

MEDIÇÃO DAS FORÇAS DE USINAGEM NO PROCESSO DE TORNEAMENTO ATRAVÉS DA MEDIDA DAS TENSÕES CISALHANTES

Measure of Machining Forces in the Turning Process through Measurement of the Shear Stress

*Thomas Gomes dos Santos; Carlos Roberto Cauduro; Alisson da Silva Fernandes; Luis Cielo Ciliato.

Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

*Autor para correspondência: thomasgomesdossantos@gmail.com

Recebido em: 11/03/2018, Aceito em: 11/04/2018, Publicado em: 04/08/2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2018.v10.p.98-109>

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo a implementação de um sistema capaz de medir forças de avanço e forças de corte sem interferir na resposta dinâmica. Isto foi conseguido instrumentando o próprio porta-ferramenta, e as deformações medidas por strain-gages ligados em circuito tipo ponte de Wheatstone para cada uma das forças, sendo a ligação feita de tal maneira que resultou em insensibilidade ao momento fletor, que é variável no porta-ferramentas e sensibilidade ao esforço cortante que é constante e origina deformações de cisalhamento. Assim, eventuais avanços ou recuos no posicionamento do porta-ferramenta, não interferem no valor da respectiva força.

Palavras-chave: strain-gages, transdutor, medida de forças, instrumentação, usinagem.

ABSTRACT

The objective of this work was to implement a system capable of measuring feed forces and cutting forces without interfering with the dynamic response. This was achieved by instrumentation of the tool holder itself, and the deformations measured by strain-gages connected in a Wheatstone bridge circuit for each of the forces, the connection being made in such a way that it resulted in insensitivity to the bending moment, which is variable in Tool holder and cutting efforts sensitivity that is constant and causes shearing deformations. Thus, any advances or retreats in the positioning of the tool holder, do not interfere in the value of the respective force.

Keywords: strain-gages, transducer, measuring forces, instrumentation, machining.

INTRODUÇÃO

O processo de usinagem apresenta diversos parâmetros, como a velocidade de corte, o avanço, os ângulos das ferramentas de corte, a potência e o material utilizado (FERRARESI, 1969), que influem na peça usinada, e cujo resultado de suas combinações pode ser avaliado no produto final, pela rugosidade superficial, pela energia consumida, pelo tempo para executar a operação de usinagem. Este grande conjunto de variáveis torna necessário conhecer as relações entre os parâmetros, para sua otimização. As principais variáveis para este propósito são a medição das forças de usinagem, (DUBOVSKA *et al.*, 2012). Estas forças podem ser estimadas, teoricamente, usando dados do material, como a força específica de corte, e convertida em força de corte, podendo-se avaliar, por exemplo, a potência ou energia consumida no processo de usinagem, (DINIZ *et al.*; 1999). Para a medida da força de usinagem experimentalmente existem diversas técnicas, como a inserção de um transdutor, piezoelétrico ou resistivo, na máquina para monitorar as forças, (GUIMARÃES, 2000). Porém a inserção de um transdutor externo pode influir nas características de medição, podendo alterar, por exemplo, a frequência natural da ferramenta, (BINDU & VINOD, 2015). Neste trabalho foi implementado um transdutor capaz de medir simultaneamente as forças de avanço e de corte, utilizando-se o próprio suporte da ferramenta de corte, que foi instrumentado usando strain-gages tipo espinha-de-peixe. A ideia do princípio de medição pode ser entendida analisando uma viga engastada AB, FIGURA 1-a, onde o esforço cortante Q originado ao longo da viga, quando da aplicação da força “F” na extremidade livre, é constante, FIGURA 1-b. Já o momento fletor, também originado ao longo da viga, é variável, indo de um valor zero até um valor máximo no engaste da viga FIGURA 1-c.

