

**ESTUDO DA CONFIABILIDADE METROLÓGICA NA MEDIÇÃO DA
ESPESSURA DAS ASAS DE AERONAVES POR ULTRASSOM****Bruno César de Andrade Silva¹**
José Eduardo Ferreira Oliveira²
Maurício Saldanha Motta³**RESUMO**

Quando um ponto de corrosão é encontrado na asa de uma aeronave, um procedimento de remoção deve ser imediatamente realizado para mantê-la 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. 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, a falta de um controle sistemático do aparelho de ultrassom no tocante à sua calibração e estabelecimento de um intervalo de calibração não realístico, o não estabelecimento de uma zona de conformidade, tudo isto acarretando em uma tomada de decisão equivocada, comprometendo, portanto, a qualidade do resultado de medição da espessura. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar um estudo experimental relacionado ao controle da espessura da asa de uma aeronave no tocante ao controle metrológico adotado nas medições realizadas durante um mês e apresentar uma metodologia de controle metrológico para este segmento.

Palavras-chave: ultrassom; calibração; metrologia; aeronave.

¹Engenheiro Mecânico, M. Sc. Em Tecnologia de Materiais. AEROTD. E-mail: bruno.bcas@gmail.com

²Engenheiro Mecânico, Dr. Laboratório de Metrologia Dimensional, Instituto Federal de Pernambuco. E-mail: joseferreira@recife.ifpe.edu.br

³Engenheiro Mecânico, Dr. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. E-mail: mmotta64@gmail.com

STUDY OF METROLOGICAL RELIABILITY IN MEASUREMENT OF THE THICKNESS OF AIRCRAFT WINGS BY ULTRASOUND

ABSTRACT

When a spot of corrosion is found on an aircraft wing, a removal procedure must be immediately carried out to keep the wing in a safe condition. Grinding a part to remove corrosion means that the part will need to be evaluated before being released due to the reduction in thickness. The steps that involve checking the remaining thickness of a part through ultrasound testing and analyzing the results obtained require extreme care, as they may contain several errors arising from unestimated uncertainties, the lack of systematic control of the ultrasound device in the regarding its calibration and establishment of an unrealistic calibration interval, the failure to establish a compliance zone, all of this resulting in mistaken decision-making, therefore compromising the quality of the thickness measurement result. Within this context, the objective of this work is to present an experimental study related to the control of the thickness of an aircraft's wing in relation to the metrological control adopted in measurements carried out over a month and to present a metrological control methodology for this segment.

Keywords: *ultrasound; calibration; metrology; aircraft.*

1 INTRODUÇÃO

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. O teste por ultrassom tem sido praticado por diversas décadas. Um exemplo de aplicação deste teste é a medição de espessura em peças industriais em que os instrumentos foram aperfeiçoados de modo a fazer a coleta de dados mais facilmente e de forma melhor [1]. 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 realizá-la, apenas pequenas aberturas de acesso são requeridas, proporcionando inspeções com a aeronave completamente montada [2]. 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 se detecta alguma anomalia em um dado membro estrutural, certas medidas devem ser tomadas de imediato para correção deste problema. No tocante à medição da espessura da asa de uma aeronave, 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 [3].

O procedimento de medição como um todo, desempenha um papel de fundamental importância dentro deste contexto. Ele se inicia na verificação de aptidão do aparelho de ultrassom para a medição da espessura da asa nos pontos onde foi retirado material em função da corrosão, passando pela garantia da sua rastreabilidade e a utilização de intervalos de calibração confiáveis, a realização de verificações entre calibrações, até se chegar nos resultados de espessura, considerando-se a correção dos erros sistemáticos: a incerteza de medição e a zona de conformidade.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar a metodologia adotada para a medição realizada e controle metrológico adotados na medição da espessura da asa de uma aeronave modelo Airbus A310, onde foi detectada uma 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. Neste estudo foi considerado o controle do padrão de verificação do aparelho de ultrassom, a calibração realizada e a zona de conformidade calculada, apresentando as implicações da sua utilização ou não.

