



# AValiação DA INCERTEZA DA medição DE RUGOSIDADE E ANálISE DA INFLUêNCIA DAS VIBRAçõES

*Monique Alves Franco de Moraes*<sup>1</sup>, *Rosenda Valdés Arencibia*<sup>2</sup>, *Helder Barbieri Lacerda*<sup>3</sup> e *Antônio Piratelli Filho*<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, monique\_afm@hotmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, arvaldes@mecanica.ufu.br

<sup>3</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, helder@mecanica.ufu.br

<sup>4</sup> Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, piratelli@unb.br

**Resumo:** Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para estimar a incerteza associada à medição da rugosidade superficial utilizando um rugosímetro portátil. Paralelamente será investigada a influência das vibrações transmitidas pelo solo nos resultados das medições. Para tanto, são propostas as seguintes etapas: estudo minucioso sobre rugosidade superficial, enfatizando as normas técnicas, rugosímetros para medição com contato e vibrações; identificação das variáveis de influência; desenvolvimento de um modelo matemático para avaliação da incerteza; planejamento e realização dos experimentos para a coleta de dados; cálculo da incerteza e, por fim, apresentação e análise dos resultados. Ao final deste trabalho, constatou-se que as vibrações presentes no local afetam o resultado da medição, mesmo para situações aparentemente normais, isto é, com as máquinas-ferramenta nas proximidades do laboratório desligadas.

**Palavras chave:** rugosidade, incerteza de medição, vibrações.

## 1. INTRODUÇÃO

O acabamento superficial é um importante fator a ser considerado nos processos de usinagem. É influenciado por vários parâmetros, dentre eles: a geometria da ferramenta de corte, a rigidez da máquina ferramenta, o material da peça e da ferramenta e as condições de corte.

A medição da rugosidade faz-se necessário para a previsão do comportamento dos componentes mecânicos e a otimização do desempenho dos mesmos. A sua importância radica no fato de as superfícies representarem o elo entre a peça como um todo e o meio ambiente com sua múltipla gama de solicitações, entre elas: resistência à corrosão, ao desgaste, à fadiga e o escoamento de fluidos.

A medição de rugosidade pode ser efetuada de forma simples utilizando um rugosímetro. Entretanto, o cálculo da incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade não é uma tarefa simples, devido à complexidade do processo de medição. Neste sentido, poucos trabalhos podem ser encontrados na literatura.

Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para avaliação da incerteza associada à medição de rugosidade. Também, objetiva-se verificar a contribuição das vibrações mecânicas na incerteza total.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A rugosidade superficial ou textura primária é um desvio de forma microgeométrico, caracterizado por sulcos ou marcas deixados pelo agente que atacou a superfície da peça durante a usinagem. Essas marcas representam um conjunto de irregularidades repetidas em ondas de comprimento semelhantes à sua amplitude, ou seja, são ondas de altas frequências, isto é, pequenos comprimentos de onda

Assim sendo, para analisar o sinal de rugosidade, os rugosímetros utilizam filtros passa-alta, que deixam passar os sinais com frequências maiores que um determinado valor ou comprimento de onda de corte (cut-off). Enquanto isso, os sinais com frequências inferiores são eliminados.

A rugosidade é função do tipo de acabamento, da máquina-ferramenta ou do processo de fabricação utilizado. Para avaliá-la, utilizam-se rugosímetros óticos, a laser ou eletromecânicos, também, padrões de rugosidade.

Quando a medição de rugosidade for efetuada com um rugosímetro com apalpador, os resultados podem ser influenciados pelas vibrações transmitidas pelo solo. Desta forma, resulta necessário avaliar o nível de vibrações em cada local de medição. Isto possibilita efetuar uma avaliação mais rigorosa da incerteza de medição.

A estimativa da incerteza de medição deve ser efetuada para todas as medições realizadas. Para tanto deve ser seguida a metodologia de cálculo especificada em [1].

