

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO E GUM PARA A AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO ASSOCIADA AO SOFTWARE IMAGEJ PARA MEDIR TAMANHO MÉDIO DE CONTORNOS DE GRÃO DA SUPERLIGA DE NÍQUEL C-22 SOLUBILIZADA.

Igor Fernando Martins de Souza ⁽¹⁾ (igor.fe@ufu.br), Samuel Davi Viera Bonifácio ⁽¹⁾ (samuel.bonifacio@ufu.br), Vitor Marques Silva ⁽¹⁾ (vitor.marquess@ufu.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de Uberlândia (UFU); Departamento de materiais de processos de fabricação; Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD)

RESUMO: Devido a dificuldades para realizar a medição automática para quantificação do tamanho médio de grão, especialmente em estruturas com microestrutura maclada, como é o caso da liga de níquel C-22 estudada, decidiu-se por utilizar o método dos interceptos, descrito na norma ASTM E112-13, para quantificar e analisar esses dados, via software ImageJ. A amostra foi preparada metalograficamente, atacada e levada ao microscópio ótico, onde foi capturadas imagens da microestrutura em uma ampliação de 5x, e posteriormente foram levadas para o Software e traçadas as retas para a quantificação do tamanho médio de grão. Foram aplicadas as metodologias GUM e Monte Carlo para verificar qual modelo apresentaria uma menor incerteza e traria maior facilidade de resolução. A partir dos resultados de medição, foi possível perceber que o método de Monte Carlo se apresentou com uma incerteza menor que o GUM, e que o principal parâmetro de influência no GUM é a variabilidade das leituras.

PALAVRAS-CHAVE: TAMANHO MÉDIO DE GRÃO, MÉTODO DOS INTERCEPTOS, GUM, MONTE CARLO.

APPLICATION OF THE MONTE CARLO METHOD AND GUM FOR THE EVALUATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY ASSOCIATED WITH IMAGEJ SOFTWARE IN MEASURING THE AVERAGE GRAIN BOUNDARY SIZE OF THE NICKEL SUPERALLOY C-22 ANNEALING.

ABSTRACT: *Due to difficulties in automatic measurement for quantifying the average grain size in twinned grain structures, as is the case with the nickel-based alloy C-22 studied, it was decided to use the intercept method, described in ASTM E112-13 standard, to quantify and analyze these data via ImageJ software. The sample was metallographically prepared, etched, and taken to the optical microscope, where images of the microstructure were captured at a 5x magnification. These images were then imported into the software, and lines were drawn for the quantification of the average grain size. GUM and Monte Carlo methodologies were applied to verify which model would present lower uncertainty and greater ease of resolution. Based on the measurement results, it was possible to notice that the Monte Carlo method showed lower uncertainty than GUM, and that the main parameter of influence in GUM is the variability of readings.*

KEYWORDS: AVERAGE GRAIN SIZE, INTERCEPT METHOD, GUM, MONTE CARLO.

1. INTRODUÇÃO

As ligas de níquel são materiais que vêm ganhando cada vez mais destaque com o passar dos anos, principalmente nos segmentos de óleo e gás, devido a elas possuírem propriedades físico-químicas que as tornam muito atrativas para a engenharia, por oferecerem uma alta resistência mecânica em altas temperaturas, boa resistência à oxidação e ductilidade (LU et al., 2023). São consideradas superligas, quando o teor de níquel em peso é maior ou igual a 30 %, semelhante ao aplicado em aços; utiliza-se muitos elementos de liga visando aprimorar ainda mais as propriedades desses materiais (BARBOSA, 2014).

A liga de níquel C-22 pertence à família Hastelloy e é composta por Ni-Cr-Mo. Ela se destaca por sua excelente resistência mecânica e resistência à corrosão em diversas condições, incluindo tensão e corrosão por pites e intragranular. O cromo (Cr) na liga forma uma camada passivadora de óxido, enquanto o molibdênio (Mo) contribui para uma repassivação acelerada, formando compostos insolúveis (ABU KASSIM et al., 2020).

