



HAL
open science

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO PARAMETRIZADO POR OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL

Washington Souza, José Paulo Vogel, Jean Eduardo Ferreira de Oliveira,
Anna Carla Araujo

► **To cite this version:**

Washington Souza, José Paulo Vogel, Jean Eduardo Ferreira de Oliveira, Anna Carla Araujo. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO PARAMETRIZADO POR OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL. 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, May 2013, Itatiaia, Brazil. hal-03214833

HAL Id: hal-03214833

<https://hal.science/hal-03214833>

Submitted on 3 May 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.



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO
7th BRAZILIAN CONGRESS ON MANUFACTURING ENGINEERING
20 a 24 de maio de 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ – Brasil
May 20th to 24th, 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ – Brazil

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO PARAMETRIZADO POR OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL

Washington Souza Nery, washingtonnery@ig.com.br¹

José Paulo Vogel, jpvogel@globo.com²

José Eduardo Ferreira de Oliveira, jefocefetpe@yahoo.com.br³

Anna Carla Araujo, anna@ufrj.br⁴

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ UnED Nova Iguaçu, Estrada de Adrianópolis, 1317 - Santa Rita - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - CEP 26041-271

² Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Av. Maracanã, 229 - Maracanã - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - CEP 20271-110

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE, Av. Prof. Luiz Freire, 500 - Cidade Universitária - Recife - PE - Brasil - CEP: 50740-540

⁴ 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 representa um esforço nesta direção e apresenta um estudo experimental que realiza o monitoramento das componentes da força de usinagem e das rugosidades média e total da superfície de um tarugo de aço ABNT 1020. Os parâmetros de corte são determinados pelo SGF. A diferença entre a rugosidade média e total das superfícies prescritas e o valor alcançado experimentalmente são então verificados, considerando-se diferentes profundidades de corte. Avaliou-se se o programa indicou valores coerentes ou se há a necessidade de adicionar informações complementares ao programa computacional, aumentando assim a sua eficácia na otimização dos parâmetros de usinagem. Verificou-se que o aumento das forças de usinagem gera uma piora na rugosidade, porém, o fenômeno é observado de maneira mais evidente na medição da rugosidade total da superfície (R_t) do que na medição da rugosidade média da superfície (R_a).

Palavras-chave: torneamento, otimização, forças de usinagem, rugosidade de superfície

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a concorrência acirrada no setor de usinagem está gerando a necessidade constante de aperfeiçoamento e otimização nos processos fabris. Nessa dinâmica, onde o tempo e o custo de fabricação passam a ser determinísticos, buscam-se soluções para otimização de processos de usinagem, sem perder o foco na qualidade do produto fabricado. A motivação para esta linha de pesquisa está na necessidade de utilizar os resultados de uma usinagem, otimizada computacionalmente, para o aprimoramento do processo, tornando possível determinar a posição limite entre o menor custo possível e o aproveitamento máximo dos recursos da máquina-ferramenta e da ferramenta de corte. 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 . 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, a rugosidade total de superfície R_t também será avaliada, 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 acrescidas 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; dados de custo, como por exemplo, o salário homem, o salário máquina e os custos gerais indiretos; 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, conforme a Eq. (2) (Junior, 1995).

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

onde f_{\max} é o avanço máximo permitido em mm/rot, R_a em μm e r_ϵ = raio de arredondamento da ponta da ferramenta em mm.

A Equação (2) determina o valor do avanço máximo permitido em função do fator empírico limitante da espessura do cavaco GF_h , do raio de arredondamento r_ϵ e do ângulo de posição de ferramenta χ .

$$f_{\max} = GF_h \times \frac{r_\epsilon}{\text{sen } \chi} \quad (2)$$

O SGF no entanto, não leva em consideração 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 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. (2) 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 usinagem é dada pela Eq. (3), onde k_s é a pressão específica do par de material e ferramenta, a_p é a profundidade de corte e f é a velocidade de avanço.

$$\vec{F} = k_s \cdot \vec{A}_D = \vec{k}_s \cdot a_p \cdot f \quad (3)$$

A força de usinagem F , escrita na equação acima, apresenta uma pressão específica em cada direção das direções ativas de corte (k_c na direção de corte, k_f na direção de avanço). Estas forças podem ser medidas por um dinamômetro orientado segundo as direções de corte e avanço no torneamento e a pressão específica média calculada experimentalmente (Eqs. 4 e 5).

