



HAL
open science

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO PARAMETRIZADO POR OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL

Washington Souza, José Eduardo Ferreira De Oliveira, Anna Carla Araujo

► **To cite this version:**

Washington Souza, José Eduardo Ferreira De Oliveira, Anna Carla Araujo. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO PARAMETRIZADO POR OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012, São Luis, Brazil. hal-03212877

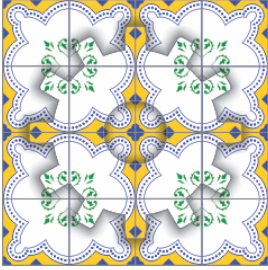
HAL Id: hal-03212877

<https://hal.science/hal-03212877>

Submitted on 30 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO PARAMETRIZADO POR OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL

Washington Souza Nery, washingtonnery@ig.com.br¹
José Eduardo Ferreira de Oliveira, jefocetpe@yahoo.com.br^{1,2}
Anna Carla Araujo, anna@ufrj.br^{1,3}

¹ CEFET/RJ - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais - PPEMM, Av. Maracanã, 229 - Maracanã - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - CEP 20271-110

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE, Av. Prof. Luiz Freire, 500 - Cidade Universitária - Recife - PE - Brasil - CEP: 50740-540

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Engenharia Mecânica - Poli/COPPE/UFRJ, Centro de Tecnologia, Bloco G - Sala G-201 - Gab.14 - Cidade Universitária - Rio de Janeiro - Brasil - CEP 21945-970

Resumo: O programa computacional “Sistema de Gerenciamento de Fabricação” (SGF) foi desenvolvido em 2009 com o propósito de integrar as etapas de projeto de sistemas mecânicos, fabricação por usinagem e medição dimensional. Este tema de pesquisa tem como objetivo acrescentar elementos ao programa na forma de variáveis adicionais, especificamente para evitar a ocorrência de vibrações e chatter na operação de torneamento cilíndrico externo. O presente trabalho é o primeiro esforço nesta direção e apresenta um estudo experimental que realiza o monitoramento das forças de usinagem, da deflexão da peça e da rugosidade média da superfície de um tarugo de aço ABNT 1020. Os parâmetros de corte são indicados pelo programa SGF e são utilizadas diferentes profundidades de corte. A diferença entre a rugosidade média da superfície prescrita e o valor alcançado experimentalmente é então verificada. Avaliou-se se o programa indicou valores coerentes ou se há a necessidade de adicionar a flexibilidade da ferramenta ao programa computacional, aumentando assim a sua eficácia na otimização dos parâmetros de usinagem. Verificou-se que o aumento das forças na usinagem geram uma piora na rugosidade média da superfície, porém, não foi detectada uma associação entre a variação da profundidade de corte e o acabamento superficial.

Palavras-chave: torneamento, otimização, forças de usinagem, deflexão, rugosidade superficial

1. INTRODUÇÃO

O mundo contemporâneo exige cada vez mais da ciência e da tecnologia, gerando a necessidade constante de aperfeiçoamento nos processos fabris. Nessa dinâmica, onde o tempo torna-se um bem precioso, buscam-se soluções para otimização de processos de usinagem dos materiais, sem perder o foco na qualidade do produto fabricado. A motivação para esta linha de pesquisa está na necessidade de utilizar os resultados práticos de uma usinagem, otimizada computacionalmente, para o aprimoramento desta otimização, tornando possível determinar a posição limite entre o menor custo possível e o aproveitamento máximo dos recursos da máquina e da ferramenta de corte. Tais dados possibilitam a união de estudos sobre otimização de usinagem e o seu monitoramento. Coppini *et al.* (1997) realizou um estudo sobre a otimização das condições de usinagem voltado diretamente para o ambiente de chão de fábrica, mostrando que a metodologia de otimização traz uma significativa racionalização no processo no âmbito fabril com aumento de produtividade e redução de custos.

Diversos estudos foram feitos visando a otimização do torneamento em vários materiais e a sua influência sobre o acabamento superficial. Um estudo da minimização do custo de usinagem por torneamento de aço ABNT 52100, utilizando-se a metodologia de superfície de resposta foi realizado por Mendes *et al.* (2007), considerando a vida da ferramenta e o acabamento superficial da peça. Seus resultados indicam que a minimização do custo é obtida com as maiores velocidades de corte utilizadas no seu experimento, com maiores taxas de remoção de material, na faixa de variação da rugosidade média da superfície entre 0,3 e 0,65 μm . Oliveira (2003) estudou a otimização das condições de usinagem no torneamento a seco do aço ABNT 1045 em operação de desbaste e concluiu que o uso de fluido de corte em abundância é benéfico para a vida útil da ferramenta, porém, pode-se obter resultados similares na usinagem a seco, utilizando-se pastilha de corte de maior resistência ao desgaste. Davim (2001) fez um estudo que verifica a influência das condições ótimas de usinagem no acabamento superficial de peças torneadas que indica a velocidade de corte exercendo grande influência na rugosidade média da superfície e a profundidade de corte não exercendo influência

significativa. Diversos outros estudos foram realizados visando a melhoria da usinagem através do seu monitoramento. Pode-se citar como exemplo: Shinno *et al.* (2003) no monitoramento de forças em usinagem de alta precisão; Jun *et al.* (2002) na avaliação de um sensor de força para o monitoramento e diagnóstico de falhas de usinagem; Kang *et al.* (2001) no desenvolvimento de uma técnica de monitoramento usando um sensor múltiplo em usinagem de alta velocidade; e a hierarquia ideal de controle de força-posição-contorno de processos de usinagem estudada por Tang *et al.* (2006).

Neste artigo, o objetivo é analisar as forças de corte e a rugosidade média da superfície R_a em uma operação de torneamento cilíndrico externo, com parâmetros de corte otimizados com o auxílio de um programa de computador. Além do monitoramento de forças, o deslocamento da peça durante a usinagem é medido, acrescentando informações para a comparação entre o valor teórico da rugosidade média da superfície responsável pela determinação do avanço máximo permitido no SGF e a rugosidade média da superfície alcançada na usinagem.

