

# **DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO - COMPUTACIONAL DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE APLICADO A USINAGEM**

**Wisley Falco Sales - [wisley@pucminas.br](mailto:wisley@pucminas.br)**

**Alexandre Gomes Gurgel - [aggurgel@bol.com.br](mailto:aggurgel@bol.com.br)**

**Clovis Sperb De Barcellos - [clovist@pucminas.br](mailto:clovist@pucminas.br)**

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas, Belo Horizonte, MG.

**Sandro Cardoso Santos - [sandro@des.cefetmg.br](mailto:sandro@des.cefetmg.br)**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET MG, Belo Horizonte, MG

## **Resumo**

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento da rugosidade com os parâmetros de corte de aço ABNT 4140 recoberto no processo de torneamento. Diversos experimentos foram realizados usando ferramentas de metal duro recobertas com TiN pelo processo de deposição física de vapor. As variáveis foram os parâmetros de corte, como velocidade de corte ( $v_c$ ), profundidade de corte ( $a_p$ ) e o avanço e para cada teste experimental a rugosidade da peça foi medida, avaliada por meio do  $R_a$ . Após isto, os dados gerados foram utilizados no Método de Análises de Sensibilidade de Parâmetros, desenvolvido pelo mesmo grupo de pesquisa responsável por este trabalho. O método desenvolvido mostra a sensibilidade para cada parâmetro de entrada sobre o de saída, que neste caso foi o  $R_a$ . Portanto, depois de concluído este trabalho foi possível verificar como cada parâmetro individual apresentava influência na rugosidade da peça.

**Palavras-chave:** Sensibilidade de parâmetros, torneamento, rugosidade.

## **1. INTRODUÇÃO**

O desempenho de um sistema mecânico é fortemente influenciado por características oriundas da fabricação. Como fabricar o componente, por qual processo e quais os ideais níveis dos parâmetros utilizados na fabricação são questões que devem ser criteriosamente analisadas nos projetos dos componentes.

O domínio da integridade da superfície obtida por processos de remoção de cavaco, envolvendo cisalhamento, é de fundamental importância. O termo integridade é abrangente e envolve a qualidade superficial, como, por exemplo, a rugosidade e as alterações sub-superficiais, como transformações de fase (ex.: austenita em martensita) da superfície para o interior da peça (Chiaverini, 1984, Trent, 1999 e Machado e Da Silva, 1999).

Elevados desgastes das ferramentas, na maioria dos casos, elevam a temperatura e a rugosidade da superfície da peça, enquanto há também a tendência de se aumentar à temperatura na interface cavaco-ferramenta, o que por sua vez pode contribuir para a elevação localizada da temperatura na peça provocando alterações na forma, devido a esforços. Como exemplo, as sedes de válvulas de motores de combustão são usinadas pelo processo de mandrilhamento cilíndrico e apresentam

inúmeras similaridades com o torneamento. As características de apoio das válvulas e da sede são fundamentais, devem apresentar a melhor vedação possível, ou seja, elevada taxa de apoio. O conhecimento da ação individual de cada fenômeno contribui para o entendimento dos efeitos resultantes e na tomada de decisões, permitindo interferir de forma consciente e sensata, na seleção de parâmetros de corte como o avanço, a profundidade de corte e a velocidade de corte (Trent, 1991 e Machado e Da Silva, 1999). Isso contribui fortemente na seleção de materiais de ferramentas adequadas a cada situação, buscando sempre a otimização da qualidade da peça produzida.

Neste trabalho se implementou dispositivos e juntamente com hardware e software, realizou-se procedimento avaliando indiretamente como as temperaturas da interface cavaco-ferramenta e da peça, em conjunto com a evolução do desgaste de ferramentas de corte influenciam na rugosidade e topografia das superfícies produzidas no processo de torneamento, com isso permitir correlacionar o desgaste da ferramenta com a temperatura na interface cavaco-ferramenta, com a temperatura da peça e com a rugosidade da superfície gerada. Isto possibilitará, entre outros, estabelecer critérios de fim de vida da ferramenta avaliando como parâmetro à rugosidade medida da peça.