As maclas ou contornos de maclas são defeitos cristalinos onde duas regiões de um cristal são separadas por uma simetria da rede cristalina em um plano cristalográfico específico, ou seja, os átomos de um dos lados se encontram em posições espelhadas, em relação aos átomos do outro lado do contorno. As maclas são resultados de deslocamentos atômicos produzidos durante a aplicação de forças mecânicas de cisalhamento (maclas de deformação) ou durante tratamentos térmicos de recozimentos, realizadas após deformações (maclas de recozimento) (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2014).

Com o avanço tecnológico, o processamento digital de imagens para obtenção de dados tornou-se comum, utilizando tanto softwares pagos quanto gratuitos. Um dos softwares que podem ser utilizados para a determinação do tamanho de grão a partir de imagens capturadas é o ImageJ, que é um programa desenvolvido por Wayne Rasband do Research Services Branch, National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, que permite exibir, processar, analisar imagens capturadas (DIAS, 2008).

Segundo o INMETRO (2008), a incerteza de medição é um parâmetro não negativo que retrata a dispersão dos valores atribuídos a um determinado mensurando, indicando a qualidade de uma medição realizada e sua confiabilidade, pois todo resultado de medição possui uma incerteza associada.

Há métodos padronizados e utilizados para estimar a incerteza da medição, que são os métodos GUM e o método de Monte Carlo. O GUM, apresentado no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), publicado na ISO (International Organization for Standardization), tem como base para o cálculo da incerteza a definição das variáveis que exercem influência sobre o processo de medição, sejam essas variáveis diretas ou indiretas do processo, fazendo com que o valor indicado pelo sistema de medição adotado não seja exatamente o valor verdadeiro do mensurando. A avaliação dessa incerteza pode ser realizada a partir da avaliação das fontes de incertezas padrão das grandezas de entrada, cálculo da incerteza padrão combinada, cálculo dos graus de liberdade efetivos e, por

fim, determinação da incerteza expandida. Para essa avaliação, adota-se um modelo matemático que combina todas as variáveis declaradas, estabelecendo uma relação entre elas. Dependendo da forma como se obtêm os valores das variáveis de influência, as avaliações de incertezas podem ser classificadas como Tipo A ou Tipo B.

A avaliação Tipo A é utilizada quando é possível realizar uma análise estatística do mensurando, onde se calcula a média e desvio padrão a partir de uma amostra de valores coletados do mensurando. Já o Tipo B, as informações sobre as variáveis que influenciam no mensurando são obtidas em certificados de calibração e manuais (INMETRO, 2008). Para casos em que não se possui valores sobre a incerteza associada à calibração de algum equipamento de medição, utiliza-se a metodologia desenvolvida por Vuolo (1996).

Quando os cálculos empregados para calcular a incerteza de medição se tornam muito complexos ou ineficazes, por conta das derivadas parciais da lei de propagação de incertezas, costuma-se empregar o método de Monte Carlo, que é baseado em simulações computacionais de variáveis aleatórias. O procedimento inicial de Monte Carlo é igual ao aplicado no método GUM, identificando as variáveis de entrada, modelo matemático da incerteza e cálculo das incertezas padrão. A partir desse ponto, Monte Carlo se difere, pois se define a quantidade de iterações que serão simuladas, que, segundo o INMETRO (2008) deve ser 1 000 000.

Os valores aleatórios gerados para cada variável possuem limites superiores e inferiores, que dependem dos valores de incerteza padrão combinada e da avaliação Tipo A ou Tipo B. Caso seja Tipo A, o limite superior para os números aleatórios gerados será o valor da média aritmética acrescida do valor de incerteza padrão, enquanto o limite inferior será a média aritmética decrescida do valor da incerteza padrão. No Tipo B, tanto o limite superior quanto o inferior dos números gerados aleatoriamente variam em torno de zero, sendo o inferior zero menos o valor da incerteza padrão e o superior zero mais o valor da incerteza padrão (DA SILVA, 2023).

Então, é realizada a propagação, segundo o modelo matemático da medição, obtendo-se assim os valores do mensurando e, então, é possível determinar a incerteza padrão combinada e expandida, junto de um histograma que retrata como os valores somados estão distribuídos em torno de uma média (DA SILVA, 2023). Segundo Osaki (2019), o método de Monte Carlo possui duas limitações: a primeira seria quando não houvesse conhecimento prévio sobre a base de dados, determinando algebricamente a distribuição de probabilidades das variáveis de influência. Já a segunda limitação seria em identificar se há uma relação de interdependência entre os números aleatórios gerados, pois eles seguem uma distribuição predeterminada.