2. O PROGRAMA COMPUTACIONAL (SGF)

No primeiro estágio de projeto de um componente, o projetista imagina o produto como sendo “ideal”, ou seja, um objeto fabricado na forma e dimensões que ele definiu. Os processos de fabricação produzem elementos mecânicos com variações ao longo da superfície, alterando tanto a forma quanto a medida daquela definida no projeto. Estas variações são acrescentadas ao desenho de projeto através das tolerâncias dimensionais, geométricas e rugosidade superficial, definindo aquelas que não comprometem o funcionamento do elemento com as demais peças. Para minimizar problemas decorrentes do processo dentro do contexto de alta produtividade e mínimo custo de fabricação, estabeleceu-se um elo entre as fases de projeto, fabricação e medição. Essa integração é apresentada por Wang *et al.* (2005), através de um Sistema de Especificação Geométrica do Produto (GPS - *Geometrical Product Specification*).

Dentro desta conjuntura, Oliveira (2009) desenvolveu um programa computacional chamado de *Sistema de Gerenciamento da Fabricação – SGF*, desenvolvido em VBA (*Visual Basic for Application*) capaz de integrar as três etapas de obtenção de um produto: o projeto, a fabricação (por usinagem) e a medição, em três módulos com essas respectivas etapas. Com relação ao módulo de fabricação, deseja-se determinar os parâmetros ótimos de fabricação (avanço, velocidade de corte e profundidade de corte), além do estabelecimento da ferramenta e do porta-ferramentas, considerando-se a condição de mínimo custo ou a de máxima produção. Inicialmente, deve-se inserir alguns dados, tais como: as dimensões iniciais e finais da peça a ser fabricada, a rugosidade superficial, a potência e o rendimento da máquina-ferramenta, os parâmetros de Kienzle, os dados de custo e a geometria da ferramenta de corte, etc. Em seguida, são obtidos os parâmetros da fórmula expandida de Taylor, através de um banco de dados anexado ao SGF, informando o tipo de ferramenta e o material do corpo de prova a ser utilizado. O banco de dados fornece os fatores empíricos C , E , F e G da fórmula expandida de Taylor que são inseridos neste módulo, de acordo com a Fig. (1).

| DADOS REFERENTES À FÓRMULA EXPANDIDA DE TAYLOR | |
|--|-------|
| ENTRE COM O VALOR DO PARÂMETRO G | -0,35 |
| ENTRE COM O VALOR DO PARÂMETRO C | 660 |
| ENTRE COM O VALOR DO PARÂMETRO E | -0,15 |
| ENTRE COM O VALOR DO PARÂMETRO F | -0,1 |
| ENTRE COM O VALOR DO PARÂMETRO H | 0 |

$$V = C \times f^E \times a_p^F \times T^G \times VK^H$$

Valores da Taylor Expandida

Figura 1. Interface do módulo de manufatura SGF com a fórmula expandida de Taylor (OLIVEIRA, 2009)

O desgaste de flanco da ferramenta de corte é definido a partir da tolerância dimensional, do tipo de usinagem (desbaste ou acabamento) e do material da pastilha de corte. O programa determina o avanço máximo permitido com base no parâmetro de rugosidade média da superfície R_a , de acordo com a Eq. (1) (Cassier, 1986) e do fator limitante da espessura do cavaco.

$$f_{\max} = \sqrt{31 \times (R_a / 1000) \times r_\epsilon} \quad (1)$$

onde f_{\max} é o avanço máximo permitido e r_ϵ = raio de arredondamento da ponta da ferramenta.

É possível perceber que não são utilizadas as influências das forças estáticas e seus efeitos na rugosidade superficial. As forças aplicadas ao elemento usinado provocam deformação e deflexão na peça, o que pode comprometer o resultado final da operação.

3. FORÇAS DE CORTE E DEFLEXÃO NO TORNEAMENTO

O estudo das forças atuantes na cunha de corte da ferramenta no torneamento possibilita estimar a potência necessária para o corte, além de se saber quais forças atuam sobre o torno e as suas influências no desgaste da ferramenta de corte (Machado *et al.*, 2009). A Força de usinagem F , representada na Fig. (2a) por um vetor, pode ser decomposta em três componentes, em uma base orientada seguindo as direções de corte e de avanço. São elas: Força

principal de corte F_c , Força de avanço F_f e Força passiva ou de profundidade F_p . Alguns modelos consideram que o módulo destas componentes varia de acordo com a área da seção do cavaco A_D em uma relação quase linear, principalmente quando se analisa a força de corte (Machado *et al.*, 2009). A força de corte segundo este modelo pode ser escrita em função da pressão específica de corte k_c , da profundidade de corte a_p e do avanço por rotação f , como mostra a Eq. (2).

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot a_p \cdot f \quad (2)$$

Considerando os diâmetros inicial e final, respectivamente d_1 e d_2 (Fig. 2b) e a posição da ferramenta em relação à castanha l (varia de zero, quando a ferramenta toca a castanha, a L), é possível calcular o deslocamento δ através da teoria da flexão simétrica, como apresentado na Eq. (3).

$$\delta = \frac{F_p \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I_y}, \quad (3)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material da peça e I_y o momento de inércia da seção da peça na direção y .