2 METODOLOGIA

Seja qual for o modelo da aeronave, um procedimento típico de remoção de corrosão consiste em [4]: 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; Inspeccionar a área retrabalhada para verificar se toda corrosão foi removida; Realizar inspeção para verificar dimensões remanescentes após o retrabalho; Verificar o Structural Repair Manual [5] 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 SRM [5] 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. Assim, para o nosso estudo, a Tabela 1 apresenta o resumo dessas informações.

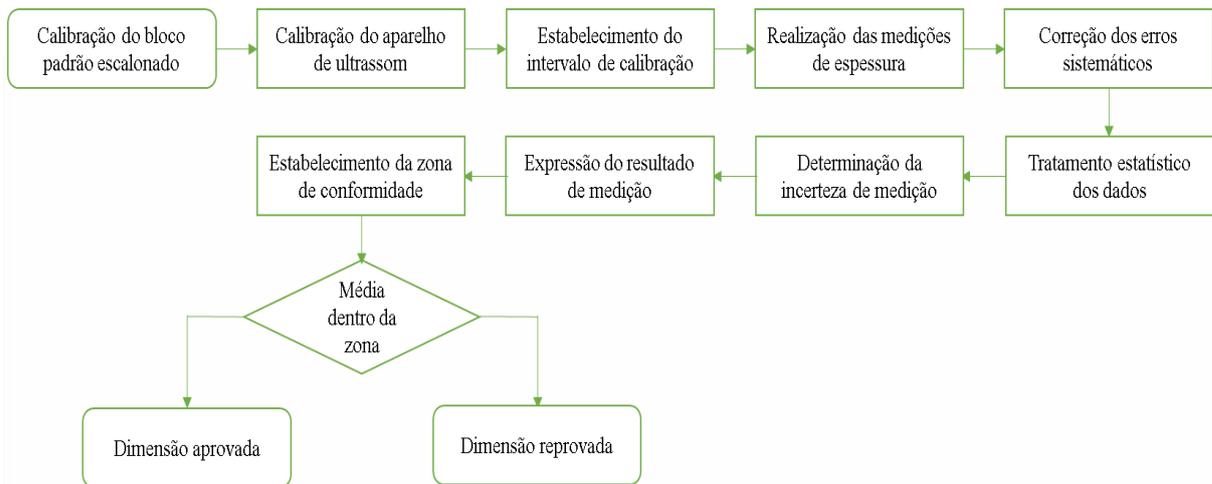
Tabela 1 - Dados relacionados à liga medida e especificações dimensionais

Material da asa	Liga de alumínio 2024-T3
Espessura nominal	0,787"
Tolerância de fabricação da espessura	+ 0,005"/- 0,020"
Zona de especificação	0,767" a 0,792"

Fonte: Da pesquisa, 2023.

Para a realização do controle metrológico foram realizadas as etapas apresentadas no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 - Etapas relacionadas ao controle metrológico



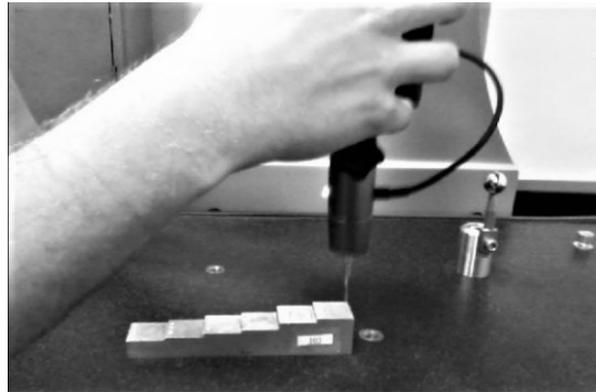
Fonte: Da pesquisa, 2023.

