} = \frac{1/a}{a} \therefore p_2(x) = \frac{(2a-x)}{a^2} \quad (2.22)$$

A abscissa do ponto médio da distribuição, tomando-se como base a Equação 2.14 e adaptando-a para os dois trechos, é dada pela Equação 2.23. O resultado desta equação é apresentado pelas Equações 2.24 e 2.25.

$$\mu(x) = \int_0^a x p_1(x) dx + \int_a^{2a} x p_2(x) dx = \int_0^a x . \frac{x}{a^2} dx + \int_a^{2a} x . \frac{(2a-x)}{a^2} dx \quad (2.23)$$

$$\mu(x) = \frac{x^3}{3a^2}\Big|_0^a + \left[\frac{2ax^2}{2a^2}\right] - \frac{x^3}{3a^2}\Big|_a^{2a} \quad (2.24)$$

$$\mu(x) = \frac{a}{3} + 4a - \frac{8a}{3} - a + \frac{a}{3} = a \quad (2.25)$$

A distância entre o ponto médio e a linha correspondente a um dos extremos da região onde a probabilidade é de aproximadamente 68% (região em tom azul), é dada pela Equação 2.26, e para se obter o valor de λ, há a necessidade de se determinar o valor de $\mu(x^2)$, conforme Equações 2.26 e 2.27, tomando-se como base a Equação 2.14. O valor de $\mu(x^2)$ é apresentado na Equação 2.28.

$$\mu(x^2) = \int_0^a x^2 . \frac{x}{a^2} dx + \int_a^{2a} x^2 . \frac{(2a-x)}{a^2} dx \quad (2.26)$$

$$\mu(x^2) = \frac{x^4}{4a^2}\Big|_0^a + \left[\frac{2ax^3}{3a^2}\right] - \frac{x^4}{4a^2}\Big|_a^{2a} \quad (2.27)$$

$$\mu(x^2) = \frac{a^2}{4} + \frac{16a^2}{3} - \frac{16a^2}{4} - \frac{2a^2}{3} + \frac{a^2}{4} = \frac{7a^2}{6} \quad (2.28)$$

Substituindo-se as Equações 2.25 e 2.28 na Equação 2.16, obtém-se:

$$\lambda^2 = \mu(x^2) - [\mu(x)]^2 = \frac{7a^2}{6} - a = \frac{a^2}{6} \quad (2.29)$$

O valor da incerteza de medição padronizada considerando-se uma distribuição triangular é obtido, extraindo-se a raiz quadrada de λ na Equação 2.29, chegando-se à Equação 2.30.

$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (2.30)$$

II.3.5. Distribuição Normal e t de Student

A distribuição normal, também conhecida como Gaussiana, é o tipo de distribuição contínua mais usada em estatística. É um tipo de distribuição com grande importância devido a três razões principais (LEVINE et al., 2008):

- Inúmeros fenômenos contínuos tendem a segui-la ou podem ser aproximados por meio dela;
- Pode-se utilizá-la para aproximar várias distribuições de probabilidade discretas e;
- Ela oferece a base para a inferência estatística clássica devido à sua afinidade com o teorema do limite central.

A expressão matemática que representa a função de densidade da probabilidade para esta distribuição, podendo a variável aleatória contínua x assumir qualquer valor no intervalo $-\infty < x < +\infty$ (LEVINE et al., 2008), é apresentada na Equação 2.31.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^*-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.31)$$

Utilizando-se a fórmula da transformação, qualquer variável normal x pode ser convertida em uma variável normal padronizada z conforme Equação 2.32. (Figura II.6).

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (2.32)$$

A variável aleatória padronizada z^* terá sempre média aritmética μ igual a zero e desvio padrão σ igual a um. Logo, a função de densidade de probabilidade de uma variável normal padronizada é dada pela Equação 2.33. A Figura II.6 apresenta o gráfico da distribuição normal padronizada. A Figura II.7 apresenta a probabilidade associada à área sob a curva.

$$f(z^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} z^{*2}} \tag{2.33}$$

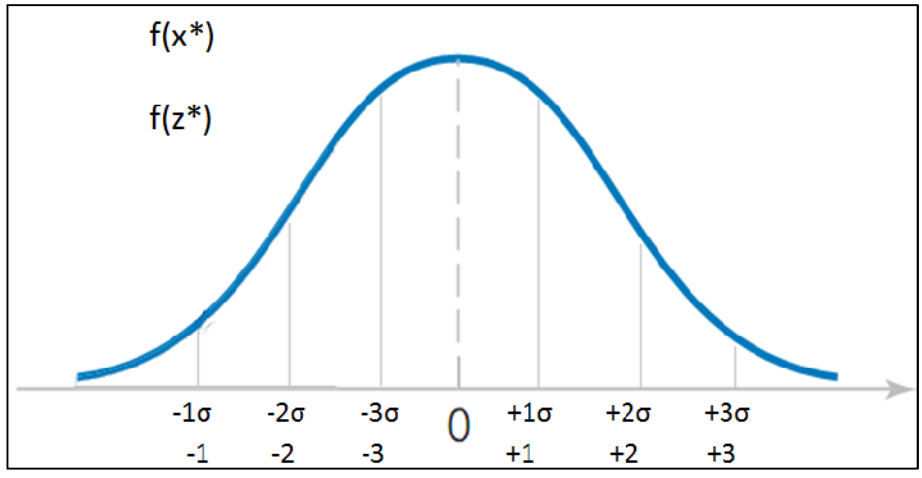


Figura II.6. Gráfico esquemático da distribuição normal padronizada (MONTGOMERY, 2003). Figura adaptada.

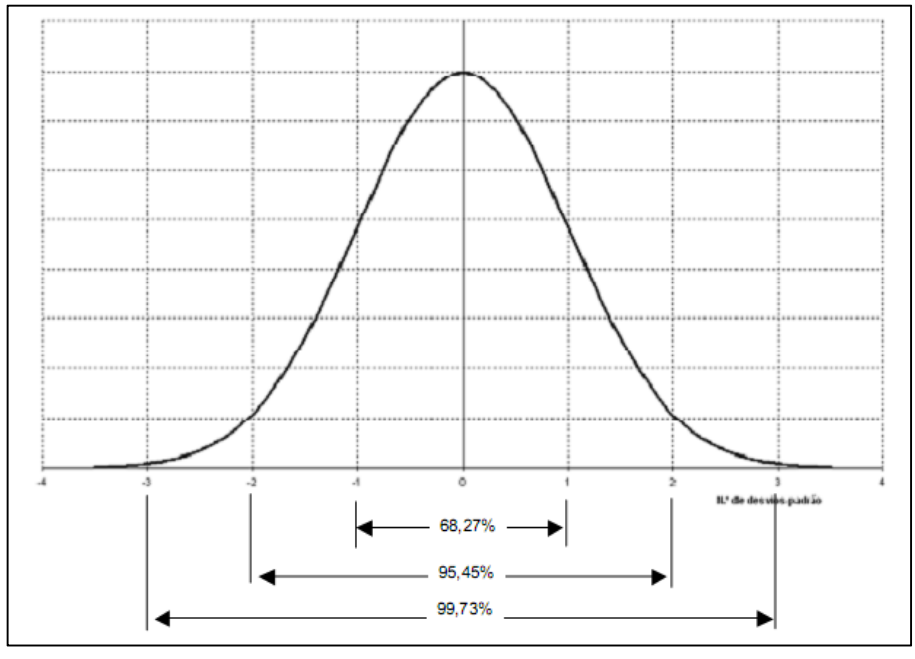


Figura II.7. Probabilidade associada à área sob a curva (CABRAL, 2004).

Para pequenas amostras a distribuição normal apresenta valores menos precisos, o que nos leva a utilizar um modelo melhor, a distribuição t de Student. Existe um valor de t para cada tamanho de amostra, sendo que à medida que a amostra n cresce, a distribuição t de Student se aproxima da distribuição normal. Para um tamanho de amostra menor que 120, o desvio padrão amostral S se torna uma melhor estimativa do desvio padrão da população σ (LEVINE et al., 2008). A função de densidade de probabilidade da distribuição t de Student está representada na Equação 2.34 (KREYSZIG, 1985).

$$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\sqrt{n\pi}\times\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \times \frac{1}{\left(1+\frac{z^2}{n}\right)^{\frac{n+1}{2}}} \tag{2.34}$$

II.3.6. Incerteza Padrão Combinada (u_c)

Refere-se à incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido por meio de valores de várias outras grandezas (ISO GUM, 2003). Representa um intervalo no qual o valor mais provável para uma determinada medição pode variar, com confiabilidade de aproximadamente 68% (OLIVEIRA, 2008). A Equação 2.35 expressa a incerteza padrão combinada e no caso em que todas as grandezas de entrada são independentes

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i) \tag{2.35}$$

onde f é a função dada na Equação 2.36, onde o mensurando Y não é medido diretamente, mas é determinado a partir de N outras grandezas $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ através de uma relação funcional f.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \tag{2.36}$$

As derivadas parcias $^{\partial f}/_{\partial x_i}$ que aparecem na Equação 2.35 representam os coeficientes de sensibilidade c do resultado, y, às diversas grandezas de entrada x_i (CABRAL, 2004). A equação 2.37 representa o coeficiente de sensibilidade.

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \tag{2.37}$$

Em situações em que as grandezas de entrada são relacionadas, isto é são interdependentes ou correlacionadas, a expressão apropriada para a variância combinada $u_c^2(y)$, associada com o resultado de uma medição está mostrada na Equação 2.38 (ISO GUM, 2003).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n} c_i^2 . u^2(x_i) + 2. \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^{n} c_i . c_j . u(x_i) . u(x_j) . r(x_i . x_j) \tag{2.38}$$

onde:

$u(x_i)$ é a fonte de incerteza associada à estimativa x_i;

$u(x_j)$ é a fonte de incerteza associada à estimativa x_j;

c_i e c_j são os coeficientes de sensibilidade;

$r(x_i, x_j)$ é o coeficiente de correlação dado pela Equação 2.39.

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i).u(x_j)} \tag{2.39}$$

II.3.7. Incerteza Expandida (U)

Refere-se à expressão da incerteza de medições com uma confiabilidade de aproximadamente 95%. É obtida multiplicando-se a incerteza combinada (u_c) por um fator de abrangência k, conforme Equação 2.40 (ISO GUM, 2003).

$$U = ku_c(y) \tag{2.40}$$

O resultado de uma medição é, então, convenientemente expresso na Equação 2.41:

$$Y = y \pm U \tag{2.41}$$

Assim, o resultado é interpretado de forma a significar que a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurando Y é y, e que $y - U$ a $y + U$ é um intervalo com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos a Y (ISO GUM, 2003).

II.3.8. Fator de Abrangência (k)

O fator de abrangência k é um coeficiente pelo qual a incerteza padrão combinada é multiplicada para se obter a incerteza de medição expandida (VIM, 2008). O valor do fator de abrangência é escolhido com base no nível da confiança requerido para o intervalo $y - U$ a $y + U$. O fator é normalmente maior do que 1 para que se tenha maior confiabilidade em afirmar que o valor verdadeiro convencional do mensurando se encontra dentro do intervalo indicado (GUPTA, 2012). Em geral, k estará entre 2 e 3. Entretanto, para aplicações especiais, k pode estar fora desta faixa (ISO GUM, 2003). A Tabela II.3 apresenta níveis de confiança para diferentes valores de k.

Tabela II.3. Percentual do nível de confiança para diferentes valores de k, considerando-se a distribuição –t, própria para o espaço amostral utilizado (ISO GUM, 2003). Tabela adaptada.

Fator de abrangência k	Nível de confiança (%)
1	68,27
2	95,45
3	99,73

II.3.9. Número de Graus Efetivos de Liberdade

O número de graus de liberdade ν de uma variável estatística pode ser interpretado como sendo o número de medições independentes menos o número de parâmetros já calculados a partir destes dados (CABRAL, 2004). Os graus de liberdade para cada estimativa de incerteza pode muitas vezes ser determinado, independentemente de se a incerteza é de tipo A ou do tipo B (CASTRUP, 2007).

Os graus de liberdade são iguais a $n - 1$ quando estiverem associados ao desvio-padrão de uma amostra com n repetições, isto é, quando a incerteza for do tipo A (ISO GUM, 2003). Para incertezas do tipo B é usual considerar que $\nu = \infty$. A Tabela II.4 mostra a relação entre graus de liberdade e o tipo de incerteza.

A confiabilidade da incerteza atribuída ao mensurando, está atribuída pelo seu número de graus efetivos de liberdade ν_{eff} (CABRAL, 2004). O número de graus efetivos de liberdade ν_{eff} da incerteza padrão pode ser estimado com base na chamada fórmula de Welch-Satterthwaite, conforme mostrado na Equação 2.42.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \tag{2.42}$$

Onde:

υ_{eff} é o número de graus efetivos de liberdade;

$u_i(x)$ é a incerteza padrão associada a i-ésima fonte de incerteza;

ν_i é o número de graus de liberdade associado a i-ésima fonte de incerteza; e

N é o número total de fontes de incerteza analisadas.

Tabela II.4. Valor do número de graus de liberdade associado a cada fonte de incerteza.

Tipo de incerteza	Graus de liberdade
Tipo A	$\nu = n - 1$ (n é o número de medições realizadas)
Tipo B	$\nu = \infty$ (infinito)

II.3.10. Influência da Incerteza de Medição na Tolerância de Processo

Devido às folgas, desvios, conversões de escalas, desgastes, imperfeições e etc. o estabelecimento de uma tolerância para o projeto de peças no tocante aos parâmetros mensuráveis se faz necessário, visto que existe a necessidade de definir as variações que tais parâmetros podem apresentar com relação à dimensão nominal, de acordo com as exigências funcionais das mesmas.

Em função disso, na definição do projeto, as peças apresentam em suas medidas um limite máximo e um limite mínimo em que podem variar as suas dimensões nominais sem comprometer a sua funcionalidade.

A tolerância dimensional é a diferença entre os limites de tolerância superior e inferior (ISO 3534-2, 1993). A Tabela II.5 mostra alguns conceitos importantes.

Tabela II.5. Conceitos importantes ligados à tolerância dimensional (GUIMARÃES, 1999).

Conceito	Definição
Dimensão nominal	Dimensão teórica indicada no desenho da peça.
Dimensão efetiva	Dimensão da peça obtida através de sua medição
Dimensão máxima	Máxima dimensão que a dimensão efetiva pode apresentar sem comprometer a funcionalidade da peça.
Dimensão mínima	Mínima dimensão que a dimensão efetiva pode apresentar sem comprometer a funcionalidade da peça.
Tolerância dimensional	Valor que expressa a diferença entre as dimensões máxima e mínima que uma determinada dimensão deverá apresentar sem comprometer a funcionalidade de uma peça.

A condição ideal estabelece que a incerteza de medição deve ser dez vezes menor que a tolerância de processo, podendo chegar a apenas três vezes menor. Dependendo da aplicação, valores de incerteza de medição de até um terço da tolerância de processo podem ser admitidos, conforme Equações 2.43 e 2.44 (OLIVEIRA, 2008).

$$U = \frac{1}{10} . t \qquad (2.43)$$

$$U = \frac{1}{3}.t \tag{2.44}$$

A zona de conformidade deve levar em consideração o valor da incerteza de medição, conforme mostrado na Figura II.8 (UNE-EN ISO 14253-1, 1998).

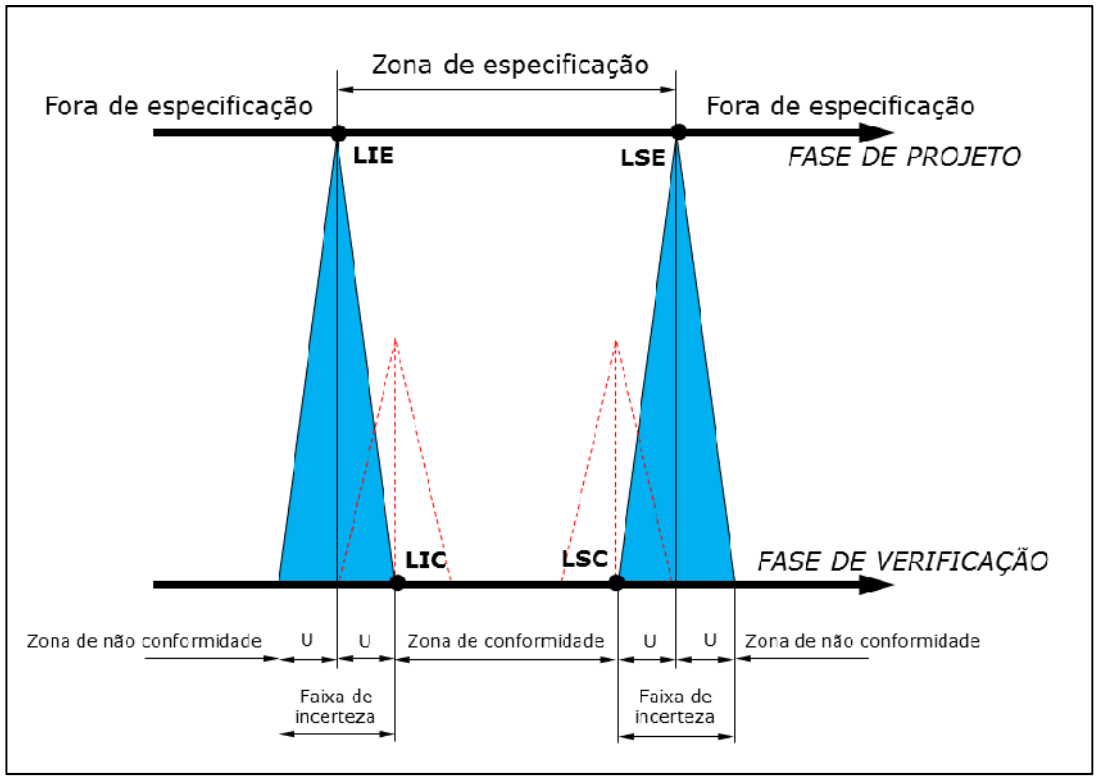


Figura II.8. Estabelecimento das zonas de conformidade e não conformidade (UNE-EN ISO 14253-1, 1998).

De acordo om a Figura II.8, existem, inicialmente, duas fases a serem tratadas: a fase de projeto e a fase de verificação. São concernentes à fase de projeto as dimensões nominais, limites de tolerância, a definição da zona de especificação etc. A zona de especificação é definida como sendo a área dentro da qual variam os valores da característica da peça e que inclui os limites de especificação (UNE-EN ISO 14253-1, 1998). Os limites de especificação são o limite superior de especificação (LSE) e o limite inferior de especificação (LIE). A zona de especificação é definida pela tolerância do processo. Desta forma, qualquer peça fabricada dentro desse intervalo é considerada “conforme”. Por outro lado, uma peça gerada fora dessa faixa é considerada “não conforme”.

A fase de verificação é usada para comprovar se uma dimensão de uma determinada peça foi ou não gerada dentro da zona de especificação. Dentro da fase de verificação se definem três fases distintas:

- zona de conformidade;
- zona de não conformidade; e
- faixa de incerteza.

Uma prática comumente usada nas indústrias é a aprovação de peças quando a medição cai dentro da zona de especificação. Desta forma a faixa de incerteza de medição do instrumento ou sistema de medição é desconsiderada. Esta prática poderá levar a dois tipos de problema:

- reprovação de peças boas; ou
- Aprovação de peças defeituosas.

As Figuras II.9 e II.10 mostram graficamente esses problemas.

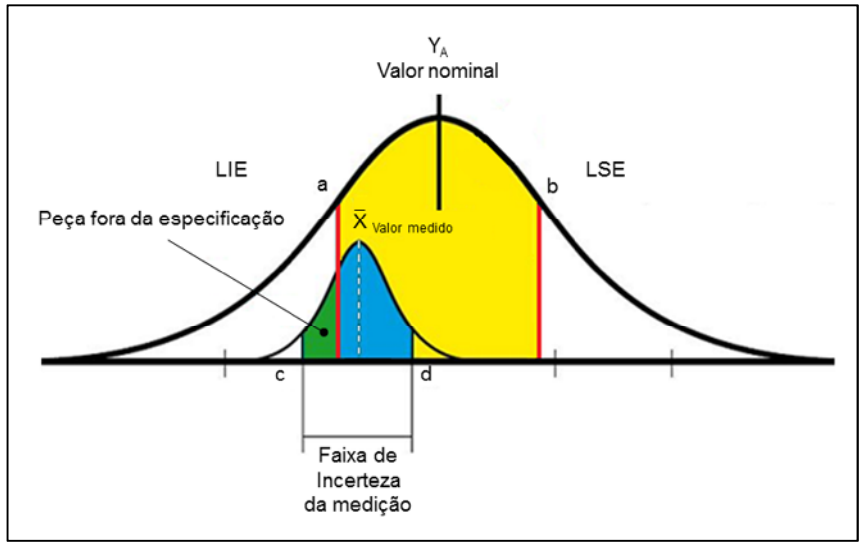


Figura II.9. O problema de se aprovar peças defeituosas (OLIVEIRA, 2008). Figura adaptada.

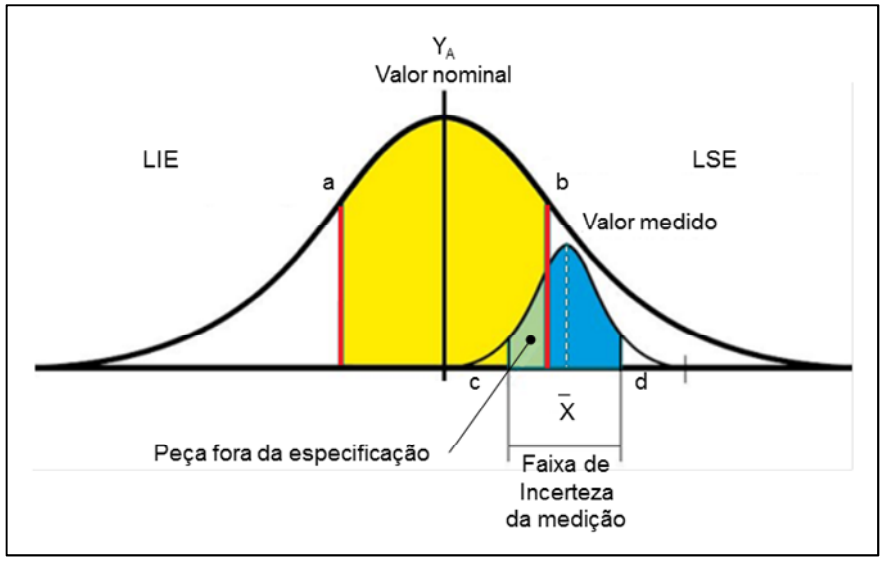


Figura II.10. O problema de se rejeitar peças boas (OLIVEIRA, 2008). Figura adaptada.

II.4. Calibração

A calibração é uma operação que permite avaliar as incertezas do processo de medição, além de identificar os desvios entre os valores indicados por um instrumento e os valores convencionalmente verdadeiros (CNI. CONPI, 2002). A Figura II.11 apresenta, esquematicamente, esse conceito.

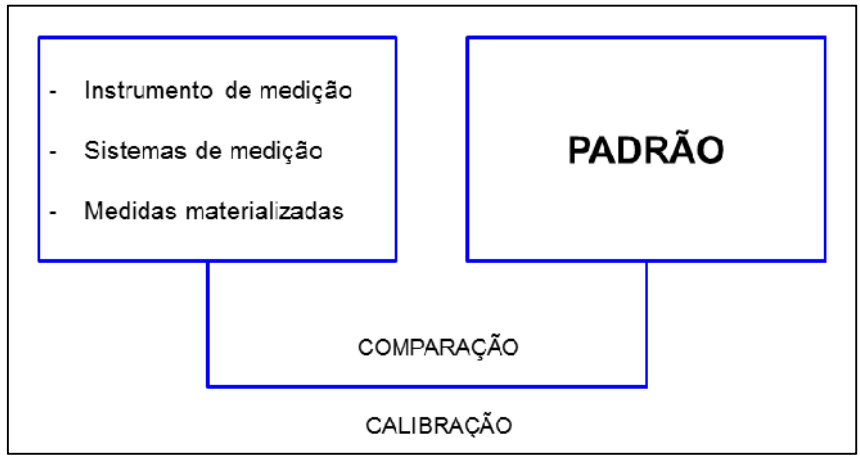


Figura II.11. Comparação entre um item (instrumento de medição, sistema de medição, medida materializada ou material de referência) e um padrão (OLIVEIRA, 2008).