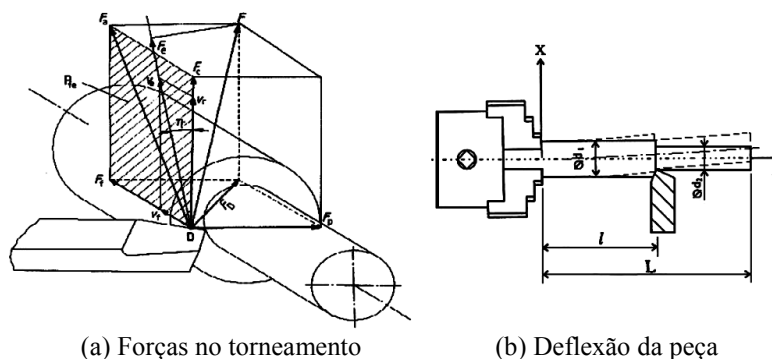


Figura 2. Torneamento cilíndrico externo (ISO 3002/4)

O deslocamento δ proveniente de uma força estática causa uma variação na área da seção do cavaco e uma consequente variação na força de corte, o que pode provocar um acoplamento dinâmico e a ocorrência do fenômeno do *chatter*. Neste estudo, espera-se que a diferença entre a força de corte sem deflexão e com deflexão esteja estabilizada após o momento do início do corte. Com isso é avaliada a influencia da deflexão no acabamento superficial para acrescer esta informação ao programa SGF.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo experimental de avaliar o impacto do aumento da profundidade de corte e, conseqüentemente, o aumento da área de corte e da força de corte na rugosidade superficial, foram feitos testes com monitoramento do deslocamento do corpo de prova e das forças exercidas pela ferramenta à peça nos eixos x , na direção da força passiva, e y na direção da força de corte. Foram feitos cinco experimentos, com os corpos de prova escolhidos aleatoriamente entre os disponíveis.

4.1. Dimensões do corpo de prova, máquina-ferramenta e ferramenta

O material utilizado para a usinagem neste trabalho é o aço ABNT 1020 que contém baixo teor de carbono e é amplamente conhecido na indústria metal-mecânica. A matéria-prima para confecção dos corpos de prova tem seção redonda com diâmetro de 2" (50,8 mm), produzida por laminação. A barra foi cortada em tarugos, que foram pré-usinados, totalizando 8 corpos de prova com dimensões apresentadas na Fig. (3).

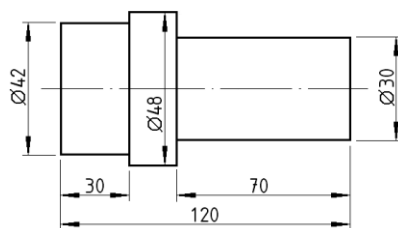


Figura 3. Vista do corpo de prova pré-usinado (cotas em mm)

O torno convencional Nardini, modelo Mascote MS 205 x 1000 foi utilizado para a execução dos experimentos em função da agilidade para composição dos parâmetros de corte na mesma, da flexibilidade para montagem dos sensores e da disponibilidade na instituição de pesquisa. O torno possui uma gama de 18 rotações disponíveis com 48 avanços longitudinais e 48 avanços transversais.

A ferramenta de corte selecionada foi a pastilha de metal duro DCMT 11 T3 04-UR, fabricada pela Sandvik, selecionada de acordo com o material usinado, forma e dimensões da peça. O porta-ferramenta selecionado segue a especificação padrão compatível com a pastilha de corte selecionada (SDJC 2525M11). A Figura (4) mostra um esquema da montagem da ferramenta e porta-ferramenta na operação com a profundidade de corte utilizada, que será diferente em cada experimento.

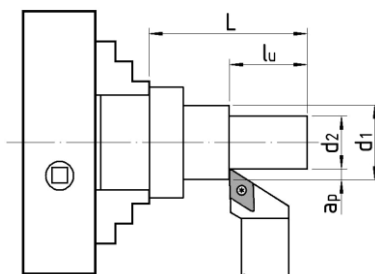


Figura 4. Esquema da montagem do corpo de prova no torno

4.2. Seleção dos parâmetros de usinagem

Os parâmetros para usinagem dos corpos de prova foram definidos utilizando o módulo de fabricação do SGF. Para que fosse possível avaliar o comportamento do conjunto máquina-ferramenta-peça, foi tomada como variável nesta etapa de otimização, o diâmetro final d_2 , que conseqüentemente tornou variável o valor da profundidade de corte a_p , em função de d_2 . Os valores de d_2 utilizados foram 26 mm, 24 mm, 23 mm, 22 mm e 20 mm, gerando profundidades de corte a_p de, respectivamente, 2 mm, 3 mm, 3,5 mm, 4 mm e 5 mm, com uso totalizado de 5 corpos de prova, como mostra a Tab. (1). A rugosidade média da superfície R_a esperada para a operação foi de 2 μm .

Os experimentos foram projetados para usinagem a seco, pois se tem observado um esforço no sentido de reduzir o consumo de fluidos de corte nocivos ao homem e que agridem o meio ambiente (Machado *et al.*, 2009; König e Klocke, 1997) e adotar ferramentas desenvolvidas para resistir a altas temperaturas na região de corte, sem perder a dureza e a resistência ao desgaste (Souza e Schroeter, 2007).

Tabela 1. Parâmetros de Corte para simulação no SGF

| | |
|---|------------------------|
| Diâmetro inicial (d_1) | 30 mm |
| Diâmetro final (d_2) | 20, 22, 23, 24 e 26 mm |
| Comprimento usinado do corpo de prova (l_u) | 40 mm |
| Comprimento livre do corpo de prova (L) | 80 mm |
| Acabamento Superficial (R_a) | 2 μm |

De posse desses dados, é utilizado o módulo de fabricação do SGF para fazer a otimização dos parâmetros de usinagem e o avanço máximo permitido é calculado. A gama de avanços disponíveis na máquina e abaixo do avanço máximo permitido foi de 0,042 a 0,151 mm/rot, totalizando 16 avanços dos 48 disponíveis no torno.

A otimização foi realizada optando-se pela condição de mínimo custo, considerando-se cada uma das 18 rotações disponíveis no torno, com o objetivo de saber qual delas contribuirá para a obtenção do menor custo de fabricação por peça, utilizando os dados de projeto d_1 , d_2 e l_u (Tab. 1). A Tabela (2) mostra os valores de a_p , N , f e V_c calculados pelo SGF em função dos dados da Tab. (1).