## 2. METODOLOGIA

Este trabalho consistiu na avaliação da rugosidade e da taxa de apoio de superfícies produzidas pelo processo de torneamento, estabelecendo correlações entre os parâmetros de corte e o desgaste das ferramentas com parâmetros de topografia da superfície usinada, por meio de um modelo matemático de Análise de Sensibilidade de Parâmetros que se caracteriza por ser modular e repetitivo tornando-o, relativamente, de fácil implementação computacional.

A formulação utilizada é denominada como Mínimos Quadrados com Ponderação Móvel que consiste de uma interpolação numérica, onde a solução é conseguida por meio de uma aproximação local de pontos, a partir de uma combinação linear de polinômios. A ponderação móvel faz com que um conjunto de pontos colhido num processo, mesmo de distâncias variáveis, sirva como base de dados para um padrão de comportamento do ponto a ser interpolado, onde o mesmo dependa fundamentalmente dos vizinhos, que agem de uma forma mais decisiva na aproximação do que os outros pontos, sendo esta distância de ação denominada como tamanho de domínio dos pontos. Otimizado o processo de cada influência por meio de pesos linearmente independentes de forma que o erro será minimizado para um dado intervalo ou mesmo pontualmente. Os pesos são calculados por meio de um polinômio interpolador que deve ser escolhido levando em consideração os pontos de entrada, onde o ajuste é feito verificando o erro cometido no cálculo do valor de saída nestes pontos, pois os mesmos são conhecidos. O grau do polinômio interpolador depende do número de pontos que é coberto pelo tamanho de domínio, ou seja, para o cálculo do peso deve haver um número mínimo de pontos de entrada que é igual ao número de coeficientes do polinômio.

Após a interpolação é investigada a sensibilidade do parâmetro de saída em relação ao de entrada, ou seja, ocorre a derivação pontual que determina qualitativa e quantitativamente a influência sem uma equação conhecida ou estabelecida. Na usinagem, variou-se a velocidade de corte ( $v_c$ ), a profundidade de corte ( $a_p$ ), o avanço (f) e utilizando ou não o fluido de corte, para o aço ABNT 4140 e fez-se o monitoramento de diversos parâmetros de topografia da superfície usinada ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ,  $M_{R1}$ ,  $M_{R2}$ ,  $R_{PK}$ ,  $R_K$  e  $R_{VK}$ ), conforme a Norma DIN 4776 (1990).

A metodologia empregada consistiu em duas partes principais: implementação de um programa computacional para a Análise de Sensibilidade (Peter e Salkauskas; 1986) e coleta de dados da operação de usinagem no torneamento. A tabela gerada com os dados experimentais contém os parâmetros de entrada para o programa computacional e as sensibilidades adimensionais, geradas pelo programa, são os parâmetros de saída. Com isto, pode-se avaliar a influência individual, ou as sensibilidades, dos parâmetros de usinagem nos parâmetros de topografia da superfície usinada.

Para validação do programa foi realizada a entrada de pontos de uma função estabelecida, desta forma pode-se avaliar o erro cometido para a interpolação e para a sensibilidade, pois se tratava de valores já conhecidos previamente, o que possibilitou a verificação da eficácia do programa computacional, da utilização do modelo matemático e suas particularidades.

No experimento realizado fixou-se à profundidade de corte, para três situações  $a_p$  igual a 0,5; 1,5 ou 3,0 mm; onde para cada velocidade de corte ( $v_c$  igual a 50, 150 ou 300 m/min) variou-se o avanço (entre 0,03; 0,10 ou 0,30 mm/rev) em cada percurso usinado,  $L_f = 10$  mm, mediu-se na superfície usinada a rugosidade por meio do rugosímetro Mitutoyo, modelo Surftest 211.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Entrada Sobre a Rugosidade, $R_a$

Para os testes realizados foi usado como polinômio interpolador a função *Pi-Spline* que em testes mostrou-se mais ajustada às características dos pontos e para o cálculo dos pesos foi utilizado o maior número de coeficientes possíveis, ou seja, o número de pontos de entrada, que para o experimento é igual a três, enquanto o tamanho do domínio de pontos foi o menor possível para cada situação evitando erros. O programa computacional foi desenvolvido em MatLab (MatLab, 1991).