O procedimento de transferir uma unidade de medida de um padrão para um instrumento de medida de menor precisão pode ser realizado de duas formas diferentes: calibração (real) e verificação (calibração simplificada) (FRIDMAN, 2012).

A calibração real deve ser distinguida da calibração simplificada (ISO GUM, 2003). A calibração real resulta na determinação de uma relação entre as indicações de um instrumento de medição e os valores verdadeiros correspondentes de um mensurando. Essa relação pode ser expressa sob a forma de uma tabela, um gráfico, ou uma função, ou ainda sob a forma de uma tabela de correções às indicações de um instrumento de medição. A calibração simplificada, que pode ser chamada apenas de verificação, simplesmente revela se o erro de um instrumento de medição ou sistema de medição excedeu seus limites específicos. Essencialmente, verificação é um caso específico de controle de qualidade durante a fabricação ou no intervalo entre calibrações. E, pelo fato de ser controle de qualidade, os resultados verificados devem apresentar algumas rejeições. Atualmente, a calibração é uma rotina nas organizações que possuem certificação na norma de qualidade ISO 9001 (ISO 9001, 2008).

Com relação especificamente à incerteza de medição, quanto menor a mesma se apresentar no padrão, mais confiável será a calibração. Visando alinhar os requisitos técnicos e

econômicos, como já mencionado no Tópico II.3.10, adota-se uma relação 1/10 entre a incerteza do item a ser calibrado e a do padrão, ou seja, a incerteza de medição do padrão é dez vezes menor que a incerteza de medição esperada do item a calibrar, o que garante ao padrão uma casa decimal a mais em termos de confiabilidade com relação ao item a ser calibrado. Porém, no caso de uma inviabilidade econômica para obtenção dessa relação, pode-se baixá-la a até 1/3, dependendo da calibração.

Outro ponto importante de ser ressaltado é que na operação de calibração de um instrumento, é necessário expressar a incerteza associada ao resultado numérico declarado, considerada um parâmetro fundamental na quantificação da qualidade final do resultado da medição (OLIVEIRA, 2008).

A partir da calibração, é possível identificar a confiabilidade de um equipamento de medição ou padrão de trabalho, comparando os resultados da calibração com especificações de normas (COSTA-FÉLIX, 2005). Além disso, torna-se possível conhecer o comportamento do item a calibrar e determinar a sua estabilidade, minimizar os erros sistemáticos, conhecer a sua incerteza de medição e correlacionar a grandeza de entrada com a de saída, quando as mesmas não são iguais (OLIVEIRA, 2008).

II.4.1. Padrão

Padrão refere-se a uma referência na obtenção de valores medidos e incertezas de medição associadas para outras grandezas do mesmo tipo, estabelecendo assim uma rastreabilidade metrológica através da calibração de outros padrões, instrumentos de medição ou sistemas de medição (VIM, 2008). O padrão indica o valor verdadeiro convencional (VVC) numa calibração. A Figura II.12 indica a hierarquia existente entre os padrões, no tocante, por exemplo, à exatidão e incerteza de medição.

Quanto mais próximo da base da pirâmide o padrão estiver, menor será a sua precisão (FRIDMAN, 2012).

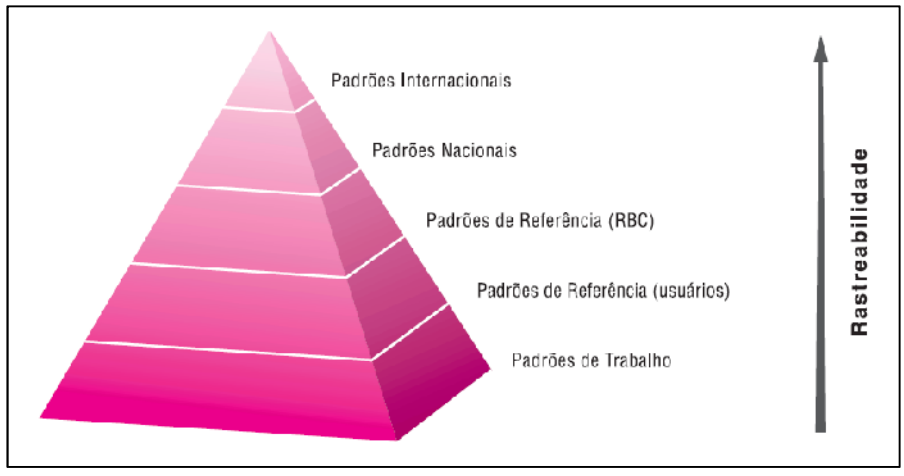


Figura II.12. Pirâmide representativa da hierarquia de padrões (CNI. CONPI, 2002).

Os padrões de trabalho encontram-se na base da pirâmide da Figura II.12. São os padrões utilizados na rotina de trabalho para controlar ou calibrar instrumentos de medição ou sistemas de medição. Geralmente são calibrados em função do padrão de referência, que por sua vez são designados para a calibração de grandezas do mesmo tipo em uma dada organização ou local.

Os padrões nacionais encontram-se um degrau acima dos padrões de referência, sendo padrões reconhecidos por uma decisão nacional para servir em um país, como base para atribuir valores a outros padrões da grandeza a que se refere.

No topo da pirâmide encontramos os padrões internacionais, localizados no *Bureau International dês Poids et Mesures – BIPM* (França), que são reconhecidos pelos signatários de um acordo internacional, com a finalidade de servir como base para o estabelecimento de valores a outros padrões a que se refere.

Para realização de verificação de espessura através de ensaio por ultrassom, por exemplo, se faz necessária a utilização de blocos-padrão para fixação dos valores de referência. O Tópico II.5.7.2 abordará mais sobre esse tema. Os blocos-padrão são reconhecidos como o principal artefato que materializa uma determinada medida e são utilizados para a calibração de medições de comprimento de instrumentos e equipamentos de medição (CONEJERO, 2006).

II.4.2. O Certificado de Calibração

Tão importante quanto calibrar é fazer uso das informações da calibração (OLIVEIRA, 2008). O certificado de calibração é o documento que reflete as informações obtidas de um instrumento de medição ou sistema de medição ou material de referência ou de uma medida

materializada, quando comparado a um padrão, sob condições específicas. Possui grande utilidade visto que através da sua leitura é possível minimizar os erros sistemáticos dos respectivos equipamentos, conhecer a incerteza de medição, conhecer sua estabilidade por meio da construção do histórico de calibrações, estabelecer o intervalo entre calibrações, além de adequar o equipamento à aplicação, com base na relação entre a incerteza de medição e a tolerância do processo.

No caso de calibração de um aparelho de ultrassom para verificação de espessura, é estabelecido por norma que o certificado deva conter diversas informações dentre as quais (ABNT-NBR 15865, 2010):

- Nome e endereço do laboratório e o local onde as calibrações foram realizadas;
- Nome e endereço do cliente;
- Identificação do método utilizado;
- Resultados da calibração com as unidades de medida e suas incertezas de medição;
- Condições ambientais sob as quais as calibrações foram feitas, que tenham influência sobre os resultados da medição;
- A incerteza da medição;

Um exemplo de certificado de calibração de blocos-padrão para medição de espessura é mostrado no Anexo 1.

II.5. Física do Ensaio por Ultrassom

II.5.1. Som

Quando as ondas sonoras têm frequência compreendida entre 20 Hz e 20.000 Hz, são percebidas pelo ouvido humano, isto é, são audíveis. Tem-se, neste caso, o fenômeno acústico denominado som. Quando as ondas sonoras possuem frequências inferiores a 20 Hz são inaudíveis e, neste caso, o fenômeno acústico denomina-se infrassom. Quando as ondas sonoras possuem frequências superiores a 20.000 Hz são também inaudíveis e, neste caso, o fenômeno denomina-se ultrassom. A Figura II.13 apresenta o campo de audibilidade das vibrações mecânicas.

Para aplicação em ensaios de materiais por ultrassom, utiliza-se, preferencialmente, a faixa de frequência entre 0,5 MHz e 15 MHz, conforme Figura II.14.

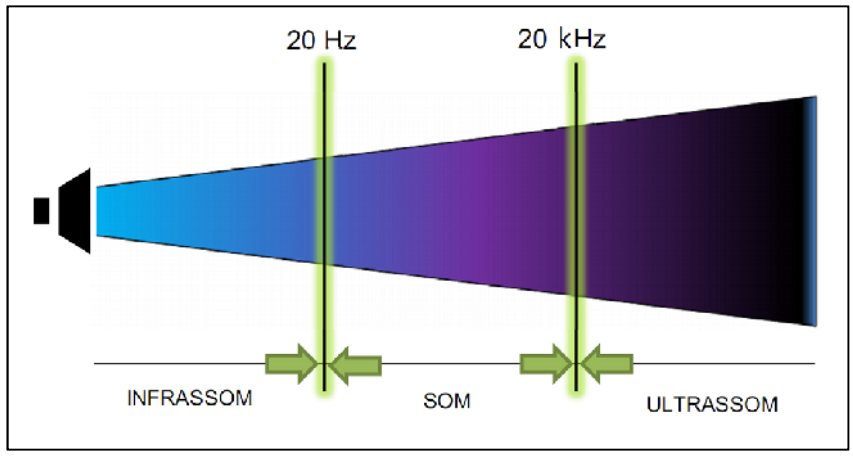


Figura II.13. Campo de audibilidade das vibrações mecânicas (ANDREUCCI, 2008).

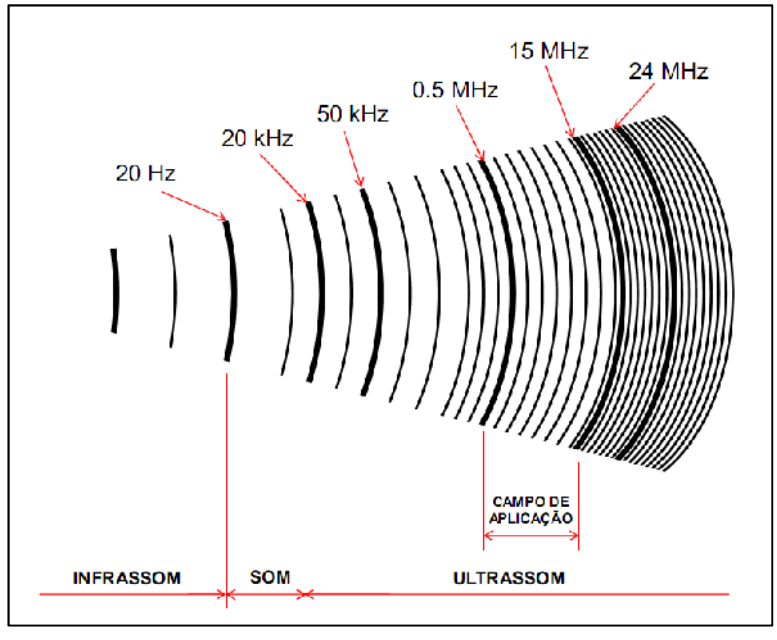


Figura II.14. Faixas de frequência do som (CTA/IFI/FQI/VEM, 2002). Figura adaptada.

II.5.2. Ondas Mecânicas

Onda é caracterizada por uma perturbação ou um abalo que se propaga em um meio. A perturbação denomina-se pulso e o movimento do pulso constitui uma onda. As ondas sonoras são simplesmente vibrações das partículas que constituem um sólido, líquido, ou gás e como uma forma de energia é, portanto, um exemplo de energia mecânica (HELLIER, 2003). As ondas sonoras não podem existir em um vácuo, visto que existe a necessidade de haver algo a vibrar.

O ensaio por ultrassom em materiais é feito com o uso de ondas mecânicas ou acústicas colocadas no meio em inspeção. Qualquer onda mecânica é composta de oscilações

de partículas discretas no meio em que se propaga. A passagem de energia acústica no meio faz com que as partículas que compõem o mesmo, executem o movimento de oscilação em torno da posição de equilíbrio, cuja amplitude do movimento será diminuída com o tempo em posição de equilíbrio, e diminuída com o tempo em decorrência da perda de energia adquirida pela onda. Assumindo-se que o meio em estudo é elástico, ou seja, que as partículas que o compõem estão rigidamente ligadas, mas que podem oscilar em qualquer direção; então se podem classificar as ondas acústicas em diversos tipos, tais como: ondas longitudinais, ondas transversais, ondas superficiais, ondas de “Lamb” etc.

II.5.2.1. Ondas Longitudinais

As ondas longitudinais também são conhecidas como ondas de compressão devido às forças de dilatação ativas (NDT RESOURCE CENTER, 2011). São ondas cujas partículas oscilam na sua direção de propagação, podendo ser transmitidas a sólidos, líquidos e gases (ANDREUCCI, 2008). Neste tipo de onda, a energia viaja através da estrutura atômica do material por uma série de movimentos de compressão e expansão. A Figura II.15 mostra uma ilustração com o comportamento típico das ondas longitudinais.

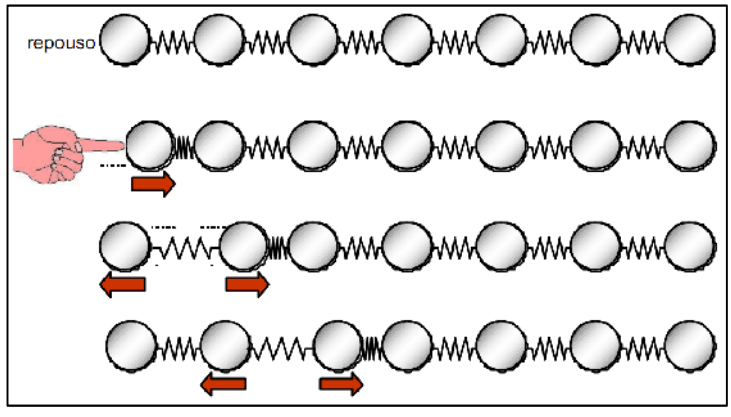


Figura II.15. Comportamento típico das Ondas Longitudinais (ANDREUCCI, 2008).

II.5.2.2. Ondas Transversais

As ondas transversais ou de cisalhamento, são ondas nas quais as partículas oscilam em ângulo reto ou perpendicular à direção de propagação. Neste caso, observa-se que os planos de partículas se mantêm na mesma distância um do outro, movendo-se apenas verticalmente. As ondas transversais requerem que um material seja acusticamente sólido para

que a propagação seja efetiva e são praticamente incapazes de se propagarem em líquidos e gases, devido às características das ligações entre partículas destes meios. As ondas transversais são relativamente fracas quando comparadas às ondas longitudinais. De fato, as ondas transversais são usualmente geradas em materiais, usando parte da energia proveniente de ondas longitudinais. A Figura II.16 mostra uma ilustração com o comportamento típico dessas ondas.

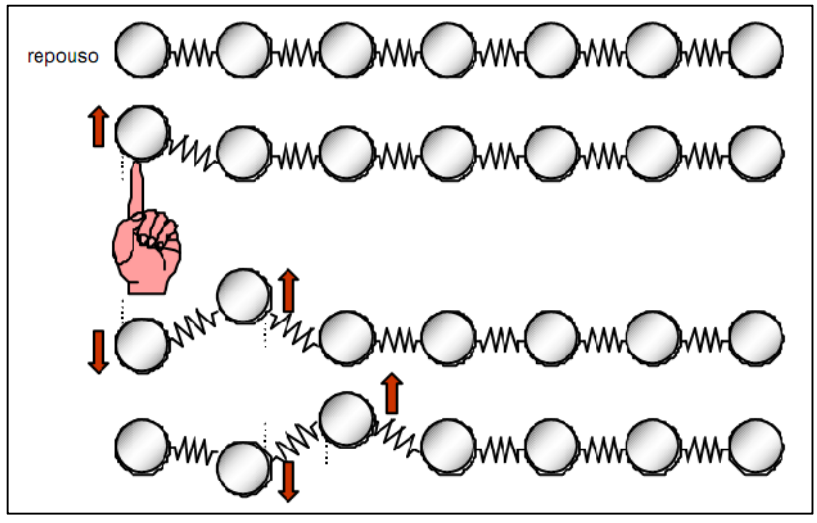


Figura II.16. Comportamento típico das ondas transversais (ANDREUCCI, 2008).

II.5.2.3. Ondas de Rayleigh

As ondas de Rayleigh ou ondas superficiais são ondas que possuem a característica de se propagar na superfície dos sólidos. Possui complexo movimento oscilatório das partículas da superfície e, possui velocidade de propagação de aproximadamente 90% da velocidade de uma onda transversal (HELLIER, 2003). Para o tipo de onda superficial que não possui a componente normal, e, portanto se propaga em movimento paralelo à superfície e transversal em relação à direção de propagação, recebe a denominação de ondas de “Love”. Sua aplicação se restringe ao exame de finas camadas de material que recobrem outros materiais. Para ondas superficiais que se propagam com comprimento de onda próxima a espessura da chapa ensaiada, neste caso a inspeção não se restringe somente à superfície, mas a todo o material. Em função dessa particularidade denominam-se as ondas de “Lamb”. As ondas superficiais combinam ambos os movimentos, transversal e longitudinal para criar um movimento orbital elíptico como mostrado na Figura II.17. O eixo maior da elipse é perpendicular à superfície do sólido. Este tipo de onda é usado para detecção de defeitos superficiais.

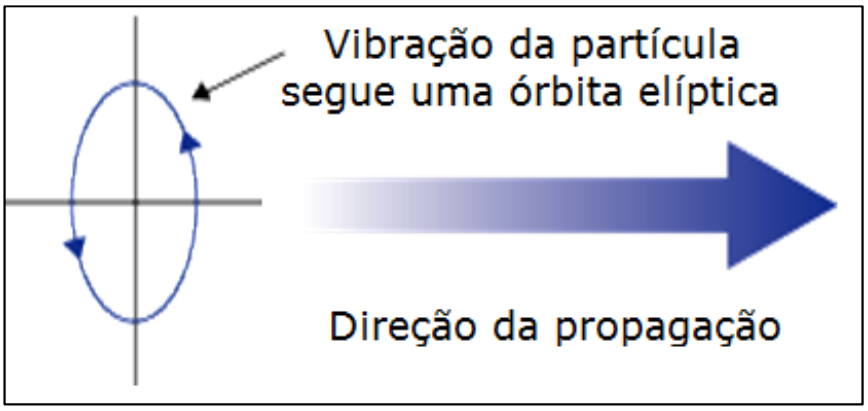


Figura II.17. Propagação da Onda de Rayleigh (NDT RESOURCE CENTER, 2011).

II.5.2.4. Ondas de Lamb

As ondas de Lamb podem ser geradas a partir das ondas longitudinais incidindo segundo um ângulo de inclinação em relação à chapa. Assim como as ondas de Rayleigh, as ondas de Lamb propagam paralelamente à superfície que está sendo ensaiada, além de possuir movimento de partícula elíptico. Com as ondas de Lamb, existem diversos modos de vibração da partícula, porém os dois modos mais comuns são o simétrico e o assimétrico, como mostrado na Figura II.18. Esse tipo de onda é mais frequente em placas, fios e tubos, afetando toda a espessura do material de teste (HELLIER, 2003).

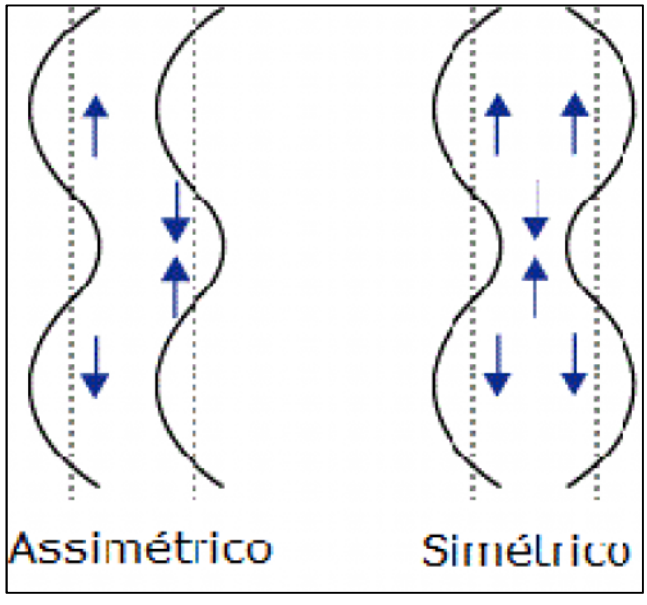


Figura II.18. Ondas de Lamb – Modos de vibração (NDT RESOURCE CENTER, 2011).

II.5.3. Frequência, Velocidade e Comprimento de Onda

As ondas acústicas ou o som são classificados de acordo com suas frequências (f) e medidos em ciclos por segundo, ou seja, o número de ondas que passam por segundo pelo ouvido humano. A unidade “ciclos por segundos” é normalmente conhecida por Hertz (Hz).

Existem várias maneiras de uma onda sônica se propagar, e cada uma com características particulares de vibrações diferentes. Velocidade de propagação (v) é definida como sendo a distância percorrida pela onda sônica por unidade de tempo. É importante ressaltar que a velocidade de propagação é uma característica do meio, sendo uma constante, independente da frequência (ANDREUCCI, 2008).

O comprimento de onda, representado pela letra grega lambda (λ), é inversamente proporcional à frequência (CHEEKE, 2002) e é definido como a distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos de uma onda. Essa distância pode ser facilmente visualizada em um gráfico representando um movimento harmônico, através de uma curva senoidal, conforme apresentado na Figura II.19.

A relação entre os parâmetros frequência (f), velocidade (v) e comprimento de onda (λ) pode ser expressa pela Equação 2.45.

$$v = \lambda \cdot f \tag{2.45}$$

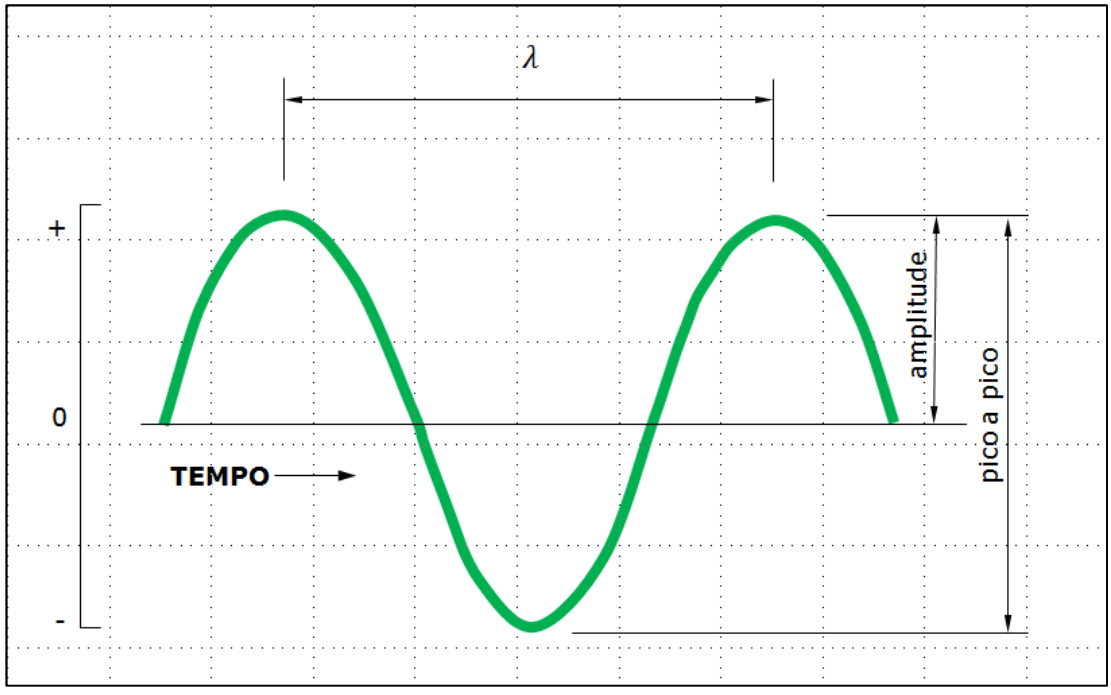


Figura II.19. Onda senoidal, $y = A.sen(x)$ (BALLOU, 1987). Figura adaptada.

