

Estudo da influência da medição do raio de arredondamento da ponta da ferramenta no acabamento superficial de peças torneadas

Study of influence of rounding radius measurement of tool tip on surface finishing of turned parts

DOI:10.34117/bjdv7n2-575

Recebimento dos originais: 25/01/2021

Aceitação para publicação: 25/02/2021

Mázio Silva de Araújo

Graduando em Engenharia Mecânica

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE

Endereço: Av. Professor Luis Freire, 500, Cidade Universitária, Recife - PE

CEP: 50.740-545, Brasil

E-mail: msa@discente.ifpe.edu.br

José Eduardo Ferreira de Oliveira

Doutor

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE

Endereço: Av. Professor Luis Freire, 500, Cidade Universitária, Recife - PE

CEP: 50.740-545, Brasil

E-mail: joseferreira@recife.ifpe.edu.br

Clóvis Góis de Lacerda Filho

Mestre

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE

Endereço: Av. Professor Luis Freire, 500, Cidade Universitária, Recife - PE

CEP: 50.740-545, Brasil

E-mail: clovislacerda@recife.ifpe.edu.br

George Marinho do Nascimento

Especialista

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE

Endereço: Av. Professor Luis Freire, 500, Cidade Universitária, Recife - PE

CEP: 50.740-545, Brasil

E-mail: georgenascimento@recife.ifpe.edu.br

Nelson Gonçalves da Silva

Mestre

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE

Endereço: Av. Professor Luis Freire, 500, Cidade Universitária, Recife - PE

CEP: 50.740-545, Brasil

E-mail: nelsongoncalves@recife.ifpe.edu.br

Antônio Marcos Figueiredo Soares

Mestre

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE

Endereço: Av. Professor Luis Freire, 500, Cidade Universitária, Recife - PE

CEP: 50.740-545, Brasil
E-mail: antoniomarcos@recife.ifpe.edu.br

RESUMO

O raio de arredondamento da ponta da ferramenta (r_ϵ) exerce influência no acabamento superficial de peças torneadas, sendo, portanto, considerado um item de controle a partir da fase de planejamento da usinagem, onde se estabelece o avanço máximo (trajetória linear da ferramenta) a ser utilizado na fabricação de peças torneadas em função do parâmetro de rugosidade pretendido. Dessa forma, ao se determinar esse avanço, utiliza-se o valor nominal do r_ϵ fornecido pelo fabricante da ferramenta. Porém, ao se medir esse raio de arredondamento, e se expressar o resultado da medição com sua respectiva incerteza de medição, para um nível de confiança de aproximadamente 95%, verifica-se diferenças entre esse valor e o valor nominal. Dentro desse contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar um estudo sobre a influência nos parâmetros de rugosidade R_t e R_a , das variações obtidas por medição do raio de arredondamento da ponta da ferramenta, em comparação com o valor nominal apresentado na especificação do fabricante, levando-se em consideração a incerteza de medição obtida pelo método analítico e por simulação de Monte Carlo. Outrossim, será apresentada a influência da incerteza de medição do r_ϵ no acabamento superficial de peças torneadas, bem como na seleção do avanço com base no acabamento superficial.

Palavras-Chave: Acabamento Superficial, Raio da Ponta, Incerteza de Medição, Rugosidade.

ABSTRACT

The tool tip rounding radius (r_ϵ) influences the surface finish of turned parts and is therefore considered a control item from the machining planning stage, where the maximum feed rate (tool linear path) to be used in the manufacturing of turned parts is established according to the desired roughness parameter. Thus, when determining this feed rate, the nominal value of r_ϵ provided by the tool manufacturer is used. However, when measuring this rounding radius, and expressing the measurement result with its respective measurement uncertainty, for a confidence level of approximately 95%, differences are found between this value and the nominal value. Within this context, the objective of this work is to present a study on the influence on the roughness parameters R_t and R_a , of the variations obtained by measuring the rounding radius of the tool tip, in comparison with the nominal value presented in the manufacturer's specification, taking into account the measurement uncertainty obtained by the analytical method and by Monte Carlo simulation. In addition, the influence of the measurement uncertainty of r_ϵ on the surface finish of turned parts will be presented, as well as the selection of the feed rate based on the surface finish.

Keywords: Surface finish, Point radius, Uncertainty of measurement, Roughness.

1 INTRODUÇÃO

Um aspecto relevante dentro do planejamento da usinagem, diz respeito ao tratamento dado ao acabamento superficial de acordo com as exigências funcionais das peças torneadas [1]. De acordo com o tipo de acabamento pretendido e em função do raio

de arredondamento da ponta da ferramenta, estabelece-se o avanço a ser utilizado na máquina-ferramenta [2], independentemente desse equipamento ser convencional ou ser de comando numérico.

Uma das principais exigências funcionais das peças fabricadas por usinagem, diz respeito ao seu acabamento superficial o qual possui um impacto direto na qualidade das montagens, principalmente quando tais peças trabalham em equipamentos de precisão. O tipo de ajuste (com folga, incerto ou por interferência) [3], a necessidade de retenção de óleo lubrificante e o atrito são condições que limitam o acabamento superficial, o qual necessita ser estabelecido na fase de planejamento da usinagem, por meio da determinação dos parâmetros de usinagem otimizados [4]. Assim, uma vez conhecido o acabamento superficial teórico pretendido, por intermédio dos parâmetros de rugosidade, o estabelecimento do avanço a ser utilizado para se alcançar esse acabamento dependerá do raio de arredondamento da ponta da ferramenta, cujo valor é tomado a partir da indicação do valor nominal, indicação essa, fornecida pelo próprio fabricante.

Ao se medir o r_e percebe-se um intervalo no qual o valor verdadeiro desse parâmetro poderá se apresentar. Tal intervalo é dado no resultado da medição pela média aritmética dos valores medidos, mais ou menos a incerteza expandida de medição, o qual poderá ser obtida através do método analítico apresentado pelo ISO GUM [5], geralmente com uma confiabilidade de aproximadamente 95%.

Em função dos parâmetros de rugosidade variarem na ordem de micrometros, o objetivo deste trabalho é apresentar um estudo sobre de que maneira o valor medido do parâmetro r_e interfere nos valores teóricos dos parâmetros de rugosidade R_t e R_a , e, conseqüentemente, como esse parâmetro também influenciará no avanço a ser selecionado na máquina ferramenta.

Para a realização deste experimento, levou-se em consideração, o tamanho das amostras obtidas, a verificação de normalidade, a verificação de possíveis outliers e a determinação da incerteza de medição pelo método analítico e por simulação de Monte Carlo [6].

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A importância da rugosidade em sistemas mecânicos se dá em várias situações, tais como [7]: Comportamento no deslizamento; Resistência ao atrito; Ajustes sem folgas especificadas; Aderência a tipos de pinturas; Corrosões.

O desvio médio aritmético de rugosidade ou valor médio de rugosidade (R_a) é definido como a média aritmética do valor absoluto das ordenadas (Y) do perfil de rugosidade, dentro do comprimento de medição (l_m), tomando como referência a linha média, ou seja, a linha paralela à direção geral do perfil, dentro do comprimento de medição, que divide o perfil de rugosidade de modo que a soma das áreas superiores (áreas dos picos ou saliências) seja igual à soma das áreas inferiores (áreas dos vales ou reentrâncias) [8]. O valor de R_a é obtido pela Eq. (1) [9].