O objetivo desse trabalho é avaliar as medições dos contornos de grão da liga C-22 solubilizada realizadas a partir do software ImageJ, pois em outros softwares de detecção automática dos contornos de grão, a grande quantidade de maclas encontradas na liga também acaba sendo contabilizada como contornos de grão, e por meio dos métodos GUM e Monte Carlo, comparar os resultados obtidos entre ambos os

métodos e verificar se a incerteza de medição se encontra dentro de limites aceitáveis, validando a medição dos contornos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Preparação metalografica da liga C-22.

A partir de uma barra da liga C-22, com composição química apresentada na Tabela 2.1, foi cortada uma pequena amostra de 15 mm de largura, 15 mm de comprimento e 20 mm de espessura via eletroerosão a fio para realizar a etapa de tratamento térmico de solubilização. Esse tratamento consistiu em aquecer a peça a 1100 °C em um forno durante 1 hora e depois resfriá-la ao ar. A amostra foi então embutida e submetida a uma sequência de lixamento e polimento utilizando lixadeira e politriz manual da Arotec, modelo Aropol E. A sequência de lixamento utilizou lixas com granulometria variando de 120 até 1200 mesh, e no polimento foram utilizados discos de polimento de 9 µm, 6 µm, 3 µm e 1 µm, sendo a solução de polimento pasta de diamante.

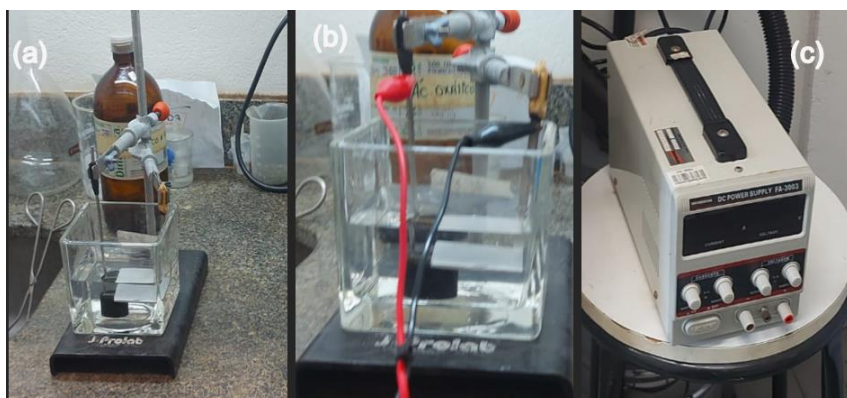
TABELA 2.1: Composição química da liga C-22 (% em peso)

Liga	Ni	Cr	Nb	Mo	Fe	Ti	Al	Co
C 22	56.3	19.5	0.032	15.70	4.60	0.04	0.20	0.15

C	Mn	Si	P	S	B	Cu	W	V
0.01	0.33	0.04	0.01	0.00	0.00	0.04	3.23	0.00

O ataque químico foi realizado por meio de um ataque eletrolítico, utilizando ácido oxálico 10 %. A amostra foi inserida na solução e submetida por aproximadamente 10 segundos a uma corrente de 3 A. O polo positivo da fonte elétrica estava conectado na peça, que estava em contato direto com a amostra, enquanto o polo negativo estava conectado a um metal de sacrifício, que não entrava em contato direto com a amostra, mas ficava logo acima, bem próximo, como retratado na Figura 2.1.

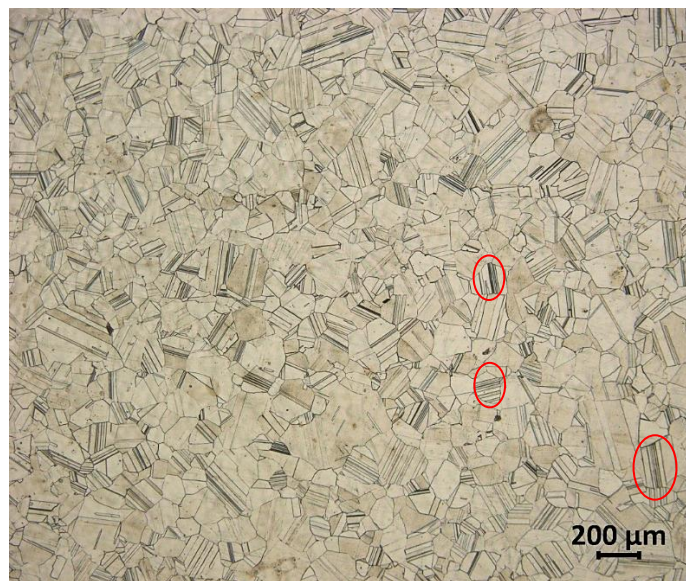
FIGURA 2.1: Montagem do ataque eletrolítico. (a) e (b) retratam a cuba contendo o ácido oxálico e (c) a fonte utilizada.