II.5.4. Efeito Piezoelétrico

As ondas ultrassônicas usadas no ensaio por ultrassom são geradas ou introduzidas no material através de um elemento emissor com uma determinada dimensão e que vibra com certa frequência (ANDREUCCI, 2008). Além disso, esse emissor pode se apresentar com determinadas formas. Os elementos emissores e receptores são denominados transdutores, também conhecidos por cabeçotes. Diversos materiais apresentam o efeito piezelétrico, sendo comumente usado em transdutores para gerar e detectar as ondas sonoras (HELLIER, 2003). Tomando-se uma lâmina de certo formato (placa) e aplicando-se uma pressão sobre o mesmo, surgem em sua superfície cargas elétricas. O efeito inverso também é verdadeiro, isto é, aplicando-se dois eletrodos sobre as faces opostas de uma placa de cristal piezelétrico, de maneira que se possam carregar as faces eletricamente, a placa comporta-se como se estivesse sobre pressão e diminui de espessura. O cristal piezelétrico pode transformar a energia elétrica alternada em oscilação mecânica e transformar a energia mecânica em elétrica. A Figura II.20 apresenta o efeito piezoelétrico.

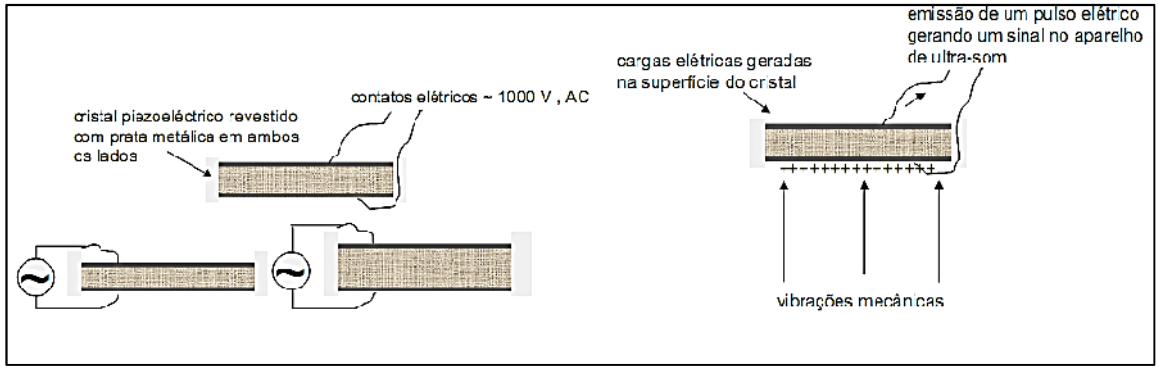


Figura II.20. Efeito Piezoelétrico (ANDREUCCI, 2008).

Tal fenômeno é obtido aplicando-se eletrodos no cristal piezelétrico com tensão elétrica alternada da ordem de centenas de Volts, de maneira que o mesmo se contrai e se estende ciclicamente. Ao se tentar impedir esse movimento, a placa transmite esforços de compressão às zonas adjacentes, emitindo uma onda longitudinal, cuja forma depende da frequência de excitação e das dimensões do cristal.

II.5.5. Cristais Piezoelétricos e Transdutores

O quartzo, o sulfato de lítio, o titanato de bário, o metaniobato de chumbo e o zirconato-titanato de chumbo (PTZ) são considerados materiais piezoelétricos (HELLIER, 2003). O

quartzo é o material piezelétrico mais antigo, translúcido e duro como o vidro sendo cortado a partir de cristais originários no Brasil (ANDREUCCI, 2008). O Sulfato de Lítio é um cristal sensível à temperatura e pouco resistente. Titanato de Bário e zirconato-titanato de chumbo são materiais cerâmicos que recebem o efeito piezelétrico através de polarização. Esses dois cristais são os melhores emissores, produzindo impulsos ou ondas de grande energia, se comparadas com aquelas produzidas por cristais de quartzo. A velocidade, a impedância e a densidade de cada um dos cristais supracitados, estão listadas na Tabela II.6. Para a inspeção ultrassônica, interessa não só a potência de emissão, mas também a sensibilidade da recepção (resolução). A frequência ultrassônica gerada pelo cristal dependerá da sua espessura, que é cerca de 1 mm para 4 MHz e 2 mm para 2 MHz. Os cristais acima mencionados são montados sobre uma base de suporte (bloco amortecedor) e junto com os eletrodos e a carcaça externa constituem o transdutor ou cabeçote propriamente dito, que serão discutidos no Tópico II.5.7.2 Existem três tipos usuais de transdutores: o reto ou normal, o angular e o duplo-cristal (CTA/IFI/FQI/VEM, 2002).

Tabela II.6. Cristais que apresentam características piezoelétricas (CTA/IFI/FQI/VEM, 2002).

Cristal	**Velocidade (m/s)**	**Impedância ($kg/m^2 \times s$)**	**Densidade (g/cm^3)**
Quartzo	$5,7 \times 10^3$	$1,52 \times 10^7$	2,6
Titanato Bário	$5,0 \times 10^3$	3×10^7	5,4
Sulfato de Lítio	$5,45 \times 10^3$	$1,12 \times 10^7$	2,0
Metaniobato de chumbo	$2,75 \times 10^3$	$1,6 \times 10^7$	6,0
PTZ	$2,3 \times 10^3$	$2,25 \times 10^7$	8,9

II.5.6. Impedância Acústica e Acoplantes

Ao se acoplar o transdutor sobre a peça a ser inspecionada, imediatamente se estabelece uma camada de ar entre a sapata do transdutor e a superfície da peça (ANDREUCCI, 2008). Esta camada ar impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propaguem para a peça em razão das características acústicas (impedância acústica) muito diferente do material a inspecionar.

A remoção do ar da interface entre a superfície de medição e o sensor é crucial para a transmissão da energia ultrassônica. A impedância acústica do ar é bastante inferior que as duas superfícies de contato.

Ouso de acoplantes se faz necessário para proporcionar a transferência eficaz da energia das ondas de ultrassom entre os transdutores e as peças a serem inspecionadas (ASM METALS, 1997). O uso do acoplante melhora esta transmissão em torno de 2 vezes mais a 100 kHz e 10 vezes mais a 500 kHz.

A efetividade de um acoplante é dependente da impedância acústica, absorção acústica, espessura de aplicação e viscosidade (THEOBALD, et. al, 2008). Cada um destes possui uma forte influencia na sensibilidade de resposta do sensor e pode em ultima analise mudar a forma de resposta do sensor para diferentes modos de ondas.

A impedância acústica Z, conforme Equação 2.46, é definida como sendo o produto da densidade do meio ρ pela velocidade de propagação neste meio V e representa a quantidade de energia acústica que se reflete e transmite para o meio.

$$Z = \rho \times V \tag{2.46}$$

Em geral, podem-se calcular as frações de energia sônica que é transmitida e refletida pela interface entre dois materiais diferentes usando as Equações 2.47 e 2.48:

Energia refletida,

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \tag{2.47}$$

Energia transmitida,

$$T = 1 - R \tag{2.48}$$

Onde, Z_1e Z_2 são as impedâncias dos dois meios que formam a interface.

Como exemplo pode-se citar que a interface água e aço apenas transmitem 12% e reflete 88% da energia ultrassônica. Por esta razão, deve-se usar um líquido que estabeleça uma redução desta diferença, e permita a passagem das vibrações para a peça. Tais líquidos, denominados líquidos acoplantes, devem ser selecionados em função da rugosidade da superfície da área de varredura, o tipo de material, forma da peça, dimensões da área de varredura e posição para inspeção (ANDREUCCI, 2008). A Tabela II.7 descreve alguns tipos de acoplantes mais utilizados, destacando sua densidade, velocidade e impedância.

Tabela II.7. Impedância Acústica de Alguns Materiais e Acoplantes (CTA/IFI/FQI/VEM, 2002).

Acoplante	Densidade (g/cm^3)	Velocidade da onda long. (m/s)	Impedância Acústica ($g/cm^2.s$)
Óleo (SAE 30)	0,9	1700	$1,5 \times 10^5$
Água	1,0	1480	$1,48 \times 10^5$
Glicerina	1,26	1920	$2,4 \times 10^5$
Carbox Metil Celulose (15 g/l)	1,20	2300	$2,76 \times 10^5$
Aço	7,8	5900	46×10^5
Ar ou gás	0,0013	330	$0,00043 \times 10^5$
Aço inox	7,8	5800	$45,4 \times 10^5$
Alumínio	2,7	6300	$17,1 \times 10^5$

II.5.7. O Ensaio por Ultrassom

II.5.7.1. Generalidades

O ensaio por ultrassom tem sido praticado por diversas décadas. Uma das diversas possibilidades de aplicação desse ensaio é a determinação de espessura de peças industriais, de modo a fazer a coleta de dados mais fácil e melhor (NDT RESOURCE CENTER, 2011). As técnicas derivadas do uso do ultrassom são utilizadas em diversas áreas, destacando-se as aplicações na área de saúde e ensaios não destrutivos (OLIVEIRA, 2008).

O ensaio por ultrassom caracteriza-se por um método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos. Tais defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componentes a ser examinada como, por exemplo: bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro trincas em forjados, escorias em uniões soldadas e muitos outros. Além disso, o ensaio por ultrassom é muito usado para verificação de espessura em peças aeronáuticas, conforme mostrado na Figura II.21. Portanto, o exame ultrassônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza de medição na utilização de materiais ou peças de responsabilidades (ANDREUCCI, 2008).



Figura II.21. Medição de Espessura por Ultrassom (DEFELSKO, 2009).

O ensaio por ultrassom usa a energia de alta frequência do som para conduzir inspeções e realizar medições. Esse método de inspeção pode ainda ser usado para detecção e avaliação de descontinuidades, verificação dimensional, caracterização de materiais etc. Para ilustrar o princípio geral de inspeção por ultrassom, uma configuração típica deste princípio de inspeção é mostrada na Figura II.22.

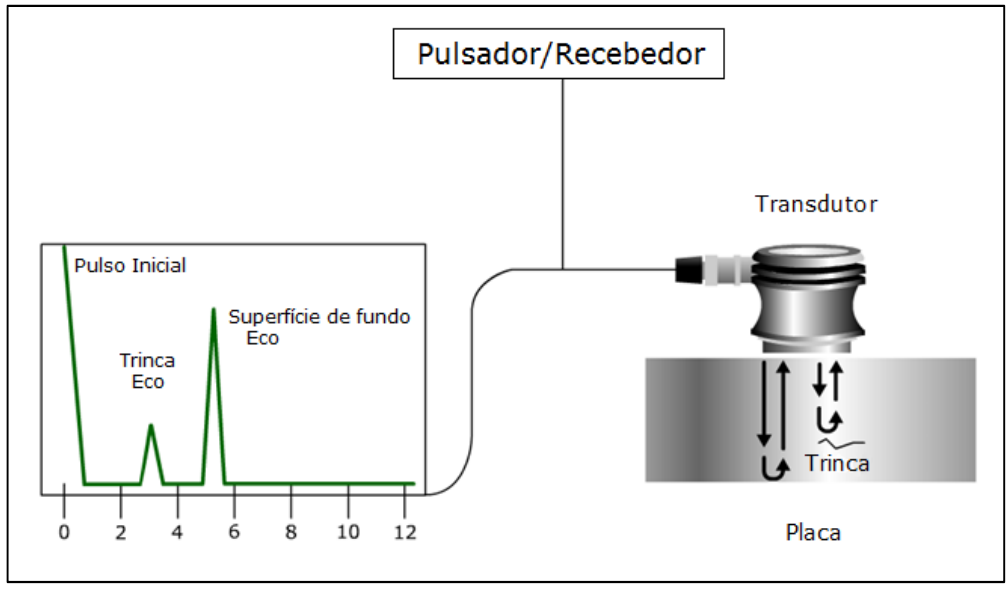


Figura II.22. Princípio geral de inspeção por ultrassom (NDT RESOURCE CENTER, 2011). Figura adaptada.

Um sistema típico de inspeção por ultrassom consiste em diversas unidades funcionais como, por exemplo, um pulsador/recebedor, transdutor, e dispositivos de saída (monitores).

O pulsador/recebedor é um dispositivo eletrônico que pode produzir pulsos elétricos de alta voltagem. Conduzido por um pulsador, o transdutor gera energia ultrassônica de alta frequência. A energia sonora é introduzida e propagada através dos materiais sob a forma de

ondas. Quando existe uma descontinuidade como uma trinca, no caminho da onda, parte da energia será refletida de volta, proveniente da superfície da descontinuidade. O sinal da onda refletida é transformado em sinal elétrico pelo transdutor e mostrado em um monitor. Na Figura II.22 observa-se a intensidade do sinal refletido versus o tempo decorrido da geração do sinal até quando o eco tiver sido recebido. O tempo de viagem do sinal pode estar diretamente relacionado à distância que o sinal viajou. A partir do sinal, podem-se obter informações sobre o local da reflexão, tamanho, orientação e outras características.

A inspeção por ultrassom é um método não destrutivo muito útil e versátil. Algumas vantagens deste método são citadas abaixo (ASM METALS, 1997):

- É sensível a ambas as descontinuidades, superficiais e sub-superficiais;
- Possui profundidade de penetração para detecção de descontinuidade ou medição superior a outros métodos não destrutivos;
- Requer acesso apenas por um lado da peça quando a técnica de pulso-eco é usada;
- É um método altamente preciso em determinar posição da reflexão e estimar tamanho e formato;
- Requer preparação mínima da peça;
- O equipamento eletrônico fornece resultados instantâneos;
- É possível a reprodução de imagens detalhadas com sistemas automatizados;
- Pode ser usado para outras diversas aplicações, como medição de espessura.

Assim como em todos os métodos de ensaios não destrutivos, o ultrassom também possui algumas limitações:

- A superfície deve estar acessível para transmissão do ultrassom;
- Requer maior habilidade e treinamento do que alguns outros métodos;
- Normalmente requer um meio de acoplamento para promover a transferência da energia sonora para o corpo de prova;
- Dificuldade de inspecionar materiais rugosos, de formatos irregulares, muito pequenos, com pouquíssima espessura ou não homogêneos;
- Dificuldade de inspecionar ferros fundidos e outros materiais de grãos grosseiros devido à baixa transmissividade sonora e alto ruído no sinal;
- Defeitos lineares orientados paralelamente ao feixe sonoro podem não ser detectados;
- Requer padrões de referência tanto para a calibração do equipamento quanto para caracterização das descontinuidades.

II.5.7.2. Medição de Espessura Através do Ensaio por Ultrassom

A medição de espessura através do ensaio por ultrassom tem sido amplamente utilizada e tem desempenhado um papel importante em muitos campos, tais como serviços de inspeção em dutos e vasos de pressão, no controle de qualidade de projetos de construção em massa, na medição do formato de componentes com geometrias complicadas, etc.. Com o rápido crescimento da economia de países emergentes, e o desenvolvimento de tecnologias, o controle de qualidade e as inspeções têm se tornado cada vez mais importantes. Sendo assim, a aplicação desta técnica tradicional torna-se cada vez mais popular atualmente (PENG, 2008).

O processo mais simples e tradicional de medição de espessura por ultrassom é aquele no qual se utiliza um único transdutor (cabeçote) normal, acoplado sobre uma das superfícies do material em ensaio. A espessura pode ser facilmente avaliada medindo-se a distância entre o pulso inicial e o eco de fundo. As medidas serão corretas desde que, antes da execução do ensaio se proceda à “calibração do ponto zero” do instrumento. Este processo, apesar de seguro, apresenta as seguintes limitações:

- Limita-se a medição de espessuras acima de, aproximadamente, 20 mm (0.787”), devido à falta de resolução inerente dos impulsos ultrassônicos;
- A área medida é muito grande sendo impossível obterem-se leituras precisas de pequenas regiões e a avaliação correta de áreas com corrosão;
- Mesmo medindo superfícies perfeitamente planas, este processo não é preciso, possuindo falta de definição inerente.

Visando-se eliminar estas limitações do processo tradicional, passou-se a empregar cabeçotes com duplo cristal, sendo um emissor e outro receptor, acusticamente separados, conforme Figura II.23.

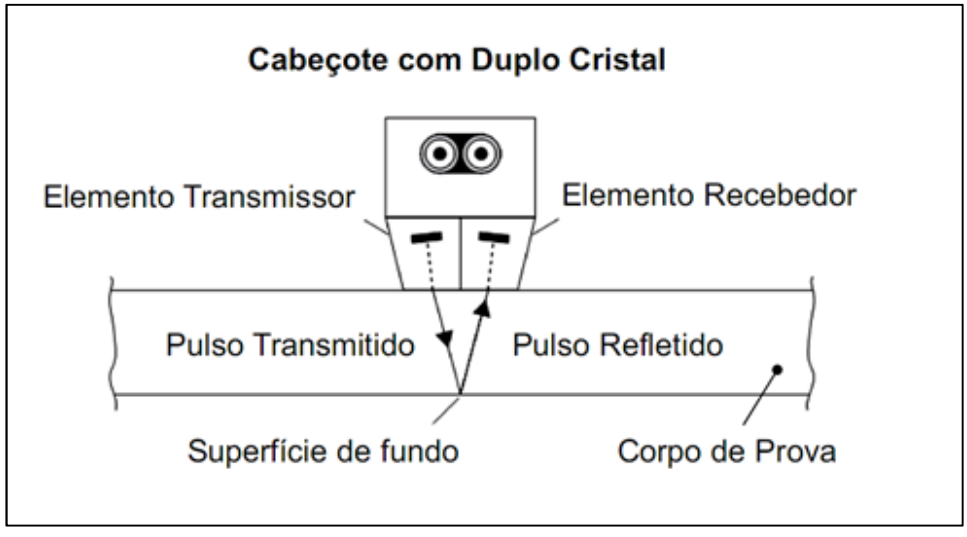


Figura II.23. Cabeçote com Duplo Cristal (KRAUTKRAMER, 2002).

A Figura II.24 mostra exemplos de cabeçotes usados no ensaio por ultrassom.



Figura II.24. Cabeçotes usados no ensaio por ultrassom (AGFA, 2010).

Pulsos ultrassônicos são emitidos pelo cristal emissor, percorrem a sapata plástica, são focalizados ao penetrarem no material em ensaio, e depois de refletidos na superfície oposta à do acoplamento, penetram na sapata pelo lado de recepção e são detectadas pelo cristal receptor.

O eco na tela do instrumento indicará o percurso do pulso, inclusive dentro da sapata plástica. Qualquer aumento ou diminuição do pulso no percurso do feixe ultrassônico, fora das sapatas plásticas, é facilmente detectado na escala do instrumento. Assim, variações na espessura da chapa serão facilmente detectadas.

O feixe ultrassônico é focalizado, permitindo medidas quase pontuais, bastante vantajosas em medidas de espessura de chapas com corrosão.

Os cabeçotes de duplo cristal permitem medições de espessuras acima de aproximadamente 1,2 mm (0,047”) e são particularmente úteis para o ensaio manual ou automático de delaminação de chapas planas (CTA/IFI/FQI/VEM, 2002).

Os equipamentos de medição de espessura por ultrassons atuais geralmente operam com frequências entre 500 kHz e 100 MHz, através de cabeçotes piezoelétricos que geram rajadas de ondas de som quando excitados por pulsos elétricos. Uma grande variedade de transdutores com características acústicas diferentes foram desenvolvidos para atender às necessidades de aplicações industriais. Tipicamente, baixas frequências são usadas para aperfeiçoar a penetração na medição de materiais espessos, altamente atenuantes ou com alta dispersão, enquanto altas frequências são recomendadas para aperfeiçoar a resolução em materiais menos espessos, pouco atenuantes e com baixa dispersão.

Na medição de espessura, as técnicas de ultrassom permitem uma medição rápida e confiável, sem a necessidade de acesso por ambos os lados da peça. Em algumas aplicações, são possíveis precisões tão altas quanto ± 1 μm ou 0,0001”. É possível medir por ultrassom a maioria dos materiais de engenharia, incluindo metais, plásticos, cerâmicos, compósitos, *epoxies*, e vidro, bem como níveis de líquido e espessura de certos corpos de testes biológicos (NDT RESOURCE CENTER, 2011).

Na medição pelo método pulso-eco, pode ser determinada a espessura de um material de forma precisa, medindo o tempo que um pulso ultrassônico curto (gerado por um transdutor) demora em transitar através da espessura do material, refletir da face de fundo da superfície, e retornar ao mesmo transdutor. Em diversas aplicações, este tempo diz respeito a microssegundos ou menos. O tempo de trânsito medido é dividido por dois para contar o caminho de ida e volta do sinal e multiplicado pela velocidade do som do material de teste. O resultado é determinado através da Equação 2.49.

$$t = \frac{2d}{v} \tag{2.49}$$

onde d é a distância entre a superfície do material e a face de fundo, v é a velocidade sônica do material, e t é o tempo de trânsito medido de ida e volta (NDT RESOURCE CENTER, 2011).

II.5.7.3. Calibração do Ponto Zero

Para tomar vantagem da alta precisão do ensaio e satisfazer os requisitos dos diferentes campos, é muito importante executar uma simples operação de “calibração do ponto zero” *(zero point calibration)*. Esta operação é essencial para garantir a precisão da medição de espessura por ultrassom. O efeito da “calibração do ponto zero” por mudança de temperatura ou outras condições podem aumentar o erro da medição do corpo de prova. Atualmente, métodos mais comuns de “calibração do ponto zero” são usados na medição de espessura por ultrassom para melhorar a precisão da medição através da eliminação dos efeitos da mudança de temperatura entre outros fatores (PENG, 2008).

Para todo processo de medição de espessura por ultrassom um material de referência conhecido como bloco padrão de referência é utilizado. Se este material não for homogêneo,

diversas velocidades sônicas podem existir em diversas áreas da peça a ser testada. Sendo assim, deve-se levar em consideração uma média das velocidades sônicas durante a calibração do instrumento. Os melhores resultados são, contudo, alcançados quando o instrumento é calibrado em um bloco padrão de referência fabricado com o mesmo material da peça a ser testada. Este bloco de referência para calibração deve possuir superfícies planas e paralelas e também espessuras que correspondem à espessura da peça a ser testada. Além disso, o operador deve entender que mudanças na velocidade sônica podem ocorrer para o caso do material ter sido tratado termicamente. Isto deve ser levado em consideração durante a avaliação da exatidão medida pelo instrumento (KRAUTKRAMER, 2002). As Figuras II.25 e II.26 mostram blocos-padrão de referência típicos para medição de espessura com ultrassom.

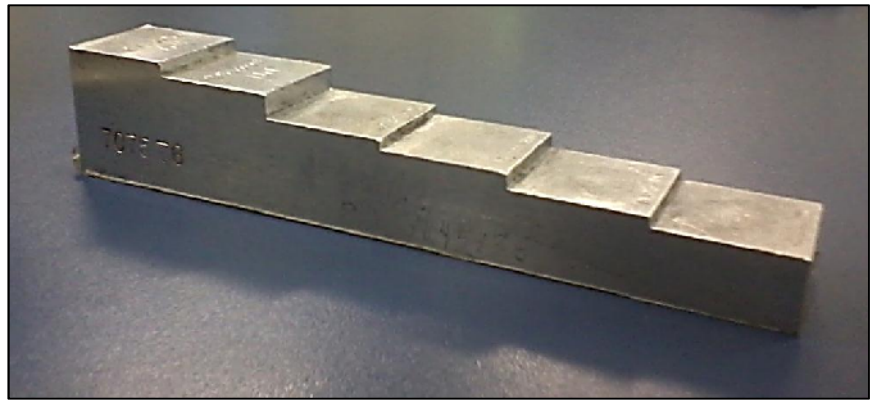


Figura II.25. Bloco padrão de referência.