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |Y(x)| dx \quad (1)$$

A rugosidade total máxima (R_t) é a distância entre o pico mais alto ($\max(d_y)$) e o vale mais profundo ($\min(d_y)$) do comprimento medido de um perfil de rugosidade, sendo d_y a distância do perfil medido à linha média [10]. O valor de R_t é obtido, conforme Eq. (2) [10].

$$R_t = \max(d_y) + |\min(d_y)| \quad (2)$$

Para o torneamento cilíndrico externo, pode-se relacionar o parâmetro R_t com o avanço e com o raio de arredondamento da ponta da ferramenta, por meio da Eq. (3) [11, 12, 13], e o valor do avanço (f) é obtido através dessa equação, conforme Eq. (4). A Eq. (3) é válida apenas para $f < 2.r_\epsilon \cdot \cos\chi$, sendo χ o ângulo de posição da ferramenta. Para avanços muito pequenos, há uma considerável divergência entre os valores experimentais e os valores calculados, devido ao esmagamento proporcionado pela ponta da ferramenta na superfície da peça [8].

$$R_t = \frac{f^2}{8.r_\epsilon} \quad (3)$$

Por outro lado, considerando-se o valor do parâmetro R_a , o avanço pode ser obtido pela Eq. (4) [14] e pela Eq. (5) [15].

$$f = \sqrt{31 \cdot R_a \cdot r_\epsilon} \quad (4)$$

$$f = \sqrt{18 \cdot \sqrt{3} \cdot R_a \cdot r_\epsilon} \quad (5)$$

3 METODOLOGIA

Para a realização dos experimentos foram considerados 10 (dez) insertos reversíveis triangulares de metal duro, especificação TNMG 160408-MA com raios de arredondamento da ponta da ferramenta de 0,8 mm.

Todas as medições foram realizadas no Laboratório de Metrologia Dimensional do IFPE campus Recife, onde todos os procedimentos laboratoriais adotados nos experimentos se encontram em conformidade com a norma NBR ISO/IEC 17025 [16]. Os experimentos foram realizados nas condições ambientais de $(20+1)^{\circ}\text{C}$ para a temperatura e $(50+10)\%$ para a umidade relativa do ar, condições padrões para as medições dimensionais em laboratório [17, 18].

Para a realização das medições foi utilizado um projetor de perfil digital, conforme apresentado na Figura 1, com menor divisão de 0,001 mm, incerteza de medição de 0,004 mm para um fator de abrangência igual a 2,0. A projeção diascópica foi utilizada, conforme Figura 2 e o procedimento de medição é apresentado no fluxograma da Figura 3. Para tal, o projetor dispõe de uma função para medição de raio, tomando-se 3 pontos aleatórios ao longo do arco da circunferência e obtendo-se, diretamente o valor do raio de arredondamento.



Figura 1 – Projetor de perfil utilizado nas medições



Figura 2 – Projeção diascópica do inserto reversível

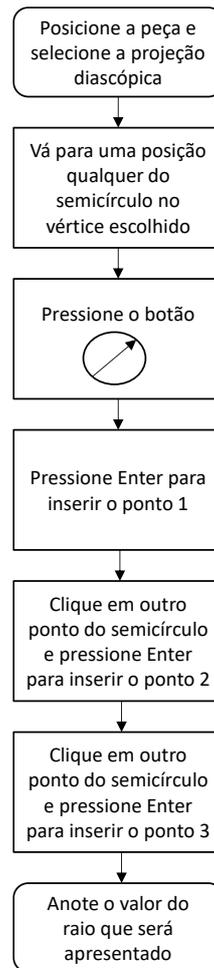


Figura 3 – Passo a passo para a realização da medição do parâmetro r_e no projetor de perfil

Para cada raio foram realizadas 20 medições, verificando-se, inicialmente, a normalidade de cada amostra gerada, aplicando os seguintes testes: Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Cramer von Mises e Anderson-Darling, considerando um nível de confiança de 95% [19, 23]. Para os três primeiros testes foi utilizado o software ACIC NORMALIDADE [24], enquanto que para o último, foi utilizado o software MINITAB 19. Em seguida, foi realizada uma verificação de possíveis outliers em cada amostra, utilizando, simultaneamente, os testes de Dixon (Q Test), Grubbs e Chauvenet [25-27]. Para a realização dos testes foi utilizado o software ANALYSIS OUTLIERS [28].

Uma vez realizado o tratamento estatístico dos dados, o passo seguinte foi a realização do cálculo da incerteza de medição, utilizando a versão educativa do software GUM WORKBENCH na sua versão educacional. Para essas medições foram utilizadas as seguintes fontes de incerteza: incerteza estatística da amostra – tipo A (i_A); Incerteza herdada do projetor de perfil (i_H) e a incerteza devida à resolução do projetor de perfil

(i_R). Assim, o modelo matemático para a incerteza de medição é dado pela Eq. (6), sendo W variável de resposta.

$$W = i_A + i_H + i_R \quad (6)$$

A incerteza estatística - tipo A, é dada pela Eq. (7), onde S é o desvio padrão amostral e n , o tamanho da amostra. Por sua vez, a incerteza herdada (tipo B) com aproximadamente 68% de confiabilidade é dada pela Eq. (8), sendo U_h , a incerteza expandida obtida diretamente do certificado de calibração e k_p , o fator de abrangência associado a esta incerteza.

$$i_A = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

$$i_H = \frac{U_h}{k_p} \quad (8)$$

Considerando-se uma distribuição retangular para a fonte de incerteza referente à resolução do projetor de perfil (tipo B), e sabendo-se que esse equipamento é digital, o seu valor é dado pela Eq. (9), sendo r , a menor divisão do projetor.

$$i_R = \frac{r}{2\sqrt{3}} \quad (9)$$

Em seguida, combina-se as fontes individuais de incerteza padrão, visando a obtenção da incerteza combinada (u_c), conforme Eq. (10) com aproximadamente 68% de confiança e sendo c_1 , c_2 , e c_3 , os coeficientes de sensibilidade para cada uma das respectivas fontes de incerteza padrão.

$$u_c = \sqrt{c_1^2 \cdot i_A^2 + c_2^2 \cdot i_H^2 + c_3^2 \cdot i_R^2} \quad (10)$$

Para essa medição, os coeficientes de sensibilidade são todos iguais a 1, uma vez que:

$$\frac{\partial W}{\partial i_A} = \frac{\partial W}{\partial i_H} = \frac{\partial W}{\partial i_R} = 1$$

A incerteza expandida de medição é obtida, multiplicando-se a incerteza padronizada combinada pelo fator de abrangência k , fornecendo assim, um nível de confiança de aproximadamente 95%, conforme apresentado na Eq. (11).

O fator de abrangência k é determinado a partir do número de graus efetivos de liberdade (ν_{eff}), o qual é determinado pela fórmula de Welch-Satterthwaite, conforme Eq. (11) [5]. Uma vez determinado o valor de ν_{eff} , utiliza-se a tabela da distribuição t-Student para se determinar o valor de k para um nível de confiança de 95,45%.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (11)$$

Os graus de liberdade (ν) são iguais a $n - 1$ para a incerteza tipo A e para as incertezas do tipo B são iguais a infinito

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os valores inicialmente medidos para os 6 (seis) vértices de um dos insertos reversíveis. O valor da temperatura durante a medição foi igual a (19,8 + 1,4)°C para um fator de abrangência $k = 2,0$ e uma umidade relativa do ar foi igual a (41 + 1) % UR para um $k = 2,0$. Todos os pontos já se apresentam na tabela com as devidas correções dos erros sistemáticos.