$$F_c = k_c \cdot A_D \quad (4)$$

$$F_f = k_f \cdot A_D \quad (5)$$

Diversos autores modelaram a pressão específica de corte e um dos mais antigos e ainda utilizados na literatura nacional é o modelo de Kienzle (Machado *et al.*, 2009), que fornece valores aproximados e generalizados de k (Eq. 6).

$$|k_s| = k_{s1} \cdot k^{1-Z} \quad (6)$$

Os valores de $|k_s|$ e $(1-Z)$ são obtidos de forma experimental, mediante ensaios feitos para cada material específico.

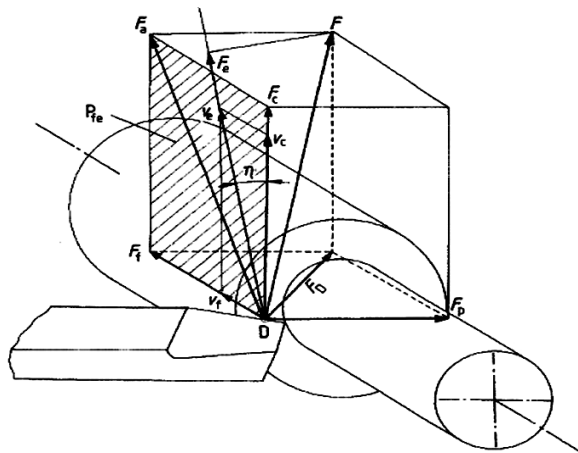


Figura 2. Torneamento cilíndrico externo (ISO 3002/4, 1984)

Neste estudo, espera-se que a diferença entre a força de usinagem esteja estabilizada após o momento do início do corte. Com isso é avaliada a influencia desta força e de suas componentes na rugosidade de superfície para acrescer esta informação ao programa SGF.

4. RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE

A rugosidade de uma superfície é determinada de acordo com a forma como é feita sua medição. No Brasil, a ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - adotou o sistema da “Linha Média” (M). Este é o sistema mais utilizado em todo o mundo. No sistema “M” todas as grandezas de medição são definidas a partir de uma linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, linha esta que divide o perfil de rugosidade de modo que o somatório das áreas dos picos seja igual ao somatório das áreas dos vales.

Segundo Almeida (2008), A rugosidade superficial desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, influenciando na resistência ao desgaste, no ajuste forçado de acoplamentos, na resistência à corrosão e à fadiga, no escoamento dos lubrificantes e na aparência da peça.

Um dos diversos parâmetros que quantifica a rugosidade de superfície é a Rugosidade R_a (roughness average) que

significa rugosidade média, ou seja, é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento y_i dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (Fig. 3).

Outro parâmetro de medição da rugosidade de superfície é a Rugosidade total R_t (Fig. 3), que corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de medição (l_m), independentemente dos valores de rugosidade parcial.

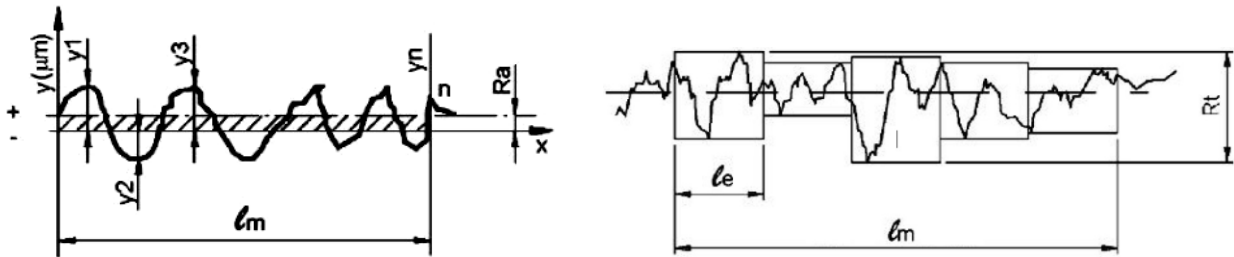


Figura 3. Rugosidades R_a e R_t (Almeida, 2008)

Para a operação de torneamento (Machado *et al.*, 2009), os parâmetros R_a e R_t podem ser calculados teoricamente. Este cálculo é uma aproximação que despreza outros fatores como vibração e desgaste das arestas de corte, por exemplo. Quando o avanço é menor que o raio de arredondamento da ponta da ferramenta (r_ϵ). O valor teórico de R_a pode ser calculado através da Eq. (1), enquanto que o valor teórico de R_t é expresso, em mm, pela Eq. (7):

$$R_t = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (7)$$

As equação acima também permite a determinação do valor teórico de avanço máximo da ferramenta de corte em função de um valor de rugosidade total de superfície pré-estabelecido.