Tabela 2. Parâmetros calculados pelo SGF

| EXPERIM. Nº | DIÂMETRO INICIAL d_1 (mm) | DIÂMETRO FINAL d_2 (mm) | PROFUND. DE CORTE a_p (mm) | VELOC. DE ROTAÇÃO N (rpm) | VELOC. DE AVANÇO f (mm/rot) | VELOC. DE CORTE V_c (m/min) |
|----------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 30 | 26 | 2 | 1600 | 0,151 | 150,79 |
| 2 | 30 | 24 | 3 | 1600 | 0,151 | 150,79 |
| 3 | 30 | 23 | 3,5 | 1600 | 0,151 | 150,79 |
| 4 | 30 | 22 | 4 | 1600 | 0,151 | 150,79 |
| 5 | 30 | 20 | 5 | 1250 | 0,151 | 117,81 |

Aplicando-se o valor do avanço de 0,151 mm/volta na Eq. (1), obtém-se um R_a teórico de 1,83 μm .

4.3. Montagem do experimento

O esquema de montagem dos experimentos é mostrado na Fig. (5). A ferramenta de corte foi montada sobre um dinamômetro com cristais piezelétricos montados no torno no lugar do cabeçote de espera. Com este dispositivo foi possível fazer a medição experimental da força de corte e da força passiva. A força de avanço foi medida experimentalmente, mas não foi considerada neste estudo pois este componente não está diretamente relacionado à flexão da peça e sua interação com a rugosidade da superfície causada pela deflexão da peça. O suporte do porta-ferramentas foi alinhado com a direção transversal do torno com o auxílio de um relógio apalpador, para que o ângulo de posição da ferramenta χ fosse mantido de acordo com a especificação do porta-ferramenta, com 93° .

Durante os procedimentos experimentais, além das aquisições dos dados de força de corte e da força passiva, o deslocamento do corpo de prova foi monitorado com um sensor capacitivo, localizado a 48 mm da castanha (LS). A aquisição de dados durante a usinagem foi feita através de uma placa analógica-digital e armazenada em dados através do programa Catman®. Após cada experimento, a rugosidade média da superfície foi medida.

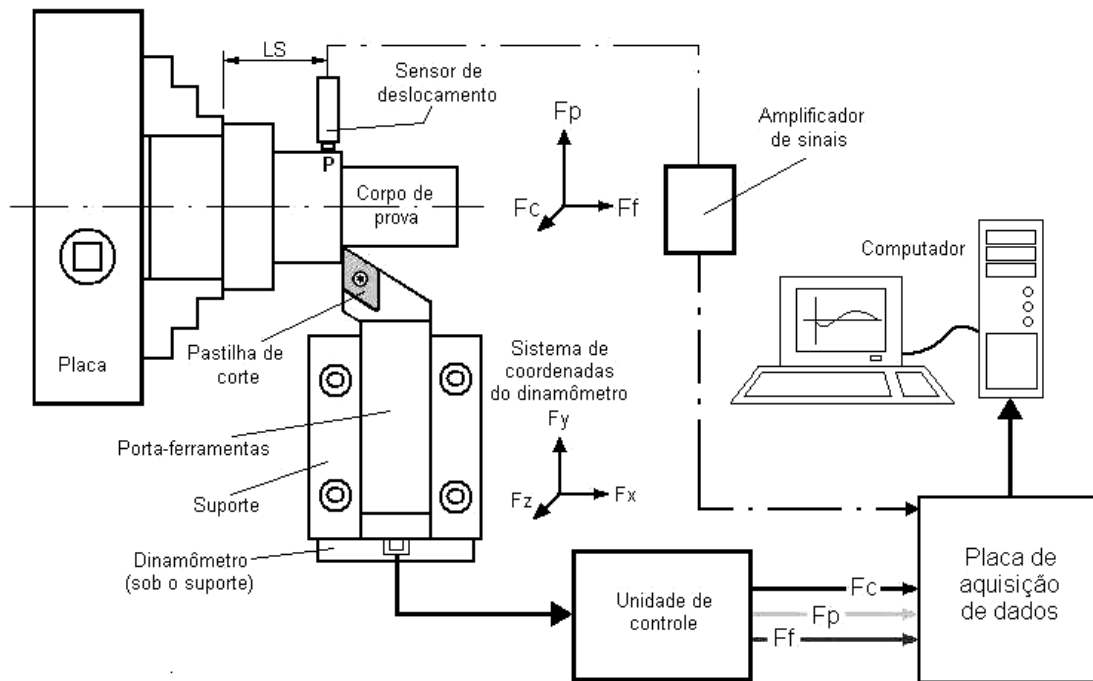


Figura 5. Esquema de montagem dos experimentos

4.4. Medição da Rugosidade

O rugosímetro utilizado para medição do parâmetro de rugosidade média da superfície R_a foi do tipo portátil, marca Tesa, modelo Rugosurf 10. Após a fixação do corpo de prova foram feitas medições de rugosidade média da superfície em 10 posições diferentes da superfície com o diâmetro final do experimento, fazendo a rotação do corpo de prova a cada medição, utilizando alternadamente o *cutoff* de 0,25 mm e de 0,8 mm para cada posição.

Os valores de rugosidade R_a medidos foram inseridos no módulo de medição do programa SGF, com o objetivo de obter o valor médio de rugosidade e sua incerteza expandida de medição. A incerteza expandida relatada U foi obtida no módulo de medição do SGF, através de uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência k , fornecendo, assim, um nível de confiança de aproximadamente 95%.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As forças e deslocamento do corpo de prova no tempo foram adquiridos simultaneamente, o que possibilitou analisar simultaneamente o comportamento dinâmico do conjunto peça-ferramenta.

A Figura (6) mostra os resultados do monitoramento dos experimentos de 1 a 4, excluindo-se o experimento 5 devido a ocorrência de quebra da pastilha de corte. No experimento 1 onde usinou-se com 2 mm de profundidade de corte (Fig. 6a), observou-se que houve uma variação sensível do deslocamento, na ordem de 500 μm , devido ao impacto da pastilha de corte com o corpo de prova, que durou 1,5 s para se estabilizar. Este fenômeno também foi percebido nos experimentos 2 e 4, apresentados nas Figs. (6b) e (6d) com profundidade de corte de 3 e 4 mm, respectivamente. No experimento 3, com profundidade de 3,5 mm (Fig. 6c), não houve perturbação aparente no deslocamento, mas houve um aumento gradativo da força de corte e da força passiva no início da usinagem, porém, não foi identificada a causa

deste fenômeno. No experimento 4 a ferramenta de corte avançou transversalmente contra o corpo de prova até a quebra da pastilha, porém houve uma estabilidade do conjunto por 2 s antes da quebra da pastilha, possibilitando assim considerar a análise desse experimento.