Tabela 1: valores do raio de arredondamento da ponta da ferramenta para o inserto 1

Valores de r_ϵ (mm)					
vértice 1	vértice 2	vértice 3	vértice 4	vértice 5	vértice 6
0,810	0,813	0,796	0,829	0,818	0,818
0,777	0,811	0,813	0,844	0,821	0,811
0,780	0,849	0,810	0,876	0,827	0,801
0,761	0,842	0,800	0,837	0,819	0,816
0,789	0,840	0,821	0,837	0,794	0,801
0,804	0,846	0,808	0,863	0,832	0,809
0,792	0,831	0,825	0,788	0,820	0,827
0,747	0,830	0,809	0,797	0,814	0,821
0,772	0,833	0,810	0,813	0,799	0,805
0,811	0,826	0,830	0,803	0,786	0,829
0,793	0,820	0,794	0,822	0,826	0,786
0,758	0,818	0,779	0,818	0,798	0,820
0,819	0,838	0,817	0,813	0,788	0,802
0,804	0,817	0,817	0,772	0,775	0,773
0,799	0,824	0,817	0,801	0,805	0,822
0,807	0,809	0,831	0,816	0,814	0,809
0,811	0,867	0,797	0,788	0,810	0,807
0,791	0,836	0,815	0,824	0,795	0,779
0,764	0,828	0,800	0,797	0,791	0,848
0,811	0,818	0,842	0,787	0,786	0,786

Aplicando-se os testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk, Cramer Von Mises, por meio do software ACIC NORMALIDADE [24] e o teste de Anderson-Darling por intermédio do software MINITAB 19 e considerando-se um nível de confiança de 95%, verificou-se que todas as amostras provêm de uma população com distribuição normal. A Figura 4 apresenta o gráfico de probabilidade normal para a amostra do vértice 1, obtida do ACIC NORMALIDADE [24], ao passo que a Figura 5 apresenta o gráfico obtido do MINITAB 19 para o teste de Anderson-Darling. Como o valor-p foi superior a 0,05, verificou-se que há normalidade. O critério adotado para considerar que a amostra provém de uma população com distribuição normal foi o se de considerar normalidade, caso se encontre essa condição em pelo menos dois dos quatro testes a mesma for verificada.

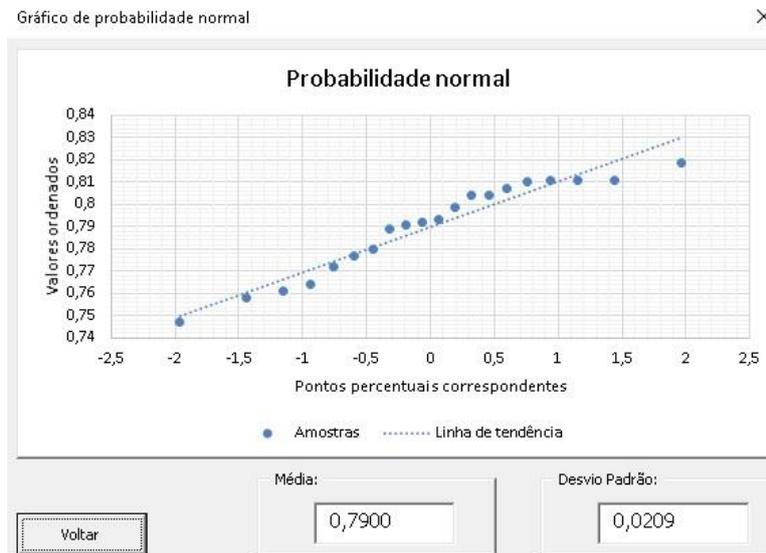


Figura 4 – Gráfico de probabilidade normal para a amostra do vértice 1

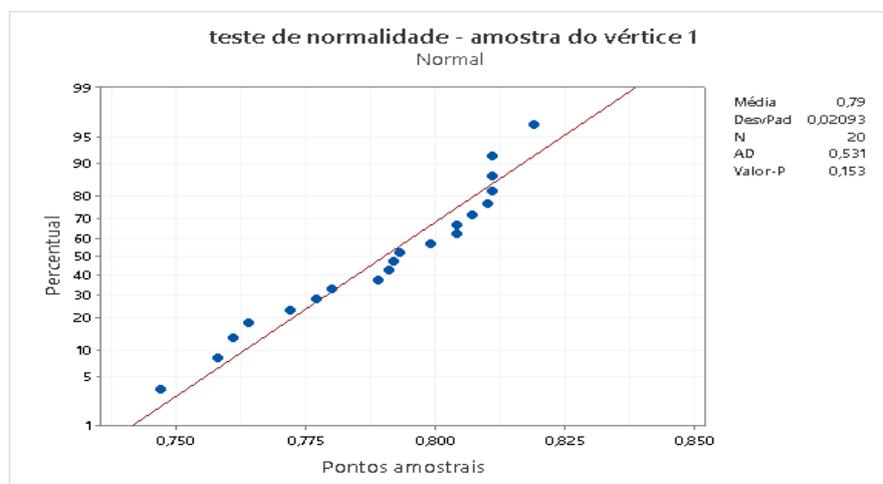


Figura 5 – Gráfico do teste de Anderson-Darling para a amostra do vértice 1

O passo seguinte consistiu na verificação de possíveis outliers em cada uma das seis amostras, utilizando o software ANALYSIS OUTLIERS [28]. O critério utilizado foi o de adotar o teste que verificou o maior número de outliers, dentre os testes de Dixon, Grubbs e Chauvenet. Aplicando-se os três testes, verificou-se que na amostra do vértice 2, o ponto 0,867 mm foi considerado um outlier pelo teste de Chauvenet, enquanto que na amostra do vértice 4, o ponto 0,876 mm também foi considerado um outlier pelo teste de Chauvenet. Logo, esses pontos foram eliminados das respectivas sequências, permanecendo essas amostras com 19 pontos, cada uma. A Figura 6 apresenta o gráfico do teste de Grubbs para a amostra do vértice 2, obtido no MINITAB 19. Percebe-se que, nesse último caso, para o referido teste, não foram detectados outliers na amostra.

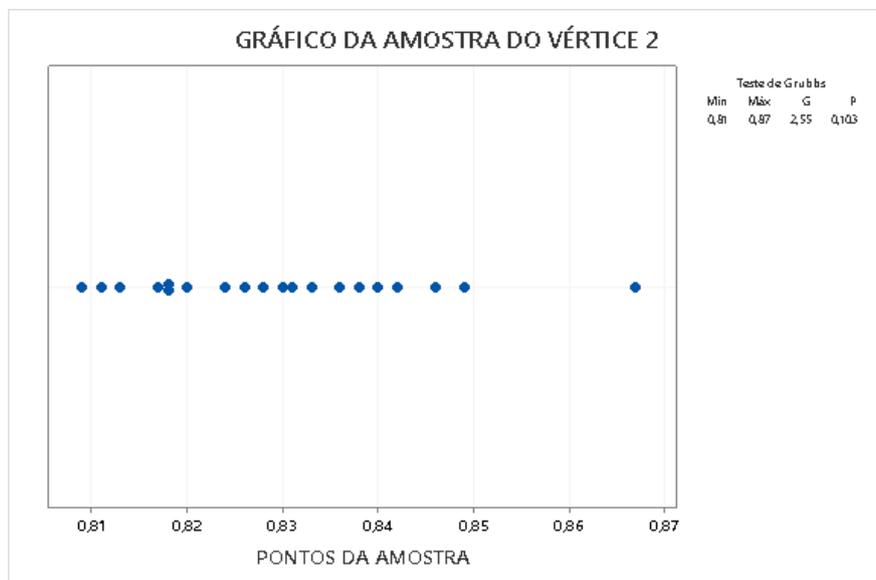


Figura 6 – Gráfico do teste de Grubbs para a amostra do vértice 2

4.1.1 Sumário gráfico com as estatísticas descritivas

As Figuras 7, 8, 9, 10, 11 e 12 apresentam um sumário gráfico da estatística descritiva para os dados amostrais referentes aos vértices da ferramenta de corte, considerando-se um nível de confiança de 95%.