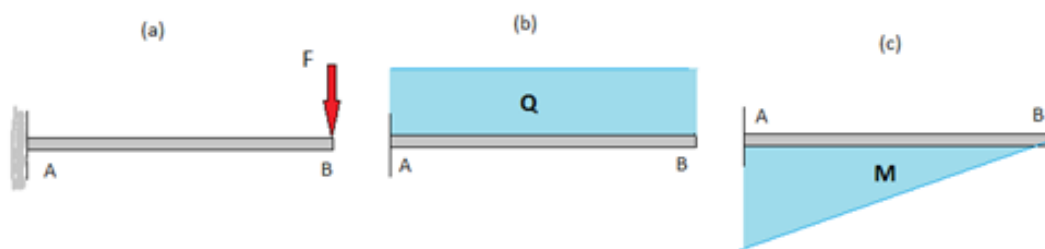


Figura 1. (a) Uma viga engastada AB, que representa o porta-ferramenta, submetida a uma força F na extremidade livre, que representa uma força de usinagem; (b) o esforço cortante Q é constante, e produz deformações de cisalhamento na linha-neutra e ; (c) o momento fletor M é dependente da posição considerada.

Para instrumentar o porta-ferramentas, foram colados strain-gages duplos, com grade orientada a 45º, na configuração espinha-de-peixe, posicionados junto a linha neutra, sendo assim sensíveis as deformações de cisalhamento, provocadas pelo esforço cortante Q , mas insensíveis as deformações provocadas pelo momento fletor M . Assim, o porta-ferramenta é considerado uma viga, e para cada direção de força, corte e avanço, que correspondem as direções vertical e horizontal, respectivamente, foi construída uma ponte de Wheatstone, em configuração inteira, ligadas a um condicionador para

strain-gages, (JAMES *et al*, 1996). Os strain-gages, colados com cola tipo cianocrilato, foram colocados de modo a medir somente a deformação de cisalhamento, não sendo sensíveis à deformação devido ao momento fletor M , obtidos graças a configuração feita na ponte de Wheatstone e ao adequado posicionamento dos strain-gages, (DUNN, 2006). Para cada força medida havia uma ponte de Wheatstone, totalizando assim duas pontes. A interferência mútua que poderia haver entre as duas forças de corte e avanço era também eliminada devido a configuração da ponte, (WILSON, 1976).

Após a calibração foram realizados testes de usinagem em um centro de torneamento. Os ensaios envolveram os parâmetros de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte.

OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo implementar um porta-ferramenta para a medição das forças de usinagem de corte e de avanço, usando, para cada força, uma ponte de Wheatstone, feita com strain-gages, que medem a deformação causada pelo cisalhamento ao longo da respectiva linha neutra. Este porta-ferramenta é colocado na sua posição no centro de torneamento, sendo assim sensíveis as forças de corte e de avanço no processo de usinagem, e praticamente não muda as características de serviço. Com a idealização do princípio de medição apresentado neste trabalho, buscou-se elaborar um equipamento de fácil operação e sensível a medida das forças de usinagem, ficando assim de fácil manuseio e utilização e de baixo custo para uso em indústrias e laboratórios de pesquisas.

MATERIAIS E MÉTODOS

A instrumentação do dispositivo de medição dos esforços de usinagem foi realizada com o uso de strain-gages (extensômetros de resistência elétrica) do tipo espinha-de-peixe, composto por dois extensômetros inclinados a 45° , com resistência de 350Ω . O porta-ferramenta foi limpo de óleos e sujeiras com o uso de álcool isopropílico e gaze, submetido a lixamento até a granulação de 320, na posição onde seriam posicionados os strain-gages. Cada dois lados opostos do porta-ferramenta mediam a força em uma direção, totalizando assim duas direções de forças.

Após o preparo e colagem dos strain-gages estes foram configurados ponte de Wheatstone completa para cada uma das duas forças envolvidas, a força de corte e de avanço. Cada ponte foi formada por quatro strain-gages, arranjados na direção longitudinal do porta-ferramenta, conforme Figura 2, os índices de 1 a 8 referem-se a strain-gages.