Segundo VIM 2009 [2] a incerteza de medição pode ser definida como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas

Uma estimativa razoável da incerteza deve conter, pelo menos, as seguintes parcelas de contribuição:

**Variabilidade associada às leituras:** neste sentido, pode-se dizer que a NBR 4288 (2008) [3] recomenda que a

rugosidade seja medida pelo menos 3 vezes nos locais da superfície da peça onde se esperam os maiores valores de rugosidade.

**Resolução do sistema de medição:** Todo sistema de medição apresenta uma limitação relacionada com a menor indicação da grandeza em questão que ele pode fornecer. Assim sendo, esta variável sempre contribuirá para a incerteza final.

**Incerteza associada à calibração do sistema de medição:** Todo sistema de medição apresenta erros e, portanto, deve ser calibrado antes do uso. Os resultados da calibração, incluindo a incerteza, devem ser declarados no certificado de calibração e considerados no cálculo da incerteza das medições efetuadas com o sistema em questão.

**Desvio de planeza da superfície do desempenho:** Como a peça objeto de medição e o rugosímetro são colocados sobre o desempenho, o desvio de planeza da superfície do mesmo pode afetar no resultado das medições dos parâmetros de rugosidade.

**Variáveis relacionadas ao meio ambiente:** No caso particular da medição de rugosidade, em laboratórios metrológicos utilizando-se rugosímetros com apalpamento, as vibrações transmitidas pelo solo podem constituir fontes de incertezas significativas. Isto porque, frequentemente, máquinas-ferramenta são instaladas nas proximidades. As vibrações, neste caso, dependem do tipo de máquina e da operação de usinagem realizada. Portanto, uma investigação deve ser conduzida a fim de identificar os diferentes níveis de vibrações e sua contribuição para a incerteza final.

A temperatura pode ser outra grandeza que afeta o resultado da medição nas seguintes situações: quando a temperatura ambiente é diferente de 20 °C e quando ocorre uma variação deste parâmetro durante as medições. Estes efeitos térmicos são mais significativos quando há expansão diferencial e, também, quando o mensurando possui dimensão significativa para que a alteração sofrida de comprimento seja percebida pela resolução do instrumento.

### 3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foram propostas três etapas, conforme descrito a seguir.

#### 3.1. Estudo do sistema de medição

Foi efetuado um estudo detalhado do sistema de medição e foram definidos os mensurandos. Simultaneamente, foram identificadas as variáveis que afetam o resultado das medições e que contribuem para a incerteza final da medição dos diferentes parâmetros de rugosidade.

#### 3.2. Modelagem do processo de medição

Para aplicação do GUM, um modelo matemático deve ser proposto relacionando as variáveis de entrada e a variável de saída. Neste trabalho foram medidos três parâmetros de rugosidade, a saber: desvio aritmético médio do perfil em avaliação (Ra); desvio médio quadrático do

perfil em avaliação (Rq) e altura total do perfil (Rt), classificados pela NBR 4287 (2002) [5] como parâmetros de amplitude.

A escolha destes parâmetros se justifica pelo fato de serem frequentemente avaliados nas pesquisas desenvolvidas na faculdade para otimização dos processos de usinagem, por exemplo. Sendo que o Ra é o parâmetro mais utilizado no mundo.

O conjunto de variáveis que afetam os valores dos três parâmetros de rugosidade é igual, assim sendo, será apresentado apenas um modelo matemático para avaliação da incerteza de medição Eq. (1).

$$C = s(L_{Ru}) + \Delta R_{Ru} + \Delta I_{Ru} + \Delta D_{Vib} + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Ru}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Ru}) \quad (1)$$

onde:  $s(L_{Ru})$  é a variabilidade associada aos valores do parâmetro em questão;  $\Delta R_{Ru}$  é a correção devido à resolução do rugosímetro;  $\Delta I_{Ru}$  é a correção associada à incerteza da calibração do rugosímetro;  $\Delta D_{Vib}$  é a correção devido ao deslocamento provocado pela amplitude das vibrações;  $\Delta T$  é a correção referente ao afastamento da temperatura ambiente com relação à 20 °C;  $\delta T$  é a correção associada à variação da temperatura durante as medições;  $\alpha_{Ru}$  e  $\alpha_{Pe}$  são os coeficientes de expansão térmica linear do material do apalpador do rugosímetro e da peça e  $L_0$  é o valor do mensurando.