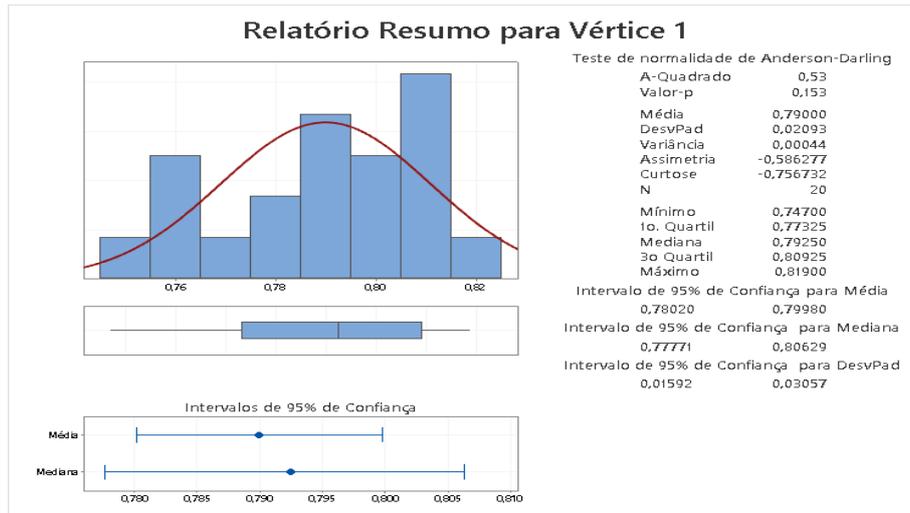


Figura 7 – Sumário gráfico para a amostra do vértice 1

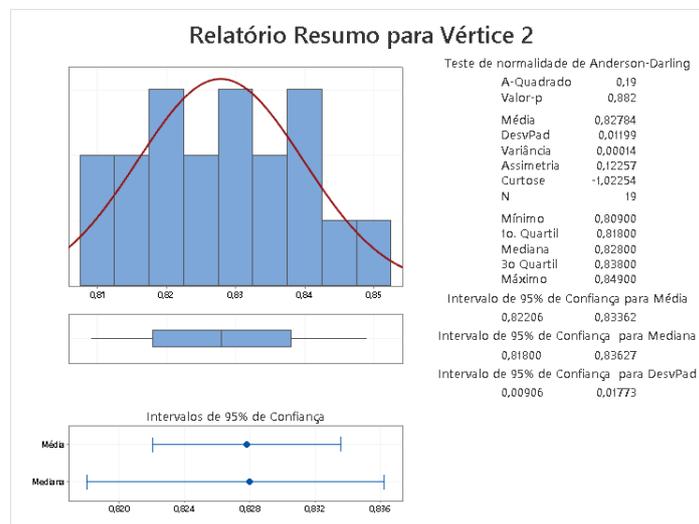


Figura 8 – Sumário gráfico para a amostra do vértice 2

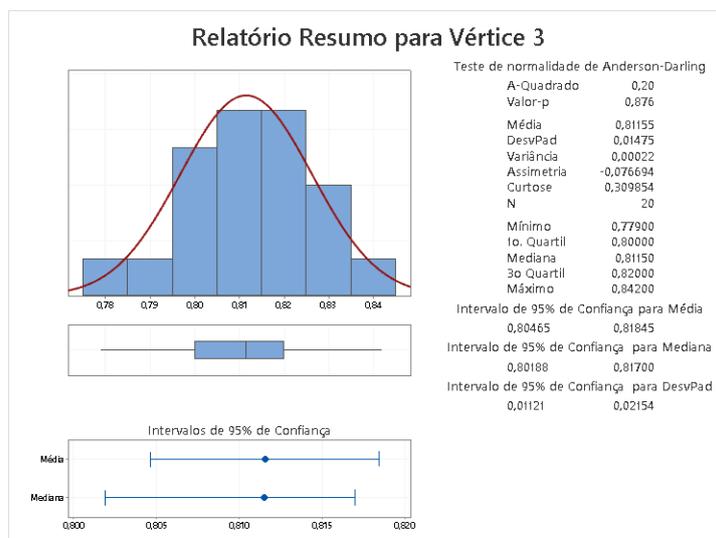


Figura 9 – Sumário gráfico para a amostra do vértice 3

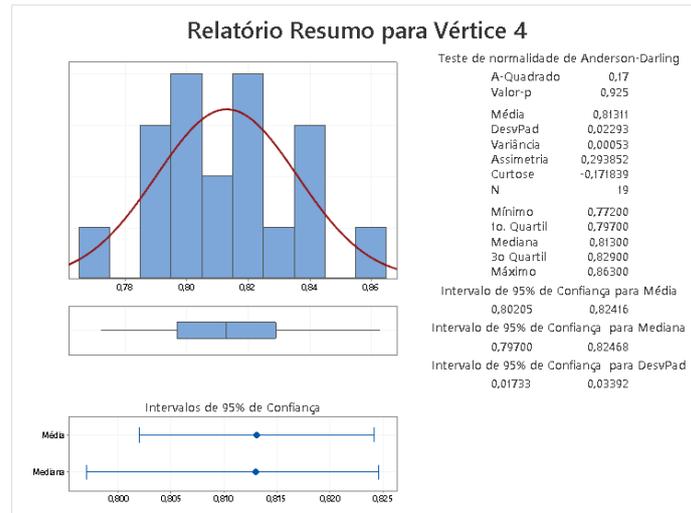


Figura 10 – Sumário gráfico para a amostra do vértice 4

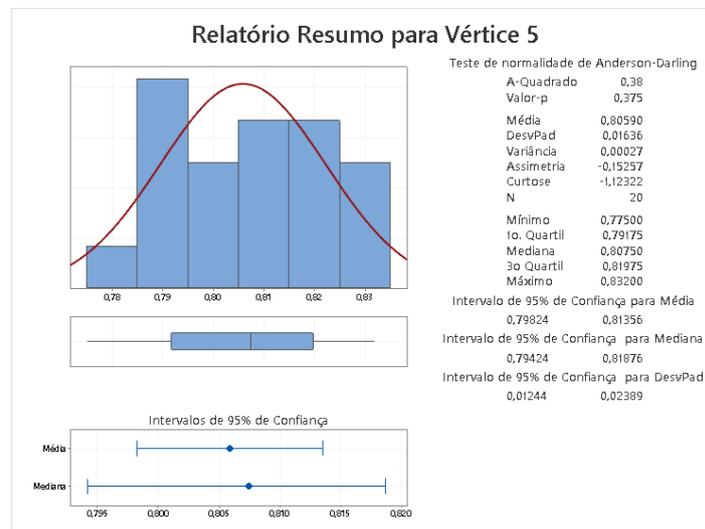


Figura 11 – Sumário gráfico para a amostra do vértice 5

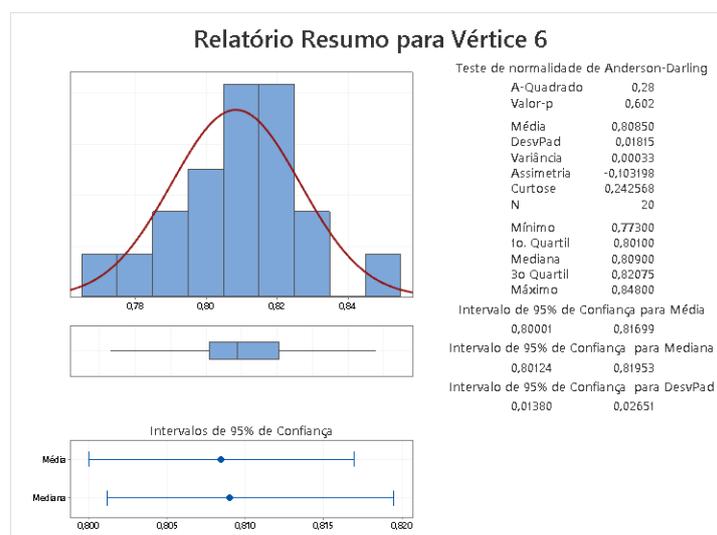


Figura 12 – Sumário gráfico para a amostra do vértice 6

4.1.2 Determinação da incerteza de medição

Para a determinação da incerteza de medição pelo método analítico e por simulação de Monte Carlo, foram inseridos no software GUM WORKBENCH, os seguintes dados:

- ✓ Incerteza do projetor de perfil é igual a 0,004 mm para um $k = 2,0$;
- ✓ Menor divisão do projetor de perfil igual a 0,001 mm
- ✓ $n = 19$ (para as amostras referentes aos vértices 2 e 4) e
- ✓ $n = 20$ (para as amostras referentes aos vértices 1, 3, 5 e 6).

A Tabela 2 apresenta os resultados da média aritmética (\bar{X}) e da incerteza expandida de medição (U) obtida pelo método analítico, gerados através do software GUM WORKBENCH, para as amostras referentes aos seis vértices do inserto reversível.

Tabela 2: Valores da média aritmética incerteza expandida de medição, obtidos pelo método analítico

r_e	\bar{X}	U	k
Vértice 1	0,7900 mm	0,011 mm	2,11
Vértice 2	0,8278 mm	0,007 mm	2,06
Vértice 3	0,8116 mm	0,008 mm	2,07
Vértice 4	0,8130 mm	0,012 mm	2,13
Vértice 5	0,8160 mm	0,021 mm	2,13
Vértice 6	0,8085 mm	0,0096 mm	2,11

As Figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18 apresentam os resultados da simulação de Monte Carlo realizada, respectivamente, para as amostras dos vértices 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Para a obtenção dos resultados foram realizadas 5.000.000 (cinco milhões) de iterações.

