

APLICAÇÃO DO MÉTODO GUM NO CÁLCULO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA FORÇA DE CORTE NO TORNEAMENTO

Paulo Vinícius da Silva Resende¹

Ildeu Lúcio Siqueira²

Instituto Federal de Goiás – IFG Campus Goiânia. Rua 75, 46, Setor Central, Goiânia-GO.
paulo.vinicius@ifg.edu.br¹; ildeu.siqueira@ifg.edu.br²

Rosenda Valdés Arencibia³

Marcio Bacci da Silva⁴

Universidade Federal de Uberlândia - FEMEC. Av. João Naves de Ávila, 2121 – Bloco 1M, Uberlândia-MG.
rosenda.arencibia@ufu.br³; mbacci@ufu.br⁴

Resumo. A medição das forças de usinagem nos estudos científicos e tecnológicos é relevante para o entendimento dos fenômenos físicos envolvidos na usinagem dos materiais. Em diversos trabalhos publicados, nota-se que a metodologia experimental contempla, por vezes, múltiplas réplicas dos ensaios e a expressão dos resultados como a média amostral acompanhada da dispersão, via desvio padrão amostral. O presente trabalho apresenta a aplicação do método GUM na determinação da incerteza de medição da força de corte. O objetivo é contribuir para a rastreabilidade dos resultados de medição e o atendimento das normas técnicas em vigor, sobretudo nos estudos comparativos de condições de usinagem, além de demonstrar a contribuição das fontes de incerteza no resultado final. São apresentados os resultados da força de corte no torneamento externo do aço ABNT 1050. A metodologia aplicada pode ser utilizada na estimativa da incerteza nas demais componentes das forças de usinagem (F_y e F_z).

Palavras chave: Força de Usinagem, Dinamômetro, Rastreabilidade metrológica, NBR ISO IEC 17025.

1. INTRODUÇÃO

A medição da força de usinagem, segundo Machado *et al.* (2009), pode ser simplificada à análise estática de maneira grosseira para estimar, por exemplo, a potência requerida de corte em um processo de usinagem. Entretanto, o estudo detalhado da formação dos cavacos e a estabilidade dinâmica de uma máquina ferramenta, requer a medição das componentes de forças dinâmicas para que se entendam os fenômenos, seja de um processo específico ou em andamento.

No torneamento, as forças de usinagem e suas componentes, mostradas na Fig.1(a) pela força passiva F_p , força de corte F_c e força de avanço F_f , são objeto de estudo em diversas pesquisas científicas, tecnológicas e de desenvolvimento na manufatura mecânica. Esta grandeza física é significativa na explicação e correlação dos mecanismos de desgaste da ferramenta de corte, na qualificação e determinação da usinabilidade dos materiais, além de guiar o projeto de uma máquina ferramenta e suas condições estáveis e econômicas de corte (Machado *et al.*, 2009).

A instrumentação utilizada para medir tais grandezas é composta fundamentalmente por um dinamômetro, Fig.1(b) e seus acessórios, com o objetivo de realizar a medição, transdução e aquisição na forma de sinal temporal ou valores escalares em determinada faixa experimental. Ferraresi (1995) destaca os principais requisitos dos dinamômetros, como a sensibilidade, precisão, exatidão e o mínimo de efeito cruzado.

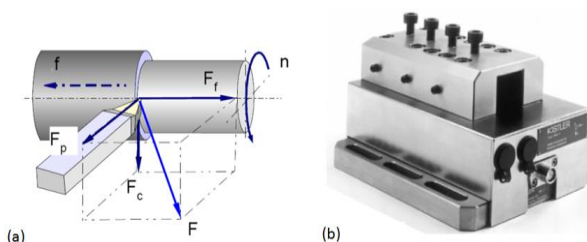


Figura 1: Diagrama de Forças de Usinagem (a), Plataforma Piezoelétrica para Torneamento (b).

Para realizar a aquisição das forças dinâmicas durante o processo, utiliza-se instrumentação específica com capacidade de reprodutibilidade experimental, como as plataformas piezoelétricas. As características qualitativas e quantitativas relacionadas aos resultados de medição do dinamômetro devem ser consideradas pelo experimentador,

visto que, em determinadas condições de corte, a magnitude das forças envolvidas pode ser um “ruído” perante o sistema de medição, ou extrapolar o fundo de escala.