Aplicando a Lei de Propagação de Incertezas na Eq. (1), obtém-se a Eq. (2), que permite o cálculo da incerteza padrão combinada.

$$u(C)^2 = \left( \frac{\partial C}{\partial s(L_{Ru})} \right)^2 \cdot (u_{s(L_{Ru})})^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial \Delta R_{Ru}} \right)^2 \cdot (u_{\Delta R_{Ru}})^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial \Delta I_{Ru}} \right)^2 \cdot (u_{\Delta I_{Ru}})^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial \Delta D_{Vib}} \right)^2 \cdot (u_{\Delta D_{Vib}})^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial \alpha_{Ru}} \right)^2 \cdot (u_{\alpha_{Ru}})^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial \alpha_{Pe}} \right)^2 \cdot (u_{\alpha_{Pe}})^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial \Delta T} \right)^2 \cdot (u_{\Delta T})^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial \delta T} \right)^2 \cdot (u_{\delta T})^2 \quad (2)$$

Para determinar a incerteza padrão associada às variáveis de entrada, presentes na Eq. (1) são utilizadas as Eqs. (3) a (10).

A incerteza padrão das leituras é dada pela Eq. (3).

$$s(L_{Ru}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Onde  $s$  é o desvio padrão associado aos valores do parâmetro medido.

Por sua vez, a correção devido à resolução do rugosímetro é dada pela Eq. (4).

$$u(\Delta R_{Ru}) = \frac{R_{Ru}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (4)$$

A correção devido à incerteza da calibração do rugosímetro é determinada pela Eq. (5).

$$u(\Delta I_{Ru}) = \frac{Up(Cal_{Ru})}{k} \quad (5)$$

A correção devido às amplitudes das vibrações pode ser calculada pela Eq. (6).

$$u(\Delta D_{Vib}) = \frac{Up(Amplit(Vib))}{k} \quad (6)$$

A correção associada ao afastamento da temperatura em relação a 20 °C ( $\Delta T_{20}$ ) é dada pela Eq. (7).

$$u(\Delta T_{20}) = \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_T}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_T}{k_T}\right)^2} \quad (7)$$

onde  $\Delta T$  é o afastamento da temperatura ambiente em relação a 20 °C;  $\Delta R_T$  é a correção da resolução do termômetro e  $\Delta I_T$  é a correção devido à incerteza da calibração do termômetro.

Por sua vez, a incerteza associada à variação da temperatura durante a medição é determinada pela Eq. (8).

$$u(\Delta \delta T) = \sqrt{\left(\frac{Var(T)}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_T}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_T}{k_T}\right)^2} \quad (8)$$

Ambas as variáveis relacionadas à variação da temperatura ambiente foram medidas com o mesmo termômetro, assim sendo, podem ser consideradas correlacionadas.

Para os coeficientes de expansão térmica linear ( $\alpha_{Ru}$  e  $\alpha_{Pe}$ ) foram propostas as Eqs. (9) e (10). Nestes casos, foi considerada uma incerteza conservativa de 10 %.

$$u(\alpha_{Ru}) = \frac{0,1\alpha_{Ru}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

$$u(\alpha_{Pe}) = \frac{0,1\alpha_{Pe}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

### 3.3. Testes experimentais

Três peças foram medidas utilizando um rugosímetro digital, portátil, modelo TR200 da Homis. Este instrumento possui sensor do tipo indutivo, com faixa nominal de 160  $\mu\text{m}$  e uma ponta de medição com raio de 0,2  $\mu\text{m}$  (Fig. 1). A resolução deste rugosímetro é variável e pode assumir 0,01 ou 0,001  $\mu\text{m}$ .