2.2. Microscopia ótica

Após o ataque químico, a amostra foi analisada via microscopia ótica utilizando um microscópio da marca Olympus, modelo BX51M, equipado com câmera para aquisição de imagens. Foram capturadas imagens com aumento de 5x e dessas imagens foram selecionadas as melhores para realizar a contagem dos interceptos, como apresentado na Figura 2.2.

FIGURA 2.2: Microestrutura da liga C-22 solubilizada. As regiões destacadas são algumas das várias maclas encontradas na liga.



2.3. Contagem dos interceptos e definição do tamanho médio de grão via ImageJ

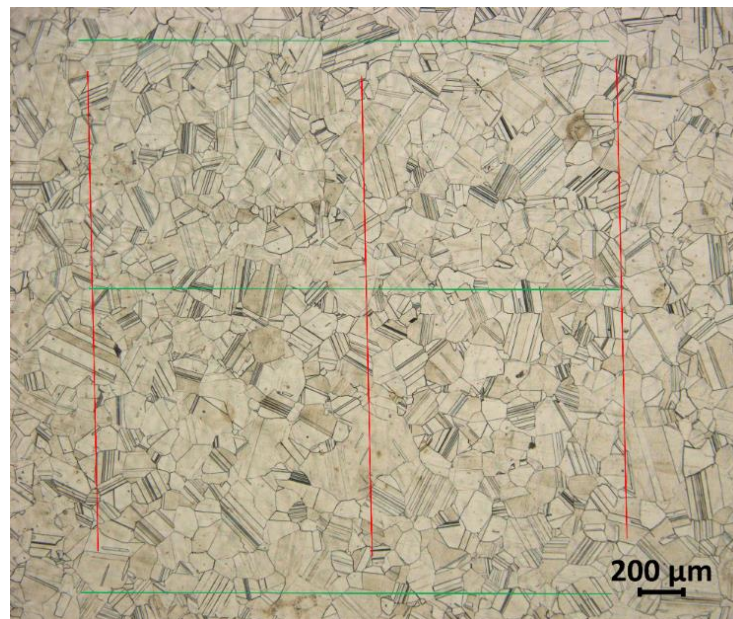
O primeiro passo ao abrir o programa foi carregar a imagem e, então, adequar a escala de medição. A partir da escala fornecida pelo microscópio, o software calculou a distância da escala em pixels, como retratado na Figura 2.3. Após as 5 leituras, o valor médio era de 159,0524 pixels (Rpix).

FIGURA 2.3: Cálculo da escala fornecida pelo microscópio em pixels.



Seis linhas foram feitas na imagem, sendo 3 na direção longitudinal e 3 na direção transversal. As linhas na direção transversal foram distribuídas uma na região mais à esquerda da imagem, uma ao centro e uma mais à direita. Já as linhas na direção longitudinal foram posicionadas uma na região superior, uma ao centro e a última na região inferior. Não havia uma posição específica para o posicionamento das linhas; elas eram distribuídas em qualquer posição dentro da região pré-estabelecida, como apresentado na Figura 2.4.

FIGURA 2.4: Distribuição das retas utilizadas para contar os interceptos, retas vermelhas longitudinais e verdes transversais.