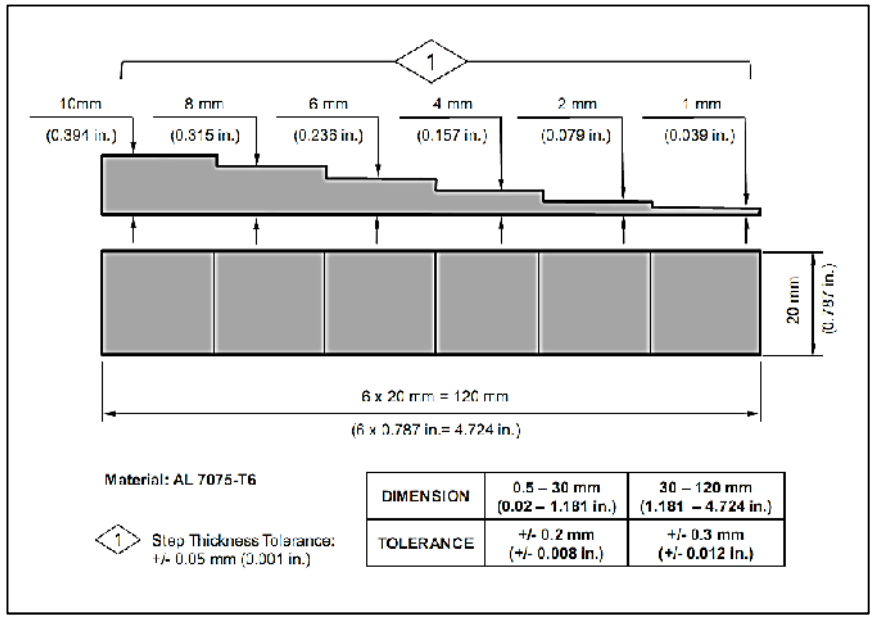


Figura II.26. Desenho de fabricação de um bloco padrão de referência (AIRBUS, 2010)

Em geral, para calibração do ponto zero, são seguidos passos definidos em uma norma técnica específica, que define qual o modelo do padrão de referência deve ser usado. Na indústria aeroespacial, a medição de espessura com ultrassom é largamente utilizada com sondas de duplo elemento. Com esse modelo de sonda, a calibração do ponto zero ideal do aparelho é realizada tomando como referência dois pontos. Esses pontos devem ser um valor acima e um abaixo da espessura original da peça a ser medida. O valor da espessura original bem como suas variações é conhecido através de desenhos de engenharia e manual técnico, além disso, o bloco padrão é fabricado a partir do mesmo material da peça a ser testada (AIRBUS, 2010). Por outro lado, em algumas situações torna-se difícil a fabricação de uma amostra para ser usada na calibração do material a ser testado. As peças podem ter sido fabricadas de um dos vários materiais aceitáveis (com diferentes velocidades sônicas) e pode não haver um local apropriado na peça onde uma espessura conhecida pode ser usada para calibração, tais como tubos, cilindros ou rolos (CARODISKEY, 1997). A velocidade sônica da peça a ser medida varia com a temperatura do material. Isso implica que o instrumento deve ser calibrado em campo antes do processo de medição para que a incerteza devido ao afastamento da temperatura de referência seja minimizada. Após o procedimento de calibração do ponto zero, o instrumento estará pronto para ser utilizado.

III – Metodologia

III.1. Visão Geral

Quando um dano estrutural é reportado em uma aeronave durante a realização de inspeções de rotina, deve-se executar um procedimento padrão de forma a identificar a estrutura danificada, o seu grau de relevância em relação à segurança de voo e a avaliação correta do dano.

A estrutura de uma aeronave está sujeita a diversos tipos de danos ocorridos em solo ou em voo, causados por ação humana ou da natureza. Dentre os danos mais comuns em estruturas de aeronaves estão a rachadura, o arranhão, a mossa, o desgaste, a corrosão etc.

A corrosão é um dos danos mais críticos que uma aeronave está sujeita, devendo ser acompanhado com extrema atenção por parte do responsável pela manutenção da mesma, visto que, quando detectada, requer uma ação imediata de remoção e controle. Dessa forma a integridade estrutural do membro afetado não é comprometida e, por conseguinte, a segurança de voo é mantida nos níveis de aceitação.

Na maioria dos casos a corrosão é proveniente do contato entre materiais dissimilares, falha da camada de proteção superficial do revestimento e em menores casos, defeitos na matéria-prima. O primeiro caso está relacionado principalmente à instalação de elementos de fixação com materiais dissimilares em relação ao material das peças a serem unidas na presença de umidade. O segundo caso está relacionado à má aplicação, a não aplicação ou defeito na camada de proteção superficial de peças de liga de alumínio. Os métodos de prevenção mais usados são a aplicação de *primers*, inibidores de corrosão e selagem de filete entre as superfícies de contato. As Figuras III.1 e III.2 mostram casos típicos de corrosão em estruturas aeronáuticas.

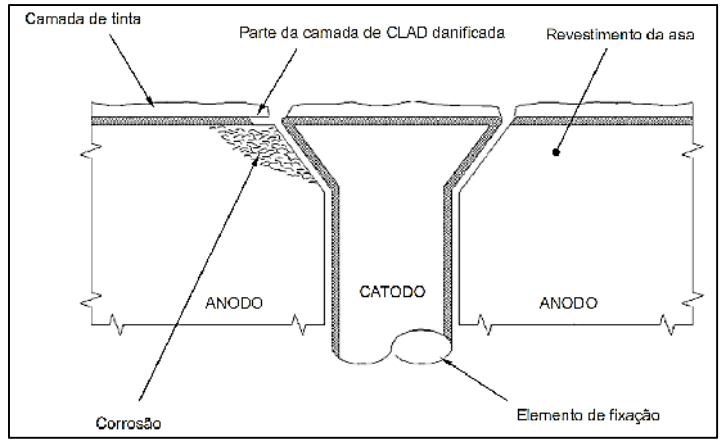


Figura III.1. Mecanismo de corrosão ao redor da cabeça de elementos de fixação.

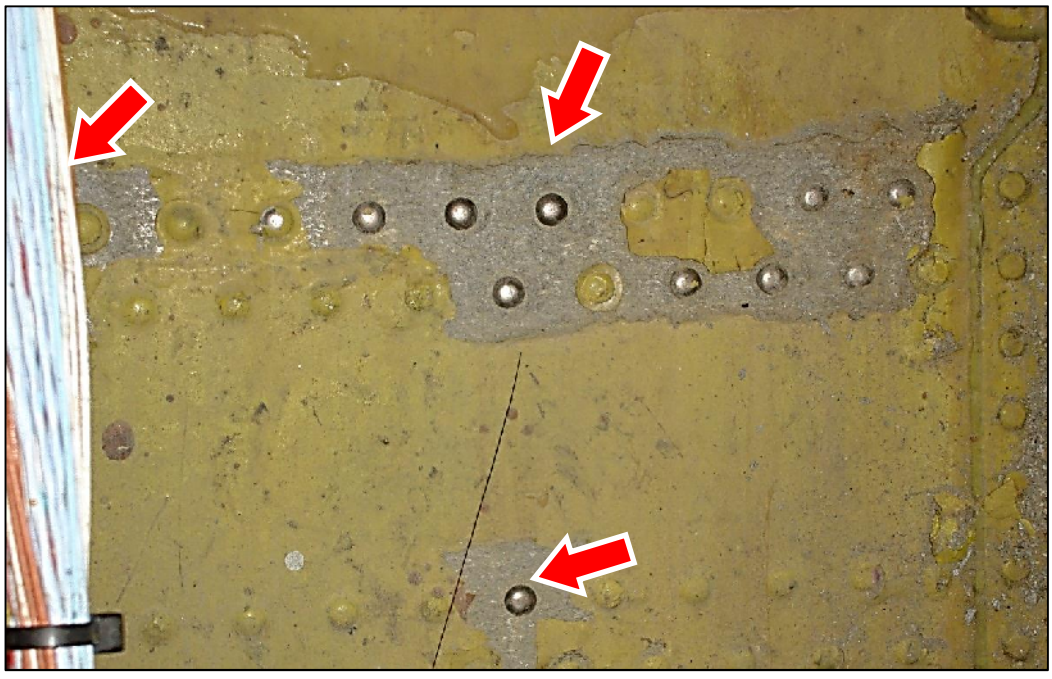


Figura III.2. Corrosão severa na área de fixação de rebites (titânio) em uma estrutura aeronáutica (liga de alumínio 7075-T6).

III.2. Procedimento Típico de Remoção e Controle da Corrosão

Toda aeronave possui um manual de manutenção exclusivo para a parte estrutural, chamado de Manual de Reparos Estruturais (*Structural Repair Manual* – SRM). Neste manual o operador possui informações úteis sobre a identificação da estrutura da aeronave, limites de danos permissíveis, procedimentos típicos para remoção de danos e procedimentos típicos para execução de reparos estruturais.

Seja qual for o modelo da aeronave, de acordo com o SRM, um procedimento típico de remoção de corrosão consiste em:

- Remover a tinta e as camadas de proteção superficial ao redor da área danificada;
- Identificar a estrutura e a localização do dano de modo a conhecer as dimensões nominais da peça, bem como material de fabricação;
- Remover o mínimo de material de modo a eliminar toda a corrosão;
- Inspecionar a área retrabalhada para verificar se toda corrosão foi removida;
- Realizar inspeção para verificar dimensões remanescentes após o retrabalho;
- Verificar o SRM quanto a limites de retrabalho;
- Definir se a estrutura deverá ser reforçada ou substituída por uma nova;
- Restaurar as camadas de proteção superficial;
- Retornar a aeronave às condições de serviço.

O procedimento de remoção da corrosão, geralmente é realizado por métodos abrasivos com auxílio de lixas manuais ou rotativas, sendo obrigatório manter um raio de adoçamento ideal para minimizar os efeitos da concentração de tensão na superfície retrabalhada. Este procedimento é conhecido na indústria aeronáutica como *blend out*. A Figura III.3 mostra o aspecto de um revestimento estrutural após o procedimento de *blend out* para remoção de corrosão superficial.

A Figura III.4 mostra um esquema simples de como o procedimento de *blend out* deve ser executado mantendo a razão ideal para minimização dos efeitos da concentração de tensão.

A inspeção para verificar dimensões remanescentes após o retrabalho pode ser realizada com auxílio de diversos tipos de instrumentos como, por exemplo, relógio comparador, micrômetro, paquímetro etc.

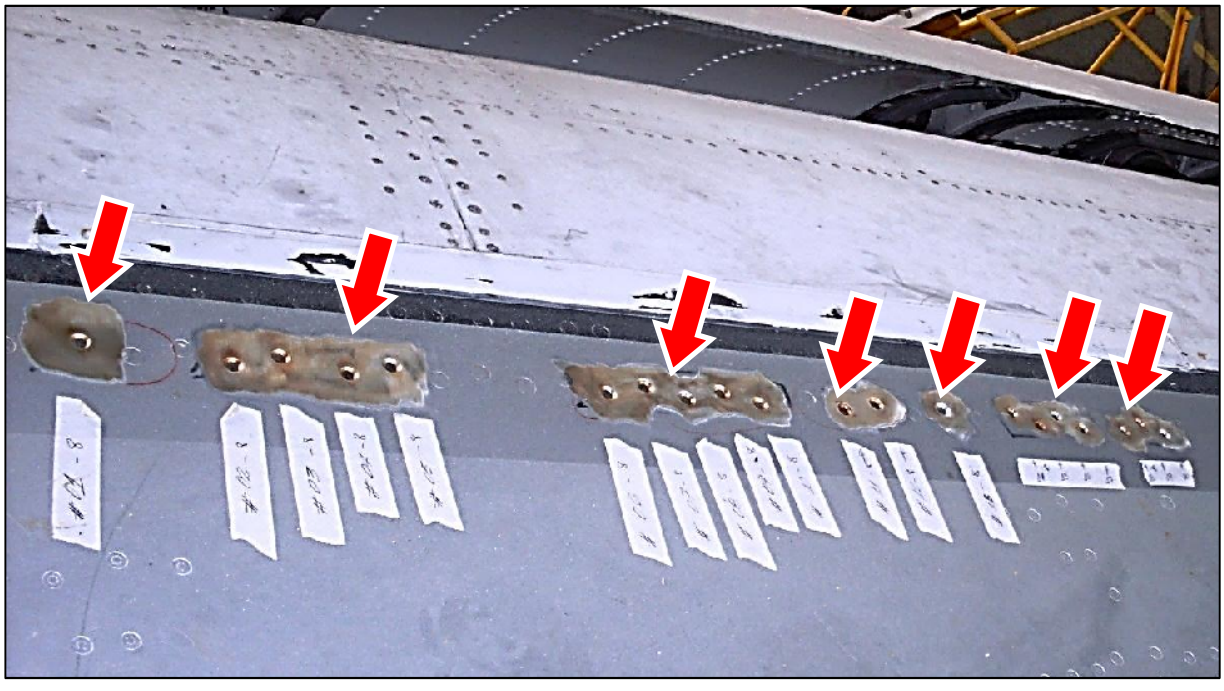


Figura III.3. Revestimento estrutural após *blend out* para remoção de corrosão.

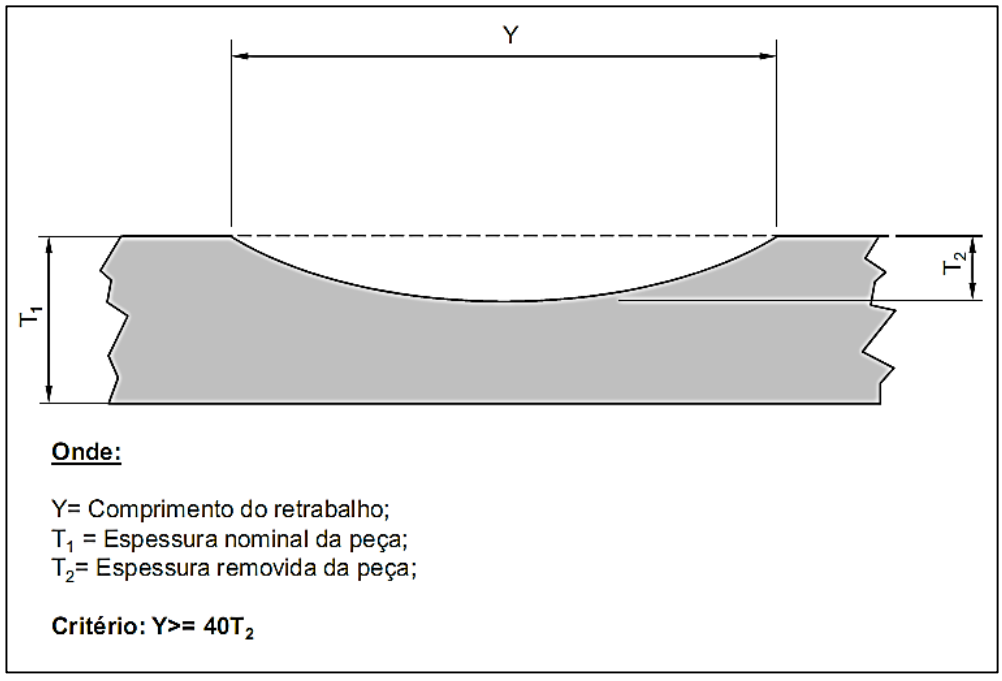


Figura III.4. Critério típico de aceitação de *blend out* em revestimento aeronáutico.

Contudo na maioria das vezes, se faz necessária a utilização de um sistema de medição que permita a verificação de espessuras em locais onde o acesso pelo lado oposto da parte afetada é limitado. Para isso, adota-se o método de verificação de espessura por ultrassom, exceto em áreas com espessura muito pequenas.

O método de verificação de espessura por ultrassom é o método mais recomendado pelos fabricantes de aeronaves para obtenção dos valores remanescentes de áreas que foram submetidas ao *blend out*, seja para remoção de corrosão, remoção de arranhões, desgastes, erosões etc. Para tal, existe um procedimento específico contido em um manual conhecido como Manual de Testes Não Destrutivos (*Non-destructive Test Manual* – NTM) das aeronaves.

III.3. Experimento realizado

III.3.1. Generalidades

Durante realização de revisão geral estrutural em uma aeronave modelo Airbus A310, foi detectada corrosão severa no revestimento inferior da asa esquerda, ao redor da cabeça dos elementos de fixação, possivelmente decorrente de falha no acabamento de proteção superficial associado ao contato entre materiais dissimilares na presença de umidade. A Figura III.5 mostra a localização aproximada da área corroída.

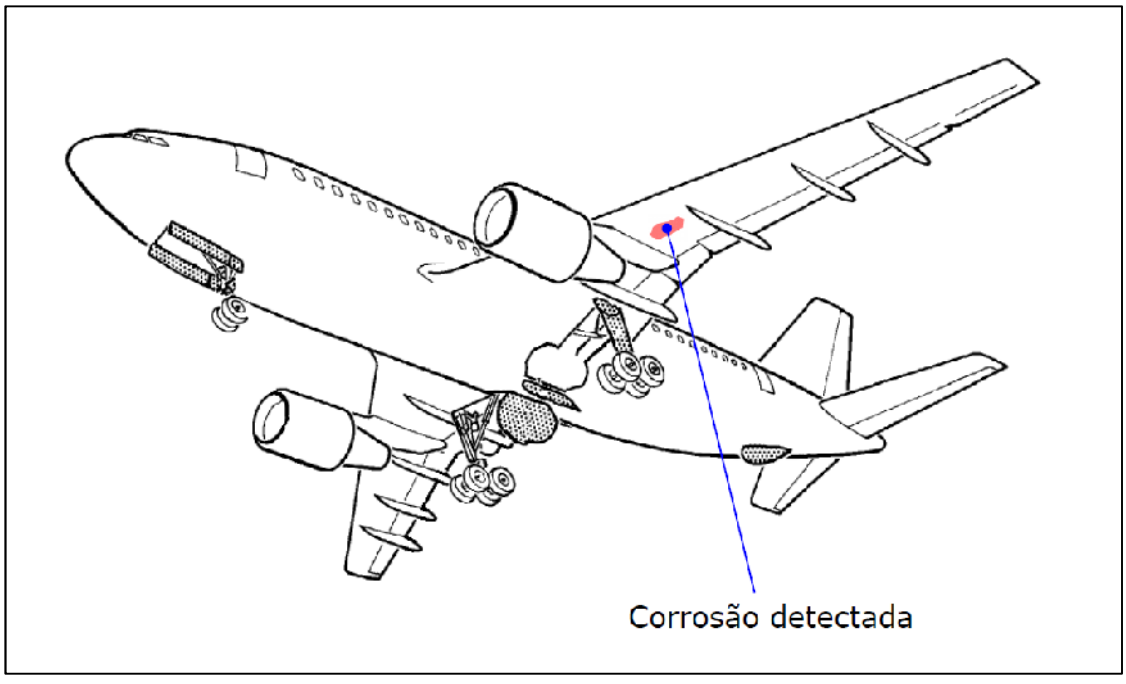


Figura III.5. Localização aproximada da corrosão. Figura adaptada de Airbus (2011).

Foi realizado o procedimento de remoção da corrosão conforme descrito no Tópico III.2 deste trabalho. Para certificar que toda corrosão foi removida, uma inspeção visual com auxílio de lente de aumento de 12 vezes foi realizada, revelando um resultado satisfatório.

Foi realizada limpeza minuciosa da área retrabalhada de modo a remover todos os detritos e poeira provenientes do desbaste *(blend out)* da área corroída, bem como vestígios de gordura e óleos presentes na superfície. A plena limpeza da área de inspeção é de grande importância, pois previne que o resultado da medição não seja alterado pela presença de alguma partícula estranha.

Para certificação das espessuras nominais do revestimento afetado, o desenho de produção da aeronave foi consultado. Além das espessuras nominais do revestimento, o desenho de fabricação fornece informações relevantes, tais como material de fabricação, tolerâncias dimensionais, tipos de proteção etc. A Tabela III.1 sumariza essas informações. O Anexo 2 mostra o desenho de produção do revestimento.

Tabela III.1. Identificação da estrutura avariada.

Material de fabricação	Liga de Alumínio 2024-T3
Espessura nominal	0,787”
Tolerância de fabricação da espessura	+0,005” / -0,003”

III.3.2. Medição da Espessura Remanescente Após o Desbaste

O evento que precede a medição da espessura remanescente do revestimento é checar se todos os equipamentos e padrões de referência a serem utilizados possuem certificado de calibração e se os mesmos encontram-se válidos.

Inicialmente, verificou-se que o bloco padrão de referência utilizado para o experimento não possuía certificado de calibração emitido por laboratório acreditado pela Rede Brasileira de Calibração (RBC). Sendo assim, a calibração do bloco foi realizada com auxílio de uma máquina de medição por coordenadas (MMC) pertencente ao laboratório de metrologia dimensional (LAMDI) do CEFET/RJ, conforme será descrito no Tópico III.3.2.1. A situação do aparelho de ultrassom era semelhante, visto que o certificado de calibração emitido pelo fabricante do mesmo não continha informações relevantes como a incerteza expandida do aparelho e o fator de abrangência. Para tal, a calibração também foi realizada durante o experimento conforme será descrito no Tópico III.3.2.2.

Para qualquer padrão, instrumento ou sistema de medição, recomenda-se que a calibração seja realizada por um laboratório acreditado pela RBC.

III.3.2.1. Calibração do Bloco Padrão de Referência

O bloco padrão de referência usado para realização do experimento foi calibrado com auxílio de uma máquina de medição por coordenadas (MMC), conforme Figura III.6 com a especificação de acordo com a Tabela III.2. O certificado de calibração da MMC utilizada está mostrado no Anexo 3.

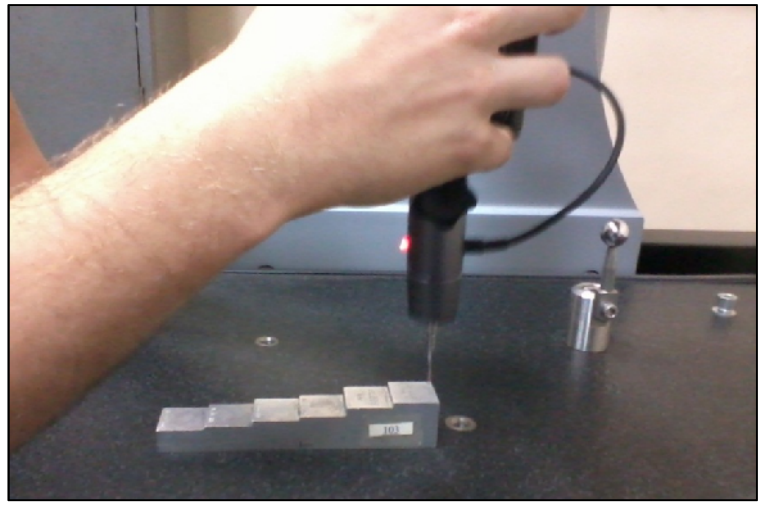


Figura III.6. Calibração do bloco padrão com a MMC.

Tabela III.2. Especificação da MMC.

Marca	TESA
Modelo	MH3D 4.5.4
Tipo	Pórtico
Resolução	1 µm
Data da última calibração	Junho de 2010
Certificado de calibração	DEA 186-10
Erro de apalpação médio	3,33 µm
Incerteza (U_{95})	± 1,15 µm
k	2,0

A operação de calibração do bloco padrão de referência consistiu em 5 medições em cada degrau do bloco padrão, conforme Figura III.7, à temperatura controlada média de 19,4ºC.O resultado da calibração está apresentado na Tabela III.3. O cálculo da incerteza do bloco padrão de referência considerou as seguintes fontes: incerteza herdada da MMC, incerteza estatística (Tipo A), incerteza devida ao afastamento da temperatura de referência (20ºC) e incerteza devida à resolução da MMC.