Completam este sistema de medição um computador e o programa dedicado Dataview TR200-A da Homis para apresentação e análise dos valores de rugosidade e dos gráficos do perfil efetivo. Um desempenho de granito com

área de 1000 x 1000 mm, onde foram posicionadas as peças e o rugosímetro.

O rugosímetro digital foi calibrado seguindo as recomendações da NBR ISO 12179 [4], utilizando-se um padrão de rugosidade com Ra de 1,49  $\mu\text{m}$ . Em seguida, os parâmetros Ra, Rq e Rt foram medidos 3 vezes para cada uma das peças, conforme recomendado em [3] e [5].

Paralelamente à medição da rugosidade, foram monitoradas as vibrações utilizando-se um acelerômetro piezolétrico, fabricado pela PCB piezotronics, modelo 352C33, um conversor de sinais (A/D), um computador portátil e programas especificamente desenvolvidos.



Figura 1. Rugosímetro digital portátil.

Foi efetuada uma calibração pontual do acelerômetro utilizando um excitador padrão. A seguir, foram monitoradas as vibrações de forma automatizada, coletando três amostras durante 20 segundos.

Especificamente, neste trabalho, as medições foram efetuadas em condições normais, isto é, as máquinas-ferramenta próximas ao laboratório não estavam em operação e os dois computadores utilizados para coleta dos dados foram retirados do desempenho.

Durante a medição, foi utilizado um comprimento de amostragem de 0,8 mm para as peças 1 e 2. Enquanto que, para a peça 3, o valor adotado foi de 2,5 mm.

Todas as medições foram realizadas no Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD) da UFU, a temperatura de  $(20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C})$ . Durante a medição, a temperatura ambiente foi monitorada utilizando-se um termo-higrômetro digital com resolução de 0,1 °C e faixa nominal de -20 a 60 °C.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 mostra os valores de rugosidade encontrados com suas respectivas médias e desvios padrão. Tem-se que P1, P2 e P3 representam as peças medidas.

Tabela 1. Valores de rugosidade.

	Ra ( $\mu\text{m}$ )			Rq ( $\mu\text{m}$ )			Rt ( $\mu\text{m}$ )		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
L1	1,775	0,482	3,297	2,032	0,639	4,344	10,06	5,980	27,20
L2	1,641	0,492	3,272	1,947	0,643	4,299	10,46	5,079	28,02
L3	1,915	0,505	2,998	2,239	0,640	3,919	11,57	5,420	25,36
$\bar{x}$	1,777	0,493	3,189	2,073	0,641	4,187	10,70	5,493	26,86
s	0,137	0,012	0,166	0,150	0,002	0,233	0,78	0,455	1,36

Como esperado, os valores de Ra são menores que os de Rq, que, por sua vez, são menores que os de Rt.

Pode ser observado na Tabela 1 que as peças apresentam valores médios de Ra de 1,777, 0,493 e 3,189  $\mu\text{m}$  para as peças 1, 2 e 3, respectivamente. Por sua vez, os valores de Rq são de 2,073, 0,641 e 4,187  $\mu\text{m}$ . Por fim, o parâmetro Rt apresentou valores de 10,70, 5,493 e 26,86  $\mu\text{m}$ .

A variabilidade das leituras para as peças 1 e 3 foi menor para o parâmetro Ra, enquanto que, para a peça 2, o menor valor foi para o Rq. De forma geral, os valores do desvio padrão são pequenos para os três parâmetros e as três peças, demonstrando que as superfícies apresentam acabamento superficial homogêneo.

#### 4.1. Cálculo da incerteza

Em seguida, foi calculada a incerteza associada à calibração do rugosímetro, sendo de 0,005  $\mu\text{m}$  para  $k=2,76$  e um nível de abrangência de 95,45 %.

Considerando uma incerteza de 1,5 % no intervalo de 10 a 99 Hz para 95 % de abrangência, tem-se que a incerteza associada ao deslocamento provocado pelas vibrações é de 0,009  $\mu\text{m}$  para  $k=2$ .