Por fim, contou-se quantas interseções havia em cada linha. O software já fornecia o tamanho da linha criada, ajustado e na unidade com a escala ajustada. Tendo o tamanho das linhas e a quantidade de interseções, calculou-se a somatória do comprimento e o total de interseções para as 6 linhas. Esse processo foi repetido cinco vezes até que se tivesse cinco imagens e, consequentemente, cinco contagens. De acordo com a ASTM E112 (2013) a somatória dos interceptos em uma imagem precisa estar acima de 50 pontos, e os cálculos utilizados para determinar o diâmetro médio do grão estão apresentados na Equação 1 e Equação 2.

$$\overline{N_L} = \frac{\Sigma \text{interceptos das 6 retas}}{\Sigma \text{ comprimentos das retas 6 retas / Ampliação utilizada}} \quad (1)$$

$$\bar{I} = \frac{1}{\overline{N_L}} \quad (2)$$

Onde $\overline{N_L}$ é o número médio de interceptos por unidade de comprimento e $\bar{I}$ equivale o diâmetro médio do grão.

2.4. Cálculo de parâmetros metrológicos para avaliação da incerteza para o método GUM.

Seguindo os passos propostos pela metodologia do método GUM, definiu-se primeiramente qual era o mensurando, ou seja, o tamanho médio de grão. A segunda etapa consiste em identificar as variáveis de entrada, que foram as seguintes: Variabilidade das leituras ($\bar{X}$), resolução do ImageJ (RI), resolução do microscópio óptico (RM), incerteza da calibração do ImageJ (CI) e a incerteza da calibração do microscópio óptico (CM). A terceira etapa consiste em propor o modelo matemático para a avaliação da incerteza de medição do mensurando, apresentado na Equação 3:

$$T_{mg} = \bar{X} + \Delta RI + \Delta RM + \Delta CI + \Delta CM \quad (3)$$

Onde T_{mg} é o tamanho médio de grão.

A quarta etapa é a avaliação da incerteza-padrão das variáveis de entrada, na qual se apresenta o Tipo de avaliação, a distribuição de probabilidade e os graus de liberdade. Os dados das variáveis de entrada citadas anteriormente estão apresentados na Tabela 2.1:

TABELA 2.1: Parâmetros das variáveis de entrada.

Variáveis de entrada	Avaliação	Dist probabilidade	Graus de liberdade
Variabilidade das leituras ($\bar{x}$)	A	T-student	4
Resolução ImageJ	B	Retangular	infinitos
Resolução Microscópio	B	Retangular	infinitos
Incerteza da calibração do ImageJ	B	Normal	infinitos
Incerteza da calibração do Microscópio	B	Normal	infinitos

O cálculo das incertezas padrão das variáveis de entrada, que estão demonstradas pelas Equação 4, Equação 5, Equação 6 e Equação 7:

$$u(x) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Onde $u(x)$ é a incerteza padrão associada a variabilidade das leituras, $s(x)$ é o desvio padrão das leituras e n equivale a quantidade de medições feitas.

A resolução do ImageJ foi calculada com base nos valores obtidos em pixels (R_{pix}) para a reta de 200 μm , demonstrada pela Equação 5 é a resolução do imageJ (R_{ImaJ}) foi igual a 1,25744.

$$R_{\text{ImaJ}} = \frac{200}{R_{\text{pix}}} \quad (5)$$

$$u(\Delta RI) = \frac{R_{\text{ImaJ}}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (6)$$

$u(\Delta RI)$ representa a incerteza padrão associada a resolução do ImageJ.

$$u(\Delta RM) = \frac{RM}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (7)$$

$u(\Delta RM)$ representa a incerteza padrão associada a resolução do microscópio óptico.

Para o cálculo incerteza associada a calibração do microscópio e incerteza associada a calibração do ImageJ, foi utilizado o princípio de Vuolo (1996), também apresentado por Valdés et al. (2019), no qual a incerteza padrão associada a calibração é a resolução multiplicado por um múltiplo. Ao final do cálculo do método se verifica a contribuição das variáveis e se ajusta o múltiplo para que ele fique em valores intermediários ou baixos.

Calculada a incerteza padrão de cada variável de entrada, se aplicação da lei de propagação de incertezas no modelo matemático aplicando as derivadas parciais, demonstrado por Valdés et al. (2019), resolvendo e simplificando as equações se obtém a Equação 8:

$$u_c^2(T_{\text{mg}}) = u^2(\bar{x}) + u^2(\Delta RI) + u^2(\Delta RM) + u^2(\Delta CI) + u^2(\Delta CM) \quad (8)$$

$$u_c^{\square}(T_{\text{mg}}) = \sqrt{u_c^2(T_{\text{mg}})} \quad (9)$$

A Equação 9 apresenta a incerteza padrão combinada ($u_c^{\square}(T_{\text{mg}})$) associada à variável de saída (T_{mg}).