A Equação 3.1 foi utilizada para o cálculo da incerteza herdada da MMC conforme indicado no certificado de calibração da MMC (Anexo 3).

$$i = 4 + \frac{L}{224}\ [\mu m] \tag{3.1}$$

Para k = 2,0, onde i é a incerteza e L é a espessura medida.

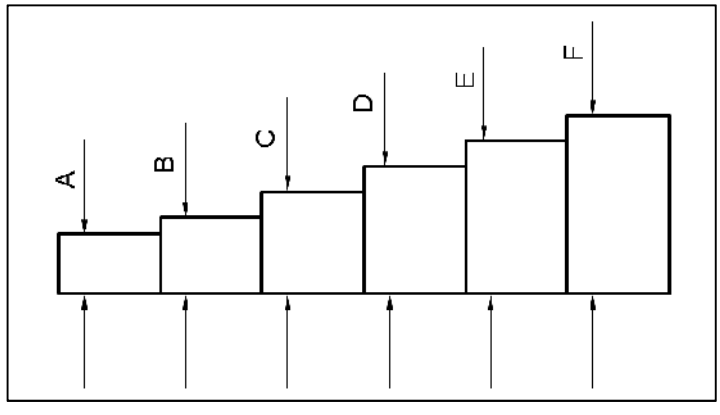


Figura III.7. Bloco padrão de referência calibrado.

Tabela III.3. Resultado da calibração do bloco padrão de referência.

Ponto	Medições na MMC (mm)				Média (mm)	D.Padrão (mm)	Incerteza (U)		k
	1ª	2ª	3ª	4ª			mm	polegada	
A	13,228	13,207	13,222	13,225	13,221	0,009	0,014	0,00055	2,8
B	15,214	15,211	15,213	15,209	15,213	0,002	0,005	0,00019	2,0
C	18,238	18,242	18,234	18,247	18,240	0,006	0,008	0,00031	2,3
D	20,240	20,230	20,243	-	20,238	0,007	0,012	0,00047	2,4
E	25,208	25,217	25,212	25,212	25,212	0,004	0,007	0,00027	2,0
F	28,237	28,232	28,223	28,230	28,231	0,006	0,009	0,00035	2,2

III.3.2.2. Calibração do Aparelho de Ultrassom

O aparelho de ultrassom usado para realização do experimento foi calibrado com auxílio do bloco padrão de referência calibrado no Tópico III.3.2.1. O aparelho de ultrassom possui especificação de acordo com a Tabela III.4. A Figura III.10 mostra o modelo do aparelho utilizado.

Tabela III.4. Especificação do aparelho de ultrassom (Krautkramer, 2002).

Marca	Krautkramer Branson
Modelo	DMS2TC
Tipo	Verificador de espessura
Resolução	0,001”
Faixa nominal	0,008” a 25,00”
Data da última calibração	Dezembro de 2009
Transdutor utilizado	DA412

A calibração do aparelho de ultrassom consistiu na medição de valores com 5 repetições no mesmo bloco padrão de referência utilizado no experimento e levando-se em consideração as seguintes incertezas: incerteza estatística (Tipo A), herdada do bloco padrão de referência, devido ao afastamento da temperatura de referência e resolução do aparelho de ultrassom, obtendo-se uma incerteza expandida de acordo com a Tabela III.5. Foram consideradas apenas as espessuras “C” e “D” da Figura III.7 por serem as espessuras de interesse para as medições do experimento.

Tabela III.5. Resultado da calibração do aparelho de ultrassom.

Ponto	Medições no Bloco Padrão Escalonado (mm)					Média	D.Padrão	Incerteza (U)		k
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	(mm)	(mm)	mm	polegada	
C	18,240	18,260	18,240	18,260	18,260	18,252	0,011	0,0190	0,00075	2,0
D	20,240	20,240	20,220	20,240	20,220	20,232	0,011	0,0202	0,00080	2,0

III.3.3. Medição da Espessura no Experimento

Para realização da medição da espessura remanescente na área afetada por ultrassom, se fez necessário o ajuste ou a “zeragem” do aparelho para os parâmetros a serem medidos. Esse ajuste que por muitas vezes é chamado na prática, de maneira errônea de calibração, foi executado de acordo com as premissas do Manual de Testes Não Destrutivos (Airbus, 2010) específico para este modelo de aeronave. De posse do valor nominal de espessura, retirado do desenho de produção do revestimento (Anexo 2), foi possível escolher um bloco padrão de referência do tipo escalonado e fabricado do mesmo material e tratamento do revestimento a ser medido. O bloco padrão de referência usado é semelhante ao da Figura II.25 e o mesmo bloco que foi calibrado no Tópico III.3.2.1. O aparelho de ultrassom utilizado para este experimento foi calibrado no Tópico III.3.2.2. O transdutor usado para este experimento foi o modelo DA412, conforme mostrado na Figura II.24.

Visando facilitar a anotação dos pontos a serem medidos por ultrassom foi desenhada uma grade de 10 x 10 mm no revestimento e os valores medidos, anotados em um papel vegetal milimetrado reproduzindo o revestimento e a área desbastada. Esta grade facilita a etapa de anotação dos valores encontrados visto que o diâmetro da superfície de contato do cabeçote (transdutor) é de aproximadamente 10 mm. Este procedimento é conhecido como mapeamento do retrabalho e é largamente utilizado na indústria aeronáutica para que a avaliação do dano possa ser realizada fora do campo de trabalho e para que se tenha um registro permanente dos resultados obtidos. A Figura III.8 retrata uma típica grade de mapeamento sendo desenhada em um revestimento de aeronave. As Figuras III.9 e III.10 mostram o procedimento típico de medição de espessura por ultrassom em aeronaves.

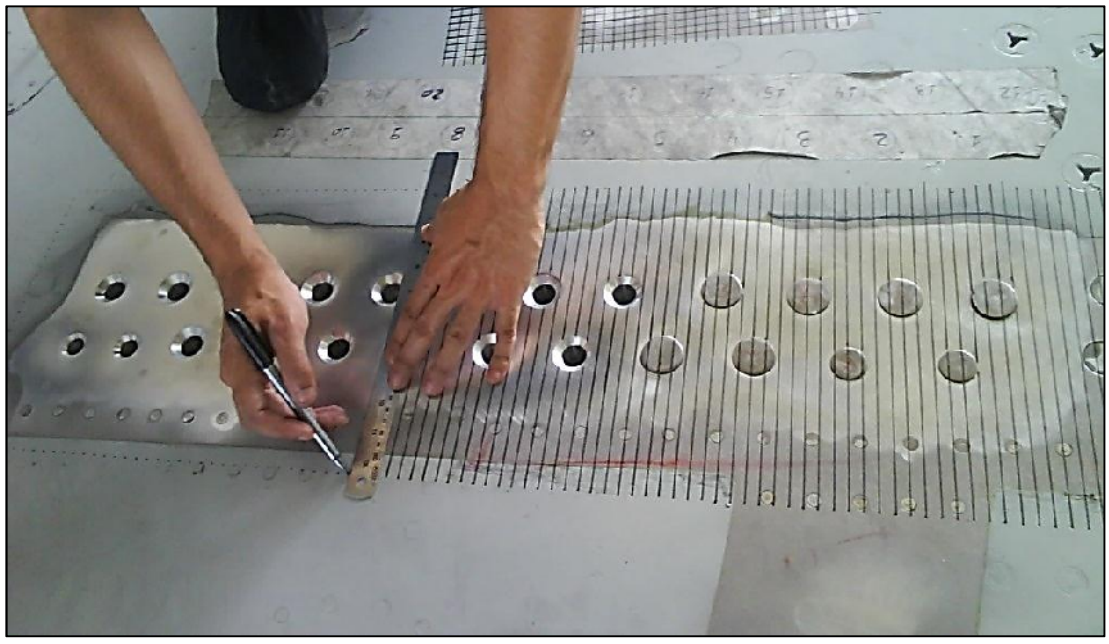


Figura III.8. Grade milimetrada de mapeamento (10 x 10 mm).



Figura III.9. Procedimento típico de medição de espessura por ultrassom.



Figura III.10. Procedimento típico de medição de espessura por ultrassom.

Além das informações já mencionadas, na folha de mapeamento são plotados todos as posições dos elementos de fixação existentes na área de retrabalho, as coordenadas de referência baseadas no próprio manual do avião, a identificação da parte afetada, bem como a indicação de algum membro estrutural relevante presente na área afetada tais como *fittings*, reforçadores, reparos existentes etc. A Figura III.11 mostra um exemplo típico de mapeamento.

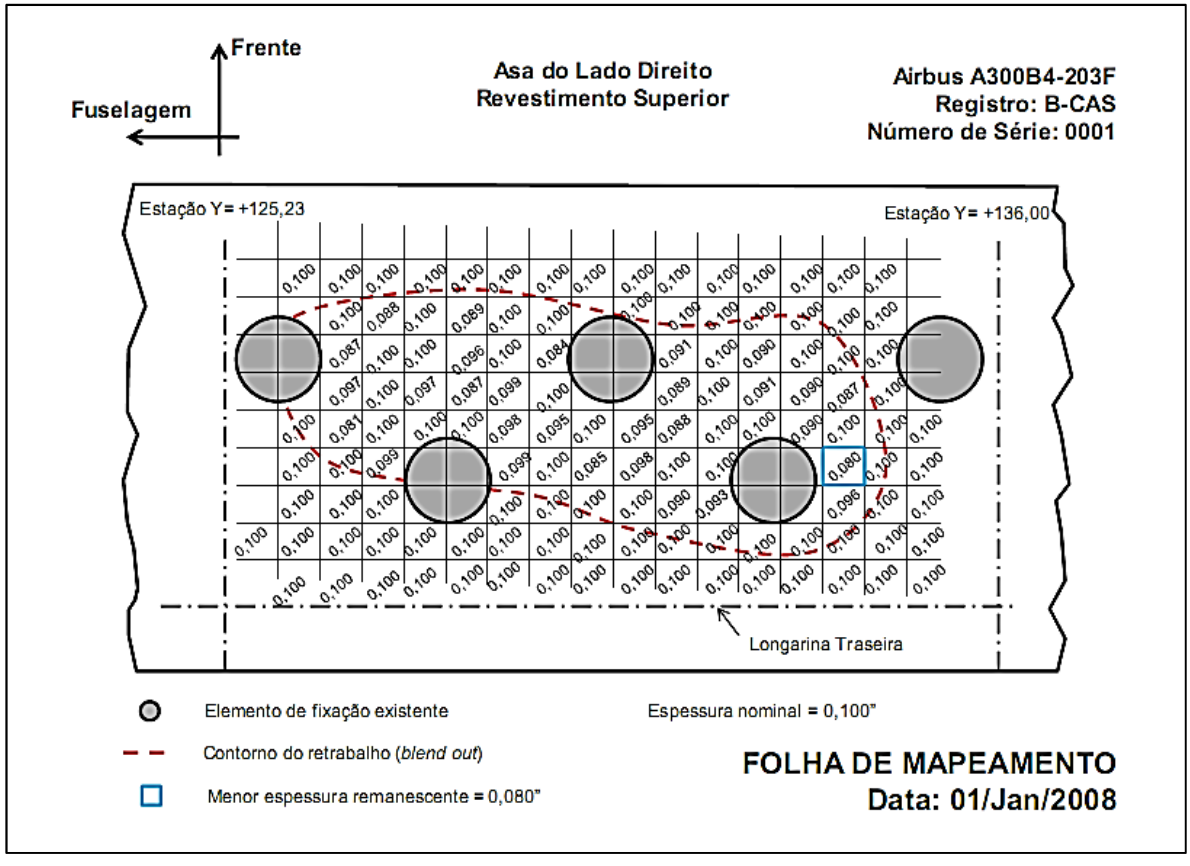


Figura III.11. Exemplo de mapeamento para verificação de espessura.

Para realização do experimento, foi fabricado um corpo de prova com a mesma espessura, tolerância, acabamento e material do revestimento da aeronave, segundo o desenho de produção do revestimento mostrado no Anexo 2. Esse corpo de prova foi desbastado reproduzindo uma remoção localizada de corrosão. A Figura III.12 mostra o aspecto do corpo de prova utilizado para o experimento.

Foram escolhidos ao acaso, 5 pontos dentro da área desbastada e 2 pontos na área sem desbaste, refletindo o que seria a espessura nominal do revestimento. Realizou-se 5 repetições da medição em cada um dos pontos escolhidos. A Figura III.13 mostra os pontos escolhidos para o experimento. A Tabela III.6 mostra os valores encontrados durante as medições.

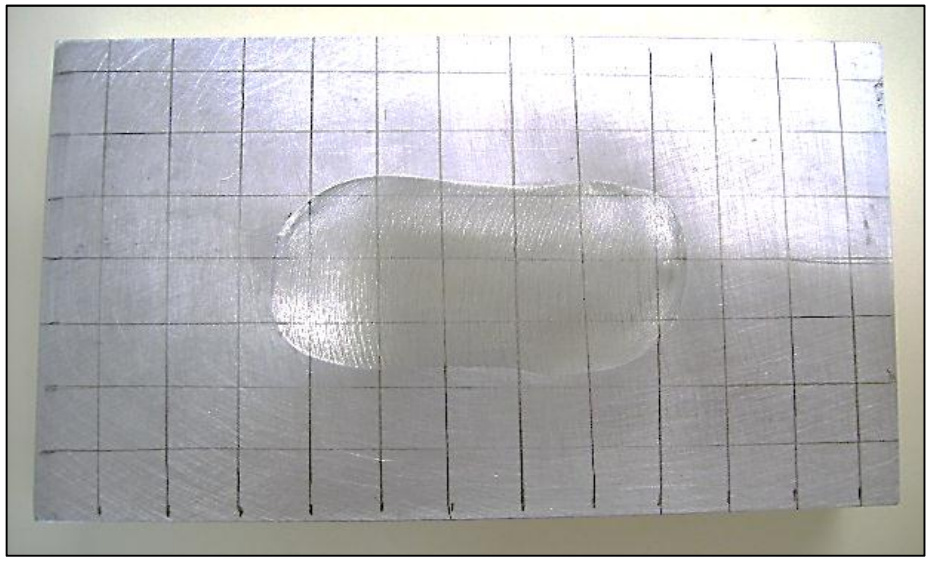


Figura III.12. Corpo de prova para realização do experimento.

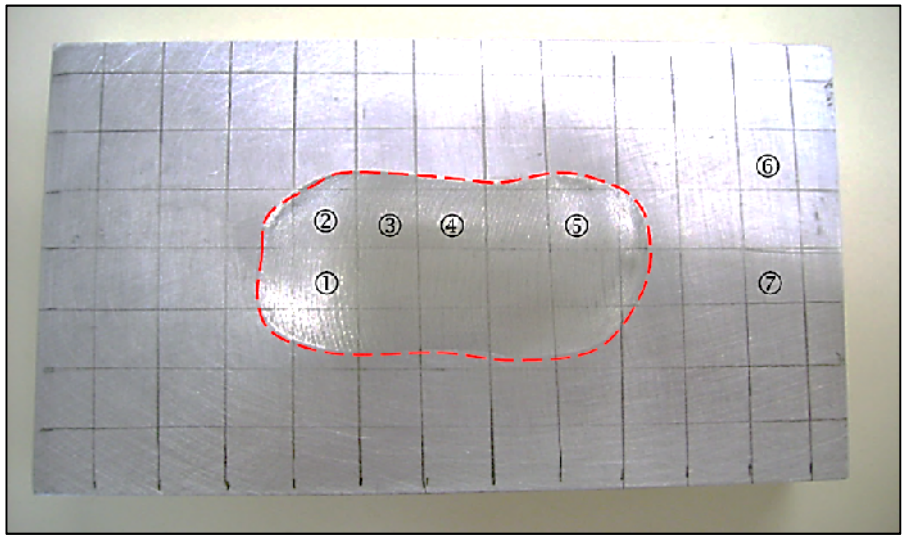


Figura III.13. Pontos escolhidos no corpo de prova para realização do experimento.

Tabela III.6. Resultado das medições por ultrassom do experimento. Valores em polegada.

Ponto / Medição	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1ª	0,760	0,767	0,769	0,765	**0,767**	0,784	0,784
2ª	0,760	0,764	0,765	0,767	**0,765**	0,786	0,785
3ª	0,759	0,766	0,763	0,769	**0,760**	0,784	0,784
4ª	0,760	0,764	0,764	0,768	**0,764**	0,784	0,785
5ª	0,760	0,764	0,764	0,768	**0,764**	0,784	0,785
Média (μ)	0,760	0,765	0,765	0,767	**0,764**	0,784	0,785
Desvio padrão (σ)	0,00045	0,00141	0,00235	0,00152	**0,00255**	0,00089	0,00055

Após as medições foi selecionado o ponto de número 5 da Tabela III.6 que apresentou maior dispersão de valores. Esse ponto escolhido foi usado para a realização dos cálculos de incerteza inerente ao procedimento de acordo com ISO GUM (2003). A Figura III.14 mostra o aspecto da seção transversal do corpo de prova no ponto escolhido.

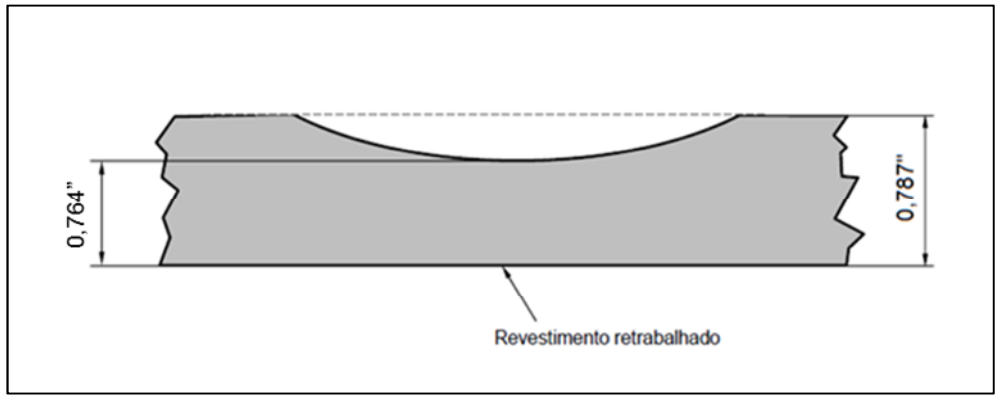


Figura III.14. Seção transversal do corpo de prova mostrando a região desbastada.

III.3.4. Testes de Rejeição dos Valores

III.3.4.1. Critério de Chauvenet

Foi utilizado o Critério de Chauvenet (Tópico II.2.1) para testar os valores encontrados na Tabela III.6. Dentre os valores do ponto 5, o valor 0,760” foi testado por ser considerado suspeito. Esse valor foi considerado suspeito devido à dispersão em relação à média aritmética da amostra. Aplicando-se a Equação 2.3 tem-se que:

$$r^{\square} = \frac{|0,760-0,764|}{0,00255} = 1,56893 \quad (3.2)$$

Sendo R_C o limite de rejeição de Chauvenet, extraído da Tabela II.1. Logo, para n = 5, R_C = 1,65, então:

$$1,56893 < 1,65 \quad (3.3)$$

Como 1,56893 < 1,65, ou seja, $r^{\square} < R_c$, o valor 0,760 não deve ser eliminado da amostra.

III.3.4.2. Teste Q ou Critério de Dixon

Outro teste utilizado foi o critério de Dixon ou Teste Q. A amostra foi ordenada em ordem crescente de acordo com a Tabela III.7.

Tabela III.7. Ordenação de maneira crescente da amostra. Valores em polegada.

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
0,760	0,764	0,764	0,765	0,767

Da Equação 2.9 tem-se que:

$$Q_{calculado}^{3\leftrightarrow7} = \frac{x_2-x_1}{x_n-x_1} = \frac{0,764-0,760}{0,767-0,760} = 0,57143 \quad (3.4)$$

O critério de rejeição é feito através da Equação 2.8 com auxílio da Tabela II.2, contudo,

0,57143 < 0,710 (3.5)

Logo, o valor 0,760” não deve ser eliminado da amostra, confirmando o resultado do teste pelo critério de Chauvenet.

III.3.5. Determinação da Incerteza do Procedimento de Medição

Durante o processo de medição de espessura, diversas fontes de incerteza foram consideradas para realização do experimento, visto que as mesmas podem potencialmente influenciar com grande relevância na avaliação de aceitação do revestimento após o retrabalho. No experimento as principais fontes de incerteza identificadas foram as seguintes:

- Incerteza proveniente da resolução do aparelho de ultrassom;
- Incerteza herdada da calibração do aparelho de ultrassom;
- Incerteza devida ao afastamento da temperatura de referência (T=20ºC);
- Incerteza estatística da amostra (Tipo A);

Foi utilizado o método ISO GUM como mostrado na Figura II.3 para estimar as incertezas inerentes ao processo e determina-las.

III.3.5.1. Incerteza Estatística da Amostra (Tipo A)

A Equação 2.10 reflete a incerteza estatística conhecida como Tipo A, que é a incerteza associada à média das medições realizadas. Sendo i_A a Incerteza Tipo A, $S(x_i)$ é o desvio padrão da amostra e n o número de medições realizadas, e considerando os dados da Tabela III.6, tem-se que:

$$i_A = \frac{0{,}00255}{\sqrt{5}} = 0{,}00114'' \quad (3.6)$$

$$c_1 = 1 \quad (3.7)$$

III.3.5.2. Incerteza Herdada da Calibração do Aparelho de Ultrassom

A incerteza herdada da calibração do aparelho de ultrassom foi calculada usando-se a Equação 3.8.

$$i_h = \frac{i_P}{k_P} \tag{3.8}$$

onde i_h é a incerteza herdada, i_P é a incerteza expandida contida no certificado de calibração e k_P é o fator de abrangência associado a i_P . Logo,

$$i_h = \frac{0{,}00080}{2{,}0} = 0{,}00040'' \tag{3.9}$$

$$c_2 = 1 \tag{3.10}$$

III.3.5.3. Incerteza Devida à Resolução do Aparelho de Ultrassom

A Equação 3.11 descreve a incerteza proveniente da resolução do aparelho de ultrassom usado no experimento.

$$i_r = \frac{r}{2\sqrt{3}} \tag{3.11}$$

onde i_r é a incerteza devida à resolução do aparelho e r a resolução adotada. Logo,

$$i_r = \frac{0{,}001}{2\sqrt{3}} = 0{,}00029'' \tag{3.12}$$

c_3 = 1 (3.13)

III.3.5.4. Incerteza Devida ao Afastamento da Temperatura de Referência

A Equação 3.14 descreve a incerteza devida ao afastamento da temperatura de referência. A temperatura de referência é considerada 20ºC.

$$i_t = \frac{l_{0p} \cdot \alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{3}} \quad (3.14)$$

onde i_t é a incerteza devida ao afastamento da temperatura de referência, l_{0p} é a espessura inicial do padrão de referência, $\Delta\alpha$ é a variação do coeficiente de dilatação linear, e ΔT é a variação da temperatura em relação à temperatura de referência.

O experimento foi realizado no campo de trabalho a uma temperatura de aproximadamente 22ºC, temperatura na qual foi realizada a calibração do ponto zero, antes do ensaio. O coeficiente de dilatação térmica da liga de alumínio é 2,31 × 10^{-5} □$^{-1}$.