A calibração do dispositivo foi realizada com solicitação do porta-ferramentas pela aplicação de pesos padrões possuindo entre 0,25 a 30Kg, os quais foram aplicados na região de contato entre o material usinado e a ferramenta de metal duro. A validação do equipamento foi feita a usinagem de corpos de prova de dimensões 250 x 25,4mm, de aço AISI 1045. Os ensaios envolveram os parâmetros de velocidade de corte, avanço, e profundidade de corte, e os dados de força medidos foram analisados e comparados com resultados analíticos.

A frequência natural do dispositivo pode ser registrada, através de um impacto com uma esfera de material cerâmico em vista a sua baixa deformabilidade, sendo aplicado exatamente no local de solicitação de usinagem do porta-ferramenta.

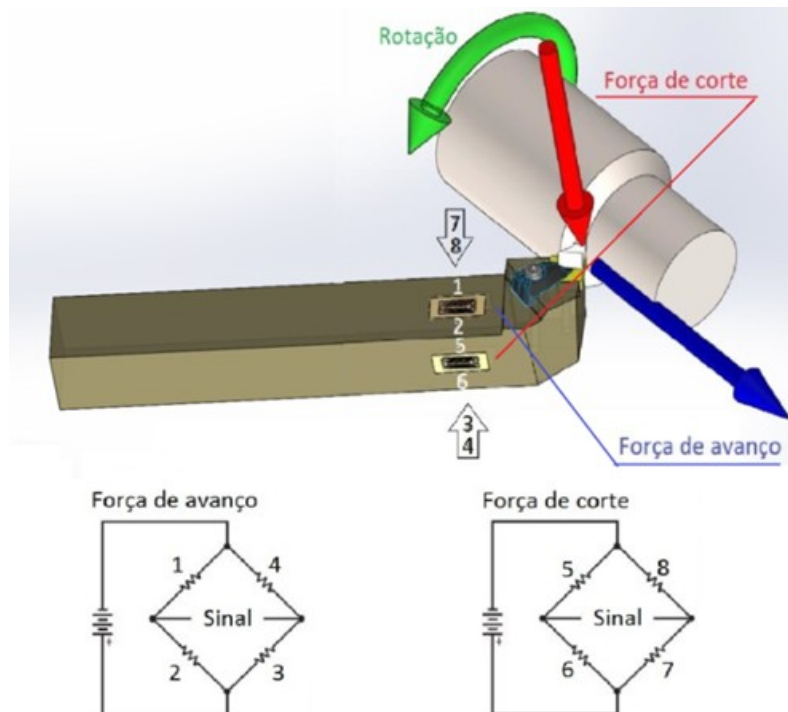


Figura 2. Vista esquemática das pontes de Wheatstone formadas para medir as forças de corte e de avanço.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a validação do equipamento foram realizados diversos testes de modo a quantificar e garantir que o equipamento satisfaça os seguintes requisitos de frequência natural, calibração e verificação da não-sensibilidade ao momento fletor e testes de usinagem, a seguir descritos:

DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA NATURAL DO EQUIPAMENTO

As características do equipamento dependem de vários fatores e um destes é a frequência natural do equipamento. A frequência deve estar acima de 6000Hz (FERRARESI, 1969), salientando que equipamentos com a frequência natural alta possuem alta certeza de medição, pois assim diminuem-se as chances de a frequência gerada no processo de usinagem alcance a frequência natural do equipamento fazendo, com que o equipamento entre em ressonância e com isso prejudique a usinagem. No equipamento produzido neste trabalho foi encontrada uma frequência natural em torno de 15000Hz, possuindo assim uma frequência natural muito elevada, ficando assim incapaz de se igualar a frequência de usinagem evitando problemas de vibrações na usinagem.

A frequência natural do dispositivo pode ser observada na Figura 3.