Seguindo, calcula-se os graus de liberdade efetivos utilizando a Equação de Welch-Satterwaite, apresentada na Equação 10:

$$u_{ef}(T_{mg}) = \frac{u_c^4(T_{mg})}{\sum_{i=1}^N \frac{(u(x_i) \cdot c_i)^4}{v_i}} \quad (10)$$

$u_{ef}(T_{mg})$ é o grau de liberdade efetivo do mensurando, $u(x_i)$ representa incerteza padrão de cada variável de entrada, c_i o coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada variável de entrada x_i e v_i o número de graus de liberdade de cada variável de entrada.

O btido o valor do grau de liberdade efetivo, consulta-se uma tabela, na coluna de probabilidade de abrangência de 95 %, para determinar o fator de abrangência k . Por fim, tendo esse valor de k tabelado, se utiliza a Equação 11 para calcular a incerteza expandida (U) associada a variável de saída (T_{mg}).

$$U(T_{mg}) = k(T_{mg}) \cdot u_c(T_{mg}) \quad (11)$$

2.5. Cálculo de parâmetros metrológicos para avaliação da incerteza para o método Monte Carlo.

A realização dos cálculos e gráficos utilizados por essa metodologia foram gerados utilizando o software Excel. O método de Monte Carlo possui as primeiras etapas iguais ao método GUM, encontrando a incerteza padrão de cada variável de entrada. A metodologia começa a se diferenciar a partir dessa etapa, pois se define a quantidade de interações ou simulações numéricas a serem realizadas. O INMETRO (2008) recomenda a utilização de 1.000.000 de interações. Este trabalho definiu 100.000 iterações devido a limitações de processamento do equipamento. Então, identificam-se as funções densidade de probabilidade das variáveis de entrada, apresentadas na Tabela 2.2:

TABELA 2.2: Distribuição de probabilidade das variáveis de entrada, método Monte Carlo.

Variáveis de entrada	Avaliação	Distribuição de probabilidade
Variabilidade das leituras (x)	A	Normal
Resolução do ImageJ	B	Retangular
Resolução do Microscópio	B	Retangular

Incerteza da calibração do ImageJ	B	Normal
Incerteza da calibração do Microscópio	B	Normal

Para o Tipo A, utilizou-se a média e a incerteza padrão da variável de entrada e simulou-se os valores aleatórios com o limite inferior sendo a média aritmética menos a incerteza padrão e o limite superior sendo a média aritmética mais a incerteza padrão. Para as variáveis do Tipo B, definiu-se a média como igual a zero (0) e tanto o limite inferior quanto o superior variavam em torno desse valor, sendo o superior zero mais a incerteza padrão da variável e o limite inferior zero menos a incerteza padrão. Então geram-se os 100.000 valores aleatórios de cada variável de entrada e propagam-se segundo o modelo (Equação 3), obtendo assim 100.000 valores simulados do mensurando.

Para determinar a incerteza-padrão combinada (u_c) basta calcular o desvio padrão populacional dos valores simulados do mensurando, tendo ela uma abrangência de 68,27 %. Já a incerteza expandida (U) é calculada aplicando a equação 12:

$$U(T_{mg}) = 2 \cdot u_c(T_{mg}) \quad (12)$$

Outros dados calculados são o número de classes, que é a raiz quadrada do número de iterações, e a largura de classe, que é a diferença entre o maior e menor valor simulado dividido pelo número de classes. O coeficiente de assimetria (Skewness) e a curtose são dados que indicam se os resultados obtidos são satisfatórios, considerando a distribuição normal, em que, caso o coeficiente de assimetria e a curtose possuam valores iguais ou próximos a 0 e 3, respectivamente, a simulação torna-se aceitável. O fator de abrangência é definido como sendo igual a 2, devido ao número de amostras.

3. RESULTADOS

3.1. GUM

A partir do método GUM, calculou-se a incerteza expandida do tamanho médio de grão ($U(T_{mg})$). A Tabela 3.1 retrata os valores obtidos.

TABELA 3.1: Parâmetros método GUM, tabela resumo.