No tocante à calibração do bloco padrão escalonado foi utilizada a máquina de medição por coordenadas, conforme Figura 2, com as seguintes especificações: Marca Tesa; Modelo MH3D 4.5.4; Tipo portico; resolução = $1\mu\text{m}$; Erro de apalpação medio = $3,33\mu\text{m}$; incerteza expandida de medição = $1,15\mu\text{m}$ para $k = 2$.

O aparelho de ultrassom utilizado nas medições possui as seguintes especificações: Marca Krautkramer Branson; Modelo DMS2TC; Tipo verificador de espessura; Resolução = $0,001''$; Faixa nominal = $0,008''$ a $25,000''$; 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.

Para o estabelecimento do interval de calibração foi utilizado o método da resposta incremental (MRI) [6], partindo-se de um interval inicial de calibração de 12 meses.

Figura 2 - Calibração do bloco padrão escalonado



Fonte: Silva, 2023.

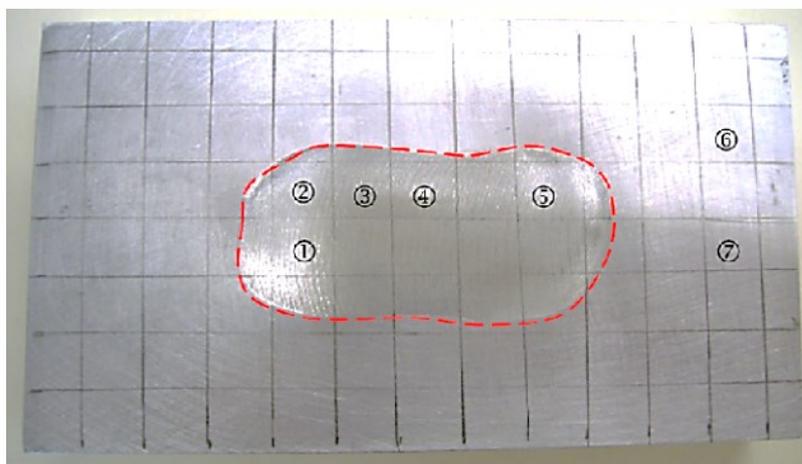
Para realização da medição da espessura remanescente na área afetada por ultrassom, se fez necessário o ajuste ou a “zeragem” do aparelho para os parâmetros a serem medidos. Esse ajuste que por muitas vezes é chamado na prática, de maneira errônea de calibração, foi executado de acordo com as premissas do Manual de Testes Não Destrutivos específicos para este modelo de aeronave [7]. Objetivando 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 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.

Para realização do experimento, foi fabricado um corpo de prova com a mesma espessura, tolerância, acabamento e material do revestimento da aeronave, conforme Figura 3. Foram escolhidos ao acaso, 5 pontos dentro da área desbastada (pontos 1, 2, 3, 4 e 5) e 2 pontos na área sem desbaste (pontos 6 e 7), refletindo o que seria a espessura nominal do revestimento. Realizou-se 5 repetições da medição em cada um dos pontos escolhidos. A correção do erro

sistemático é realizada considerando-se o valor obtido na calibração do aparelho de ultrassom com o bloco padrão escalonado.

Figura 3 - Corpo de prova utilizado para a realização dos experimentos, destacando os pontos de medição



Fonte: Silva, 2023.