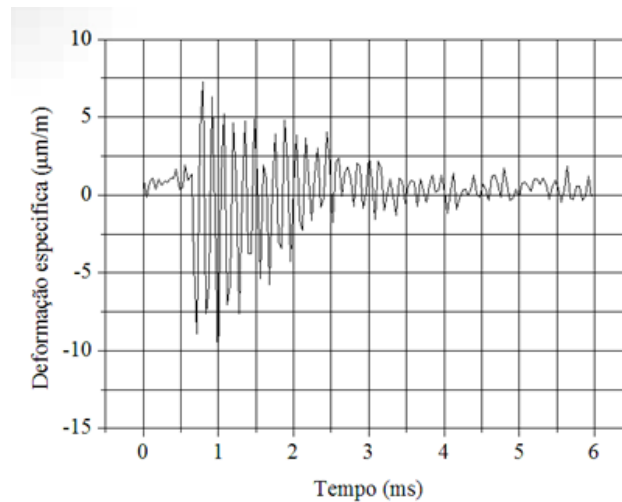


Figura 3. Oscilação amortecida medida com o equipamento.

CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO

Realizando a calibração do equipamento com a placa condicionadora de sinais NI 9237 fabricado pela National InstrumentsTM verificou-se nas Figuras 4 e 5 que a deformação correspondia linearmente com a força aplicada tanto para a força de corte quanto para a força de avanço, e com isso ficou possível a determinação de uma equação da reta para a obtenção das forças correspondente a uma solicitação de usinagem. Para realizar a calibração do dispositivo foram utilizados pesos padrões os quais foram acomodados de modo a desempenhar uma força no local de contato do cavaco com e a ferramenta de corte. As equações 1 e 2, mostram a expressão para determinar, respectivamente, as forças de corte e de avanço.

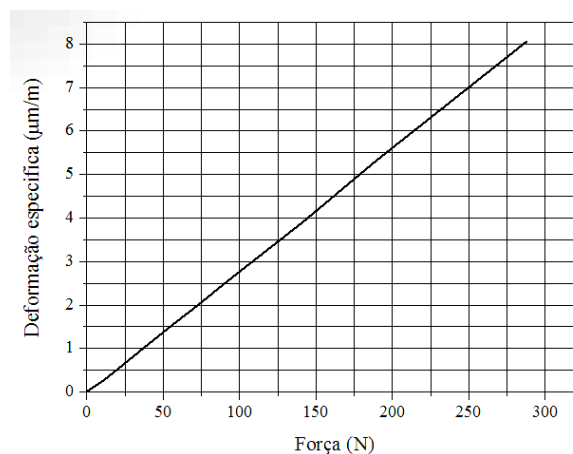


Figura 4. Curva de calibração da força de corte (F_c).

Para a força de corte (F_c):

$$F_c = (d + 0,2665) / 0,02808 \quad (1)$$

Onde: d = deformação específica ($\mu\text{m/m}$).

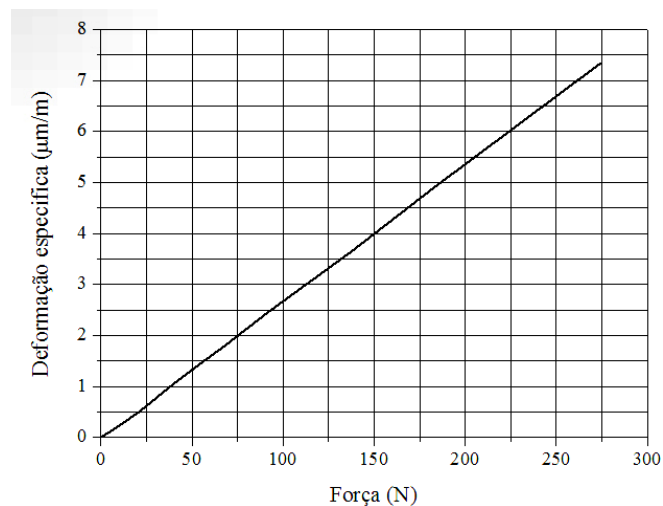


Figura 5. Curva de calibração da força de avanço (F_f).

Para a força de avanço (F_f):

$$F_f = (d + 0,03021) / 0,02685 \quad (2)$$

Onde: d = deformação específica ($\mu\text{m/m}$).