Posteriormente, foi avaliada a incerteza de medição dos parâmetros Ra, Rq e Rt. Cabe ressaltar que a variação de temperatura durante a medição não foi considerada, porque as medições foram efetuadas em um curto intervalo de tempo.

E, apesar da excelente resolução do rugosímetro, o afastamento da temperatura ambiente em relação à de referência também foi desprezado, visto que a temperatura durante a medição ficou estabilizada em 20,2 °C. Assim sendo, os efeitos térmicos não são percebidos por este equipamento, pois os valores dos parâmetros de rugosidade são na ordem dos micrometros.

As Tabelas 2, 3 e 4 correspondem ao cálculo da incerteza do parâmetro de rugosidade Ra para as peças 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Cálculo da incerteza do parâmetro Ra para a peça 1.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	u
$s(L_{Ru})$	1,777	A	N	2	1	0,07910
$\Delta R_{Ru}$	0,001	B	R	$\infty$	1	0,00029
$\Delta D_{Vib}$	0,0045	A	N	2	1	0,00450
$\Delta I_{Ru}$	0,00181	B	N	29	1	0,00181
Incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) em $\mu\text{m}$						0,07930
Grau de liberdade efetivo $veff$						2,01
Fator de abrangência k						4,303
Incerteza expandida em $\mu\text{m}$						0,341

Nestas tabelas, TI indica o tipo de avaliação da incerteza, A ou B, segundo as informações disponíveis; DP representa a distribuição de probabilidade que, nestes casos, foram: normal (N) e retangular (R); GL significa graus de liberdade; CS caracteriza os coeficientes de sensibilidade e

'u' é a incerteza padrão associada a cada uma das variáveis de entrada ou variáveis de influência.

Tabela 3. Cálculo da incerteza do parâmetro Ra para a peça 2.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	u
$s(L_{Ru})$	0,493	A	N	2	1	0,00666
$\Delta R_{Ru}$	0,001	B	R	$\infty$	1	0,00029
$\Delta D_{Vib}$	0,0045	A	N	2	1	0,00450
$\Delta I_{Ru}$	0,00181	B	N	29	1	0,00181
Incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) em $\mu\text{m}$						0,00820
Grau de liberdade efetivo $veff$						3,886
Fator de abrangência k						3,182
Incerteza expandida em $\mu\text{m}$						0,026

Cabe ressaltar que dois algarismos significativos foram acrescentados para minimizar os erros de arredondamento.

Tabela 4. Cálculo da incerteza do parâmetro Ra para a peça 3.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	u
$s(L_{Ru})$	3,189	A	N	2	1	0,09577
$\Delta R_{Ru}$	0,001	B	R	$\infty$	1	0,00029
$\Delta D_{Vib}$	0,0045	A	N	2	1	0,00450
$\Delta I_{Ru}$	0,00181	B	N	29	1	0,00181
Incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) em $\mu\text{m}$						0,09590
Grau de liberdade efetivo $veff$						2,0103
Fator de abrangência k						4,303
Incerteza expandida em $\mu\text{m}$						0,413

Para as peças 1, 2 e 3, respectivamente, tem-se que a incerteza expandida associada às medições de Ra é de: 0,341  $\mu\text{m}$ , para  $k=4,3$ ; 0,026  $\mu\text{m}$ , para  $k=3,182$ ; 0,413  $\mu\text{m}$ , para  $k=4,303$ .

A variável que mais contribuiu para a incerteza padrão combinada foi a variabilidade das leituras, sendo responsável por 99,74 % da incerteza total para a peça 1; de 81,2 % para a peça 2, enquanto que, para a peça 3, a contribuição foi de 99,86 %.

Os efeitos das vibrações transmitidas pelo solo representam a segunda parcela de maior contribuição na incerteza total, sendo de 0,0045  $\mu\text{m}$ , seguida das contribuições relativas à calibração (0,0018  $\mu\text{m}$ ) e à resolução do rugosímetro (0,0003  $\mu\text{m}$ ).