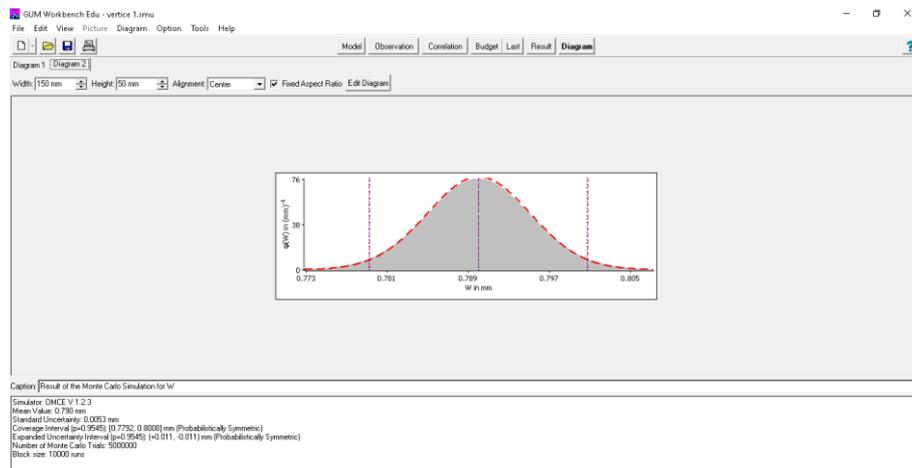


Figura 13 – Resultados da simulação de Monte Carlo para o vértice 1

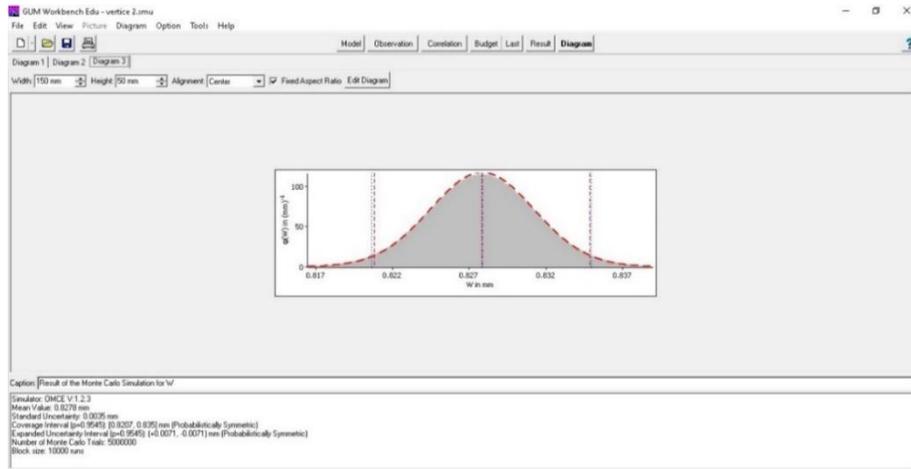


Figura 14 – Resultados da simulação de Monte Carlo para o vértice 2

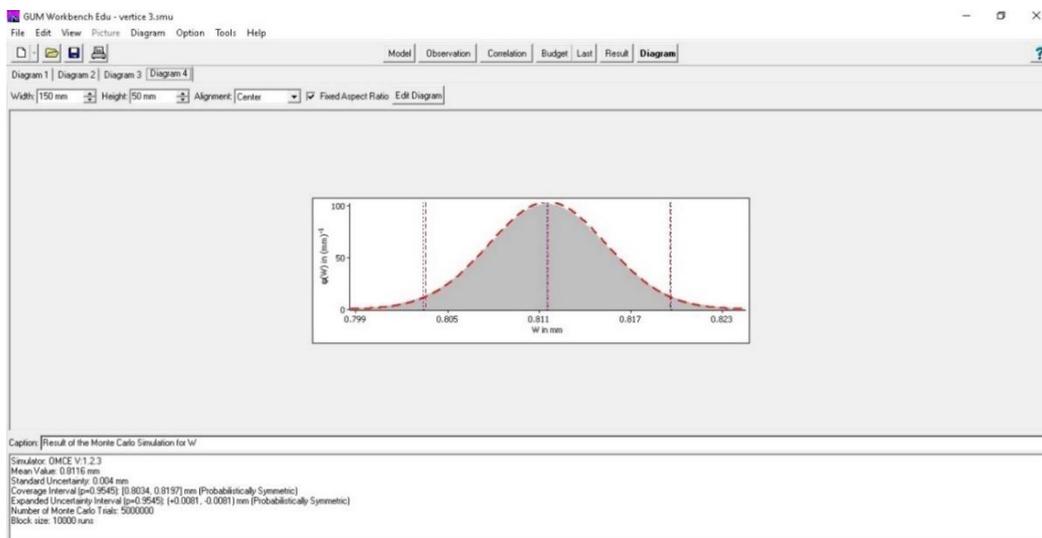


Figura 15 – Resultados da simulação de Monte Carlo para o vértice 3

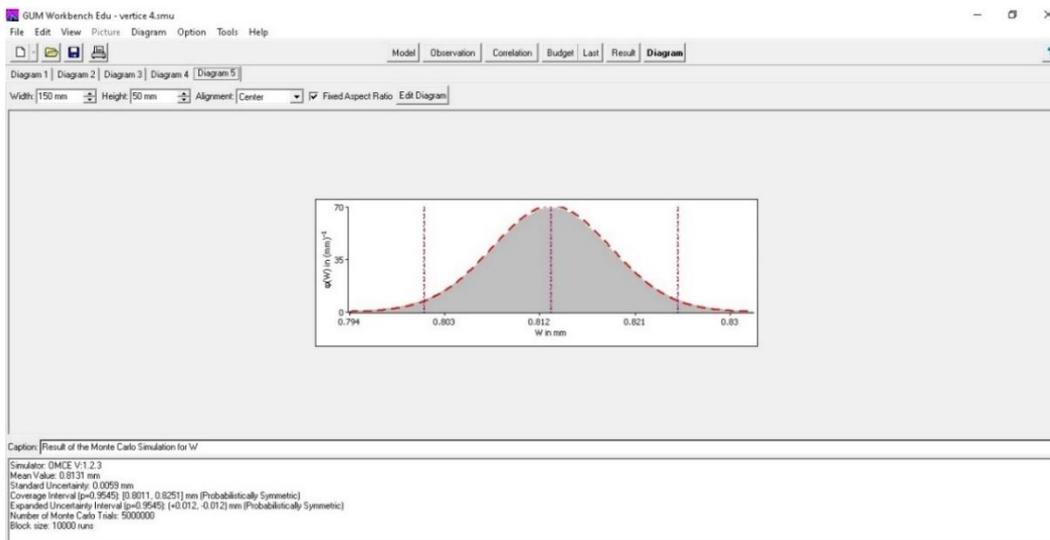


Figura 16 – Resultados da simulação de Monte Carlo para o vértice 4

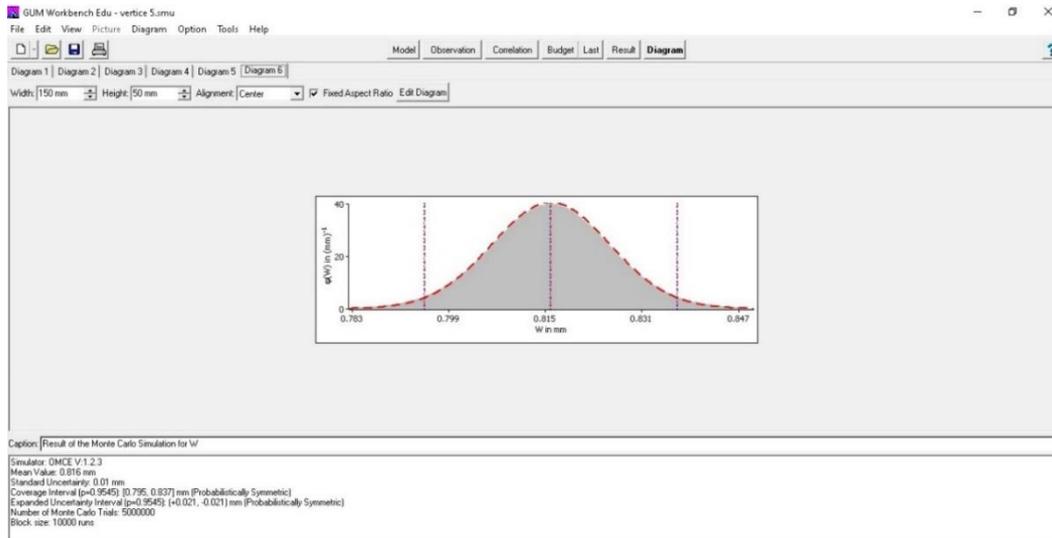


Figura 17 – Resultados da simulação de Monte Carlo para o vértice 5

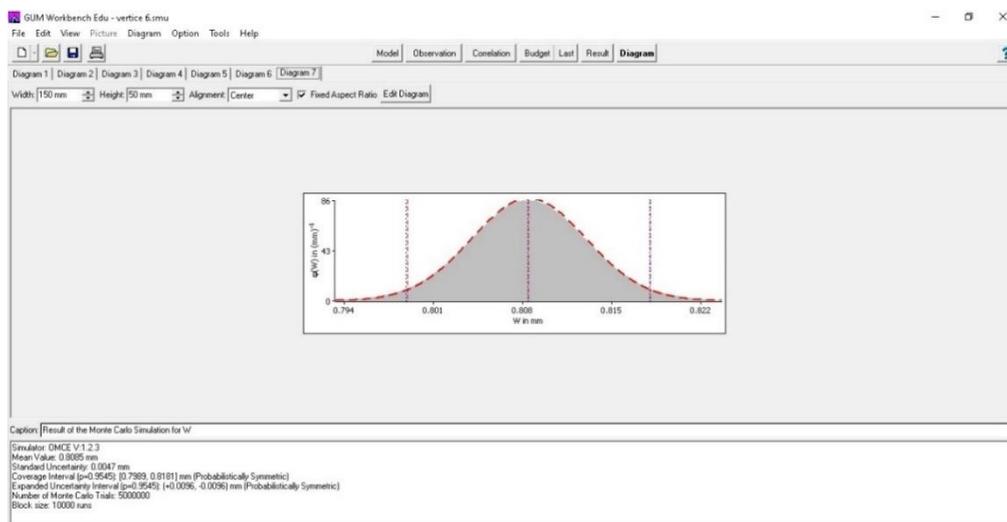


Figura 18 – Resultados da simulação de Monte Carlo para o vértice 6

A partir dos resultados obtidos por simulação de Monte Carlo e apresentados nas Figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18, a Tabela 3 apresenta a média e a incerteza obtida por simulação de Monte Carlo.

Tabela 3: Valores da média aritmética incerteza de medição, obtidos por simulação de Monte Carlo

r_E	\bar{X}	U
Vértice 1	0,7900 mm	0,011 mm
Vértice 2	0,8278 mm	0,0071 mm
Vértice 3	0,8116 mm	0,0081 mm
Vértice 4	0,8131 mm	0,012 mm
Vértice 5	0,8160 mm	0,021 mm
Vértice 6	0,8085 mm	0,0096 mm

Comparando-se os dados das Tabelas 1 e 2, verifica-se que os valores de incerteza de medição coincidiram, porém, como os dados de incerteza obtidos por simulação de

Monte Carlo para os vértices 2 e 3 apresentam uma casa decimal a mais, os valores de incerteza utilizados serão os da Tabela 3.

4.2 DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE RUGOSIDADE

Considerando-se o avanço $f = 0,15$ mm/volta e o valor nominal do raio de arredondamento da ponta da ferramenta r_ϵ igual a 0,8 mm. Com base nestes dados e tomando-se as Equações (3) e (4), os valores dos parâmetros R_t e R_a valem, respectivamente:

$$R_t = \frac{0,15^2}{8,0,8} \cong 0,003515625\text{mm} \cong 3,516\mu\text{m}$$

$$R_a = \frac{0,15^2}{31,0,8} \cong 0,000907258\text{mm} \cong 0,907\mu\text{m}$$

O resultado da medição (R) é dado pela média aritmética, mais ou menos a incerteza de medição, conforme Eq. (12).

$$R = \bar{X} \pm U \quad (12)$$

Assim, considerando-se os valores da Tabela 3 para a obtenção do resultado da medição do raio de arredondamento da ponta da ferramenta para o vértice 1 ($r_{\epsilon 1}$), tem-se:

$$r_{\epsilon 1} = (0,7900 + 0,011) \text{ mm}$$

Percebe-se, portanto, que há um intervalo de possíveis valores de r_ϵ com aproximadamente 95% de confiança de que o valor verdadeiro do raio se apresente [29], cujos extremos são dados por:

$$r_{\epsilon 1 \text{ menor}} = 0,7900 - 0,011 = 0,779 \text{ mm}$$

$$r_{\epsilon 1 \text{ maior}} = 0,7900 + 0,011 = 0,801 \text{ mm}$$

Nesse contexto, pode-se obter também dois valores extremos possíveis para os parâmetros de rugosidade R_t e R_a , sendo cada um deles dado por um raio de arredondamento da ponta da ferramenta.