Os valores obtidos na calibração comportaram-se como o esperado, demonstrando que o valor de deformação variou diretamente com o aumento da força.

TESTES DE INSENSIBILIDADE AO MOMENTO FLETOR.

Como o objetivo disposto do trabalho era de desenvolver um equipamento que seja insensível ao braço de alavanca, de modo a poder retirá-lo e recolocá-lo na máquina operatriz sem sofrer uma variação na leitura obtida devido à mudança de posição.

De modo a verificar a sensibilidade obtida pelo equipamento foram realizados testes variando progressivamente o braço de alavanca e realizando duas calibrações distanciadas de 10mm e 20mm do local referência de fixação do porta-ferramenta na máquina (0mm), plotando estas variações no mesmo gráfico, Figura 6.

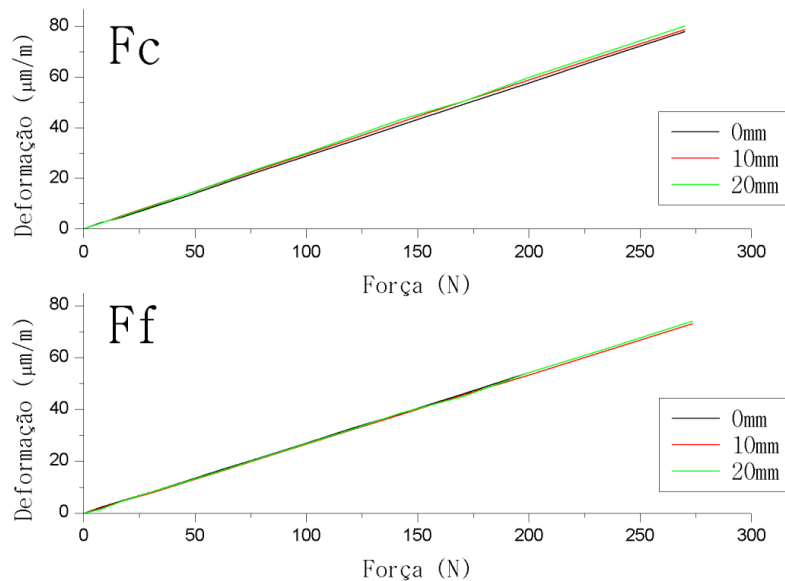


Figura 6. Representação da mínima sensibilidade ao aumento do braço de alavanca encontrado no transdutor construído.

Assim, no teste realizado para verificar como a indicação de leitura do equipamento se comportava com o aumento do braço de alavanca, construiu-se os gráficos FIGURA 6, observando que havia uma variação de 4% do valor na força de corte e 2% na força de avanço, considerando uma variação de 20mm no braço de alavanca de 20mm, caracterizando como mínima influencia com o braço de alavanca, pois as variações de serviço são menores que 20mm.

TESTES DE USINAGEM

De modo a visualizar e verificar a precisão do equipamento desenvolvido foi realizado testes de usinagem com a utilização do equipamento desenvolvido, e comparados os valores das forças de corte obtidos de modo experimental com os valores obtidos de maneira analítica.

Os valores analíticos foram calculados utilizando as EQUAÇÕES 3, 3.1, 4 e 4.1 de KIENZLE conforme Ferraresi (1969) calculados para o aço AISI 1045, utilizando uma ferramenta de metal duro P30 com um raio de ponta de 0,8mm e com a seguinte geometria: χ 95°, γ 5°, α 5° (χ) ângulo de posição/ataque, (γ) ângulo de saída e (α) ângulo de folga.

MÉTODO ANALÍTICO

Para a realização dos cálculos analíticos da força de corte e de avanço, foram utilizadas as Equações 3, 3.1, 4 e 4.1, nas quais foram resolvidas tomando em conta o material a ser usinado e as características usinadas, profundidade de corte, velocidade de avanço e o ângulo de posição da ferramenta. Na Figura 7 têm-se os parâmetros característicos para o cálculo e na Tabela 1 as equações utilizadas para a determinação analítica das tensões de usinagem.