5. 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 na 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.

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

O material utilizado para a usinagem neste trabalho é o aço ABNT 1020 para confecção dos corpos de prova tem seção redonda com diâmetro de 1" (25,4 mm), produzida por laminação. A barra foi cortada em tarugos, que foram pré-usinados com dimensões apresentadas na Fig. (4).

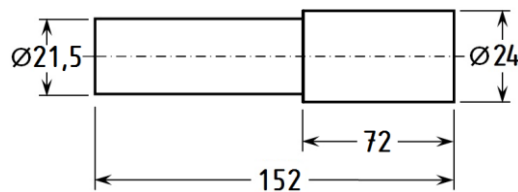


Figura 4. Vista do corpo de prova pré-usinado (cotas em mm)

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 R/L 2525M11). A Figura (5) mostra a montagem da ferramenta e porta-ferramenta na operação com a profundidade de corte utilizada, que será diferente em cada experimento.

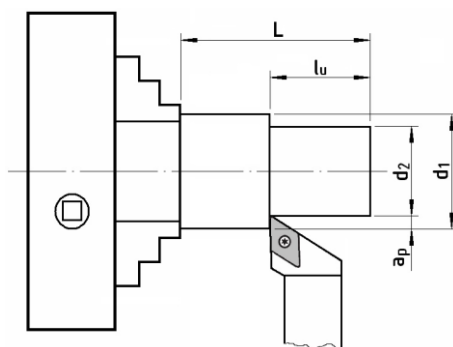


Figura 5. Montagem do corpo de prova no torno

5.2. 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 consequentemente tornou variável o valor da profundidade de corte a_p , em função de d_2 . Os valores de d_2 utilizados foram 23 mm, 22 mm, 21 mm, e 20 mm, gerando profundidades de corte a_p de, respectivamente, 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, e 2 mm, com uso totalizado de 4 corpos de prova (Tab. 1). A rugosidade média da superfície R_a esperada para a operação foi de 3,2 μm , que condiz com o objetivo de se fazer a avaliação de uma operação de desbaste, dentro do campo de utilização usual do torno (AGOSTINHO, 1977).

Tabela 1. Parâmetros de Corte para simulação no SGF

Diâmetro inicial (d_1)	30 mm
Diâmetro final (d_2)	20, 21, 22 e 23 mm
Comprimento usinado do corpo de prova (l_u)	40 mm
Comprimento livre do corpo de prova (L)	72 mm
Acabamento Superficial (R_a)	3,2 μm

Definidas as dimensões de desbaste dos corpos de prova, foi utilizado o módulo de fabricação do SGF para fazer a otimização dos parâmetros de usinagem e o avanço máximo permitido foi calculado. A gama de avanços disponíveis na máquina e abaixo do avanço máximo permitido foi de 0,042 a 0,199 mm/rot, totalizando 20 avanços longitudinais 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).

Após as simulações, verificou-se que os valores de custo e tempo de usinagem se repetiram para cada rotação e para todas as profundidades de corte. Foi observado que o avanço da ferramenta de corte (f), para todas as rotações, foi a máxima possível (0,199 mm/rot). O menor “custo direto” para o cilindramento foi obtido para a rotação de 1600 rpm do torno, no valor de R\$ 0,064 por peça, para todas as 4 profundidades de corte (Fig. 6). É importante salientar que este custo não considera os custos indiretos, como por exemplo o custo da matéria-prima que é um custo fixo, independente da velocidade de corte. A velocidade de corte calculada em todas as simulações foi de 120,64 m/min.