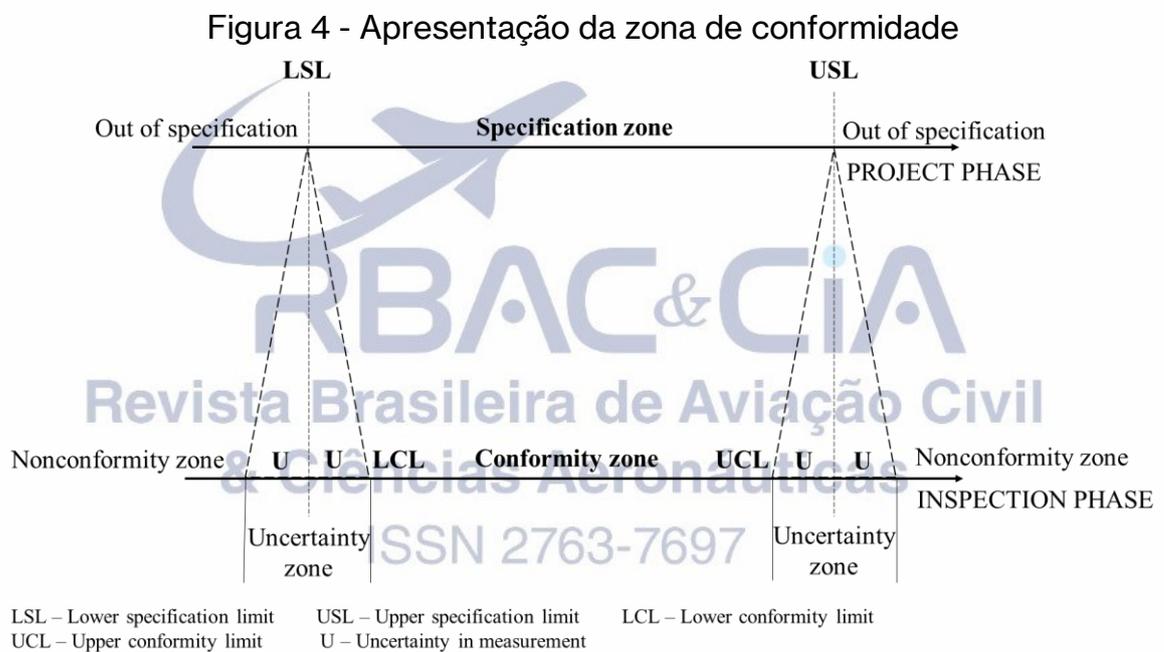
Para a realização do tratamento estatístico, inicialmente foi verificada a normalidade pelos testes de Shapiro-Wilk, Cramer von Mises e Kolmogorov Smirnov [8, 9, 10, 11, 12] e caso a amostra seja aprovada em algum deles, a mesma é considerada oriunda de uma população normalmente distribuída. Em seguida, são verificados possíveis outliers aplicando-se o Teste Q, o Teste de Grubbs e o Teste de Chauvenet [13, 14, 15].

Durante o processo de medição de espessura, diversas fontes de incerteza foram consideradas na realização do experimento, visto que as mesmas podem potencialmente influenciar com grande relevância na avaliação da aceitação do revestimento após o retrabalho. No experimento as principais fontes de incerteza identificadas e utilizadas no cálculo da incerteza expandida de medição pelo método analítico (GUM, 2012) foram as seguintes: Incerteza associada à resolução do aparelho de ultrassom (tipo B); Incerteza herdada da calibração do aparelho de ultrassom (tipo B); Incerteza devida ao afastamento da temperatura de referência de 20°C [16, 17] (tipo B) e Incerteza estatística (Tipo A). O resultado de medição é dado pela média aritmética das indicações mais ou

menos a incerteza expandida de medição para uma confiabilidade de aproximadamente 95%.

É uma prática muito comum nas indústrias a aprovação de peças quando a medição cai dentro da zona de especificação ou intervalo de especificação [18]. Essa prática de não considerar a incerteza de medição pode levar a resultados equivocados, comprometendo a tomada de decisão, como será apresentado no tópico resultados.

Assim, obtido o resultado de medição, o último passo é a determinação da zona de conformidade e verificação se a média se encontra ou não dentro do mesmo. Essa zona de conformidade é apresentada na Figura 4 [19, 20].



Fonte: [19].

Analisando-se esta figura, constata-se que o limite inferior de conformidade é dado pelo limite inferior de especificação mais a incerteza expandida de medição, enquanto que o limite superior de conformidade é dado pelo limite superior de especificação menos a incerteza expandida de medição. Para este estudo, com base na Tabela 1, o $LSL = 0,767''$ e o $USL = 0,792''$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

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 para a qualidade do processo, visto que após retrabalhos e desbastes em peças, esse método tem a vantagem de não requerer desmontagens dos conjuntos e não requerer acesso ao lado oposto do componente a ser verificado. 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. As medições ocorreram em duas áreas: dentro do desbaste e na área com espessura nominal, adjacente ao desbaste para eliminação da corrosão.