Em diversos trabalhos publicados, como Rodrigues *et. al* (2007) e Souza *et. al* (2016), observa-se que os resultados de medição são expressos apenas em função da média, ou acompanhada do desvio padrão. Por outro lado, a partir da leitura dos manuais de instrumentação e plataformas piezoelétricas, nota-se que os sistemas de medição de força, ainda que fabricados por processos minuciosos e controlados, possuem erros e/ou incertezas associados à calibração dos mesmos, declaradas no manual do fabricante, *data sheet* da instrumentação ou certificados de calibração.

A incerteza de medição é um parâmetro metrológico que permite avaliar a qualidade do resultado da medição. A estimativa e declaração deste parâmetro são indispensáveis para a garantia da rastreabilidade metrológica do resultado de medição, bem como para o atendimento da NBR ISO IEC 17025 (2017). A declaração da incerteza viabiliza que os resultados de medição possam ser comparados, seja entre si ou com valores de referência.

Para isso, a comunidade científica em conjunto com os organismos internacionais começou a discutir na década de 70 sobre procedimentos e recomendações para calcular a incerteza associada aos resultados das medições, dando origem ao GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) em 1993. A atual versão brasileira foi publicada pelo INMETRO (2012) com título “Avaliação de dados de medição - Guia para Expressão de Incerteza de Medição GUM 2008”.

O objetivo do presente trabalho é aplicar o método de cálculo de incerteza de medição GUM à medição de forças de usinagem com plataforma piezoelétrica. Para efeitos de cálculo da incerteza no modelo matemático da medição foram consideradas todas as fontes de incerteza declaradas no manual e no certificado de calibração emitido pelo fabricante da plataforma piezoelétrica. O método foi aplicado no torneamento cilíndrico do aço ABNT 1050 em diferentes condições de corte para demonstrar a influência da amplitude das grandezas no efeito cruzado, realizar a comparação dos resultados entre si e a expressão do resultado.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O torneamento cilíndrico do aço ABNT 1050 foi executado em um Torno Mecânico Paralelo Universal, modelo Nodus 220 Gold do fabricante Nardini S/A, com potência instalada de 5,5 kW (7,5 cv) como apresentado na Figura 2.

Como variáveis de entrada, foram adotados:

(a) Material: um tarugo redondo de Aço ABNT 1050 com dureza média de 238 HB e dimensões de 54 mm de diâmetro e comprimento de 500 mm. A fixação foi feita entre placa e ponta;

(b) Ferramenta de corte: composta pelo suporte e inserto do fabricante Mitsubishi Carbide dos respectivos modelos, PWLNR2020K06 e WNMG06T308-MP classe UE6110;

(c) Parâmetros de corte: Velocidade de Corte $V_c = 160$ m/min; Avanço $f = 0,1$ mm /rev.; profundidade de corte ap variável em dois níveis, de 0,5 mm e 1,5 mm. Por consequência, a rotação selecionada no torno foi de 950 rpm.

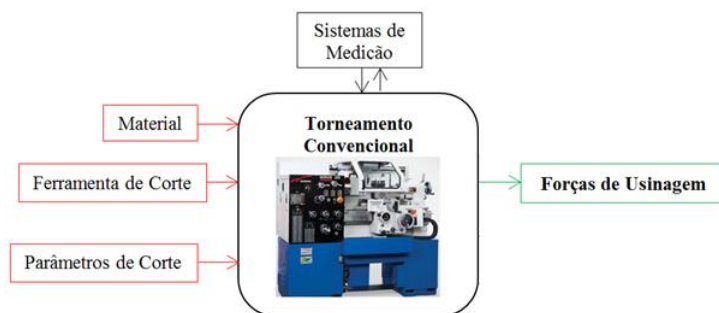


Figura 2: Representação esquemática dos ensaios

Como variável de saída, foi avaliada a componente da Força de Usinagem denominada Força de Corte F_c , adquirida pelo sistema de medição, uma Plataforma piezoelétrica do Fabricante Kistler, modelo 9265B com o dispositivo para torneamento modelo 9441B, montado sobre o carro transversal do referido torno. Os sinais obtidos pelo dispositivo foram enviados ao amplificador multicanais, também do mesmo fabricante e modelo 5070A que realiza a comunicação via USB pelo *software* Dynoware específico do conjunto, com resolução de 0,5 N. Realizaram-se seis repetições em cada condição experimental.

A Tabela 1 apresenta os resultados declarados no Certificado de Calibração do dinamômetro. A coluna de resultados de Sensibilidade (*Sensitivity*) refere-se à constante de proporcionalidade do sinal de entrada e saída do transdutor, enquanto a Linearidade (*Linearity*) é expressa por pela porcentagem do fundo de escala (*Full Scale Output - FSO*) e o Efeito Cruzado (*Cross Talk*) como percentual da amplitude de referência. Por exemplo, para a primeira faixa de medição do canal F_x (primeira linha Tab. 1), F_x interfere em F_y 0,6 % de sua amplitude, enquanto em F_z , -2,4 %.