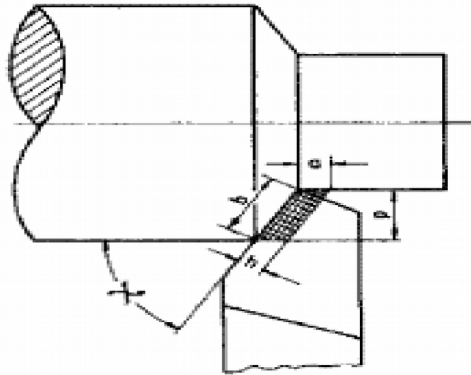


Figura 7. Seções de corte para o processo de torneamento. (FERRARESI, 1969)

Tabela 1. Método analítico utilizado na determinação das forças de corte e avanço (KIENZLE).

Determinação da pressão específica de corte.	$k_s = \frac{k_{s1}}{h^z}$	(3)
--	----------------------------	-----

Determinação da força de corte	$P_c = k_s \cdot h \cdot b = k_{s1} \cdot h^{1-z'} \cdot b$	(3.1)
--------------------------------	---	-------

$$P_a = k'_{s1} \cdot (a \text{ sem } \chi)^{1-z'} \cdot p \cdot \left[1 - \frac{r}{p} (1 - \cos \chi) (1 - \theta^{1-z'}) \right] \quad (4)$$

Determinação da força de avanço	$\theta = x = \frac{1 - \cos \chi}{\text{sen } \chi \cdot \sqrt{2 - 2 \cdot \cos \chi}}$	(4.1)
---------------------------------	--	-------

Onde:= constante específica do metal para uma secção de corte de 1 mm de espessura por 1 mm de largura;

r = raio de ponta da ferramenta;

$1 - z' = 0,86$ para aço AISI 1045;

$k_{s1} = 222$ para o aço AISI 1045;

χ = ângulo de posição da ferramenta;

a = velocidade de avanço (m/min);

p = penetração (mm).

MEDIDA DE FORÇAS DE USINAGEM

Para a realização dos testes experimentais de medida das forças de corte e avanço durante o processo de usinagem, foram usinados 12 corpos de prova de aço AISI 1045 (Tabela 2) de 250mm de largura e com diâmetro de 25,4mm com um furo de centro a fim de ser usinada entre placa e ponta. A largura de usinagem foi de 70mm conforme figura 8, nos testes de usinagem foram utilizados os mesmos valores de profundidade de corte e velocidade de avanço que os considerados nas avaliações teóricas. Posteriormente realizados os testes, buscou se comparar os valores obtidos de modo a analisar dados adquiridos.

Nas Tabelas 3 e 4 estão apresentados os valores encontrados nos testes experimentais e os calculados analíticos, que também podem ser visualizados na Figura 8.

Tabela 2. Composição química do aço AISI 1045 utilizado.

C %	Si %	Mn %	Cr %	Mo %	Ni %	Cu %	Nb %	Ti %	V %	W %
0.452	0.189	0.782	0.048	0.014	0.047	0.097	0.0054	0.0053	0.0020	<0.010

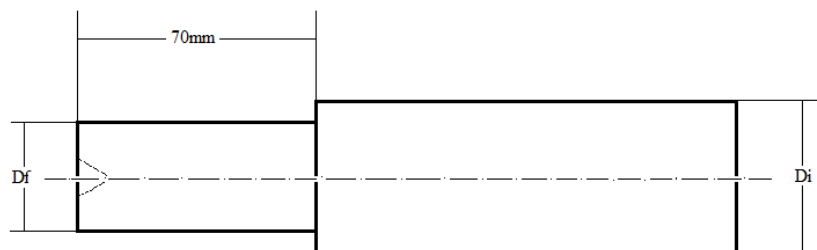


Figura 8. Vista esquemática da região usinada, sendo D_f e D_i os diâmetros final e inicial, respectivamente.