A Tabela 2 apresenta os valores medidos para cada um dos 7 pontos analisados, conforme Figura 3, apresetando a media aritmetica e a incerteza expandida de medição (U) com seu respectivo fator de abrangência (k) para cada um dos 7 pontos. Por sua vez, a Figura 5 apresenta um box plot elaborado no Minitab 19, referente aos 5 pontos onde foram verificados desgastes.

Tabela 2 - Resultados das medições por ultrassom (valores em polegadas)

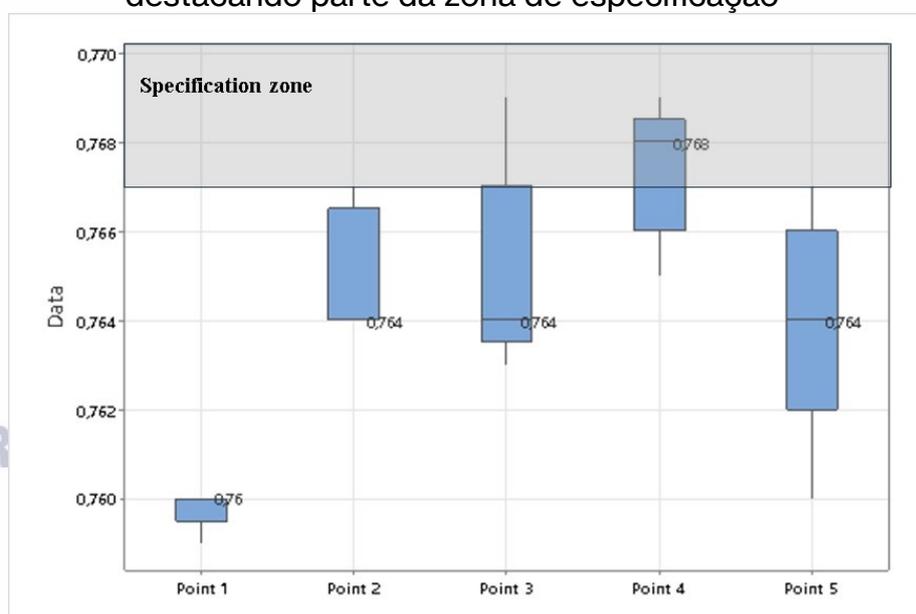
Ponto	1	2	3	4	5	6	7
Medição							
X_1	0,760	0,767	0,769	0,765	0,767	0,784	0,784
X_2	0,760	0,764	0,765	0,767	0,765	0,786	0,785
X_3	0,759	0,766	0,763	0,769	0,760	0,784	0,784
X_4	0,760	0,764	0,764	0,768	0,764	0,784	0,785
X_5	0,760	0,764	0,764	0,768	0,764	0,784	0,785
Média	0,760	0,765	0,765	0,767	0,764	0,784	0,785
U	0,001	0,002	0,003	0,002	0,003	0,001	0,001
	($k =$ 2,01)	($k =$ 2,28)	($k =$ 2,65)	($k =$ 2,32)	($k =$ 2,65)	($k =$ 2,11)	($k =$ 2,02)

Fonte: Da pesquisa, 2023.

Analisando a Figura 5, percebe-se que a única região em que são encontrados pontos dentro da zona de especificação demarcada no box plot, diz respeito aos valores do ponto 4. Logo, este é um ponto de interesse a ser analisado.

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

Figura 5 - Box plot dos dados de medição dos pontos com corrosão, destacando parte da zona de especificação



Fonte: Da pesquisa, 2023.