Foi utilizada a faixa de 1,5 kN para os canais referentes à F_x e F_y (força de avanço e passiva) e de 3,0 kN para F_z (força de corte).

Faixa Calibrada		Sensibilidade	Linearidade	Cross Talk	
kN		pC / N	$\leq \pm \% \text{ FSO}$	% amplitude resultante	
Fx	15	-7,832	0,08	Fx $\rightarrow$ Fy 0,6	Fx $\rightarrow$ Fz -2,4
Fx	1,5	-7,841	0,04	Fx $\rightarrow$ Fy 0,5	Fx $\rightarrow$ Fz -2,0
Fy	15	-7,889	0,02	Fy $\rightarrow$ Fx 0,7	Fy $\rightarrow$ Fz -0,6
Fy	1,5	-7,887	0,05	Fy $\rightarrow$ Fx 0,7	Fy $\rightarrow$ Fz -0,5
Fz	30	-3,622	0,31	Fz $\rightarrow$ Fx -0,1	Fz $\rightarrow$ Fy 1,0
Fz	3	-3,589	0,06	Fz $\rightarrow$ Fx -0,2	Fz $\rightarrow$ Fy 0,6

Tabela 1: Resultados da Calibração fornecidos pelo fabricante

3. MÉTODO GUM PARA CÁLCULO DE INCERTEZA

O modelo matemático proposto para avaliação da incerteza associada à componente F_z é mostrado na Eq. (1), sendo $\bar{x}_z$ a dispersão dos valores medidos; ΔC é a correção associada à calibração do instrumento, ΔR é a correção devido à resolução do instrumento; ΔL é a correção associada a não linearidade e ΔEC_z a correção devido ao efeito cruzado.

$$F_z = \bar{x}_z + \Delta C + \Delta R + \Delta L + \Delta EC_z \quad [1]$$

Esta última parcela, ΔEC_z , possui duas componentes que dependem de constantes, a_{yx} e a_{zx} declaradas no certificado de calibração do sistema de medição (Tab. 1), multiplicadas às respectivas forças que são adquiridas simultaneamente pelo segundo e terceiro canal, F_x e F_y , da forma:

$$\Delta EC_z = a_{xz}F_x + a_{yz}F_y \quad [2]$$

A incerteza padrão dos componentes $\bar{x}_z$ e ΔC da Eq. (1) foi obtida a partir da avaliação Tipo A como mostram as Eqs. (3) e (4). Na Eq. (4) foi adotada a recomendação de Vuolo (2005), que recomenda estimar a incerteza associada à calibração como sendo múltiplo da resolução do instrumento R_{inst} considerando um fator de abrangência $k = 2,00$. Esta prática foi adotada visto que a incerteza expandida associada à calibração não foi declarada no Certificado de Calibração.

$$u(\bar{x}_x) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [3]$$

$$u(\Delta C) = 2 \cdot \frac{R_{inst}}{k} \quad [4]$$

As demais incertezas padrão foram obtidas por meio de avaliações tipo B, visto que não podem ser estimadas estatisticamente. Considerou-se uma distribuição retangular com infinitos graus de liberdade em todos os casos, Eqs. (5) e (6).

$$u(\Delta R) = \frac{R_{inst}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad [5]$$

Na Eq. (5) R_{inst} é a resolução do instrumento, dada em Newton.

$$u(\Delta L) = u(\Delta EC) = \frac{ED}{\sqrt{3}} \quad [6]$$

Na Eq. (6) se observa que a incerteza padrão relacionada à correção de linearidade e do efeito cruzado foram calculadas considerando os respectivos valores de Erro Declarado ED , sendo EL_i o erro declarado no certificado de calibração como percentual da faixa de medição do canal, apresentado na Fig. 3, e ΔEC_x é a parcela do efeito cruzado, interferência do segundo e terceiro canal da aquisição das forças, proveniente da Eq. (2).