Tabela 3. Valores dos testes de usinagem em função do avanço de corte.

f (mm/rot)	Vc (m/min)	ap (mm)	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico
			Fc (N)	Fc (N)	Ff (N)	Ff (N)
0.2	100	0,465	238	256	70	91
0.4	100	0,485	564	494	119	183
0.6	100	0,465	662	670	141	236
0.8	100	0,470	841	854	174	310

Tabela 4. Valores dos testes de usinagem em função da profundidade de corte.

f (mm/rot)	Vc (m/min)	ap (mm)	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico
			Fc (N)	Fc (N)	Ff (N)	Ff (N)
0.2	100	0,465	238	256	70	91
0,2	100	1,055	642	583	173	369
0.2	100	1,325	896	737	390	396

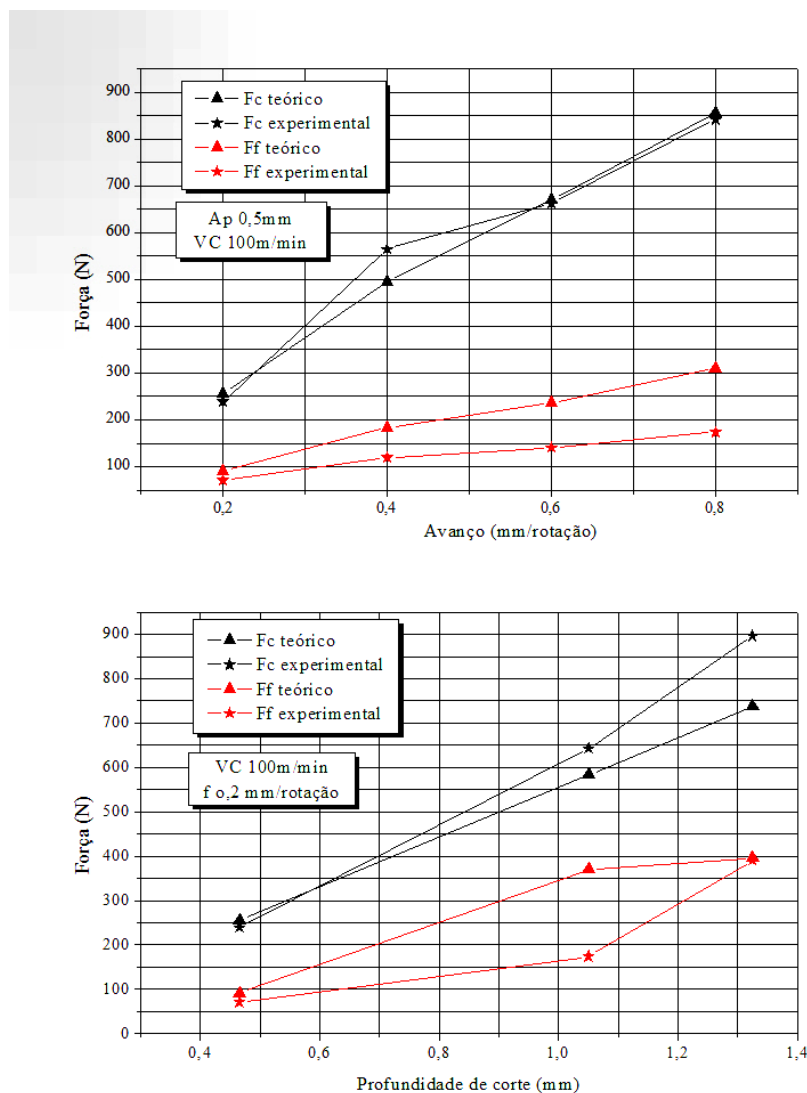


Figura 9. Comparativo entre valores teóricos e experimentais; Material aço AISI 1045 trefilado, usinagem a seco; Ferramenta de metal duro P30 raio de ponta 0,8mm, $\chi 95^\circ$, $\gamma 5^\circ$, $\alpha 5^\circ$.