Com relação ao ponto 4, se fosse tomada apenas a primeira medição (0,765”), como ainda se adota em alguns casos, a medição, estaria fora da zona de especificação. Para as demais medições realizadas, o valor da espessura se encontra dentro da zona de especificação, inclusive para a média aritmética (0,767”). No entanto, mesmo que a média fique dentro da zona de especificação, deve-se considerar a incerteza expandida de medição, conforme apresentado na Tabela 3, onde a incerteza expandida de medição (U) vale 0,002”.

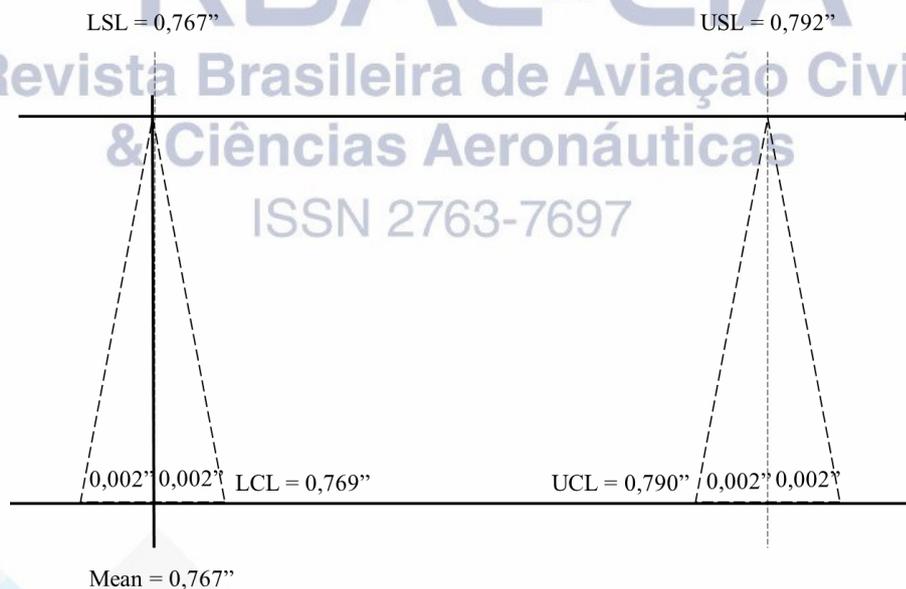
Tabela 3 - Dados referentes à determinação da incerteza expandida de medição para o ponto 4 da Figura 3

Parâmetro	Valor
Incerteza estatística	0,000678233"
Incerteza herdada	0,0004"
Incerteza associada à resolução do aparelho	0,000288675"
Incerteza associada ao afastamento da temperatura de referência	0,0000204693"
Incerteza combinada	0,000838899"
Número de graus efetivos de liberdade	9,362331497
Fator de abrangência	2,32
Incerteza expandida de medição	0,002"

Fonte: Da pesquisa, 2023.

Portanto, considerando-se a incerteza de medição, verifica-se, conforme apresentado na Figura 6, que a média das indicações dos valores do ponto 4 fica fora do intervalo de conformidade, tendo-se a espessura, também reprovada na medição.

Figura 6 - Zona e conformidade para os dados do ponto 4



Fonte: Da pesquisa, 2023.

Percebe-se, com relação ao ponto 4, que a única medida que ficou dentro do intervalo de conformidade foi $x_3 = 0,769"$.

4 CONCLUSÕES

A partir deste estudo foi possível se constatar a necessidade de utilizar sempre a zona de conformidade na medição de espessuras de película por ultrassom, ao invés de se considerar apenas a zona de especificação como critério de garantia da qualidade do valor medido.

É fundamental se abolir em definitivo a prática de se realizar apenas uma medição de espessura por região, e, deve-se seguir um procedimento de medição, conforme apresentado neste trabalho, considerando-se não apenas a determinação da incerteza expandida de medição, mas, inicialmente, deve-se realizar um tratamento estatístico em cada ponto da asa do avião, sujeito à medição.