A Incerteza Padrão Combinada $u_c(F_z)$ é expressa da forma:

$$u_c^2(F_z) = \left(\frac{\partial F_z}{\partial \bar{x}_z}\right)^2 \cdot u^2(\bar{x}_z) + \left(\frac{\partial F_z}{\partial \Delta C}\right)^2 \cdot u^2(\Delta C) + \left(\frac{\partial F_z}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot u^2(\Delta R) + \left(\frac{\partial F_z}{\partial \Delta L}\right)^2 \cdot u^2(\Delta L) + \left(\frac{\partial F_z}{\partial \Delta EC_z}\right)^2 \cdot u^2(\Delta EC_z) \quad [7]$$

As derivadas parciais são unitárias para todas as fontes de incertezas, aqui denominada de coeficiente de sensibilidade $C(x_i)$. A incerteza expandida, por sua vez, é obtida por meio da Eq. (8), onde k é função do número de

graus de liberdade efetivo obtido pela Eq. (9), e extraído da Tabela de Distribuição *t-Student* em um nível de confiabilidade aqui estabelecido em 95 %.

$$U(Fz) = k \cdot u_c(Fz) \quad [8]$$

$$v_{ef} = \frac{u_c^4(Fz)}{\sum_{i=1}^N \frac{(u(x_i) \cdot C_i)^4}{v_i}} \quad [9]$$

A contribuição percentual de cada fonte de incerteza x_i foi estimada por meio da Eq. (10), onde o quadrado de sua incerteza padrão $u(x_i)$ é multiplicado pelo quadrado do coeficiente de sensibilidade correspondente $C(x_i)$ é dividido pelo quadrado da incerteza combinada u_c .

$$Cont(x_i) = \frac{u^2(x_i) \cdot C^2(x_i)}{u_c^2(y)} \cdot 100 \% \quad [10]$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta o resultado dos cálculos obtidos a partir dos experimentos. O ensaio E1 representa a primeira condição de usinagem, com profundidade $ap = 0,5$ mm enquanto a E2, $ap = 1,5$ mm. A coluna D.P. representa a distribuição de probabilidade adotada para cada incerteza padrão (t: *t-Student*; R: Retangular e N: Normal) os Graus de Liberdade (G.L.) e o Coeficiente de Sensibilidade (C.S.).

Tabela 2: Resultados do Cálculo de Incerteza para os experimentos

Grandeza	Estimativa (N)		D.P.	G.D.L.	C.S.	Incerteza Padrão (N)	
	E1	E2				E1	E2
$\bar{x}_z$	114,52	315,12	t	5	1	1,88	2,29
ΔR	0,50	0,50	R	∞	1	0,14	0,14
ΔC	0,50	0,50	N	∞	1	0,50	0,50
ΔL	1,80	1,80	R	∞	1	1,04	1,04
ΔEC	-1,78	-4,88	R	∞	1	-1,03	-2,82
Incerteza Padrão Combinada - $u_c Fz$ (N)						2,44	3,82
Graus de Liberdade Efetivo						14	39
Fator de Abrangência - k						2,10	2,02
Incerteza Expandida – U Fz (N)						5,12	7,71

A Figura 3 apresenta o resultado das contribuições percentuais da incerteza. Nota-se que no ensaio E1, a maior parcela provém da dispersão dos valores medidos $\bar{x}_z$ com 59,6 %, seguido das correções associadas ao erro de linearidade e ao efeito cruzado (ΔL e ΔEC). Como apresentado no tópico 2, a linearidade depende da faixa de medição e seu erro é declarado no certificado de calibração, enquanto o efeito cruzado depende da amplitude dos valores de força medidos pelo segundo e terceiro canal, neste caso, de F_x e F_y . Para o ensaio E2, nota-se que este comportamento mudou significativamente, com a predominância da contribuição do efeito cruzado na incerteza de medição ΔEC , seguido da dispersão dos valores medidos $\bar{x}_z$ e do erro de linearidade ΔL .

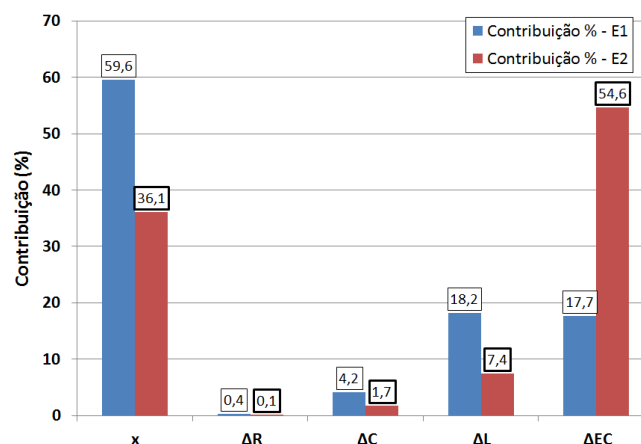


Figura 3: Contribuição das fontes de incerteza para os dois ensaios.