As Tabelas 5, 6 e 7 correspondem ao cálculo da incerteza do parâmetro de rugosidade Rq para as peças 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 5. Cálculo da incerteza do parâmetro Rq para a peça 1.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	u
$s(L_{Rq})$	2,073	A	N	2	1	0,08672
$\Delta R_{Rq}$	0,001	B	R	$\infty$	1	0,00029
$\Delta D_{Vib}$	0,0045	A	N	2	1	0,00450
$\Delta I_{Rq}$	0,00181	B	N	29	1	0,00181
Incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) em $\mu\text{m}$						0,08680
Grau de liberdade efetivo $veff$						2,0126
Fator de abrangência k						4,303
Incerteza expandida em $\mu\text{m}$						0,374

Tabela 6. Cálculo da incerteza do parâmetro Rq para a peça 2.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	u
$s(L_{Ru})$	0,641	A	N	2	1	0,00120
$\Delta R_{Ru}$	0,001	B	R	$\infty$	1	0,00029
$\Delta D_{Vib}$	0,0045	A	N	2	1	0,00450
$\Delta I_{Ru}$	0,00181	B	N	29	1	0,00181
Incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) em $\mu m$						0,00500
Grau de liberdade efetivo $veff$						3,04190
Fator de abrangência k						3,182
Incerteza expandida em $\mu m$						0,016

Tabela 7. Cálculo da incerteza do parâmetro Rq para a peça 3

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	u
$s(L_{Ru})$	4,187	A	N	2	1	0,13479
$\Delta R_{Ru}$	0,001	B	R	$\infty$	1	0,00029
$\Delta D_{Vib}$	0,0045	A	N	2	1	0,00450
$\Delta I_{Ru}$	0,00181	B	N	29	1	0,00181
Incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) em $\mu m$						0,13490
Grau de liberdade efetivo $veff$						2,0052
Fator de abrangência k						4,303
Incerteza expandida em $\mu m$						0,580

Para as peças 1, 2 e 3, respectivamente, tem-se que a incerteza expandida associada às medições de Rq é de: 0,374  $\mu m$ , para k= 4,303; 0,016  $\mu m$ , para k= 3,182; 0,580  $\mu m$ , para k= 4,303.

A variável que mais contribuiu para a incerteza padrão combinada das peças 1 e 3 foi a variabilidade das leituras, sendo responsável por 99,91 e 99,92 % da incerteza, respectivamente.

Durante a avaliação da incerteza da peça 2 a variável de maior contribuição foi a vibração transmitida pelo solo, contribuindo com 90 % da incerteza total.

Ainda, os efeitos das vibrações transmitidas pelo solo representam a segunda maior parcela de contribuição na incerteza total das peças 1 e 3, sendo de 0,0045  $\mu m$ , seguida das contribuições relativas à calibração (0,0018  $\mu m$ ) e à resolução do rugosímetro (0,0003  $\mu m$ ).

As Tabelas 8, 9 e 10 correspondem ao cálculo da incerteza do parâmetro de rugosidade Rt para as peças 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 8. Cálculo da incerteza do parâmetro Rt para a peça 1.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	u
$s(L_{Ru})$	10,70	A	N	2	1	0,45168
$\Delta R_{Ru}$	0,01	B	R	$\infty$	1	0,00289
$\Delta D_{Vib}$	0,0045	A	N	2	1	0,00450
$\Delta I_{Ru}$	0,00181	B	N	29	1	0,00181
Incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) em $\mu m$						0,45170
Grau de liberdade efetivo $veff$						2,0006
Fator de abrangência k						4,303
Incerteza expandida em $\mu m$						1,94