Para o raio de arredondamento menor, tem-se o seguinte valor de R_t :

$$R_t = \frac{0,15^2}{8,0,779} \cong 0,003610398\text{mm} \cong 3,610\mu\text{m}$$

Para o maior valor do raio de arredondamento, tem-se o seguinte valor de R_t :

$$R_t = \frac{0,15^2}{8,0,801} \cong 0,003511236\text{mm} \cong 3,511\mu\text{m}$$

De maneira análoga para o parâmetro R_a , considerando-se o menor valor do raio de arredondamento da ponta da ferramenta, tem-se:

$$R_a = \frac{0,15^2}{31,0,779} \cong 0,000931716\text{mm} \cong 0,932\mu\text{m}$$

Para o maior valor do raio de arredondamento da ponta da ferramenta, tem-se:

$$R_a = \frac{0,15^2}{31,0,801} \cong 0,000906125\text{mm} \cong 0,906\mu\text{m}$$

A Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros de rugosidade R_t e R_a , considerando-se os resultados de medição dos raios de arredondamento de todos os seis vértices, enquanto que a Tabela 5 apresenta a diferença percentual entre os valores dos parâmetros R_t e R_a , obtidos considerando-se $r_\epsilon = 0,8$ mm e os valores dos extremos de r_ϵ , considerando-se os valores medidos para cada vértice da ferramenta de corte.

Tabela 4: Valores dos parâmetros de rugosidade, considerando-se os limites dos valores medidos de r_ϵ para os seis vértices do inserto

Vértice	r_ϵ (menor)	r_ϵ (maior)	R_t (menor)	R_t (maior)	R_a (menor)	R_a (maior)
1	0,779 mm	0,801 mm	3,511 μm	3,610 μm	0,906 μm	0,932 μm
2	0,8207 mm	0,8349 mm	3,369 μm	3,427 μm	0,869 μm	0,884 μm
3	0,8035 mm	0,8197 mm	3,431 μm	3,500 μm	0,885 μm	0,903 μm
4	0,8011 mm	0,8251 mm	3,409 μm	3,511 μm	0,880 μm	0,906 μm
5	0,795 mm	0,837 mm	3,360 μm	3,538 μm	0,867 μm	0,913 μm
6	0,7989 mm	0,8181 mm	3,438 μm	3,520 μm	0,887 μm	0,909 μm

Tabela 5: Diferença percentual entre os valores de rugosidade obtidos considerando-se $r_\epsilon = 0,8$ mm e os valores de r_ϵ medidos

Vértice	Diferença percentual			
	R_t (menor)	R_t (maior)	R_a (menor)	R_a (maior)
1	0,14%	2,67%	0,11%	2,76%
2	4,18%	2,53%	4,19%	2,54%
3	2,42%	0,46%	2,43%	0,44%
4	3,04%	0,14%	2,98%	0,11%
5	4,44%	0,63%	4,41%	0,66%
6	2,22%	0,11%	2,21%	0,22%

Analisando-se a Tabela 4, constata-se, inicialmente, que o resultado de medição do r_e referente ao vértice 1 demonstra que o valor verdadeiro se encontra entre 0,779 mm e 0,801 mm, para um nível de confiança de aproximadamente 95%. Por sua vez, analisando-se a Figura 7, constata-se que o intervalo de confiança para o r_e para o mesmo vértice é formado pelos extremos de 0,78020 mm e 0,79980 mm, podendo assim, o valor verdadeiro se encontrar fora deste intervalo para valores entre 0,7980 mm e 0,801 mm, inclusive para o valor nominal de 0,8 mm. Um comportamento semelhante pode ser verificado nos valores de r_e em relação aos demais vértices.

Por meio da Tabela 5, constata-se que a diferença percentual entre o valor de R_t obtido considerando $r_e = 0,8$ mm e considerando-se os valores medidos chegou a aproximadamente 4,44% (0,156 μm) na amostra do vértice 5, uma vez que o R_t calculado considerando-se o $r_e = 0,8$ mm foi igual a 3,516 μm , enquanto que o valor de R_t calculado considerando-se o $r_e = 0,837$ mm foi igual a 3,360 μm , apresentando um valor inferior ao obtido para o valor de raio de arredondamento nominal, fornecido pelo fabricante. Do mesmo modo, com relação ao parâmetro de rugosidade R_a , que apresentou uma diferença percentual máxima de aproximadamente 4,41% (0,04 μm), uma vez que o valor de R_a obtido com $r_e = 0,8$ mm é igual a 0,907 μm , enquanto que para o $r_e = 0,837$ mm, o valor de R_a é igual a 0,867 μm . Para esse tipo de situação, tudo dependerá das exigências funcionais da peça, uma vez que obter uma rugosidade real menor que a planejada poderá representar um benefício em determinadas situações, mas também poderá comprometer a qualidade da peça em situações onde uma maior rugosidade seja necessária, como por exemplo, em situações em que o atrito é uma exigência funcional. Porém, caso a tolerância de acabamento superficial consiga abranger as variações nas determinações de rugosidade teórica considerando-se as medições de r_e , o problema estará resolvido. No entanto, deve-se estabelecer tal tolerância de maneira realística com base exatamente nas exigências funcionais das peças.

Outra questão é que a influência das variações de r_e observadas nesse experimento geram no avanço alterações que dependerão, fundamentalmente, do tipo de máquina-ferramenta utilizada. Considerando-se, por exemplo, que se pretenda obter $R_t = 2$ μm , ou imediatamente inferior. Nesse caso, o avanço a ser utilizado para $r_e = 0,8$ mm é igual a:

$$f = \sqrt{8 \cdot R_t \cdot r_e} = \sqrt{8 \cdot 0,002 \cdot 0,8} \cong 0,113 \text{ mm/volta}$$

Ao passo que se for utilizado o maior raio de arredondamento possível apresentado na Tabela 5 que é $r_e = 0,837$ mm, tem-se:

$$f = \sqrt{8 \cdot R_t \cdot r_e} = \sqrt{8 \cdot 0,002 \cdot 0,837} \cong 0,116 \text{ mm/volta}$$

Tomando-se, por exemplo, um torno convencional com os seguintes avanços (mm/volta) [8]: 0,053; 0,074; 0,079; 0,094; 0,116; 0,14; 0,15; 0,16; 0,19; 0,223; 0,254; 0,282; 0,297; 0,32; 0,348; 0,374; 0,394; 0,449; 0,49; 0,554; 0,62; 0,675; 0,731 e 1,013, percebe-se para o r_e medido, o valor do avanço permanece igual a 0,116 mm/volta, enquanto que para o $r_e = 0,8$ mm, o avanço passará para 0,094 mm/volta. Por sua vez, para um valor do parâmetro R_a igual a 8 μm , os valores do avanço apresentaram uma diferença de aproximadamente 0,011 mm/volta. Para o $r_e = 0,8$ mm, tem-se:

$$f = \sqrt{31 \cdot R_a \cdot r_e} = \sqrt{31 \cdot 0,008 \cdot 0,8} \cong 0,445 \text{ mm/volta}$$

Para $r_e = 0,837$ mm, tem-se:

$$f = \sqrt{31 \cdot R_a \cdot r_e} = \sqrt{31 \cdot 0,008 \cdot 0,837} \cong 0,456 \text{ mm/volta}$$

Assim, para a situação em que $r_e = 0,8$ mm, o avanço deveria ser aproximado para 0,394 mm/volta, enquanto que para o caso do $r_e = 0,837$ mm, o avanço deveria ser aproximado para 0,449 mm/volta.