O resultado das medições é expresso por meio da média $\pm$ incerteza expandida, com fator de abrangência k e confiabilidade de 95 %. Os resultados dos experimentos E1 e E2 são respectivamente:

$F_c = 114,5 \pm 5,5$ N com $k = 2,10$ e probabilidade de abrangência de 95 %.

$F_c = 315,0 \pm 8,0$ N com $k = 2,02$ e probabilidade de abrangência de 95 %.

Nota-se que a incerteza expandida o ensaio E2 é maior que no E1 e proporcional à amplitude média da força de corte F_z .

Conclui-se que, o erro relacionado ao Efeito Cruzado (*Cross Talk*) deve ser levado em consideração, tendo em vista sua influência proporcional à amplitude das forças medidas, Eq. (2) e dos resultados da Fig. 3. Além disso, com base nos resultados declarados no certificado de calibração, reitera-se que a escolha da faixa de medição do instrumento contribui para a qualidade dos resultados, sobretudo pelo erro proveniente da linearidade que se apresenta significativamente menor na faixa de 3 kN para o canal F_z , se comparada com a faixa de 30 kN.

Pretende-se ampliar a faixa experimental, diversificar a aquisição de dados e comparar a influência do erro relacionado à linearidade e divulgar a rotina para avaliação dos sinais de força de corte com a aplicação do método de cálculo de incertezas, apresentada neste trabalho, com intuito de contribuir com o critério científico de futuras publicações.

5. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO IEC 17025: Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2017.
- BARATTO, A. C., Damasceno, J. C., Alves Filho, J. A. P., & Oliveira, S. P. (2012). Avaliação de dados de medição: guia para a expressão de incerteza de medição: GUM 2008. Rio de Janeiro: INMETRO.
- de Souza, A. J., Rodrigues, R. I., da Rosa, G. C. 2016. Verificação das forças geradas no torneamento a seco, com fluido em abundância e em quantidade reduzida do aço AISI 420C utilizando ferramenta wiper. In IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Vol. 21). Fortaleza/CE, Brasil.
- Ferraresi, D., 1977. Fundamentos da usinagem dos materiais. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, p.751, 1ª. Ed.
- INMETRO, Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados. Rio de Janeiro, Brasil, 2012, 95p.
- International Organization for Standardization. ISO TAG 4/WG 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, Geneva Switzerland, 2008.
- Machado, Á. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B. D. Teoria da usinagem dos materiais. São Paulo: Blucher, 2009.
- Rodrigues, J. R. P.; SANTOS, J.; SORDI, A. Componentes da Força de Usinagem no Torneamento de Ligas Não Ferrosas e Aços ABNT 1020 e 1045. In Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação–COBEF 2007, Águas de São Pedro/ SP, Brasil, 2007.
- Vuolo, José Henrique. Fundamentos da teoria dos erros. Ed. Blucher, 1996.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

MEASUREMENT UNCERTAINTY ASSOCIATED WITH THE CUTTING FORCE IN TURNING: GUM METHOD

Paulo Vinicius da Silva Resende¹

Ildeu Lúcio Siqueira²

Instituto Federal de Goiás – IFG Campus Goiânia. Rua 75, 46, Setor Central, Goiânia-GO.

paulo.vinicius@ifg.edu.br¹; ildeu.siqueira@ifg.edu.br²

Rosenda Valdés Arencibia³

Marcio Bacci da Silva⁴

Universidade Federal de Uberlândia - FEMEC. Av. João Naves de Ávila, 2121 – Bloco 1M, Uberlândia-MG

rosenda.arencibia@ufu.br³; mbacci@ufu.br⁴

Abstract. *The measurement of machining forces in scientific and technological studies is relevant to the understanding of the physical phenomena involved in the machining of materials. In several published works, it was noticed that the experimental methodology sometimes contemplates multiple replica of the tests and the expression of the results as the average and the dispersion, via sample standard deviation. The present work presents the application of the GUM method in determining the measurement uncertainty associated with the cutting force. The objective is to contribute to the result traceability, especially in the comparative studies of machining conditions, besides showing the contribution of the sources of uncertainty in the final result. The results of cutting force in the external turning of the ABNT 1050 steel are presented. The applied methodology can be used to estimate the uncertainty in the other components of the machining forces (F_y and F_z).*

Keywords: *Machining Force, Dynamometer, Metrological Traceability, NBR ISO IEC 17025*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.