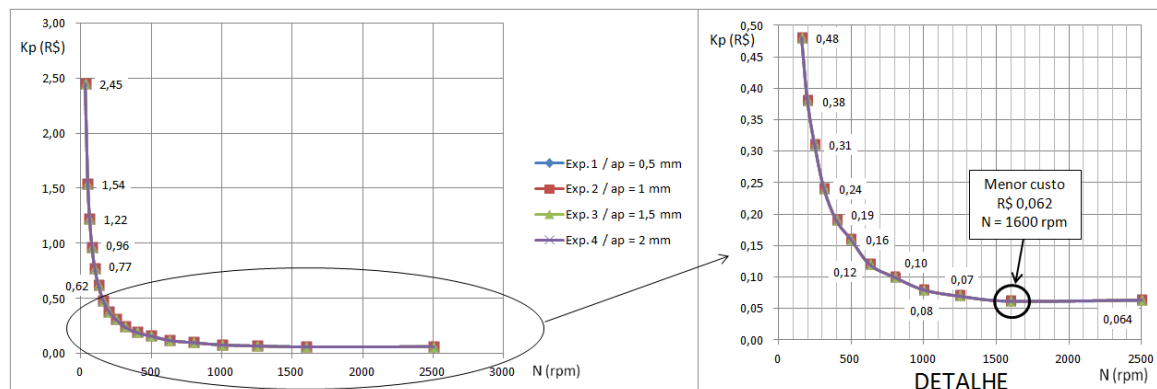


Figura 6 - Gráfico com a relação entre o número de rotações do torno (n) e o custo de fabricação por peça (K_p)

Aplicando-se o valor do avanço de 0,199 mm/volta na Eq. (1), obtém-se um R_a teórico de 3,19 μm . Aplicando-se o mesmo avanço na Eq. (7), obtém-se um R_t teórico de 12,38 μm . Esses valores serão utilizados para comparação com as medições de rugosidade média e total e suas respectivas análises.

5.3. Montagem do experimento

O esquema de montagem dos experimentos é mostrado na Fig. (7). 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° .

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.