Tabela 9. Cálculo da incerteza do parâmetro Rt para a peça 2.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	u
$s(L_{Ru})$	5,493	A	N	2	1	0,26265
$\Delta R_{Ru}$	0,001	B	R	$\infty$	1	0,00029
$\Delta D_{Vib}$	0,0045	A	N	2	1	0,00450
$\Delta I_{Ru}$	0,001812	B	N	29	1	0,00181
Incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) em $\mu m$						0,26270
Grau de liberdade efetivo $veff$						2,0014
Fator de abrangência k						4,303
Incerteza expandida em $\mu m$						1,130

Tabela 10. Cálculo da incerteza do parâmetro Rt para a peça 3.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	u
$s(L_{Ru})$	26,86	A	N	2	1	0,78647
$\Delta R_{Ru}$	0,01	B	R	$\infty$	1	0,00289
$\Delta D_{Vib}$	0,0045	A	N	2	1	0,00450
$\Delta I_{Ru}$	0,001812	B	N	29	1	0,00181
Incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) em $\mu m$						0,78650
Grau de liberdade efetivo $veff$						2,0002
Fator de abrangência k						4,303
Incerteza expandida em $\mu m$						3,380

Os valores de incerteza expandida relacionados às medições de Rt são as seguintes: 1,94  $\mu m$ , para k= 4,303; 1,130  $\mu m$ , para k= 4,303; 3,380  $\mu m$ , para k= 4,303.

A variável que mais contribuiu para a incerteza padrão combinada foi a variabilidade das leituras, sendo responsável por 99,99 % da incerteza total para as peças 1, 2 e 3.

Os efeitos das vibrações transmitidas pelo solo representam a segunda parcela de maior contribuição na incerteza total, sendo de 0,0045  $\mu m$ , seguida das contribuições relativas à resolução do rugosímetro (0,0029  $\mu m$ ) e à calibração (0,0018  $\mu m$ ) para as peças 1 e 3. Enquanto que, para a peça 2, a incerteza padrão associada à calibração (0,0018  $\mu m$ ) é maior que a da resolução (0,0003  $\mu m$ ).

## 5. CONCLUSÕES

Ao término deste trabalho podem-se apresentar as seguintes conclusões:

Foi possível estimar a incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade ( $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_t$ ), aplicando a metodologia proposta no GUM.

Foi verificado que a variabilidade das leituras, em comparação com as outras fontes de incerteza, foi a que mais contribuiu para a incerteza final de medição na maioria dos casos.

Este trabalho revelou que, mesmo para situações aparentemente normais, os efeitos das vibrações contribuem para a incerteza final da medição de rugosidade. Sendo que esta contribuição foi de até 90 % da incerteza total para a medição do Rq da peça 2.

Espera-se que, quando as máquinas-ferramenta estiverem em operação, os efeitos das vibrações transmitidas pelo solo sejam maiores. Assim sendo, as vibrações, nestas condições, devem ser monitoradas e seus efeitos considerados na avaliação da incerteza de medição de rugosidade.

Atualmente estão sendo investigados os efeitos das vibrações, considerando-se as seguintes condições:

1ª Condição: A fresadora ligada executando diferentes operações de fresamento e o torno desligado.

2ª Condição: O torno ligado e a fresadora desligada.

3ª Condição: Ambas as máquinas ligadas.

Ainda, as vibrações estão sendo monitoradas em dias diferentes e horários diferentes, a fim de identificar outras possíveis fontes de interferência.

Visando uma avaliação mais completa da incerteza, na medição da rugosidade superficial, será aplicado, também, o método de Monte Carlo.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à FAPEMIG (Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio financeiro.

## **7. REFERÊNCIAS**

- [1] INMETRO- "Guia para a expressão da incerteza de medição", Rio de Janeiro, 2008.
- [2] INMETRO, Vocabulário Internacional de Metrologia Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados – VIM, 2009. 77p.
- [3] NBR ISO 4288 “Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil-regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. 2008. 10p.
- [4] NBR ISO 12179 “Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade – Método do perfil – Calibração de instrumentos de medição por contato (com sapata de apalpação). 2002. 15p.
- [5] NBR ISO 4287 “Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade”. Set. 2002. 18p.