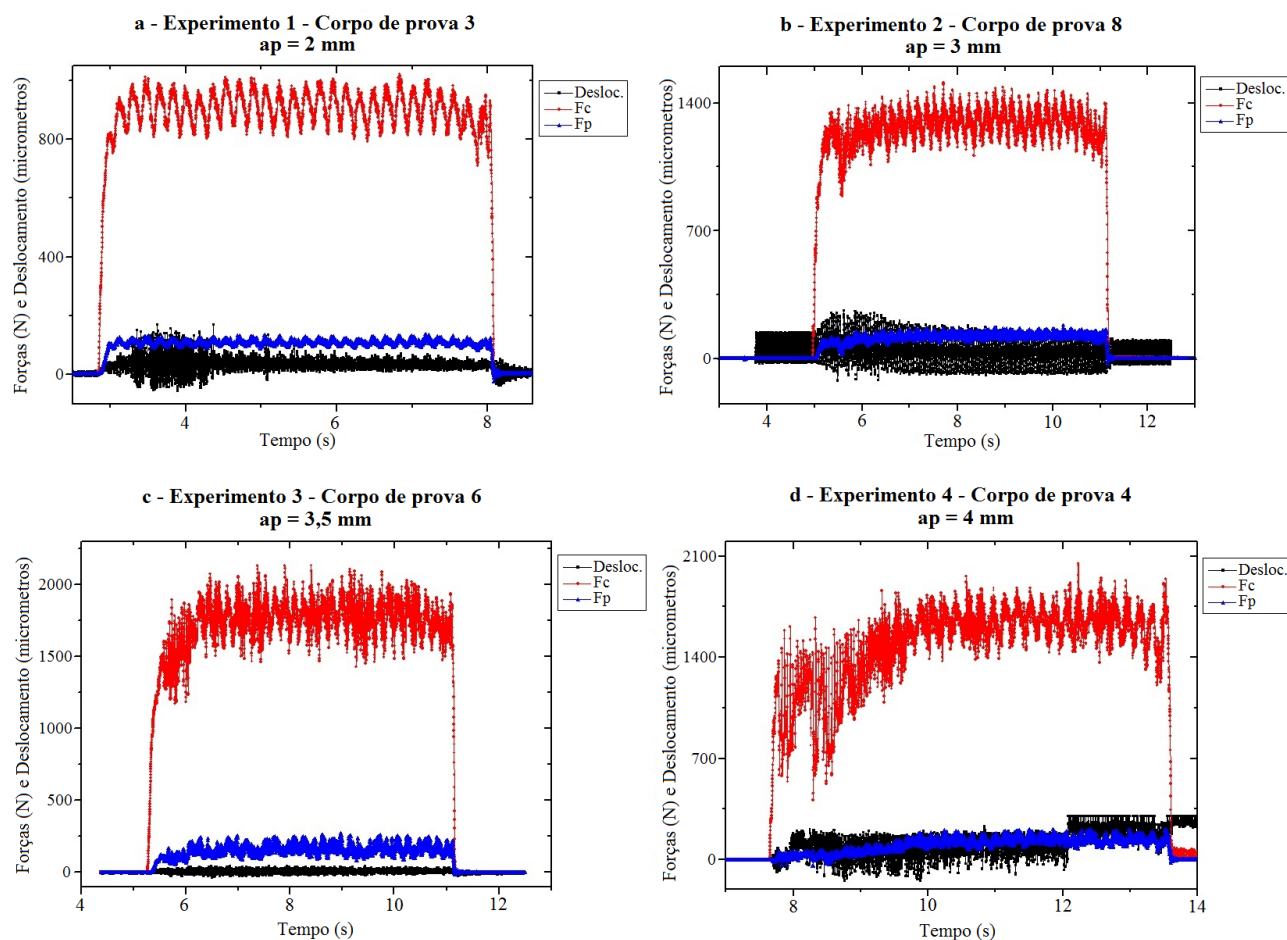


Figura 6. Resultados de Forças e Deslocamentos

A partir dos resultados obtidos nos experimentos pode-se calcular os valores médios das amplitudes dos sinais pico a pico (a diferença entre o valor máximo e o mínimo) de cada sinal. Um resumo destes valores pode ser observado na Tab. (3), considerando a força de corte, a força passiva e a amplitude da distância entre o corpo de prova e o sensor em dois momentos: quando a peça está girando sem usinar e durante a usinagem.

Tabela 3. Valores médios de F_c , F_p , deslocamento δ dos corpos de prova e amplitudes

| Experimento | Força de Corte | | Força Passiva | | Deslocamento do corpo de prova | |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|---|
| | F_c médio (N) | Pico a Pico (N) | F_p médio (N) | Pico a Pico (N) | δ antes da usinagem (μm) | δ durante a usinagem (μm) |
| 1 | 953,6 | 230,2 | 101,6 | 22,2 | 50,3 | 34,6 |
| 2 | 1324,9 | 427,2 | 138,9 | 53,4 | 169,1 | 253,9 |
| 3 | 1740,4 | 960,3 | 148,6 | 91,8 | 20,6 | 49,8 |
| 4 | 1705,9 | 585,8 | 131,2 | 76,2 | 28,6 | 201,3 |

A rugosidade média da superfície medida após cada um dos experimentos pode ser observada na Tab. (4). Nela são apresentados resultados com *cutoff* de 0,25 mm e 0,8 mm e os respectivos valores de incerteza de medição e fator de abrangência k .