4.3 RELEVÂNCIA NA GESTÃO DA QUALIDADE DAS ORGANIZAÇÕES

Segundo a ISO 9001:2015 [30], a organização deve determinar a verificação, ou outra atividade, necessária para assegurar que os processos, produtos e serviços providos externamente atendam a requisitos. Dessa forma, os parâmetros de avaliação estabelecidos no presente trabalho podem ser utilizados como base para inspeção de recebimento de ferramentas de torneamento, principalmente em indústrias que se utilizem de usinagem como atividade-fim, pois pressupõe-se que o consumo desses insumos sejam sistêmicos e que, portanto, passem a integrar itens de controle de processo.

Ainda segundo a mesma Norma, a organização deve determinar o que precisa ser monitorado e medido, bem como os métodos para monitoramento, medição, análise e avaliação necessários para assegurar resultados válidos além de quando o monitoramento e a medição devem ser realizados. Essa asserção indica que, a depender da estrutura organizacional em questão, a organização opte:

4.3.1 Por uma sistemática de estabelecimento de qualidade assegurada: em comum acordo entre o cliente e o fornecedor, que esse último possa fornecer os seus produtos em

função de parâmetros estabelecidos em procedimentos previstos em sua administração da qualidade interna, prevendo a verificação dos itens de controle supracitados.

4.3.2 Por uma operacionalização interna de verificação de conformidade: estabelecer procedimentos internos de verificação de conformidade dos parâmetros citados na própria organização como pré-requisito para a continuidade do processo produtivo.

Em ambos os casos, a organização pode optar por metodologia específica para atingimento de tais objetivos. Pode-se citar opções tais como controle estatístico de processo, referendado por cartas de controle, inspeção por atributos ou outro método que se ajuste à realidade da organização.

Verifica-se que, na essência, em se tratando de inspeção de qualidade para recebimento, o dimensionamento da amostragem se torna imprescindível, razão pela qual se considera de bom alvitre que se utilize de aplicativos específicos para tal intento, o qual destaca-se o SAMPLE SIZE CALC SOFTWARE [31].

5 CONCLUSÕES

Apesar terem sido verificadas variações até da ordem de 4% entre a rugosidade teórica calculada (parâmetros R_t e R_a), considerando-se $r_e = 0,8$ mm e a rugosidade teórica calculada para o valor de r_e medido, tal diferença passará a ser expressiva se a tolerância dimensional do diâmetro da peça em questão for da ordem de grandeza da rugosidade.

Outra questão experimentalmente verificada neste estudo foi que a variação observada entre os valores medidos e o valor nominal de r_e poderão impactar na seleção do avanço, principalmente em relação às máquinas-ferramenta com comando numérico computadorizado, dependendo do acabamento superficial pretendido e do tipo de torno utilizado.

Como as equações dos parâmetros R_t e R_a em função de f e r_e são equações empíricas, espera-se que ocorram variações entre os valores teóricos e experimentais, os quais deverão se apresentar dentro de uma faixa de tolerância que deverá ser estabelecida com base nas exigências funcionais das peças, mas também considerando-se possíveis variações entre os valores reais, tanto de r_e quanto de f . A próxima etapa deste estudo será comparar a influência do avanço real da máquina nos mesmos parâmetros de rugosidade com os valores dos parâmetros de rugosidade obtidos para o avanço nominal indicado.

Destarte, verifica-se que tornar-se-ia importante que em cada lote de ferramentas recebido pelo cliente usuário fosse informado o valor médio bem como a incerteza

referentes ao raio de arredondamento da ferramenta, haja vista ser item de controle (demandante de ajustes a posteriori) para o processo de usinagem.

Para o presente trabalho, utilizou-se um único tipo de ferramenta oriunda de um fabricante; trabalhos vindouros podem ser efetuados levando-se em consideração tanto a distinção de uma mesma ferramenta em fabricantes distintos quanto ferramentas distintas de um mesmo fabricante.

REFERÊNCIAS

- [1] MESQUITA, N. G. M. M. Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.
- [2] BATISTA, A. J. Desenvolvimento de um aplicativo para cálculo dos custos de torneamento / Alfredo José Batista. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Recife, 2005.
- [3] NBR 6158: sistemas de tolerância e ajustes: procedimento. Rio de Janeiro, 1995.
- [4] OLIVEIRA, J. E. F. Otimização de processos de fabricação por usinagem via programação linear. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Recife, 1999.
- [5] • ISO GUM (2008), Avaliação de dados de Medição - Guia para a expressão de incerteza de medição, 1ª edição brasileira.
- [6] JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method
- [7] NBR ISO 4287. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, 2002.
- [8] 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 (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Recife, 2009.
- [9] BET, L. Estudo da medição da textura de superfícies com sonda mecânica e com sondas ópticas tipo seguidor. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- [10] ARAUJO, A. C.; MOUGO, A. L.; CAMPOS, F. O. Usinagem para engenharia: um curso de mecânica do corte. 1. Rio de Janeiro: E-papers, 2020.
- [11] BRAMMERTZ, P. H. Die Entstehung der Oberflächenrauheit beim Feindreihen. Bericht aus dem Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der TH Aachen, 1961.
- [12] KÖNIG, W. Fertungsverfahren, vol. 1, p. 178 – VDI – Verlag gmbH – Düsseldorf, 1984.
- [13] TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK. Society of manufacturing engineers. Volume 1, Machining, Fourth Edition, Michigan, 1983.
- [14] CASSIER, Z. Critérios de optimización de parâmetros de corte en el torneado de piezas utilizando sistemas CAD-CAM. Departamento de Mecânica – Universidad Simón Bolívar, Caracas, 1986.

- [15] PRASAD, A. Optimal selection of process for turning operation in CAPP system. Taylor and Francis Ltd, International Journal of Product Research, vol. 3, issue 6, pp. 1495-1522, London, 1997.
- [16] NBR ISO/IEC 17025. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, 2017.
- [17] BRUNELLI, A. Calibration Handbook of Measuring Instruments. 1th ed. ISA, 2017.
- [18] NASA. Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods - NASA Measurement Quality Assurance Handbook – ANNEX 3. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC 20546, 2010.
- [19] 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.
- [20] SHESKIN, D. J. – Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures 3rd Edition. CRC Press LLC. Florida, 2003.
- [21] KAPUR, K. C. Reability Engineering. Hoboke, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [22] KECECIOGLU, D. Reliability & Life Testing Handbook. Vol. 1 and 2. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1993 and 1994.
- [23] KECECIOGLU, D. Reliability and Life testing Handbook, Volume 1, Destech Publications Inc. USA, 2002.
- [24] ACIC NORMALIDADE. Download, C2019. Pagina inicial. Available at <<https://sites.google.com/site/acicnormalidade>>. Accessed on 21/01/2021.
- [25] 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.
- [26] GRUBBS, F. E. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. American Society for Quality, *Technometrics*, Vol. 11, No. 1, 1969, p. 1-21.
- [27] LINK, W. Tópicos avançados de metrologia mecânica – Confiabilidade metrológica e suas aplicações. 1a ed., São Paulo, 2000.
- [28] ANALYSIS OUTLIERS. Download, C2019. Pagina inicial. Available at <<https://sites.google.com/site/outliersanalysis>>. Accessed on 21/01/2021.
- [29] Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais de termos associados (VIM 2012). Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012.
- [30] NBR ISO 9001:2015. Sistemas de gestão da qualidade — Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, 2015.
- [31] SAMPLE SIZE CALC SOFTWARE. Download, C2019. Pagina inicial. Available at <<https://sites.google.com/site/samplesizecalcsoftware>>. Accessed on 21/01/2021.