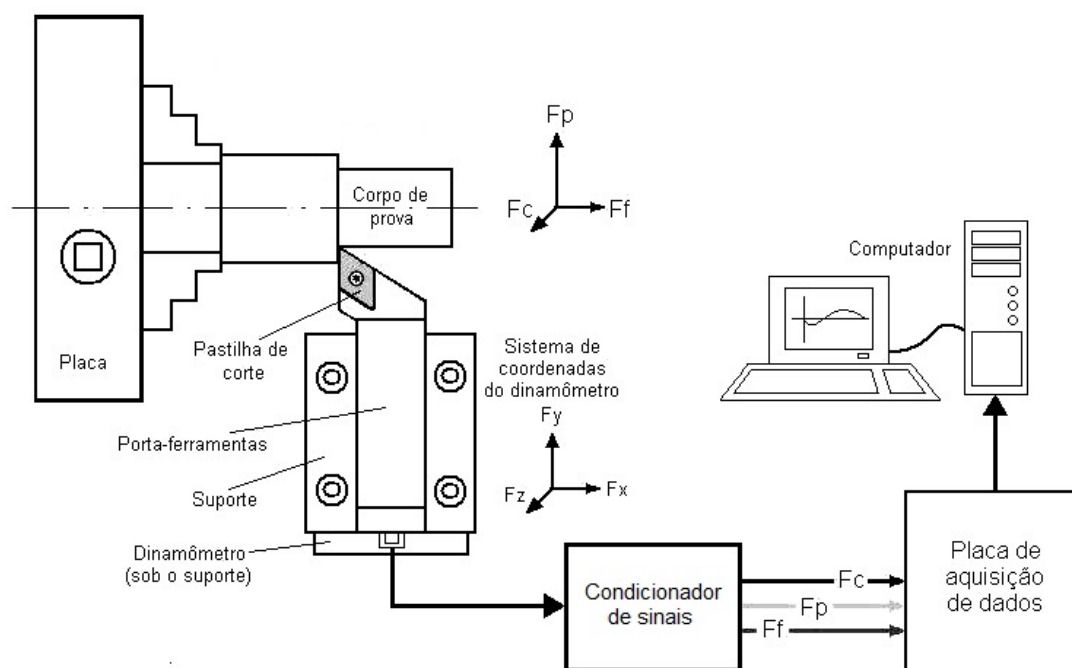


Figura 7. Esquema de aquisição de dados

5.4. Medição da Rugosidade

O rugosímetro utilizado para medição dos parâmetros de rugosidade média R_a e total R_t da superfície foi da marca Taylor Hobson, modelo Form Talysurf 10 com resolução de 0,0001 μm e incerteza expandida de medição de 0,022 μm para um fator de abrangência $k = 2$. Após a fixação do corpo de prova foram feitas medições de rugosidade da superfície em 6 posições diferentes da superfície com o diâmetro final do experimento, exceto para o experimento 1, que teve a rugosidade medida em 3 posições, fazendo a rotação do corpo de prova a cada medição, utilizando *cutoff* de 0,25 mm. As medições nos dois parâmetros foram feitas de forma simultânea.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As componentes da força de usinagem (F_f , F_c e F_p) do corpo de prova no tempo foram adquiridas simultaneamente (Fig. 8). Cada corte durou 5,6 segundos a uma frequência de aquisição de 2000 Hz, o que representa a aquisição de 75 pontos a cada rotação do torno. Foi selecionado, em cada experimento, um intervalo de 3,75 segundos, o que corresponde a 100 rotações do torno a 1600 rpm, totalizando 7500 pontos para análise. No experimento 1 onde usinou-se com 0,5 mm de profundidade (Fig. 8a), observou-se que a força de avanço F_f foi inferior à força passiva F_p , que manteve-se em uma mesma faixa de valores em todos os quatro experimentos. Nos experimentos 2, 3 e 4 (Figs. 8b, 8c e 8d), observa-se o aumento da força de corte em cada experimento, com profundidade de corte de, respectivamente, 1 mm, 1,5 mm e 2 mm. O aumento da profundidade de corte e, conseqüentemente, da área da seção do cavaco (A_D), provocou o aumento da força de avanço F_f a 36% de F_c no experimento 1, 54% no experimento 2, 58% no experimento 3 e 60% no experimento 4.

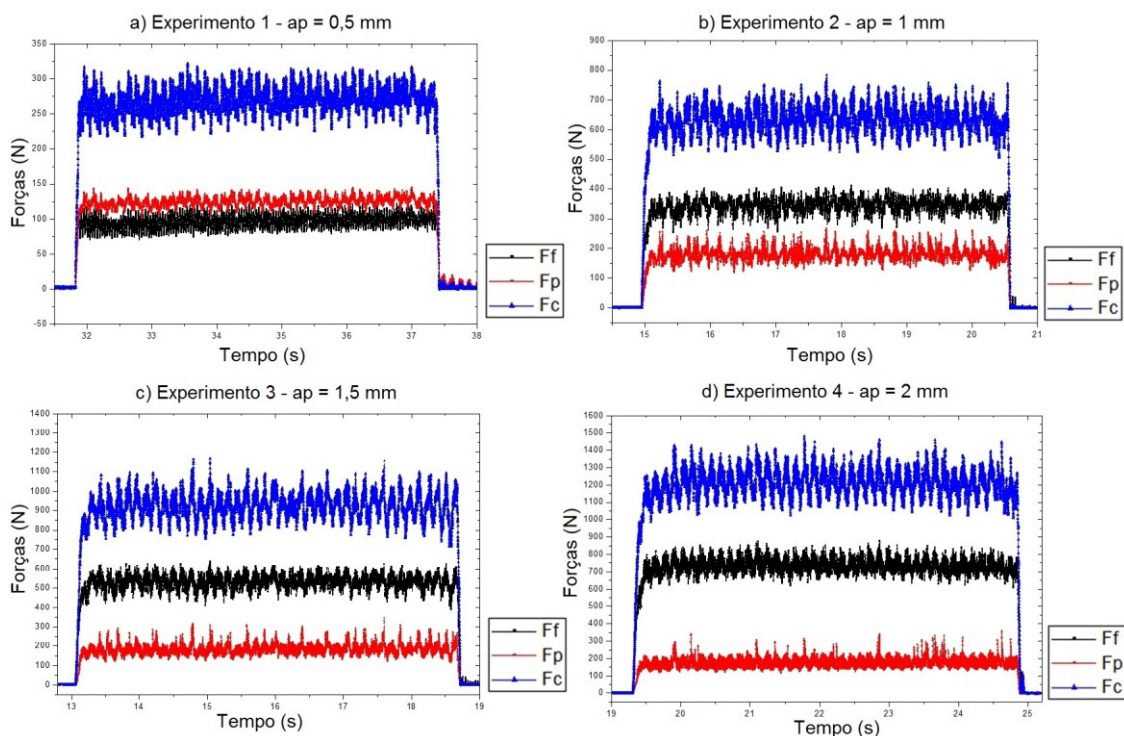


Figura 8. Resultados de Forças

A partir dos resultados obtidos nos experimentos pode-se calcular os valores médios da força de usinagem F , resultante das forças monitoradas nos experimentos, para cada profundidade de corte. Um resumo destes valores pode ser observado na Tab. (2), considerando a força de avanço, a força passiva e a força de corte durante a usinagem.