Tabela 4. Medição das rugosidades médias das superfícies

| Rugos. Exper. | Cutoff 0,8 mm | | | Cutoff 0,25 mm | | |
|------------------|-------------------------|-----------------------|------|-------------------------|-----------------------|------|
| | R_a (μm) | U (μm) | k | R_a (μm) | U (μm) | k |
| 1 | 3,75 | 0,11 | 2,28 | 2,34 | 0,06 | 2,18 |
| 2 | 4,97 | 0,20 | 2,32 | 3,17 | 0,22 | 2,32 |
| 3 | 4,77 | 0,14 | 2,32 | 2,86 | 0,16 | 2,32 |
| 4 | 4,72 | 0,15 | 2,32 | 2,71 | 0,11 | 2,28 |

Os resultados de rugosidade média da superfície obtidos com *cutoff* de 0,8 mm apresentaram valores 64% superiores, em média, aos valores obtidos nas medições com *cutoff* de 0,25 mm. Isso se explica pois, ao se utilizar o *cutoff* com o comprimento total de medição de 4 mm, este sofre influência dos desvios geométricos de 1ª e 2ª ordens, o que não ocorre quando aplicado *cutoff* de 0,25 mm. Portanto, como apenas a rugosidade é foco deste estudo, foram consideradas apenas as medições feitas com *cutoff* de 0,25mm.

6. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Ao analisar os resultados obtidos nos experimentos, não foi verificada associação entre a rugosidade média da superfície e a profundidade de corte para a mesma velocidade de corte aplicada, conforme havia sido constatado anteriormente por Souza e Schroeter (2007).

O experimento 2, feito com $a_p = 3$ mm, gerou forças pelo menos 63,9% superiores aos outros na verificação da amplitude e uma rugosidade média da superfície no mínimo 73,2% superior à rugosidade média da superfície teórica esperada, de 1,83 μm , o que indicou a exclusão deste resultado na regressão polinomial. Os dados apresentados na Tab. (5) correspondem aos valores encontrados a partir dos experimentos 1, 2 e 4 e seus respectivos valores de rugosidade média da superfície, obtidos em ordem crescente.

Tabela 5. Medição das rugosidades médias das superfícies, valores médios de F_c , F_p e F_u

| Rugosidade média da sup. Cutoff 0,25 mm | Força de Corte | Força Passiva | Amplitude da Força (F _{máx} - F _{mín}) | | Força de Usinagem |
|--|-----------------|-----------------|---|------------------|-------------------|
| R_a (μm) | F_c Médio (N) | F_p Médio (N) | ΔF_c (N) | ΔF_p (N) | F_u (N) |
| 2,34 | 953,6 | 101,6 | 230,2 | 22,2 | 959,0 |
| 2,71 | 1705,9 | 131,2 | 585,8 | 76,2 | 1710,9 |
| 2,86 | 1740,4 | 148,6 | 960,3 | 91,8 | 1746,7 |

Os gráficos mostrados na Fig. (6) mostram uma relação direta entre o deslocamento do corpo de prova e as forças de corte e passiva, o que é esperado. O aumento do deslocamento significa um aumento da área de corte e, conseqüentemente, o aumento das forças de corte e passiva, influenciando a rugosidade média da superfície. O aumento do acabamento superficial, de acordo com a Tab. (5), mostra uma relação direta com as forças na usinagem. Ou seja, o aumento das forças durante a usinagem representam piora da rugosidade média da superfície da peça.

6.1. Relação entre a Rugosidade Média da Superfície e Forças de Corte

Com o objetivo de quantificar a relação entre a rugosidade média da superfície e as forças, foram calculadas, a partir de regressões polinomiais de 2º grau com o auxílio do programa Origin®, as funções apresentadas nas Eqs. (4), (5) e (6). Com estas funções é possível calcular quais os valores das forças de corte, passiva e, conseqüentemente, de usinagem que proporcionam uma rugosidade média da superfície com valor teórico de $R_a = 1,83$ μm .

A função que relaciona a força passiva em função da rugosidade média da superfície, de acordo com os experimentos apresentados, é:

$$F_p(R_a) = 69,23077 R_a^2 - 269,61538 R_a + 353,42 \quad (4)$$

A diferença de 22,2% na rugosidade média da superfície corresponde a uma diferença de aproximadamente 46,2% na força passiva como pode ser visto na função da Eq. (4) e apresentada na Fig. (7). Por extrapolação, um valor de rugosidade $R_a = 1,83$ μm corresponderia a uma força passiva de 91,87 N.

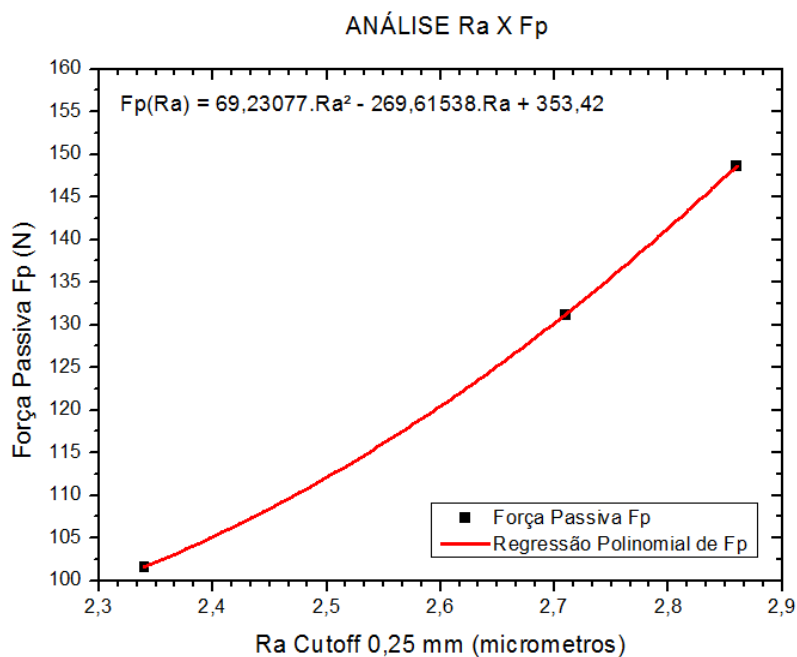


Figura 7. Gráfico de análise entre a Rugosidade Média da Superfície e a Força Passiva

A função da relação da força de corte e o R_a , para estes resultados é:

$$F_c(R_a) = -3467,77547 R_a^2 + 19545,50936 R_a - 25794,74054 \quad (5)$$

Observa-se na Fig. (8) um progressivo aumento da força de corte correspondente a um aumento progressivo de R_a . O aumento de 22,2% de R_a corresponde nesta função a um aumento aproximado de 82,5% da força de corte. Não foi possível extrapolar valor de F_c para $R_a = 1,83 \mu\text{m}$ o que resultaria força negativa.