Na Figura 10 é possível observar a tendência apresentada nos valores obtidos de modo experimental com os valores obtidos de maneira analítica; também é possível verificar que a força de corte manteve uma proximidade dos resultados experimentais com os analíticos, no caso da força de avanço esta possuiu um maior erro com o valor gerado quando comparado com a força de avanço, porém se observa que os valores experimentais apresentaram uma mesma proporção de aumento dos valores analíticos e assim possuíram a mesma tendência de aumento.

Os valores obtidos com equipamento apresentaram uma diferença máxima de 13% na força de corte e de 8% na força de avanço, quando comparado com os resultados analíticos, os cálculos teóricos foram realizados para aço AISI 1045, utilizando para cálculos teóricos a equação de KIENZLE, conforme Ferraresi (1969).

CONCLUSÕES

Nos ensaios experimentais de usinagem o equipamento desenvolvido apresentou um erro máximo na direção da força de corte de 8% e na direção da força de avanço um erro máximo de 13%, quando comparados os valores obtidos de maneira teórica e experimental, porém se verificou visualmente na Figura 9 que os valores experimentais se apresentaram conforme a tendência possuindo um aumento semelhante aos valores teóricos.

Nos resultados de insensibilidade ao braço de alavanca, FIGURA 6 o equipamento apresentou uma diferença máxima de 4% na direção da força de avanço e de 8% na direção da força de corte, possuindo assim uma variação mínima devida a flexão mínima ao local de fixação, podendo ser retirado e recolocado com uma mínima variação. A variação total do braço de alavanca nos ensaios foi de 20mm.

Também foram realizados testes de modo a verificar se havia interferência de um canal sobre o outro. Nestes testes realizou-se uma série de solicitações sobre apenas um canal e verificando uma possível interferência no outro canal, e nestes testes não se verificou uma interferência significativa no valor gerado, com isso o dispositivo desenvolvido apresentou uma captação das forças de corte e de avanço isoladas e independentes.

Assim o porta-ferramenta adaptado apresentou resultados coerentes, podendo ser usado para a avaliação dos parâmetros de corte, a forma e ângulo dos insertos, uso de fluido de corte e o uso de diferentes materiais.

Além de poder ser utilizado como base para a elaboração de futuros trabalhos na área de usinagem como na determinação da usinabilidade de aços inoxidáveis, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BINDU, B. Vinod, B. "Measurement of Cutting Forces in CNC Turning Centers: A Review", *PASJ International Journal of Mechanical Engineering*, 3(5), 2015.
- DINIZ, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., 1999 "Tecnologia da usinagem dos materiais." Ed. MM São Paulo, Brasil, 204 p.
- DUBOVSKA, B. Majerik, J. and Baska, I. "Experimental Measurement Of Cutting Forces In The turning technology", *DAAAM International Scientific Book*, 2012, pp. 255-266, Chapter 22.
- DUNN, W. C. 2006. "Introduction to instrumentation, sensors, and process control." Artech House, Inc. Norwood, MA.
- FERRARESI, D., 1969, "Fundamentos da usinagem dos metais.", Ed. Edgard Blücher, São Carlos, Brazil, 747 p.

- JAMES, W.D. William, F. R. and Kenneth, G.M. “Instrumentation For Engineering Measurements”, Ed. MA, 1996, Second Ed.
- METALS HANDBOOK, - **Machining**. USA: ASM.1989v.16.
- ROCHA, A. M. Teixeira, R. C. Mendes, A. A. and Bacci M. S. “**Metal Machining Theory**”, Ed. Edgard Blucher, São Carlos, Brazil, 2014,750 p.
- GUIMARÃES, A.R., “**Sistema de medição das componentes das forças de usinagem em operações de torneamento.**”, Trabalho de graduação, Departamento de engenharia mecânica, Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 2000, São Paulo, Brasil. 96 p.
- WILSON, E. J., 1976 “**Strain-gage Instrumentation.**” Harris’ Shock and Vibration Handbook, S, pp 17.1-17.15.