	Estimativa (μm)	Avaliação	Dist de probabilidade	Graus de liberdade	Coef de sensibilidade	u (μm)	Contribuição
Variabilidade das leitura ($\bar{x}$)	91,2066	A	T-student	4	1	2,0620	78,8

Resolução ImageJ (ΔR_I)	1,2574	B	Retangular	infinitos	1	0,3630	2,4
Resolução Microscópio (RM)	0,2000	B	Retangular	infinitos	1	0,0577	0,1
Incerteza calibração ImageJ (CI)	1,0060	B	Normal	infinitos	1	1,0060	18,7
Incerteza calibração Microscópio (CM)	0,2000	B	Normal	infinitos	1	0,2000	0,7
Incerteza padrão combinada $u_c(T_{mg})$ (μm)						2,3235	
Graus de Liberdade de T_{mg}						6,4494	
Fator de abrangência de T_{mg}						2,4000	
Incerteza expandida $U(T_{mg})$ (μm)						5,5765	

O resultado da medição obtido, segundo o método GUM, foi o retratado na Equação 13 abaixo, onde T_{mcg} é o tamanho médio de contorno de grão da liga C-22 solubilizada. Essa equação é equivalente para um $k = 2,32$ é 95 % de probabilidade de abrangência.

$$T_{mcg} = 91,2066 \pm 6,000 \mu m \quad (13)$$

O valor apresentado se mostra coerente quando se retorna às imagens capturadas (Figura 2.2) e se compara o tamanho médio do grão de acordo com a escala do microscópio. O material apresenta grãos grandes quando comparado à microestrutura de alguns aços. Um fator que contribui para o aumento do tamanho de grão é o tratamento térmico de solubilização, que eleva a temperatura até a fase de recristalização, onde o tamanho dos grãos cresce mais devido à alta temperatura e energia do sistema (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2014).

Pelo método GUM, foi possível perceber que a principal variável era a variabilidade das leituras, devido à sua alta contribuição para o valor final. Para melhorar a apresentação dos resultados e diminuir a influência dessa variável, deve-se realizar mais leituras. Outro ponto a melhorar é a utilização de retas de mesmo tamanho em cada série de marcação, pois assim a variabilidade das interseções pode diminuir devido a uma melhor padronização.

3.2. Monte Carlo

O método de Monte Carlo também foi aplicado para comparar a incerteza expandida obtida, simulando um total de 100.000 iterações. A distribuição e os dados calculados encontram-se na Figura 3.1 e na Tabela 3.2, respectivamente.

FIGURA 3.1: Distribuição normal das medições segundo Monte Carlo

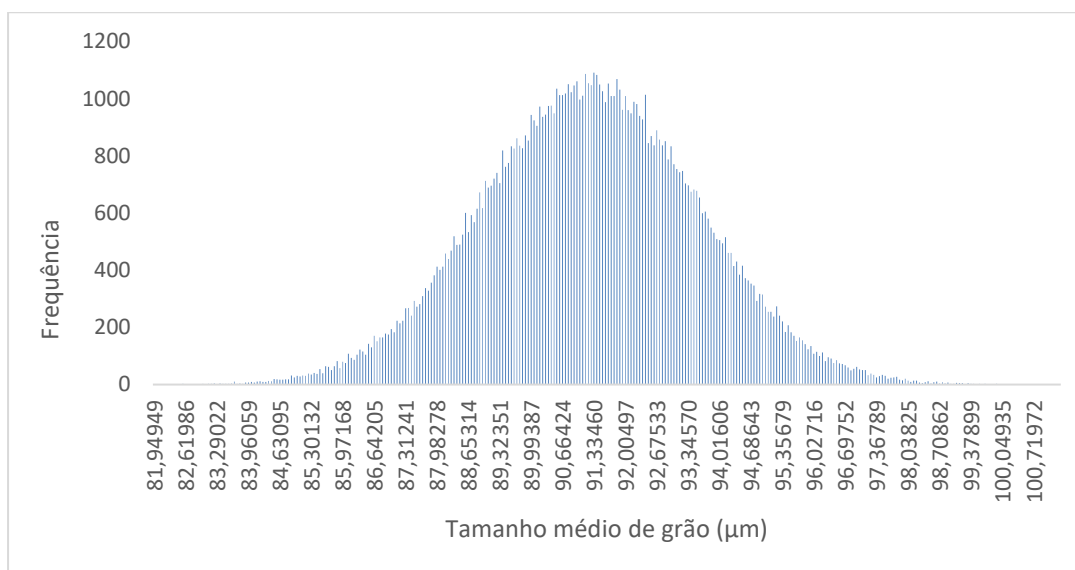


TABELA 3.2: Resultados da simulação realizada via Monte Carlo.