Pela Equação 3.15 tem-se:

$$i_t = \frac{0{,}764 \cdot 0{,}0000231 \cdot (22-20)}{\sqrt{3}} = 0{,}00002038" \quad (3.15)$$

c_4 = 1 (3.16)

III.3.5.5. Determinação da Incerteza Padrão Combinada (u_c)

A incerteza padrão combinada é estimada através da Equação 2.38. Logo, substituindo os valores já encontrados tem-se:

$$u_c = \sqrt{(1 \times 0{,}00114)^2 + (1 \times 0{,}00040)^2 + (1 \times 0{,}00029)^2 + (1 \times 0{,}00002038)^2}$$

u_c = 0,001242477" (3.17)

III.3.5.6. Determinação dos Graus Efetivos de Liberdade (ν_{eff})

Os graus efetivos de liberdade foram obtidos através da Equação 2.42. Logo, substituindo os valores já encontrados tem-se:

$$\nu_{eff} = \frac{0{,}001242477^4}{\frac{0{,}00114^4}{5-1}+\frac{0{,}00040^4}{\infty}+\frac{0{,}00029^4}{\infty}+\frac{0{,}00002038^4}{\infty}} = 5{,}6 \quad (3.18)$$

III.3.5.7. Determinação da Incerteza Expandida (U)

A incerteza expandida do processo de medição de espessura por ultrassom é obtida através da Equação 2.40. Considerando a distribuição –t, tem-se um k aproximado de 2,52 (ISO GUM, 2003). Logo, substituindo os valores já encontrados tem-se:

U = 2,52 × 0,001242477 = 0,003" (3.19)

III.3.5.8. Incertezas Adicionais Estimadas

Dentre diversas fontes de incerteza possíveis neste processo, duas outras foram observadas durante o experimento. Trata-se das incertezas gerada pela variação da quantidade de acoplante utilizada durante o ensaio e a incerteza proveniente da pressão de apalpação do cabeçote. De modo a fornecer uma noção da influência dessas incertezas no processo foram realizadas 3 medições no mesmo ponto escolhido, o ponto de número 5 da Figura III.13. As incertezas provenientes da variação na quantidade de acoplante e pressão de apalpação do cabeçote foram tratadas como sendo incertezas estatísticas (Tipo A).

III.3.5.8.1. Incerteza Devida à Variação da Quantidade de Acoplante

Para que essa incerteza fosse estimada, foram escolhidas as seguintes situações que ocorrem na prática: uso de pouca quantidade de acoplante, uso de média quantidade ou quantidade “normal” de acoplante e uso de muita quantidade de acoplante. As Tabelas III.8 e III.9 mostram os resultados das medições para as situações de quantidade média de acoplante e para muita quantidade de acoplante, respectivamente. Para o cenário de pouca quantidade não foi possível a coleta de dados visto que a medição se torna impraticável devido a não eliminação do ar presente entre o cabeçote e a superfície de medição.

Tabela III.8. Medições com média quantidade de acoplante. Valores em polegada.

Ponto / Medição	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1ª	0,761	0,767	0,762	0,764	**0,762**	0,784	0,785
2ª	0,763	0,769	0,763	0,766	**0,763**	0,786	0,785
3ª	0,761	0,766	0,763	0,765	**0,762**	0,785	0,785
Média (μ)	0,762	0,767	0,763	0,765	**0,762**	0,785	0,785
Desvio padrão (σ)	0,00115	0,0015	0,00058	0,00152	**0,00058**	0,00100	0,00000

Tabela III.9. Medições com muita quantidade de acoplante. Valores em polegada.

Ponto / Medição	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1ª	0,762	0,769	0,763	0,767	**0,763**	0,786	0,786
2ª	0,762	0,770	0,763	0,766	**0,762**	0,786	0,786
3ª	0,762	0,771	0,763	0,765	**0,764**	0,785	0,786
Média (μ)	0,762	0,770	0,763	0,766	**0,763**	0,786	0,786
Desvio padrão (σ)	0,00000	0,00100	0,00000	0,00100	**0,00100**	0,00058	0,00000

Ainda analisando o ponto de número 5, a diferença entre as médias das medições com muita e média quantidade de acoplante é de apenas 0,001”. Através de uma distribuição retangular, a incerteza pode ser estimada pela Equação 2.20.

$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 0,00058'' \quad (3.20)$$

III.3.5.8.2. Incerteza Devida à Variação da Pressão de Apalpação

Para que essa incerteza fosse estimada, foram escolhidas as seguintes situações que ocorrem na prática: aplicação de pouca quantidade de pressão de apalpação no cabeçote, aplicação de média pressão ou pressão “normal” e aplicação de muita pressão de apalpação. As Tabelas III.10, III.11 e III.12 mostram os resultados das medições para estas situações, respectivamente.

Tabela III.10. Medições com pouca pressão de apalpação aplicada no cabeçote. Valores em polegada.

Ponto / Medição	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1ª	0,761	0,771	0,769	0,766	**0,764**	0,790	0,792
2ª	0,762	0,770	0,763	0,765	**0,763**	0,788	0,785
3ª	0,762	0,767	0,763	0,767	**0,761**	0,787	0,785
Média (μ)	0,762	0,769	0,765	0,766	**0,763**	0,788	0,787
Desvio padrão (σ)	0,00058	0,00208	0,00346	0,00100	**0,00153**	0,00153	0,00404

Tabela III.11. Medições com média pressão de apalpação aplicada no cabeçote. Valores em polegada.

Ponto / Medição	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1ª	0,760	0,767	0,762	0,763	**0,761**	0,783	0,784
2ª	0,761	0,765	0,764	0,766	**0,760**	0,783	0,783
3ª	0,766	0,769	0,763	0,765	**0,760**	0,783	0,783
Média (μ)	0,762	0,767	0,763	0,765	**0,760**	0,783	0,783
Desvio padrão (σ)	0,00321	0,00200	0,00100	0,00153	**0,00058**	0,00000	0,00058

Tabela III.12. Medições com muita pressão de apalpação aplicada no cabeçote. Valores em polegada.

Ponto / Medição	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1ª	0,760	0,767	0,761	0,763	**0,760**	0,783	0,783
2ª	0,760	0,767	0,761	0,764	**0,760**	0,783	0,783
3ª	0,760	0,767	0,761	0,764	**0,761**	0,782	0,782
Média (μ)	0,760	0,767	0,761	0,764	**0,760**	0,783	0,783
Desvio padrão (σ)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00058	**0,00058**	0,00058	0,00058

A diferença entre as médias das medições com pouca e muita pressão de apalpação no cabeçote é 0,003". Admitindo-se uma distribuição retangular, a incerteza pode ser estimada pela Equação 2.20.

$$\lambda = \frac{0{,}003}{\sqrt{3}} = 0{,}00173'' \tag{3.21}$$

III.3.5.9. Recálculo da Incerteza Expandida

A incerteza expandida foi recalculada levando-se em consideração as incertezas provenientes da quantidade de acoplante utilizada e a pressão de apalpação do cabeçote. A Equação 3.22 mostra o novo cálculo da incerteza combinada do processo.

$$u_c = = \sqrt{(0{,}00114)^2 + (0{,}00040)^2 + (0{,}00029)^2 + (0{,}00002038)^2 + (0{,}00058)^2 + (0{,}00173)^2}$$

$$u_c = 0{,}002209066'' \tag{3.22}$$

Logo,

$$\nu_{eff} = \frac{0{,}002209066^4}{\frac{0{,}00114^4}{5-1}+\frac{0{,}00040^4}{\infty}+\frac{0{,}00029^4}{\infty}+\frac{0{,}00002038^4}{\infty}+\frac{0{,}00058^4}{3-1}+\frac{0{,}00173^4}{3-1}} = 4{,}8 \quad (3.23)$$

Para ν_{eff} = 4,8, k = 2,65 aproximadamente. Então:

$$U = 2{,}65 \times 0{,}002209066 = 0{,}006'' \quad (3.24)$$

Como a quantidade de experimentos foi insuficiente para se obter uma conclusão mais apurada sobre o comportamento dessas duas fontes de incerteza, as mesmas foram desconsideradas. Fica a recomendação para em um trabalho futuro se estudar tais fontes de incerteza.

III.3.6. Determinação da Incerteza Expandida no Ponto 4

O mesmo procedimento utilizado para determinação da incerteza expandida do ponto 4 da Figura III.13 e Tabela III.6. Este ponto foi escolhido, pois a média das medições é exatamente igual ao valor mínimo aceitado pelo fabricante da aeronave para a espessura do revestimento que sofreu desbaste.

III.3.6.1. Incerteza Estatística da Amostra (Tipo A)

A Equação 3.25 reflete a incerteza estatística conhecida como Tipo A, que é a incerteza associada à média das medições realizadas.

$$i_A = \frac{0{,}00152}{\sqrt{5}} = 0{,}00068'' \quad (3.25)$$

$$c_1 = 1 \quad (3.26)$$

III.3.6.2. Incerteza Herdada da Calibração do Aparelho de Ultrassom

A incerteza herdada da calibração do aparelho de ultrassom foi estimada usando-se a Equação 3.27.

$$i_h = \frac{0,00080}{2,0} = 0,00040'' \quad (3.27)$$

$$c_2 = 1 \quad (3.28)$$

III.3.6.3. Incerteza Devida à Resolução do Aparelho de Ultrassom

A Equação 3.29 descreve a incerteza proveniente da resolução do aparelho de ultrassom usado no experimento.

$$i_r = \frac{0,001}{2\sqrt{3}} = 0,00029'' \quad (3.29)$$

$$c_3 = 1 \quad (3.30)$$

III.3.6.4. Incerteza Devida ao Afastamento da Temperatura de Referência

O experimento foi realizado no campo de trabalho a uma temperatura de aproximadamente 22ºC, temperatura na qual foi realizada a calibração do ponto zero, antes do ensaio. O coeficiente de dilatação térmica da liga de alumínio é 2,31 × 10^{-5}□$'^{-1}$.

A incerteza devida ao afastamento da temperatura de referência é mostrada pela Equação 3.31.

$$i_t = \frac{0,767 \cdot 0,0000231 \cdot (22-20)}{\sqrt{3}} = 0,00002047'' \quad (3.31)$$

c_4 = 1 (3.32)

III.3.6.5. Determinação da Incerteza Padrão Combinada (u_c)

A incerteza padrão combinada é estimada através da Equação 2.38. Logo, substituindo os valores já encontrados tem-se:

$$u_c = \sqrt{(1 \times 0{,}00068)^2 + (1 \times 0{,}00040)^2 + (1 \times 0{,}00029)^2 + (1 \times 0{,}00002047)^2}$$

u_c = 0,000838899" (3.33)

III.3.6.6. Determinação dos Graus Efetivos de Liberdade (ν_{eff})

Os graus efetivos de liberdade foram obtidos através da Equação 2.42. Logo, substituindo os valores já encontrados tem-se:

$$\nu_{eff} = \frac{0{,}000838899^4}{\frac{0{,}00040^4}{5-1} + \frac{0{,}00040^4}{\infty} + \frac{0{,}00029^4}{\infty} + \frac{0{,}00002092^4}{\infty}} = 9{,}4 \quad (3.34)$$

III.3.6.7. Determinação da Incerteza Expandida (U)

A incerteza expandida do processo de medição de espessura por ultrassom é obtida através da Equação 2.40. Considerando a distribuição –t, tem-se um k aproximado de 2,32 (ISO GUM, 2003). Logo, substituindo os valores já encontrados tem-se:

U = 2,32 × 0,000838899 = 0,002" (3.35)

III.3.7. Determinação da Incerteza Expandida da Área Sem Desbaste (Ponto 6)

O mesmo procedimento utilizado para verificação da incerteza expandida da área que sofreu *blend out* foi realizado para um ponto fora dessa área. O ponto escolhido foi o ponto de número 6 mostrado na Figura III.13 e Tabela III.6.

III.3.7.1. Incerteza Estatística da Amostra (Tipo A)

A Equação 3.36 reflete a incerteza estatística conhecida como Tipo A, que é a incerteza associada à média das medições realizadas.

$$i_A = \frac{0,00089}{\sqrt{5}} = 0,00040" \quad (3.36)$$

$$c_1 = 1 \quad (3.37)$$

III.3.7.2. Incerteza Herdada da Calibração do Aparelho de Ultrassom

A incerteza herdada da calibração do aparelho de ultrassom foi estimada usando-se a Equação 3.38.

$$i_h = \frac{0,00080}{2,0} = 0,00040" \quad (3.38)$$

$$c_2 = 1 \quad (3.39)$$

III.3.7.3. Incerteza Devida à Resolução do Aparelho de Ultrassom

A Equação 3.40 descreve a incerteza proveniente da resolução do aparelho de ultrassom usado no experimento.

$$i_r = \frac{0,001}{2\sqrt{3}} = 0,00029'' \quad (3.40)$$

$$c_3 = 1 \quad (3.41)$$

III.3.7.4. Incerteza Devida ao Afastamento da Temperatura de Referência

O experimento foi realizado no campo de trabalho a uma temperatura de aproximadamente 22ºC, temperatura na qual foi realizada a calibração do ponto zero, antes do ensaio. O coeficiente de dilatação térmica da liga de alumínio é 2,31 × 10^{-5} □$^{-1}$.

A incerteza devida ao afastamento da temperatura de referência é mostrada pela Equação 3.42.

$$i_t = \frac{0,784 \cdot 0,0000231 \cdot (22-20)}{\sqrt{3}} = 0,00002092'' \quad (3.42)$$

$$c_4 = 1 \quad (3.43)$$

III.3.7.5. Determinação da Incerteza Padrão Combinada (u_c)

A incerteza padrão combinada é estimada através da Equação 2.38. Logo, substituindo os valores já encontrados tem-se:

$$u_c = \sqrt{(1 \times 0,00040)^2 + (1 \times 0,00040)^2 + (1 \times 0,00029)^2 + (1 \times 0,00002092)^2}$$

$$u_c = 0,0006354'' \quad (3.44)$$

III.3.7.6. Determinação dos Graus Efetivos de Liberdade (ν_{eff})

Os graus efetivos de liberdade foram obtidos através da Equação 2.42. Logo, substituindo os valores já encontrados tem-se:

$$\nu_{eff} = \frac{0{,}0006354^4}{\frac{0{,}00040^4}{5-1}+\frac{0{,}00040^4}{\infty}+\frac{0{,}00029^4}{\infty}+\frac{0{,}00002092^4}{\infty}} = 25{,}5 \quad (3.45)$$

III.3.7.7. Determinação da Incerteza Expandida (U)

A incerteza expandida do processo de medição de espessura por ultrassom é obtida através da Equação 2.40. Considerando a distribuição –t, tem-se um k aproximado de 2,11 (ISO GUM, 2003). Logo, substituindo os valores já encontrados tem-se:

$$U = 2{,}11 \times 0{,}0006354 = 0{,}001'' \quad (3.46)$$

III.3.8. Erro Sistemático do Procedimento

Com base na Equação 2.1 pode-se determinar o erro sistemático do procedimento de medição de espessura por ultrassom, onde R é a média dos valores tomados para realização da calibração do equipamento de ultrassom e V é o valor verdadeiro do bloco padrão de referência. A Tabela III.13 mostra o erro sistemático para os pontos C e D do bloco padrão de referência usado para realização deste experimento.

Tabela III.13. Erro sistemático do procedimento de ultrassom.

Ponto do bloco padrão	**Média dos valores encontrados na calibração do ultrassom (R), em mm.**	**Valor verdadeiro convencional do bloco padrão (V), em mm.**	**Erro Sistemático (E_s)**	
			mm	**polegada**

C	18,252	18,240	0,012	0,00047
D	20,232	20,238	-0,006	-0,00024

Como a correção para o erro sistemático é inferior a 0,001”, a mesma não será computada no resultado da medição.

III.3.9. Limite de Danos Aceitáveis pelo Fabricante

O SRM (Airbus, 2009) estabelece que somente 5% ou 0,020” (o que for menor) da espessura nominal do revestimento inferior da asa da aeronave podem ser desbastados para remoção de dano, mantendo as aeronaves dentro dos níveis aceitáveis de segurança. No caso do experimento, aplica-se o critério de se aceitar até 0,020” da espessura removida, visto que essa remoção representa menor perda de material do que 5% da espessura nominal. A Tabela III.14 mostra em valores os limites de danos aceitáveis pelo fabricante da aeronave. A Figura III.15 mostra graficamente a espessura mínima aceitável após o desbaste do revestimento segundo o SRM (Airbus, 2009) considerando a tolerância de projeto do revestimento.

Tabela III.14. Limites de danos aceitáveis pelo fabricante da aeronave.

Espessura Nominal do Revestimento	**Tolerância de Fabricação do Revestimento segundo o Desenho de Produção (Anexo 2)**	**Espessura Mínima Aceitável após desbaste segundo o SRM A310 (2009)**
0,787”	+ 0,005” / -0,003”	0,767”

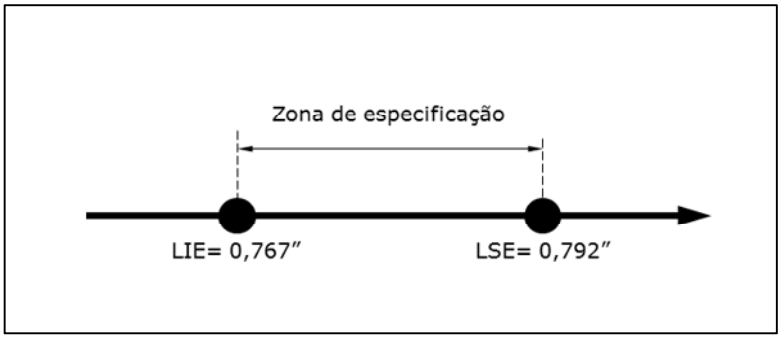


Figura III.15. Zona de especificação da espessura mínima aceitável após o desbaste do revestimento segundo a Airbus (2009).

IV – Resultados e Discussão

A fim de se identificar as incertezas inerentes ao método de verificação de espessura por ultrassom em peças aeronáuticas, este trabalho executou diversos experimentos simulando uma medição de espessura por ultrassom exatamente como ocorre na rotina de trabalho das empresas de manutenção aeronáutica. A medição de espessura por ultrassom é de grande importância visto que após retrabalhos e desbastes em peças, esse método tem a vantagem de não requerer desmontagens dos conjuntos, não requerer acesso ao lado oposto do componente a ser verificado etc.

Os experimentos simularam uma corrosão no revestimento inferior da asa de uma aeronave Airbus modelo A310. Corrosões são danos típicos nestes componentes, aparecendo principalmente ao redor da cabeça dos elementos de fixação, devido ao contato de materiais dissimilares na presença de umidade. Os experimentos analisaram as incertezas inerentes ao método em duas áreas, dentro do desbaste e na área com espessura nominal, adjacente ao desbaste para eliminação da corrosão.

IV.1. Resultado da Medição Realizada na Área Desbastada (Ponto 5)

O primeiro experimento consistiu em calcular a incerteza expandida inerente ao método de medição de espessura por ultrassom levando-se em consideração as incertezas estatísticas, herdada do aparelho de ultrassom, devida à resolução do aparelho e devida ao afastamento da temperatura de referência.

O estudo realizado mostrou que a incerteza expandida do método vale ±0,003" com 95% de confiabilidade. Considerando o valor médio encontrado para o ponto de número 5 da Figura III.13 e Tabela III.6, o resultado da medição é mostrado na Equação 4.1.

$$RM = [0{,}764 \pm 0{,}003]\ polegada \tag{4.1}$$

A Tabela III.14 mostra os limites de aceitação do fabricante para remoção de espessura do revestimento inferior da asa, que é de no máximo 0,020” de material removido, representando 0,767” de espessura remanescente. Aplicando-se as tolerâncias de fabricação de acordo com o desenho de produção (Anexo 2) tem-se que a zona de especificação da espessura do revestimento após o desbaste máximo permitido fica entre 0,767” e 0,792”, isto é, um revestimento desbastado pontualmente que possua espessura mínima dentro destes limites,

seria considerado aceitável como estabelecido pelo fabricante, conforme mostrado na Figura III.15.

No entanto, aplicando-se a faixa de incerteza calculada e exposta na Equação 4.1 pode-se estabelecer a zona de conformidade, como mostrado na Figura IV.1. Assim, pode-se afirmar que a situação reproduzida no experimento mostra que o valor médio das medições encontra-se fora da zona de conformidade, com possibilidade de atingir o limite inferior de conformidade (LIC) aplicando-se a faixa de incerteza.

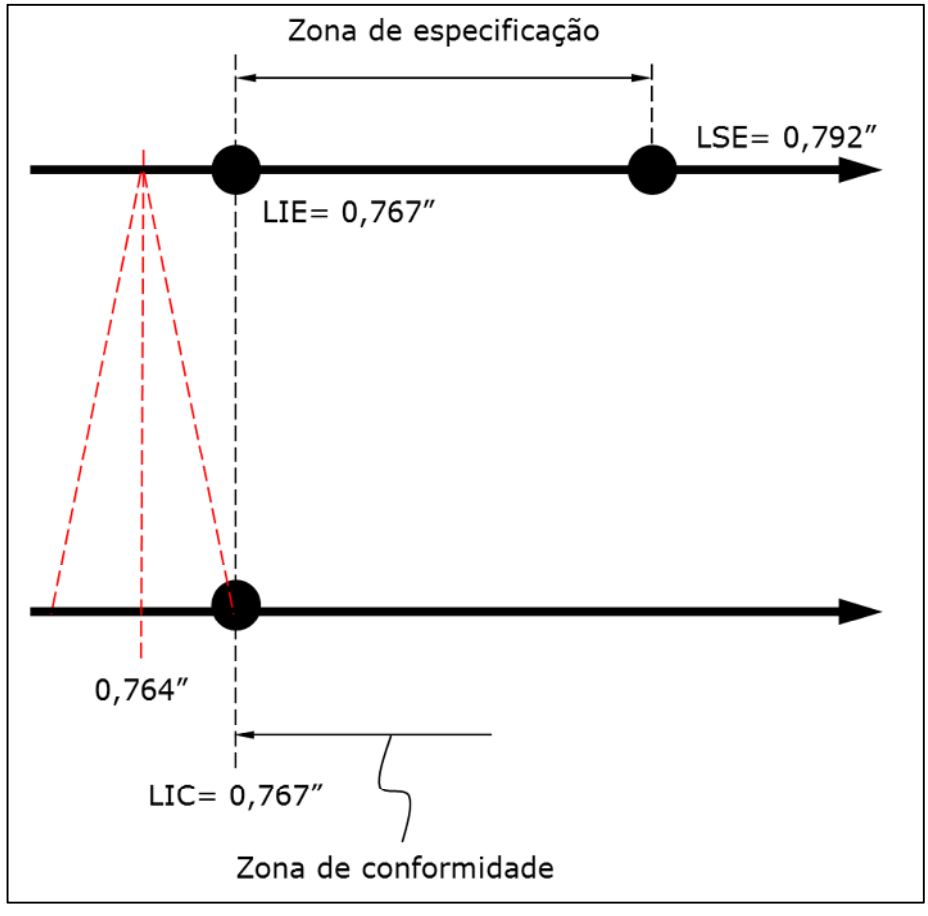


Figura IV.1. Zona de conformidade da espessura mínima aceitável após desbaste do revestimento da asa (Ponto 5).

A asa de uma aeronave é um membro estrutural primário que sofre solicitações mecânicas extremas. A aprovação do revestimento da asa nestas condições implicaria, dentre outras consequências, na diminuição da resistência à fadiga do elemento estrutural pela maximização de pontos concentradores de tensão. Em certos casos com um número muito maior de pontos fora da zona de conformidade, a segurança de voo estaria seriamente comprometida, o que potencialmente causaria uma falha catastrófica.