Outro aspecto de fundamental importância diz respeito a se ter o aparelho de ultrassom e o bloco padrão escalonado sempre rastreado a padrões nacionais, através de um programa de calibração com o estabelecimento de intervalos de calibração realísticos. Neste sentido, o Método da Resposta Incremental, sugerido neste trabalho, se apresenta como uma alternativa viável, pois leva em consideração não apenas a conformidade do aparelho de ultrassom com as especificações, mas considera também, a influência das calibrações passadas, ou seja, considera o histórico de calibrações.

Este trabalho considerou quatro importantes fontes de incerteza de medição para a composição da incerteza expandida de medição. No entanto, outras fontes poderão ser adicionadas, como por exemplo, considerando-se a influência da pressão de contato do transdutor na peça e a influência da quantidade de acoplante utilizada na medição.

REFERÊNCIAS

- [1] NDT Education Resource Center, Brian Larson, Editor, 2001-2012, The Collaboration for NDT Education, Iowa State University. Disponível em . Acesso em: Fev 2011.
- [2] FAA, U. S. Department of Transportation, Ultrasonic Testing for Aircraft,

USA, 1975.

- [3] ANDREUCCI, R. Aplicação Industrial Ensaio por Ultra-som, Aplicação industrial; Ed. Jul/2008 – Abendi. Disponível em . Acesso em: 30 Nov 2010.
- [4] SILVA, B. C. A. Estudo das incertezas na medição de espessura por ultrassom em peças aeronáuticas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2012.
- [5] AIRBUS, A310 Structural Repair Manual, “Main Skins”, Allowable Damages, Chapter 57-20- 12, Germany, Dec 2009.
- [6] SOUZA, P. H. G.; SOARES, A. M. F.; OLIVEIRA, C. A. N.; OLIVEIRA, J. E. F.; OLIVEIRA, E. J. A.; SILVA, N. G.; ARAUJO, R. P.; OLIVEIRA, S. T. Aplicação dos métodos A1, A2 e do método da resposta incremental para ajuste de intervalos de calibração. Brazilian Journal of Development, v.7, n.7, Curitiba, 2021.
- [7] 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.
- [8] SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, vol. 52, No. 3/4, (Dec., 1965), 591 – 611.
- [9] SHESKIN, D. J. Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures. 3rd Edition. CRC Press LLC. Florida, 2003.
- [10] KAPUR, KAILASH C. Reability Engineering. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [11] KECECIOGLU, D. Reliability and Life Testing Handbook. Vol. 1 and 2. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1993 and 1994.
- [12] KECECIOGLU, D. Reliability and Life testing Handbook. Vol. 1, Destech Publications Inc. USA, 2002.
- [13] RORABACHER, R. D. B. Statistical treatment for rejection of deviant values: critical values of Dixon’s “Q” parameter and related subrange ratios at the 95% level. Anal. Chem., 63 (2), 1991, 139 – 146.
- [14] GRUBBS, F. E. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. American Society for Quality, Technometrics, Vol. 11, No. 1, 1969, p. 1-21.
- [15] VUOLO, J. H. Fundamentos da teoria de erros. 2. ed., São Paulo: Blucher, 1996.
- [16] BRUNELLI, A. Calibration Handbook of Measuring Instruments. 1th ed. ISA, 2017.
- [17] NASA. Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods - NASA Measurement Quality Assurance Handbook – ANNEX 3. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC 20546, 2010.

- [18] OLIVEIRA, J. E. F. Desenvolvimento de um programa computacional para a integração de dados de projeto, fabricação e medição de peças torneadas com ênfase na síntese de tolerâncias dimensionais determinísticas. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- [19] UNE-EN ISO 14253-1. Especificación geométrica de productos (GPS). Parte 1: Reglas de decisión para probar la conformidad o no conformidad com las especificaciones. Norma española, Génova, 1998.
- [20] OLIVEIRA, J. E. F. A metrologia aplicada aos setores industrial e de serviços – Principais aspectos a serem compreendidos e praticados no ambiente organizacional. SEBRAE, Brasília, 2008.