Resultados Monte Carlo	
Mínimo	81,9495
Máximo	101,2682
Largura do intervalo	19,3187
Número de classes	316,2278
Número de classes	317,0000
Largura da classe	0,0609
Skewness	0,0087
Curtosis	2,9942
s populacional	2,3117
Incerteza padrão do comprimento	2,3117
Incerteza expandida do comprimento	4,6235
k (Monte Carlo)	2,0000
P. abrangência	0,9545

A partir dos dados, pode-se verificar que, pelo método de Monte Carlo, o resultado da medição é um tamanho médio de contorno de grão da liga C-22 solubilizada de $91,2066 \pm 4,6235 \mu\text{m}$ sendo $k= 2,000$ e 95,45 % de probabilidade de abrangência.

O valor da incerteza expandida apresentado pelo método de Monte Carlo é menor do que pelo GUM, o que pode ser devido à quantidade de valores simulados, pois o método GUM calculou esse parâmetro com base somente nas cinco leituras e nas incertezas padrão calculadas. Por outro lado, o Monte Carlo possui

100.000 dados simulados do mensurando, com uma gama de dados muito maior, permitindo cálculos mais precisos e contribuindo para a diminuição da incerteza expandida.

Contudo, vale ressaltar que os valores da incerteza expandida obtida pelo método de Monte Carlo e pelo método GUM são próximos, com uma diferença de 1,3765 μm . Ambas as metodologias se mostraram eficazes para avaliar a incerteza de medição associada às medidas do tamanho médio de grão realizadas via ImageJ.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, pode-se destacar duas constatações importantes verificadas.

- No método GUM a influência da variabilidade das medições se mostrou significativa, e para trabalhos futuros, deve-se aumentar a quantidade de leitura feitas, podendo aumentar de 5 para 7 a 10 imagens.
- Ambos os métodos se mostraram eficazes ao calcular a incerteza expandida a partir das medições feitas via ImageJ, apresentando um valor de incerteza próximo.
- O método de Monte Carlo apresentou uma incerteza menor que o GUM, devido a quantidade de dados simulados, possuindo uma maior base de dados para realizar a avaliação da incerteza expandida.

REFERÊNCIAS.

ABU KASSIM, S. et al. High temperature corrosion of Hastelloy C22 in molten alkali salts: The effect of pre-oxidation treatment. **Corrosion Science**, v. 173, 15 ago. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E112 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. Em: **ASTM**. 3. ed. [s.l.] ASTM, 2013. v. 1p. 1–28.

BARBOSA, C. **Metais não Ferrosos e suas Ligas Microestrutura, Propriedades e Aplicações**. 1. ed. [s.l.] E-papers, 2014.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2014.

DA SILVA, J. A. **Avaliação da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via integral-J**. Dissertação—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2023.

DIAS, F. DA C. **USO DO SOFTWARE IMAGE J PARA ANALISE QUANTITATIVA DE IMAGENS DE MICROESTRUTURAS DE MATERIAIS**. Dissertation—São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2008.

INMETRO. **valiação de dados de medição — Guia para a expressão de incerteza de medição**. 1. ed. Rio de Janeiro: INMETRO, 2008. v. 1

LU, X. et al. In situ nanomechanical characterization of hydrogen effects on nickel-based alloy 725 under different metallurgical conditions. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 135, p. 156–169, 1 fev. 2023.

OSAKI, M. et al. Risks associated with a double-cropping production system-a case study in southern. **Sci. Agric.** v. 76, n. 2, p. 130–138, 2019.

VALDÉS, R. et al. **Incerteza de medição. Metodologia de cálculo, conceitos e aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 2019. v. 1

VUOLO, J. H. **Fundamentos da Teoria de Erros**. 2. ed. [s.l.] Blucher, 1996.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a toda equipe LTAD, engenheiros, técnicos e professores pelo auxílio e dúvidas sanadas durante a elaboração desse artigo.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.