IV.2. Resultado da Medição Realizada no Ponto 4

Esta etapa do experimento consistiu na avaliação da contribuição das incertezas em um ponto em que a média das medições coincidia com o limite inferior de especificação (LIE) determinado pelo fabricante. O ponto escolhido foi o ponto de número 4 cuja média das medições foi de 0,767”. Conforme o primeiro experimento, não foi considerado a influência da variação da quantidade de acoplante, nem a variação da pressão de apalpação. A incerteza expandida foi de 0,02”. A Equação 4.2 mostra o resultado da medição com a influência dessa incerteza.

$$RM = [0{,}767 \pm 0{,}002]\ polegada \tag{4.2}$$

Aplicando-se a faixa de incerteza calculada nesta etapa e exposta na Equação 4.2 pode-se estabelecer a zona de conformidade, como mostrado na Figura IV.2. Assim, pode-se afirmar que apesar do valor da média das medições ser exatamente igual ao limite inferior de especificação do revestimento, com a influência da incerteza de medição existe a possibilidade do valor medido estar menor do que o recomendado pelo fabricante para um voo seguro.

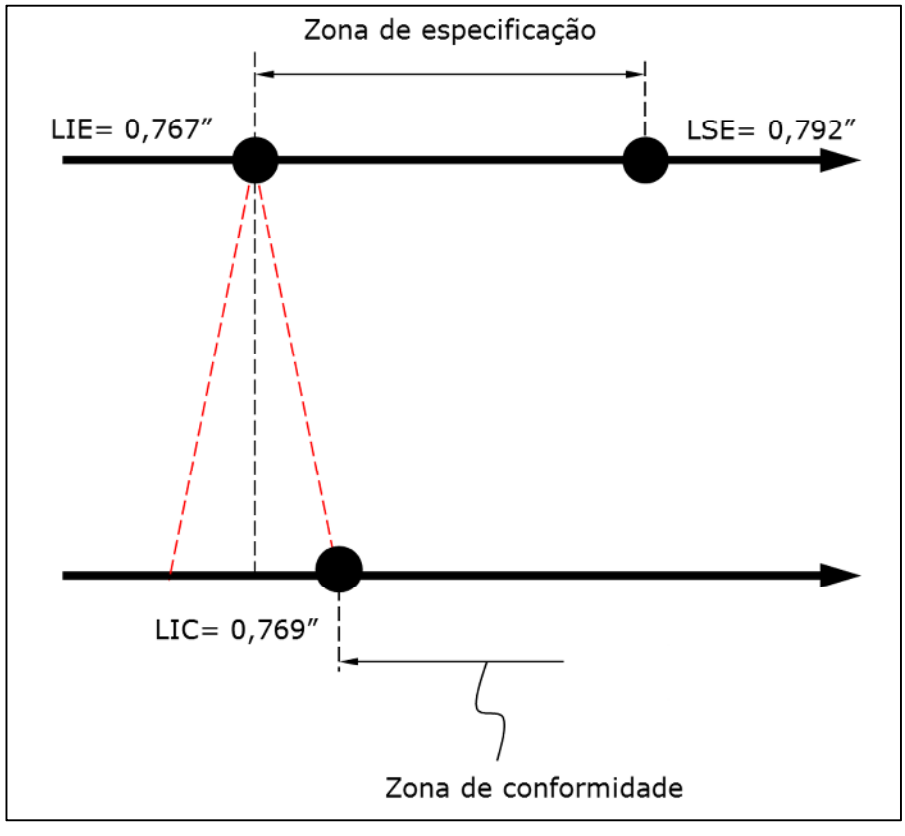


Figura IV.2. Zona de conformidade da espessura mínima aceitável após desbaste do revestimento da asa (Ponto 4).

IV.3. Resultado da Medição Realizada na Área sem Desbaste (Ponto 6)

Esta etapa do experimento consistiu na avaliação da contribuição das incertezas em um ponto em que não fora realizado desbaste *(blend out)*. O ponto escolhido foi o ponto de número 6 cuja média das medições foi de 0,784". Conforme o primeiro experimento, não foi considerado a influência da variação da quantidade de acoplante, nem a variação da pressão de apalpação. A incerteza expandida foi de 0,01". A Equação 4.3 mostra o resultado da medição com a influência dessa incerteza.

$$RM = [0{,}784 \pm 0{,}001]\ polegada \tag{4.3}$$

Aplicando-se a faixa de incerteza calculada nesta etapa e exposta na Equação 4.3 pode-se estabelecer a zona de conformidade, como mostrado na Figura IV.3. Assim, pode-se afirmar que a situação reproduzida no experimento mostra que o valor médio das medições continua dentro da faixa de incerteza, porém mais próximo da zona de conformidade.

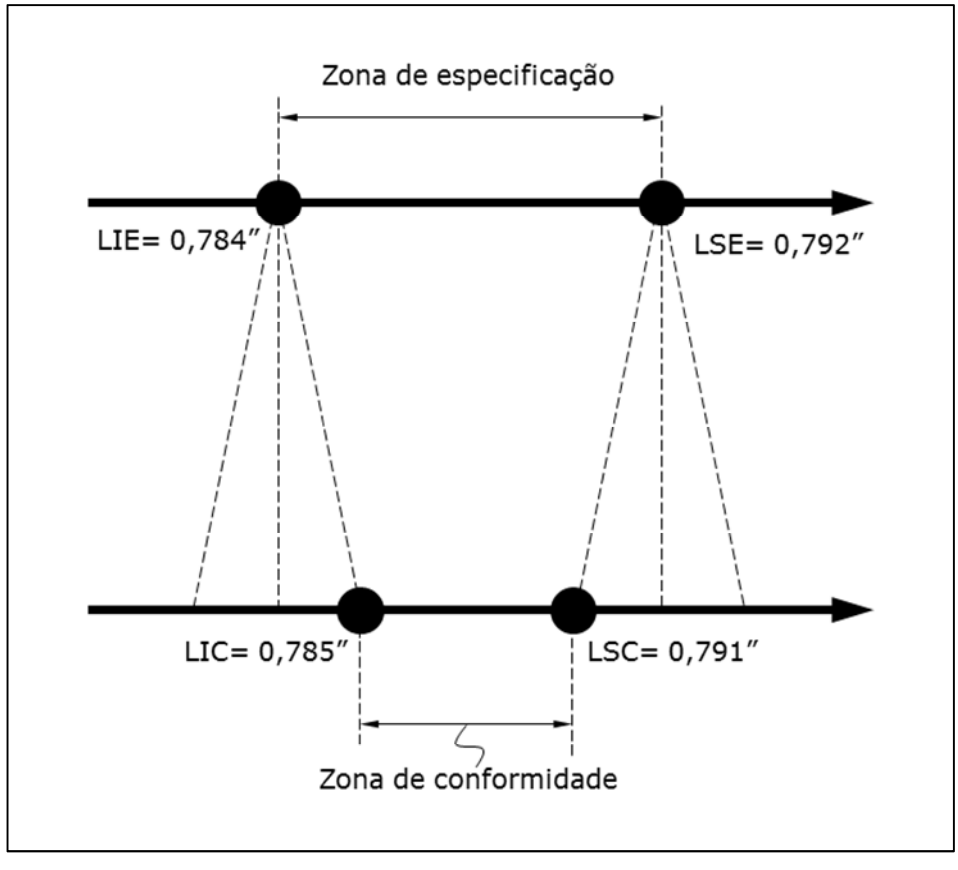


Figura IV.3. Zona de conformidade da espessura nominal do revestimento da asa.

IV.4. Comparação de Resultados dos Experimentos

Comparando-se os experimentos, nota-se que a incerteza expandida do experimento realizado na área sem desbaste é inferior a incerteza da área com desbaste. Um dos motivos que leva a esse resultado é o fato da superfície do revestimento nominal ser mais lisa e uniforme do que a superfície do revestimento desbastado. Em geral, o acabamento superficial dos revestimentos de asa está na ordem de 125 micropolegadas. Apesar dos procedimentos de *blend out* requererem um acabamento superficial desta ordem, grande parte dos operadores de aeronaves não mantém esse requisito. No experimento realizado o cenário não foi diferente, já que com a rugosidade visivelmente inferior a do revestimento nas condições originais, a superfície desbastada possui uma pequena irregularidade na sua uniformidade, o que pode influenciar de maneira negativa no processo de medição. Apesar desta constatação não foi medida a rugosidade da área desbastada nem estimada a incerteza associada a potencial incerteza associada a ela.

IV.5. Proposição de Uma Metodologia para Medição de Espessura por Ultrassom na Área Aeronáutica

Este trabalho propõe uma metodologia baseada no fluxograma da Figura IV.4 que visa aperfeiçoar a medição de espessura por ultrassom no revestimento da asa, de modo a estabelecer uma zona de conforto para facilitar na tomada de decisão do avaliador dos resultados.

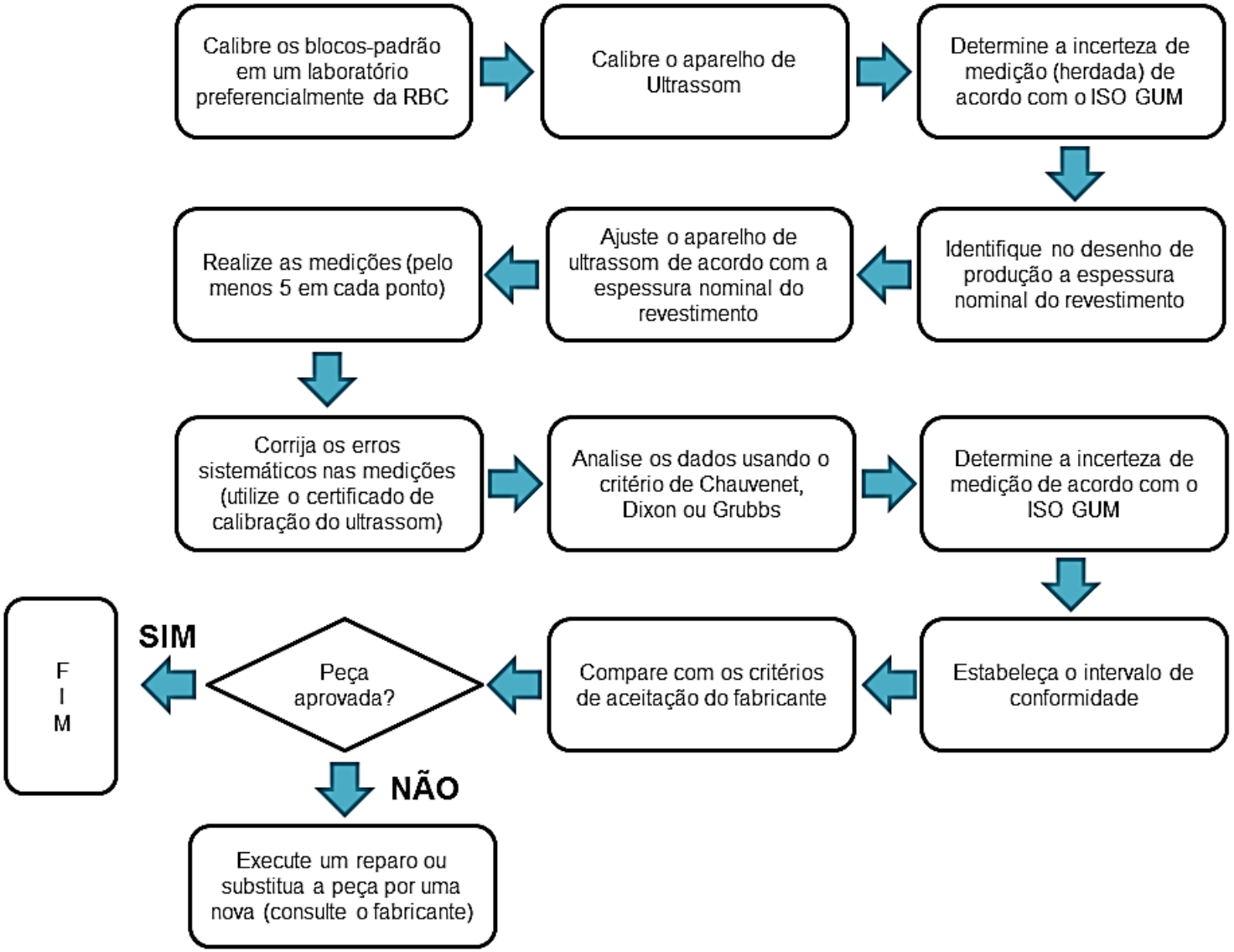


Figura IV.4. Fluxograma para verificação de espessura por ultrassom no revestimento da asa.

V – Conclusões

Através dos estudos realizados no âmbito deste trabalho é possível concluir que a metodologia utilizada para medição de espessura por ultrassom na indústria aeronáutica pode ser aperfeiçoada com a implementação de um método que leve em consideração as incertezas inerentes ao processo e estabeleça a zona de conformidade para este processo. Atualmente, a verificação de espessura remanescente por ultrassom em aeronaves é realizada tomando-se apenas uma medida em cada ponto, analisando-se o ponto com menor valor e comparando-o com os limites estabelecidos pelo manual do fabricante. Seguindo este roteiro, em diversas situações, o avaliador estará lidando com uma medida no limiar da aceitação pelo fabricante e caso as incertezas inerentes ao processo não sejam levadas em consideração, o processo fica sujeito ao problema da aceitação de peças ruins ou da rejeição de peças boas. Em se tratando da indústria aeronáutica e do grau de criticidade deste segmento, todo esforço deve ser desprendido para que a qualidade da medição seja cada vez melhor.

Ficou evidenciado que se o metrologista desconsiderar a incerteza de medição haverá a possibilidade do valor verdadeiro da grandeza se apresentar fora do limite de especificação, mesmo que a média das medições realizadas se apresente na zona de especificação. Se o metrologista, por exemplo, considerasse somente a primeira medição no ponto 5 (0,767”) e fizesse uma análise simples de comparação com os limites aceitáveis no manual, ele estaria aprovando o revestimento da asa para retornar ao serviço. No entanto, se ele tivesse considerado somente a terceira medição do ponto 5 (0,760”) ele rejeitaria a peça de imediato. Daí a necessidade de se ter uma metodologia baseada no fluxograma proposto na Figura IV.4.

Com os estudos experimentais realizados no ponto 5 constatou-se ainda que se fossem realizadas apenas três medições ao invés de cinco, a incerteza expandida de medição passaria de ±0,003” para ±0,006” (tomando-se as três primeiras medições conforme Tabela III.6). Isto geraria uma expressiva diminuição da zona de conformidade, impactando na qualidade da medição, e, consequentemente, na tomada de decisão no tocante a avaliação do retrabalho. Duplicar a dúvida a respeito do valor verdadeiro de uma grandeza implica na diminuição dos custos inerentes à medição. No entanto, há uma consequente piora na qualidade dos resultados, o que aumenta a probabilidade de uma tomada de decisão errada. Isto pode causar custos e prejuízos muito maiores, ligados, principalmente à segurança. É importante salientar também que ao se considerar cinco medições por ponto, há um aumento nos custos referentes à medição e no tempo de permanência em solo da aeronave. De antemão, porém, fica evidenciada a importância de não se tomar apenas um ponto de medição como é prática atual da indústria aeronáutica.

Os estudos realizados revelaram outro ponto importante a ser abordado, que diz respeito à rugosidade da peça medida e da uniformidade da superfície. Durante este estudo foi

demonstrado que a incerteza inerente ao processo é minimizada quando a peça é mais bem acabada superficialmente e quando a superfície medida é plana e uniforme. Isto facilita a interface entre o cabeçote (transdutor) e a peça a ser medida. Recomenda-se que antes da realização da medição por ultrassom, tanto o acabamento superficial da peça na área desbastada e a uniformidade da mesma sejam melhoradas ao máximo de forma a contribuir para qualidade do processo.

Concernente à contribuição das parcelas de incertezas de medição, ficou evidenciado que a incerteza devida ao afastamento da temperatura de referência contribuiu com apenas 0,7% para a incerteza expandida, o que a torna praticamente desprezível para o caso de medição de espessura por ultrassom.

VI – Recomendações para Trabalhos Futuros

Uma ideia para trabalhos futuros é realizar novos estudos sobre as incertezas inerentes a medição de espessura por ultrassom, levando-se em consideração a variação de carga da bateria do aparelho de ultrassom, variando-se os técnicos de medição e agrupando as medições pelo tempo de experiência do operador, variando-se a rugosidade da superfície medida e aprofundando-se na estimativa das incertezas variando-se a quantidade de acoplante e pressão de apalpação. Os estudos experimentais realizados no ponto 5 mostraram que se faz necessário, um estudo futuro mais aprofundado dos impactos gerados pelo aumento do número de medições em cada ponto.

Outra ideia seria a criação de um programa simples que funcione como uma calculadora de incertezas, tornando o julgamento do avaliador mais rápido e preciso.

Referências Bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Guia para expressão da incerteza de medição – ISO GUM. Rio de Janeiro: INMETRO e ABNT, 2003. 120 p.

ABNT-NBR 15865:2010; “Metrologia, Ensaios Não Destrutivos, Calibração de instrumentos de medição de espessura por ultrassom”, 2010.

AIRBUS, **A310 Aircraft Maintenance Manual**, “Landing Gear – General – Description and Operation”, Chapter 32-00-00, France, Jun 2011.

AIRBUS, **A310 Non-Destructive Test Manual**, “PART 4 – Ultrasonic Measurement of Remaining Structure Thickness in Large Blended Out Areas”, Chapter 51-10-04, Germany, Jun 2010.

AIRBUS, **A310 Structural Repair Manual**, “Main Skins”, Allowable Damages, Chapter 57-20-12, Germany, Dec 2009.

AGFA, “DA 45x improved features for a successful family of thickness probes”. Catalog. Krautkramer NDT Ultrasonic Systems, Peter Renzel, 2010.

ANDREUCCI, Ricardo. **Aplicação Industrial Ensaio por Ultra-som**, Aplicação industrial; Ed. Jul/2008 – Abendi. Disponível em <http://www.abende.org.br>. Acesso em: 30 Nov 2010.

ASM **Metals Handbook Volume 17**, Nondestructive Evaluation and Quality Control, 9th Edition, ASM International, 1992.

BALLOU, G. **Handbook for Sound Engineers**, The New Audio Cyclopedia, Howard W. Sans & Company, Indiana, 1987.

CABRAL, P., “Erros e Incertezas de Medição”. Apostila, julho 2004.

CARODISKEY, Thomas J. and MEYER, Paul A. **Thickness Measurement in Materials of Unknown Acoustic Velocit**. October 1997.

CASTRUP, Howard, “Distributions for Uncertainty Analysis”, Bakersfield, last revision in 2007. Presented at the 2001 IDW Conference, Knoxville, TN.

CHEEKE, J. D. N**, Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves**, CRC press LLC, USA, 2002.

CNI. COMPI, Metrologia. 2. ed. rev. Apostila. Brasília, 2002.

CONEJERO, A. S., MIZUTANI, T., “Melhoria da Incerteza de Medição na Calibração de Blocos-Padrão Usando um Coeficiente de Expansão Térmico mais Exato”, Mitutoyo Brasil, 2006.

COSTA-FÉLIX, R. P. B. **Aplicações metalúrgicas do ultra-som empregado em engenharia biométrica utilizando varreduras de senos (Chirps)**, Rio de Janeiro, mar. 2005. 196 p. Tese 9Doutorado em Engenharia Biomédica), COPPE, UFRJ.

COUTO, P. R. G. “Estimativa da incerteza de medição na análise química”. Apostila. Cooperação técnica Alemanha – Brasil. Projeto Metrologia Nordeste II. Recife, 2002.

CTA/IFI/FQI/VEM, Apostila de treinamento em Ultrassom Nível II, Varig Engenharia e Manutenção, 2002.

DEFELSKO Co., “The Quality of Measure”, Disponível em <http://www. defelsko.com>. Acesso em: 05 Abr 2012.

EA-4/16 – EA Guidelines on the Expression of Uncertainty in Quantitative Testing, 2004.

FAA, U. S. Department of Transportation, **Ultrasonic Testing for Aircraft**, USA, 1975.

FIDÉLIS, Gilberto C. Apostila de Incerteza de Medição. Centro de Educação, Consultoria e Treinamento, CECT. Disponível em: <http://www.cect.com.br>. Acesso em: 30 dez 2010.

FIDELIS, Gilberto. C. “Como Determinar a Incerteza de Medição”, CECT, 2010. Disponível em <http://www.cect.com.br>. Acesso em: 26 Mar 2011.

FRIDMAN A. E. **The Quality of Measurements**, A Metrological Reference, Springer; Russia, 2012.

GUIMARÃES, V. A., **Controle dimensional e geométrico: uma introdução à metrologia industrial**, Passo Fundo: EDIUPF, 1999.

GUPTA, Dr. S. V. **Measurement uncertainties**, Physical Parameters and Calibration of Instruments; Springer, India, 2012.

HELLIER, C. J., **Handbook of Nondestructive Evaluation**, McGraw-Hill, USA, 2003.

INMETRO – Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2008). 3ª Edição Brasileira. Rio de Janeiro, 2009. 78 p.

ISO 14253-1, 1998, “Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications”.

ISO 3534-1. “Statistics - Vocabulary and symbols - Part 1: General statistical terms and terms used in probability”, 2006.

ISO 9001:2008. “Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos”, 2a. Edição, 2008.

KRAUTKRAMER DMS 2E/ DMS 2/ DMS 2TC, Manual. “Important remarks about thickness testing”, “Wall thickness measurement with the DMS” and “Calibrating”, Issue 3, May 2002.

KREYSZIG, E. “Statistische Methoden und Ihre Anwendungen”. Vandenhoeck & Ruprecht. ISBN 3-525-40717-3, Göttingen, 1985.

LEVINE, D.; BERENSON, M.; STEPHAN, D. **Statistics For Managers**, Using Microsoft Excel, 5th Edition, Prentice Hall, 2008.

LINK, W. **Tópicos avançados de metrologia mecânica**, Confiabilidade metrológica e suas aplicações.1a ed., São Paulo, 2000.

MAURIS, G. “Propagation of measurement uncertainty expressed by a possibility distribution with coverage-interval-based semantics”. XVIII IMEKO WORLD CONGRESS. Metrology for a sustainable development. Rio de Janeiro, Brazil, 2006.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C., **Applied Statistics and Probability for Engineers**, Wiley, 3rd Edition, ISBN 0471204544, Sep 2002.

NDT Education Resource Center, Brian Larson, Editor, 2001-2012, The Collaboration for NDT Education, Iowa State University. Disponível em <http://www.ndt-ed.org>. Acesso em: Fev 2011.

OLIVEIRA, Elcio Cruz de; "Comparação das Diferentes Técnicas para Exclusão de "Outliers", **Rede Metrológica do Estado de São Paulo – REMESP**, Junho. 2008.

OLIVEIRA, E. G. de; COSTA-FÉLIX, R. P. B. da; ALVES, C. H. F., "Validação de um sistema de calibração de transdutores de ultra-som por auto-reciprocidade", Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, v. 24, n.1, p. 39-49, abril 2008.

OLIVEIRA, José Eduardo Ferreira de**. A metrologia aplicada aos setores industrial e de serviço**. Principais aspectos a serem compreendidos e praticados no ambiente organizacional, Brasília: SEBRAE, 2008.

PENG, Xuelian. "Calibration Method Study of Ultrasonic Thickness Gauge". 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.

POTTER, R. W. **The art of measurement**, theory and practice. Prentice-Hall, New Jersey, 2000. ISBN 0-13-026174-2.

SLEELE, A. "Analysis of measurement comparisons". XVIII IMEKO WORLD CONGRESS. Metrology for a sustainable development. Rio de Janeiro, Brazil, 2006.

THEOBALD, P., ZEQIRI, B. et.al. **Couplants and Their Influence on AE Sensor Sensitivity**. National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, United Kingdom, 2008.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**. Editora Edgard Blücher, 2a edição, São Paulo, 1996. ISBN 8521200560.

WOOD, B. M. & DOUGLAS, R. J. "Confidence-interval interpretation of a measurement pair for quantifying a comparison". Metrologia, 35, pp 187-196, Sèvres, 1998.

Anexo 1 – Exemplo de Certificado de Calibração – Folha 1 de 2.