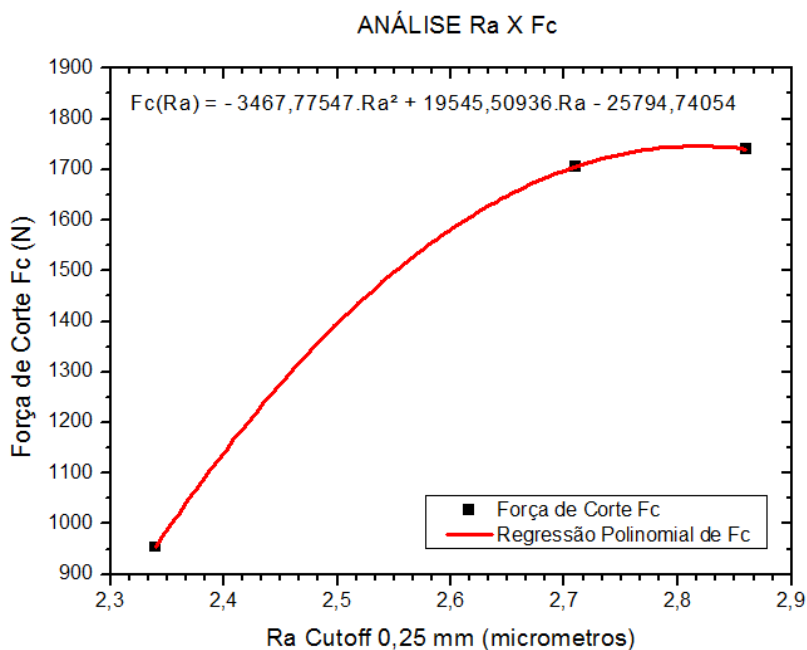


Figura 8. Gráfico de análise entre a Rugosidade Média da Superfície e a Força de Corte

Analisando a função referente à força de usinagem, o aumento de 82,14% correspondeu a um aumento de R_a de 22,2%, como visto na Fig. (9). A regressão polinomial da força de usinagem gerou a Eq. (6):

$$F_u(R_a) = -3449,31982 R_a^2 - 19451,33806 R_a + 25670,03846 \quad (6)$$

Também não foi possível extrapolar valor de F_u para um valor de $R_a = 1,83 \mu\text{m}$.

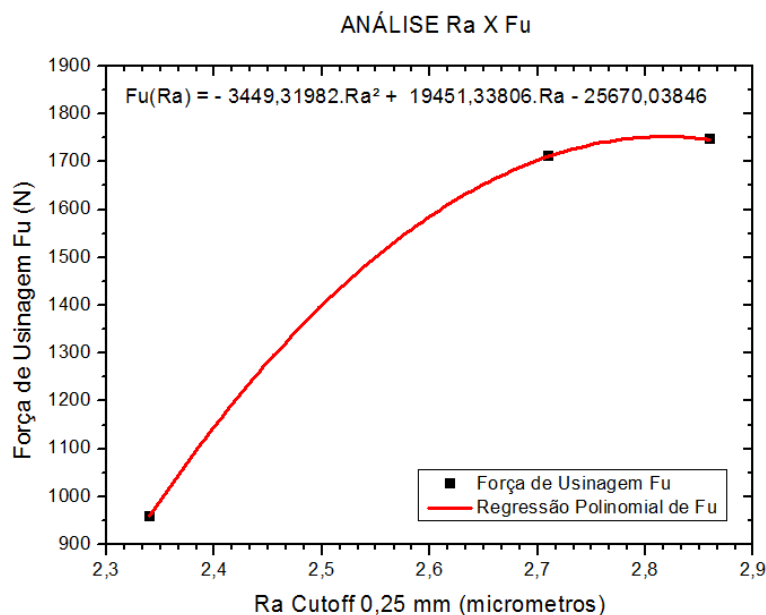


Figura 9. Gráfico de análise entre a Rugosidade Média da Superfície e a Força de Usinagem

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um procedimento experimental para comparar a rugosidade média da superfície R_a teórica com a produzida pela operação de usinagem em um processo cujos parâmetros foram definidos pelo programa SGF. O estudo mostra que a força de usinagem, avaliada através de seus componentes, influencia diretamente na rugosidade média da superfície, pois maiores valores de força de corte e força passiva provocaram piora da rugosidade superficial. Os valores apresentados indicam que a diminuição da força de usinagem aplicada durante o processo resulta em melhora da rugosidade média da superfície, o que não é considerado pelo SGF. A análise experimental mostra que fatores externos no procedimento de usinagem, como a centralização da peça na placa do torno, desvios geométricos no corpo de prova e o posicionamento da ferramenta podem alterar significativamente a rugosidade média da superfície superficial em relação ao valor teórico esperado.

A rugosidade média da superfície foi no mínimo 27,9% acima do valor teórico calculado no programa SGF, atribuindo-se então tal resultado às pequenas variações ocorridas durante as operações, como pequenas variações na centralização da peça e, possivelmente, a desvios geométricos existentes nos corpos de prova pré-usinado. Não houve uma relação direta entre a profundidade de corte e a rugosidade média da superfície neste estudo, onde os parâmetros se mantiveram constantes e apenas a profundidade de corte foi variou, o que induz à conclusão de que um conjunto de fatores (sistemáticos e aleatórios) provocou as variações verificadas.