Tabela 2. Valores médios de F_f , F_p , F_c e F

Experimento	F_f (N)	F_p (N)	F_c (N)	F (N)
1 (a _p = 0,5 mm)	96,1 ± 10,0	124,4 ± 6,6	270,5 ± 19,0	312,9 ± 21,5
2 (a _p = 1 mm)	337,1 ± 23,9	177,8 ± 18,6	628,8 ± 43,2	735,6 ± 48,5
3 (a _p = 1,5 mm)	536,9 ± 35,3	187,4 ± 26,3	925,3 ± 63,8	1086,5 ± 71,4
4 (a _p = 2 mm)	727,3 ± 43,7	179,0 ± 27,2	1207,9 ± 74,3	1421,7 ± 83,6

As rugosidades médias (R_a) e totais (R_t) da superfície, medidas após cada um dos experimentos podem ser observadas na Tab. (3). Nela são apresentados resultados com *cutoff* de 0,25 mm e os respectivos valores de incerteza de medição e fator de abrangência k .

Tabela 3. Medição das rugosidades médias e totais das superfícies

Experimento	a_p (mm)	R_a Médio (μm)	Incerteza U (μm)	Fator k	R_t Médio (μm)	Incerteza U (μm)	Fator k
1	0,5	2,6596	± 0,6948	4,5266	15,5503	± 2,7559	4,5266
2	1,0	2,9267	± 0,2592	2,6487	16,0273	± 2,2476	2,6487
3	1,5	3,2215	± 0,3140	2,6487	18,3812	± 2,0587	2,6487
4	2,0	3,2085	± 0,8404	2,6487	19,0753	± 4,6018	2,6487

Os valores de rugosidade R_a e R_t 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%.

7. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Ao analisar os resultados obtidos nos experimentos, foi verificado que os valores nominais da rugosidade média da superfície ficaram abaixo do valor teórico de 3,19 μm para $a_p = 0,5$ mm e 1 mm e acima do valor teórico para $a_p = 1,5$ mm e 2 mm, porém, considerando-se a incerteza de medição, todos os valores de R_a contemplam o valor teórico. Os

valores de rugosidade total de superfície R_t ficaram acima do valor teórico de 12,38 μm , em todos os experimentos, ficando também fora da faixa de incerteza de medição calculada.

Os dados apresentados na Tab. (4) correspondem aos valores médios de força e rugosidade de superfície encontrados e ordenados em ordem crescente de rugosidade média da superfície.

Tabela 4. Medição das rugosidades médias e totais das superfícies, valores médios de F_f , F_p , F_c e F

a_p (mm)	R_a Médio (μm)	R_t Médio (μm)	F_f (N)	F_p (N)	F_c (N)	F (N)
0,5	2,6596 \pm 0,6948	15,5503 \pm 2,7559	96,1	124,4	270,5	312,9
1,0	2,9267 \pm 0,2592	16,0273 \pm 2,2476	337,1	177,8	628,8	735,6
1,5	3,2215 \pm 0,3140	18,3812 \pm 2,0587	536,9	187,4	925,3	1086,5
2,0	3,2085 \pm 0,8404	19,0753 \pm 4,6018	727,3	179,0	1207,9	1421,7

Na Figura (8) e na Tab. (4), percebe-se que a força passiva não varia de forma significativa, pois esta influencia na deflexão da peça e não na pressão específica de corte. Nota-se também que a força de avanço tem um crescimento de 657% entre as profundidades de corte de 0,5 mm e 2 mm e que, neste mesmo intervalo, a força de corte aumentou 347%.

7.1. Relação entre a Rugosidade de Superfície e a Força de Usinagem

Com o objetivo de quantificar a relação entre a rugosidade de superfície e a força de usinagem, foram calculadas, a partir de regressões lineares, as funções apresentadas nas Eqs. (8) e (9). Com estas funções, é possível calcular quais os valores das forças de usinagem F que proporcionam uma rugosidade média da superfície $R_a = 3,19 \mu\text{m}$ e rugosidade total da superfície $R_t = 12,38 \mu\text{m}$.