IPT



Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Metrologia Mecânica / CME

RELATÓRIO DE MEDIÇÃO Nº 6 948-204

Cliente: General Eletric do Brasil Ltda.
Av. das Nações Unidas, 8501
CEP 05425-070 - São Paulo - SP

NATUREZA DO TRABALHO: Medição das alturas
REFERÊNCIA: Correio eletrônico de 09.01.2009

1. MATERIAL
Padrão escalonado, fabricante Krautkramer, modelo não consta, nº de série 1134, identificação não consta, com dimensões aproximadas de (120 x 15 x 8) mm

2. MÉTODO UTILIZADO
Foi utilizado um micrômetro de pontas finas, identificação 28087, certificado IPT nº 92 214-101 de 26.01.2009.
Foram medidas as alturas, conforme figura 1.
A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência k = 2,0, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

3. RESULTADO

Identificação	Altura (mm)
A	1,001
B	1,999
C	2,999
D	3,999
E	4,999
F	6,000
G	6,999
H	7,996

U = 0,002 mm

Anexo 1 – Exemplo de Certificado de Calibração – Folha 2 de 2.

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Relatório de Medição nº 6 948-204

Laboratório de Metrologia Mecânica/ CME
Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre/Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número 003.

4. LIMITES ESPECIFICADOS
Os valores dos limites especificados não foram fornecidos pelo cliente.

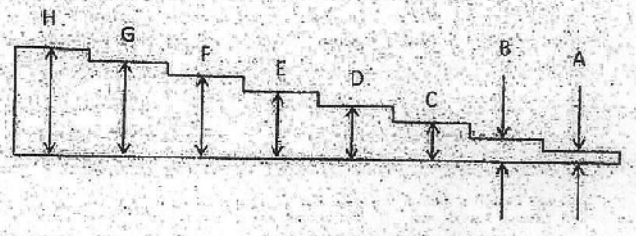


Figura 1 - Padrão escalonado

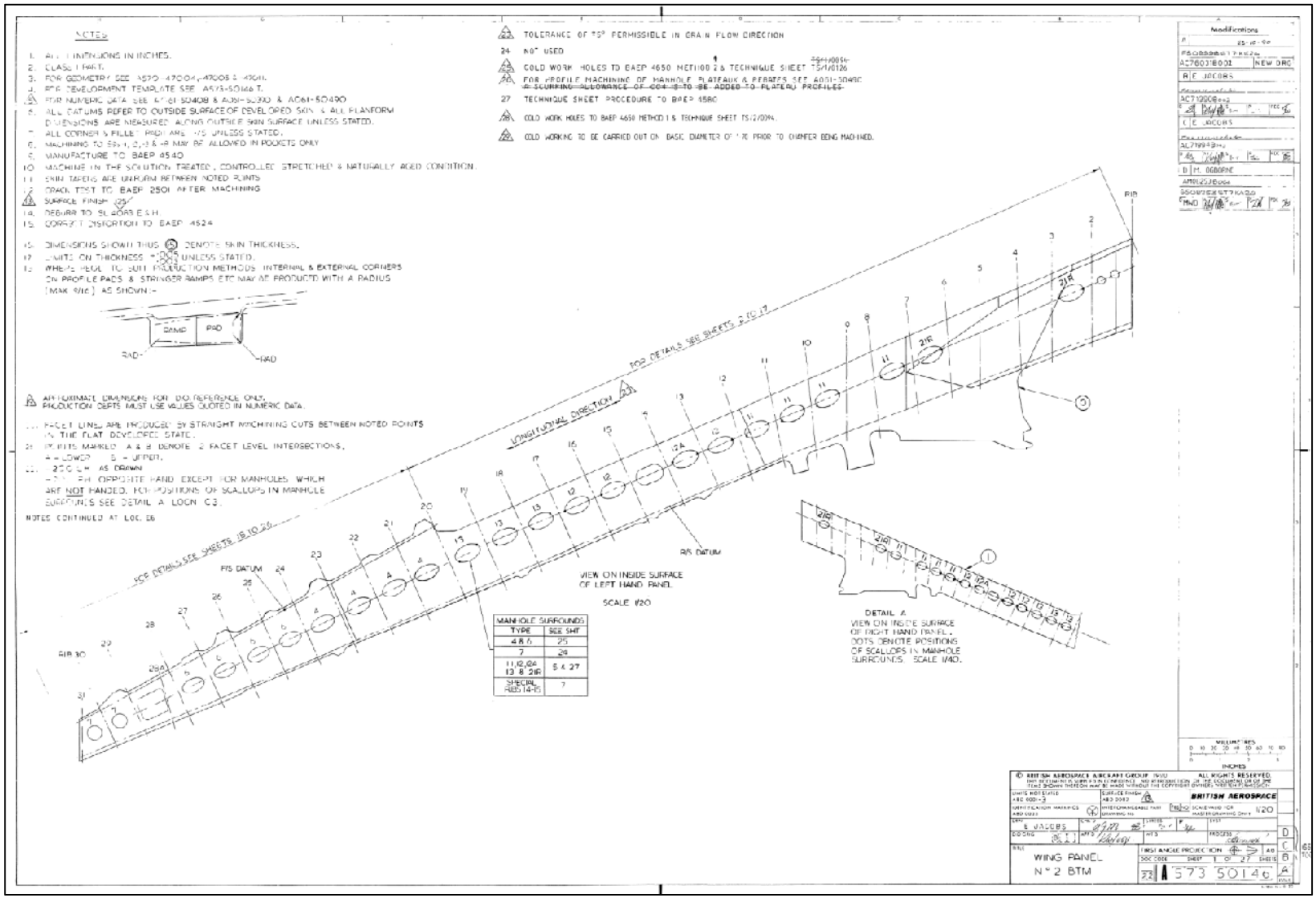
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS
Este relatório atende aos requisitos de acreditação da Cgcre / Inmetro, que avaliou a competência do Laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI).
Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente ao espécime medido.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.
Data da medição: 05.02.2009
Temperatura ambiente: (20,2 ± 0,5)°C
A avaliação dos resultados será feita pelo cliente.

São Paulo, 05 de fevereiro de 2009.

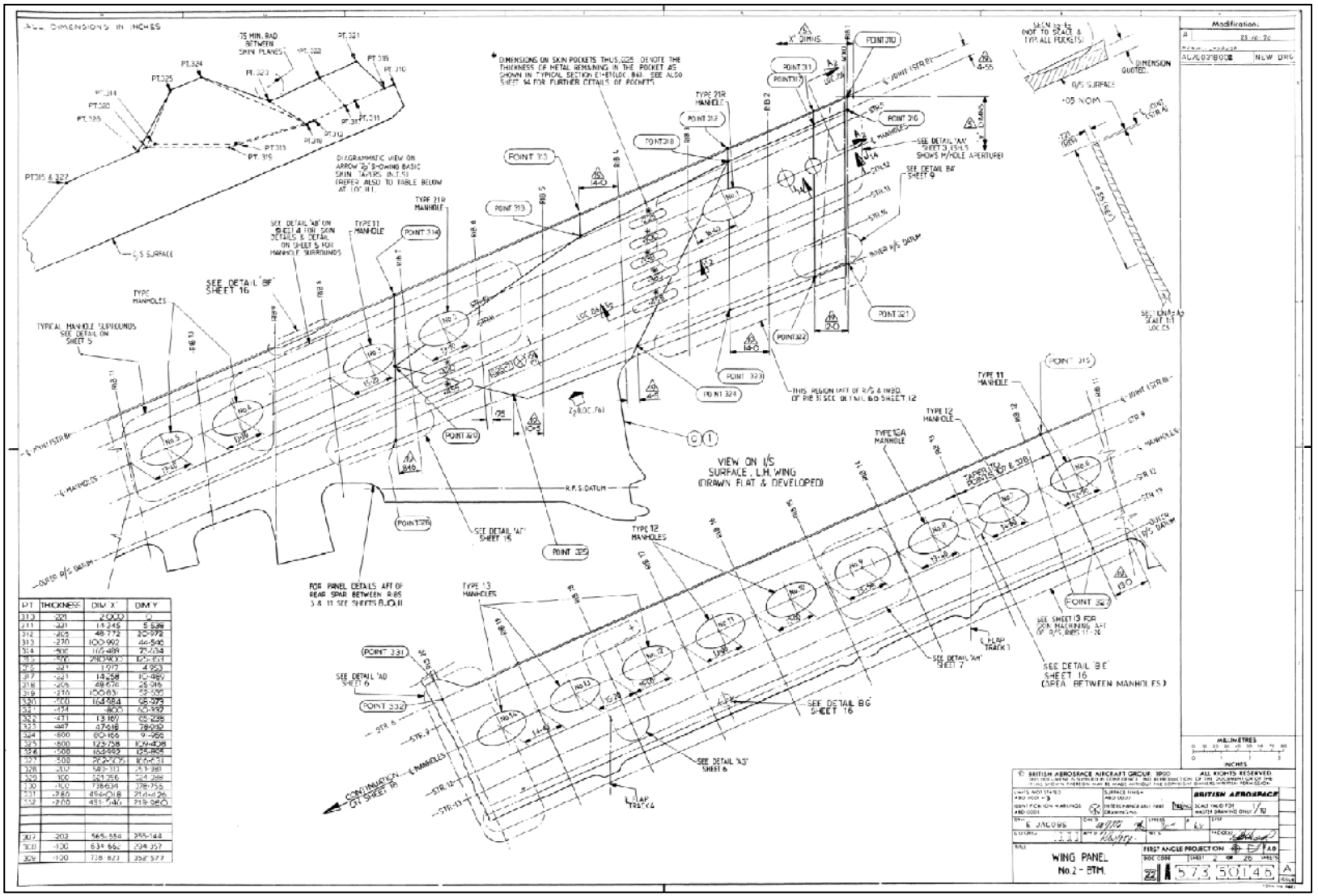
Centro de Metrologia Mecânica e Elétrica
Laboratório de Metrologia Mecânica
Físico Douglas Mamoru Yamanaka
Supervisor da calibração
RE nº 8028.3

Centro de Metrologia Mecânica e Elétrica
Laboratório de Metrologia Mecânica
Tecg° Mecânico Manuel Antonio Pires Castanho
Responsável pelo Laboratório
CREA nº 186.075/D - RE nº 7502.8

Anexo 2 – Desenho de Produção do Revestimento Inferior da Asa – Folha 1 de 2.



Anexo 2 – Desenho de Produção do Revestimento Inferior da Asa – Folha 2 de 2.



Anexo 3 – Certificado de Calibração da MMC – Folha 1 de 3.

HEXAGON METROLOGY

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO PELA CGCRE/INMETRO SOB O Nº 292

CAL 0292

Certificado de Calibração Nº DEA 186-10

DADOS DO SOLICITANTE PAGINA 1 DE 3

NOME : CEFET - CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TEC CELSO SUCKOW DA FONSECA
ENDEREÇO : AV.MARACANÃ, 229
CIDADE : RIO DE JANEIRO ESTADO : RJ CEP : 20271-110

IDENTIFICAÇÃO DO ITEM CALIBRADO

MODELO	: MH3D 4.5.4	Nº SÉRIE	: 7100010	TIPO DE MÁQUINA	: Pórtico
SOFTWARE	: REFLEX	VERSÃO	: V 3.052	RESOLUÇÃO	: 0.100 (µm)
CABEÇOTE	: TESASTAR	Nº SÉRIE	: 3B 1301 01	IDENT. CLIENTE	: 7100010
APALPADOR	: -	Nº SÉRIE	: -		
PONTA	: 3X30	EXTENSÃO	: -		

PADRÕES UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO

DESCRIÇÃO	IDENTIFICAÇÃO	CERTIFICADO Nº	ÓRGÃO	VALIDADE
Step Gauge - 420 mm	200606/S302	DIMCI 1949/2009	INMETRO	jul-2011
Esfera 25 mm	127653	DIMCI 1974/2009	INMETRO	jul-2011
Termômetro 420-1	01570307-2	2660/09	CERTI	jul 2011

TEMPERATURA MÁXIMA E MINIMA DURANTE TODO O PROCESSO DE CALIBRAÇÃO.

MINIMA : 20.2 °C MÁXIMA : : 20.7 °C

ESPECIFICAÇÃO DO FABRICANTE (MPEe E MPEp)

ERRO DE EXATIDÃO (MPEe) : 3.0 + 1.0 L / 250 µm ERRO DE APALPAÇÃO (MPEp) : 3.5 µm

Notas :

1 - CALIBRAÇÃO EFETUADA CONFORME INSTRUÇÃO INTERNA IQ9-03 REV.14 (VER MÉTODO DE CALIBRAÇÃO NESTE CERTIFICADO)
2 - OS RESULTADOS DESTE CERTIFICADO REFEREM-SE EXCLUSIVAMENTE AO INSTRUMENTO SUBMETIDO À CALIBRAÇÃO NAS CONDIÇÕES ESPECIFICADAS, NÃO SENDO EXTENSIVO A QUALQUER LOTE.
3 - A REPRODUÇÃO DESTE CERTIFICADO SÓ PODERÁ SER TOTAL E COM AUTORIZAÇÃO DA HEXAGON METROLOGY SISTEMAS DE MEDIÇÃO LTDA.
4 - A INCERTEZA EXPANDIDA É OBTIDA MULTIPLICANDO-SE A INCERTEZA PADRÃO COMBINADA PELO FATOR DE ABRANGÊNCIA K PARA UM NIVEL DE APROXIMADAMENTE 95%.
5 - TODOS OS RESULTADOS OBTIDOS SÃO CALCULADOS PARA UMA TEMPERATURA DE 20ºC.
6 - NA FÓRMULA DO "MPEe" E DA "INCERTEZA DE MEDIÇÃO", "L" CORRESPONDE AO COMPRIMENTO MEDIDO EM MILIMETROS.
7 - SE A MÁQUINA SOFRE AJUSTE, O CERTIFICADO VIRÁ ACRESCIDO DAS LETRAS "A" E "D", ONDE A = ANTES DO AJUSTE E D = DEPOIS DO AJUSTE. AJUSTE NÃO FAZ PARTE DO ESCOPO DE ACREDITAÇÃO.

9 de junho de 2010
DATA DA CALIBRAÇÃO

LEANDRO LUIZ APONI
TÉCNICO DE CALIBRAÇÃO

5 de julho de 2010
DATA DA EMISSÃO

RENÉ ZANAROLI BENEDETTI
SIGNATÁRIO AUTORIZADO

Hexagon Metrology Sistemas de Medição Ltda
Av. Engenheiro Eusébio Stevaux, 2496 - CEP 04696-000 - S. Paulo - SP - Brasil
Tel.: (55 11) 5525-6000 - Fax: (55 11) 5687-2101 - www.hexagonmetrology.com.br

Anexo 3 – Certificado de Calibração da MMC – Folha 2 de 3.

HEXAGON METROLOGY

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO PELA CGCRE/INMETRO SOB O Nº 292

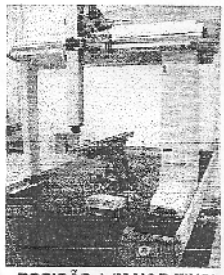
Certificado de Calibração Nº DEA 186-10

MÉTODO DE CALIBRAÇÃO - EXATIDÃO (MPEe)

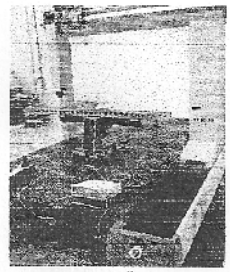
PARA ESTE PROCESSO FOI UTILIZADO O PADRÃO ESCALONADO

FORAM TOMADOS 5 PONTOS NA ESCALA, SENDO QUE O MENOR É <=30mm E O MAIOR ATINGINDO 96% DA DIAGONAL FORMADA PELOS 3 EIXOS.

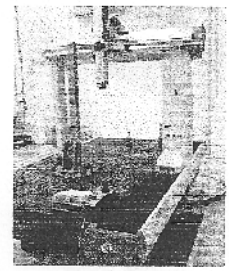
FORAM REALIZADAS 3 MEDIÇÕES EM 7 POSIÇÕES DIFERENTES COMO MOSTRAM AS FOTOS ABAIXO (O PADRÃO NAS FOTOS É APENAS PARA ILUSTRAR AS POSIÇÕES).



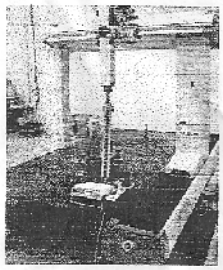
POSIÇÃO 1 (MAIOR EIXO)



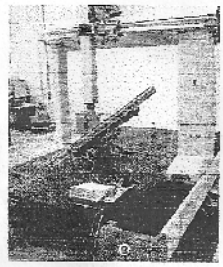
POSIÇÃO 2



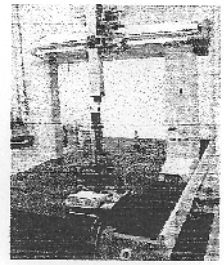
POSIÇÃO 3



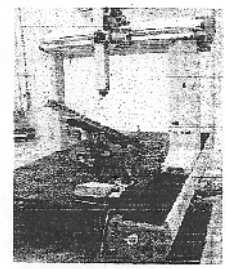
POSIÇÃO 4



POSIÇÃO 5

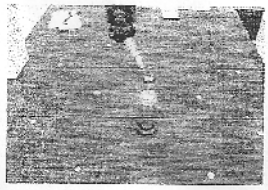


POSIÇÃO 6



POSIÇÃO 7

MÉTODO DE CALIBRAÇÃO - ERRO DE APALPAÇÃO (MPEp)



PARA ESTE TESTE FOI UTILIZADA A ESFERA PADRÃO CERTIFICADA DE PROPRIEDADE DA HEXAGON METROLOGY DE DIÂMETRO APROXIMADO DE 25mm, POSICIONADA NO CENTRO DA MÁQUINA, COMO MOSTRA A FOTO AO LADO.

COM O APALPADOR DO CLIENTE POSICIONADO A UM ÂNGULO NÃO PARALELO AOS EIXOS DA MÁQUINA, FORAM TOCADOS 25 PONTOS DISTRIBUÍDOS NA ÁREA DA CALOTA ESFÉRICA. O RESULTADO DESTA MEDIÇÃO É A AMPLITUDE DOS RAIOS POLARES MEDIDOS. ESTE TESTE É REPETIDO 3 VEZES.

Hexagon Metrology Sistemas de Medição Ltda
Av. Engenheiro Eusébio Stevaux, 2496 - CEP 04696-000 - S. Paulo - SP - Brasil
Tel.: (55 11) 5525-6000 - Fax: (55 11) 5687-2101 - www.hexagonmetrology.com.br

Anexo 3 – Certificado de Calibração da MMC – Folha 3 de 3.

HEXAGON METROLOGY

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO PELA CGCRE/INMETRO SOB O Nº 292

Certificado de Calibração Nº DEA 186-10

RESULTADO MÉDIO DAS MEDIÇÕES PÁGINA 3 DE 3

U1 (valores em mm)						U3 (valores em mm)							
POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3		POSIÇÃO 4		POSIÇÃO 5		POSIÇÃO 6		POSIÇÃO 7	
RESULTADOS MÉDIOS	ERRO µm	RESULTADOS MÉDIOS	ERRO µm	RESULTADOS MÉDIOS	ERRO µm	RESULTADOS MÉDIOS	ERRO µm	RESULTADOS MÉDIOS	ERRO µm	RESULTADOS MÉDIOS	ERRO µm	RESULTADOS MÉDIOS	ERRO µm
19.9950	-1.1	19.9957	-0.4	19.9962	0.2	19.9950	-1.1	19.9953	-0.8	19.9926	-3.1	19.9977	1.6
100.0110	0.2	100.0120	1.2	100.0100	-0.8	100.0130	2.2	100.0110	0.2	100.0110	0.2	100.0063	-2.5
220.0460	-0.9	220.0470	0.1	220.0470	0.1	220.0500	3.1	220.0500	3.1	220.0490	2.1	220.0450	-1.9
340.0790	-0.9	340.0810	1.1	340.0107	0.5	340.0823	2.4	340.0810	1.1	340.0820	2.1	340.0790	-0.9
419.9920	0.9	419.9930	1.9	380.0603	1.4	419.9933	2.2	419.9933	2.2	419.9933	2.2	419.9867	-2.4
ERRO MÁX.	-1.1	ERRO MÁX.	1.9	ERRO MÁX.	1.4	ERRO MÁX.	3.1	ERRO MÁX.	3.1	ERRO MÁX.	-3.1	ERRO MÁX.	-2.5
AMPLITUDE	4.0	AMPLITUDE	2.0	AMPLITUDE	2.0	AMPLITUDE	2.0	AMPLITUDE	4.0	AMPLITUDE	3.0	AMPLITUDE	5.0

TEMPERATURA			TEMPERATURA			TEMPERATURA			TEMPERATURA			TEMPERATURA			TEMPERATURA			TEMPERATURA		
X:	20.24	°C	X:	20.36	°C	X:	20.17	°C	X:	20.32	°C	X:	20.42	°C	X:	20.27	°C	X:	20.18	°C
Y:	20.27	°C	Y:	20.36	°C	Y:	20.28	°C	Y:	20.38	°C	Y:	20.41	°C	Y:	20.36	°C	Y:	20.34	°C
Z:	20.28	°C	Z:	20.59	°C	Z:	20.26	°C	Z:	20.46	°C	Z:	20.55	°C	Z:	20.43	°C	Z:	20.51	°C
PADRÃO	20.5	°C	PADRÃO	20.6	°C	PADRÃO	20.65	°C	PADRÃO	20.62	°C	PADRÃO	20.64	°C	PADRÃO	20.6	°C	PADRÃO	20.53	°C

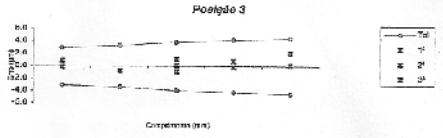
GRÁFICO DE DISPERÇÃO



INCERTEZA $U1_{95}$ ± 4 + L/ 224 µm PARA K= 2.00



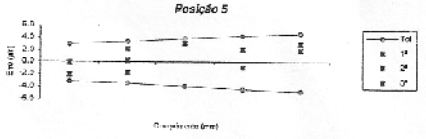
INCERTEZA $U1_{95}$ ± 3.9 + L/ 312 µm PARA K= 2.00



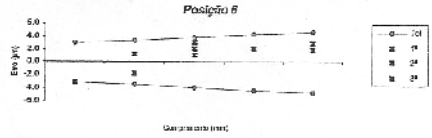
INCERTEZA $U1_{95}$ ± 3.9 + L/ 278 µm PARA K= 2.00



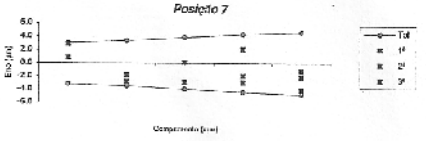
INCERTEZA $U3_{95}$ ± 4 + L/ 266 µm PARA K= 2.00



INCERTEZA $U3_{95}$ ± 4 + L/ 264 µm PARA K= 2.00



INCERTEZA $U3_{95}$ ± 3.8 + L/ 230 µm PARA K= 2.00



INCERTEZA $U3_{95}$ ± 4 + L/ 229 µm PARA K= 2.00

ERRO DE APALPAÇÃO MÉDIO (MPEp) : 3.33 µm Up 95 : ± 1.15 µm

AMPLITUDE DO ERRO DE APALPAÇÃO : 1.00 µm PARA K= 3

NOTAS:

1) ERRO É O RESULTADO ENTRE VALOR MEDIDO - VALOR VERDADEIRO CONVENCIONAL.

2) AMPLITUDE É A DIFERENÇA ENTRE O MAIOR E O MENOR VALOR OBTIDO DE 3 MEDIÇÕES EM UM MESMO PONTO

3) OS RESULTADOS MÉDIOS APRESENTADOS NESTA PÁGINA, É A MÉDIA DE 3 MEDIÇÕES

Hexagon Metrology Sistemas de Medição Ltda
Av. Engenheiro Eusébio Stevaux, 2496 - CEP 04696-000 - S. Paulo - SP - Brasil
Tel.: (55 11) 5525-6000 - Fax: (55 11) 5687-2101 - www.hexagonmetrology.com.br