Foram propostas relações empíricas entre as forças aplicadas na usinagem e a rugosidade média da superfície gerada, que podem contribuir para a determinação, no programa SGF, da força de usinagem máxima a ser aplicada na peça para uma operação de desbaste com o menor custo e a melhor rugosidade superficial. Espera-se que, como continuação a este trabalho, possa ser acrescido ao programa as influências da força de usinagem e de fenômenos dinâmicos associados a ela.

7. REFERÊNCIAS

- Araujo, A. C., 1999, "Estudo das forças de usinagem no fresamento de topo", Dissertação de M.Sc, COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Cassier, Z., 1986, "Crítérios de optimización de parâmetros de corte en el torneado de piezas utilizando sistemas CAD-CAM", Departamento de Mecânica – Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- Coppini, N. L., Ferreira, J. R. and Miranda, G. W. A., 1997, "Procedimento para Otimização das Condições de Usinagem para Aplicação em chão de Fábrica", Proceedings of the 3rd International Congress of Industrial Engineering and XVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção ENEGEP, Gramado, Brazil, CD ROM.
- Davim, J. P., 2001, "A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments", Journal of Materials Processing Technology, No. 116, pp. 305-308.
- International Organization for Standardization, 1984, "International Standard ISO 3002/4, Basic quantities in cutting and grinding - Part 4: Forces, energy, power", Ed. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1st edition.
- Jun, M. B., Ozdoganlar, O. B., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., Kirchheim, A. and Schaffner, G., 2002, "Evaluation of a spindle-based force sensor for monitoring and fault diagnosis of machining operations", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, Issue 6, pp. 741-751.

- Kang, M. C., Kim, J. S. and Kim, J. H., 2001, "A monitoring technique using a multi-sensor in high speed machining", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, Issues 1-3, pp. 331-336.
- König, W. and Klocke, F., 1997, "Fertigungsverfahren 1. drehen, fräsen, bohren", Ed. Springer-Verlag GmbH, Berlin, Germany, 417 p.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T. and Silva, M. B., 2009, "Teoria da Usinagem dos Materiais". Ed. Blucher, São Paulo, Brazil, 383 p.
- Mendes, R. R. A., Paiva, A. P. and Ferreira, J. R., 2007, "Estudo da minimização do custo de usinagem por torneamento do aço ABNT 52100 utilizando-se a metodologia de superfície de resposta", *Proceedings of the 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, Vol. 1, Águas de São Pedro, Brazil, pp. 1-10.
- Meola, T. and Duarte, M. A. V., 2006, "Monitoramento on-line de processos de usinagem via medição de vibrações", *Proceedings of the 16º POSMEC - Simpósio de Pós Graduação em Engenharia Mecânica*, Uberlândia, Brazil.
- Oliveira, Adilson José de, 2003, "Otimização das condições de usinagem visando o torneamento a seco do aço ABNT 1045 em operação de desbaste", *Dissertação de M.Sc.*, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, Brasil.
- Oliveira, J. E. F., 2009, "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 de D.Sc.*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Sandvik do Brasil S. A. Indústria e Comércio, 2008, "Corokey '08", Ed. Sandvick, Jurubatuba, Brazil.
- Shinno, H., Hashizume, H. and Yoshloka, H., 2003, "Sensor-less Monitoring of Cutting Force during Ultraprecision Machining", *Proceedings of CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 52, Issue 1, pp. 303-306.
- Souza, A. J. and Schroeter, R. B., 2007, "Análise da influência dos parâmetros de corte nos sinais monitorados de força e vibração, e na variação da rugosidade da superfície torneada", *Proceedings of the 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, Águas de São Pedro, Brazil, CD ROM.
- Tang, Y., Landers, R. G. and Balakrishnan, S. N., 2006, "Hierarchical optimal force-position-contour control of machining processes", *Control Engineering Practice*, Vol. 14, Issue 8, pp. 909-922.
- Wang, J. X., Jiang, X., Ma, L. M., Xu, Z. G. and Li, Z., 2005, "Decision Rules for Workpieces based on Total Uncertainty", Ed. Springer Verlag London Limited, London, England.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF A CYLINDRICAL EXTERNAL TURNING PARAMETERIZED BY COMPUTATIONAL OPTIMIZATION

Washington Souza Nery, washingtonnery@ig.com.br¹

José Eduardo Ferreira de Oliveira, jefocetpe@yahoo.com.br^{1,2}

Anna Carla Araujo, anna@ufrj.br^{1,3}

¹ CEFET/RJ - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais - PPEMM, Av. Maracanã, 229 - Maracanã - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - CEP 20271-110

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE, Av. Prof. Luiz Freire, 500 - Cidade Universitária - Recife - PE - Brasil - CEP: 50740-540

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Engenharia Mecânica - Poli/COPPE/UFRJ, Centro de Tecnologia, Bloco G - Sala G-201 - Gab.14 - Cidade Universitária - Rio de Janeiro - Brasil - CEP 21945-970

Abstract. *The computer program "Manufacturing Management System" (SGF) was developed in 2009 with the purpose of integrating the stages of mechanical system design, fabrication for machining and dimensional measurement. This research theme aims to add elements to the program as additional variables specifically to avoid the occurrence of vibration and chatter in the outer cylindrical turning operation. The present study is the first effort in this direction and presents an experimental study that performs the monitoring of machining forces, the deflection of the workpiece and the average surface roughness of a billet of AISI 1020. The cutting parameters are indicated by the SGF program and used different cutting depths. The difference between the required average surface roughness and the experimentally achieved value is then checked. Was evaluated if the program indicated values consistent or if there is the need to add flexibility to the computer program tool, thereby increasing its effectiveness in the optimization of the machining. It was found that the increase in the machining forces generate a worsening in the surface finish, but was not detected an association between the variation in depth of cut and surface finish.*

Keywords: *turning, optimization, machining forces, deflection, surface roughness*