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

$$R_a(F) = 0,00066F + 2,45885 \quad (8)$$

Observa-se na Fig. (9a) que um progressivo aumento da força de usinagem correspondente a um aumento progressivo de R_a . A diferença de 20,6% na rugosidade média da superfície corresponde a uma diferença de aproximadamente 346,5% na força de usinagem como pode ser visto na função da Eq. (8). Aplicando-se esta equação, verificamos que um valor de rugosidade $R_a = 3,19 \mu\text{m}$ corresponderia a uma força de usinagem F de 912,84 N. A rugosidade R_a apresenta uma piora a medida em que a profundidade de corte a_p é alterada em 0,5mm, porém, de $a_p = 1,5 \text{ mm}$ para $a_p = 2 \text{ mm}$ acontece uma melhora do valor nominal da rugosidade, porém, com incerteza de medição 2,7 vezes maior (Fig. 9b).

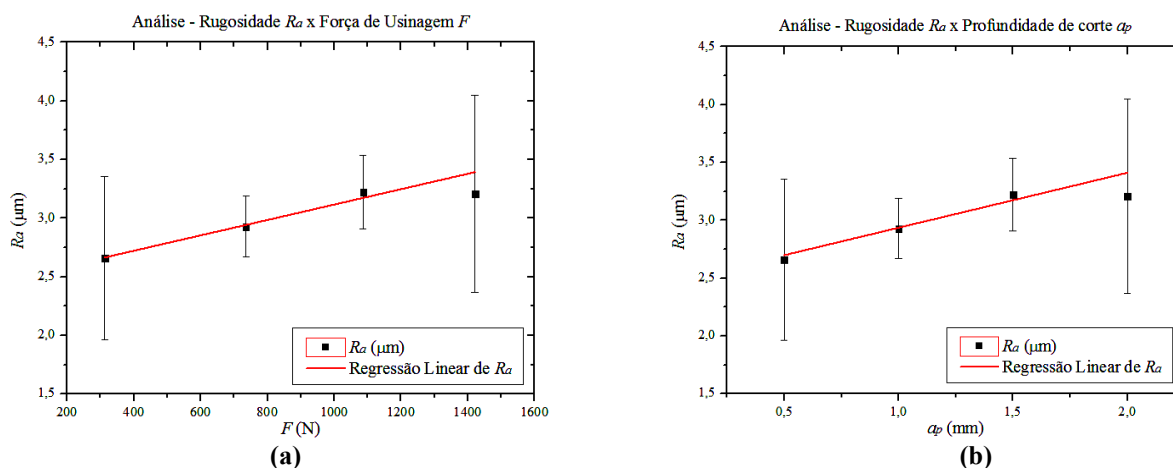


Figura 9. Gráfico de análise entre a Rugosidade Média da Superfície, a Força de Usinagem e a Profundidade de Corte

Analisando a função referente à rugosidade total da superfície, o aumento de 22,7% de R_t corresponde a um aumento aproximado de 346,5% da força de usinagem, como visto na Fig. (10a). A regressão linear da força de usinagem gerou a Eq. (9):

$$R_t(F) = 0,00374F + 13,94909 \quad (9)$$

Não foi possível fazer a extrapolação valor de F para $R_t = 12,38 \mu\text{m}$ pois resultaria em força F negativa.

A rugosidade R_t apresentou piora a cada aumento de profundidade a_p (Fig. 10b), corroborando com a análise feita em relação à força F .

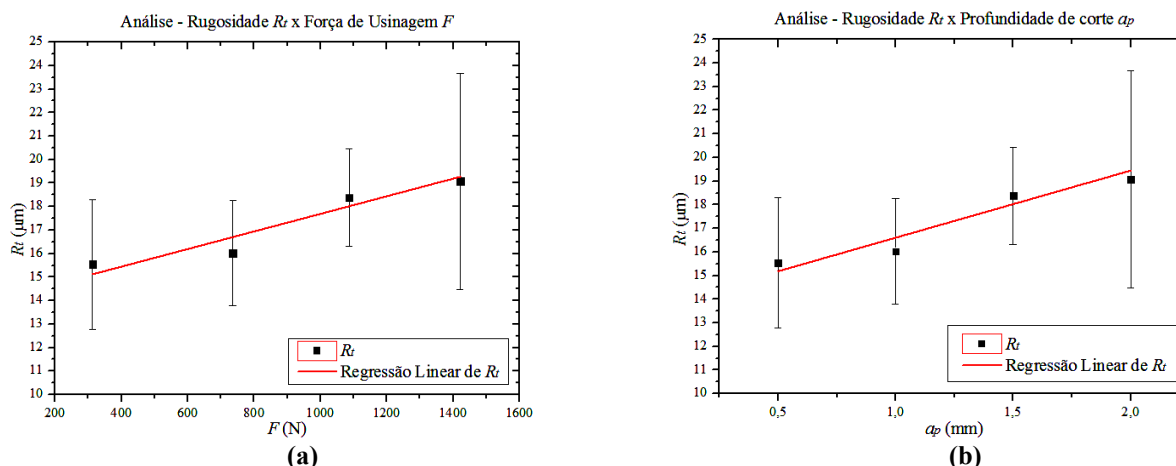


Figura 10. Gráfico de análise entre a Rugosidade Total da Superfície, a Força de Usinagem e a Profundidade de Corte

8. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um procedimento experimental para comparar as rugosidades da superfície R_a e R_t teóricas 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 R_t , mas não influencia de forma significativa na rugosidade R_a . A piora da rugosidade de superfície ficou evidenciada quando se utilizou o parâmetro R_t como referência, sendo que a força passiva foi a que menos exerceu influência, na ordem de 4,19%; a força de corte influenciou em 33,09% do resultado e a força de avanço contribuiu com 62,72% da piora da rugosidade total da superfície. Os valores apresentados indicam que a diminuição da força de usinagem aplicada durante o processo resulta em melhora da rugosidade total da superfície, o que não é considerado pelo SGF.

A medida nominal da rugosidade R_t foi no mínimo 25,6% acima do valor teórico calculado no programa SGF. O aumento da profundidade de corte influenciou o aumento das forças de corte e avanço, conforme o esperado, mas tal fenômeno não ocorreu de forma linear, onde os parâmetros de corte se mantiveram constantes e apenas a profundidade de corte variou.

Foram propostas relações empíricas entre as forças aplicadas na usinagem e as rugosidades média e total 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, a sua influência no parâmetro R_t de rugosidade e de fenômenos dinâmicos associados a ela.

9. REFERÊNCIAS

- Agostinho, O. L., Rodrigues, A. C. S. and Lirani, J., 1977, "Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões". Ed. Blucher, São Paulo, Brazil, 312 p.
- Almeida, D. O., 2008, "Investigação de desvios geométricos no alargamento de ferro fundido com ferramentas revestidas". Dissertação de M.Sc, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- 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.

- Junior, R. S. U. R., 1995, "Determinação das condições otimizadas de usinagem com aplicação em torneamento". Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- 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, 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.
- 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.

10. 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 Paulo Vogel, jpvogel@globo.com²

José Eduardo Ferreira de Oliveira, jefocetpe@yahoo.com.br³

Anna Carla Araujo, anna@ufrj.br⁴

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ UnED Nova Iguaçu, Estrada de Adrianópolis, 1317 - Santa Rita - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - CEP 26041-271

² Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Av. Maracanã, 229 - Maracanã - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - CEP 20271-110

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE, Av. Prof. Luiz Freire, 500 - Cidade Universitária - Recife - PE - Brasil - CEP: 50740-540

⁴ 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 steps 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 prevent the occurrence of vibration and chatter in external cylindrical turning operation. The present study is an effort in this direction and presents an experimental study that performs the monitoring of machining force components and total and average roughness of the surface of a billet steel ABNT 1020. The cutting parameters are determined by the SGF. The difference between the average and total roughness of the surfaces and the prescribed value is then achieved experimentally verified, considering different cutting depths. It was evaluated whether the program indicated coherent values or if there is the need to add further information from the computer program, thereby increasing their effectiveness in optimizing the machining parameters. It was found that increasing machining forces generates a deterioration in surface roughness, however, the phenomenon is observed in more apparent in measuring the total surface roughness (R_t) than in measuring the average surface roughness (R_a).

Keywords: turning, optimization, machining force, surface roughness