##### 3.1. Velocidade de corte x $R_a$

Considerando a profundidade de corte,  $a_p = 3,0$  mm e o avanço  $f$  igual a 0,03 mm/volta. Incremento da interpolação igual a 1, para o polinômio interpolador usou-se 3 coeficientes e o tamanho do domínio dos pontos igual a 255.

Nas Figuras 1 e 2 são mostrados os resultados encontrados para a velocidade de corte como parâmetro de entrada e a rugosidade aritmética média,  $R_a$ , como saída. Observa-se na Figura 1 que há a tendência de  $v_c$  até 150 m/min aumentar  $R_a$ , onde para este ponto ocorre o maior valor, enquanto acima deste o efeito se inverte. Isto de outra forma é apresentado na Figura 2 em que a sensibilidade adimensional é positiva até  $v_c = 150$  m/min e inverte de sinal, para  $v_c$  superiores. Em outras palavras, no intervalo entre 50 e 150 m/min a rugosidade  $R_a$  é diretamente proporcional à variação da velocidade e acima de  $v_c = 150$  m/min, há a tendência de redução de  $R_a$ . A análise desse comportamento, embasado em dados da literatura, na usinagem de aços até em torno de 100 m/min ocorre o fenômeno da aresta postiça de corte, APC, comprometendo o acabamento da superfície usinada, devido as microrebarbas remanescentes na peça. O aumento de  $v_c$ , tende a promover o desaparecimento da APC e de melhorar o acabamento.

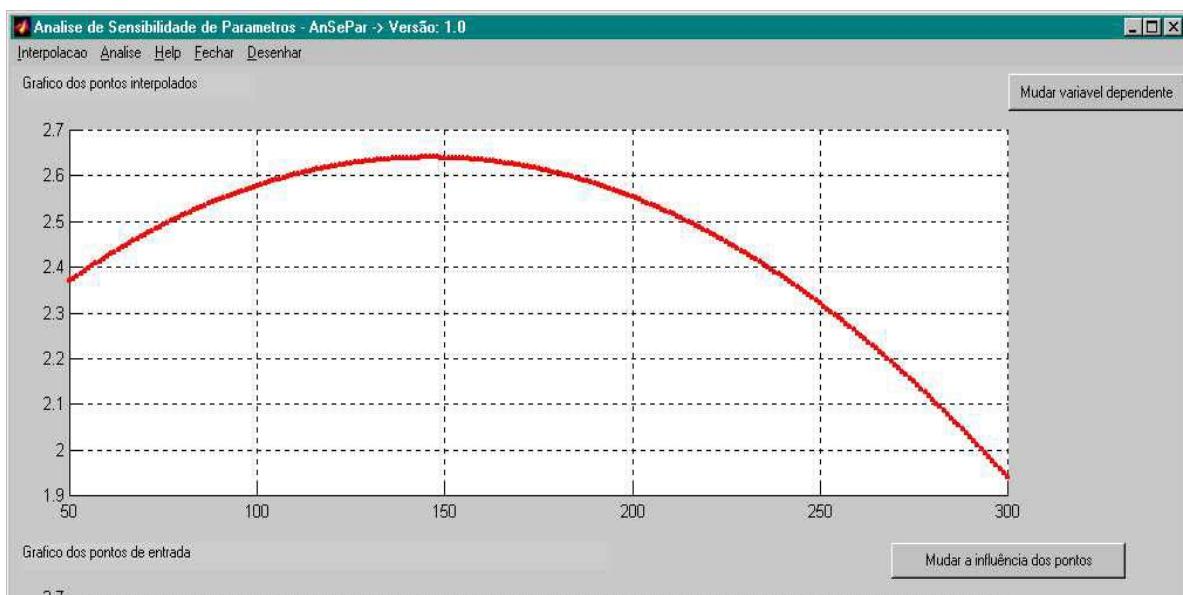


Figura 1 – Pontos interpolados.

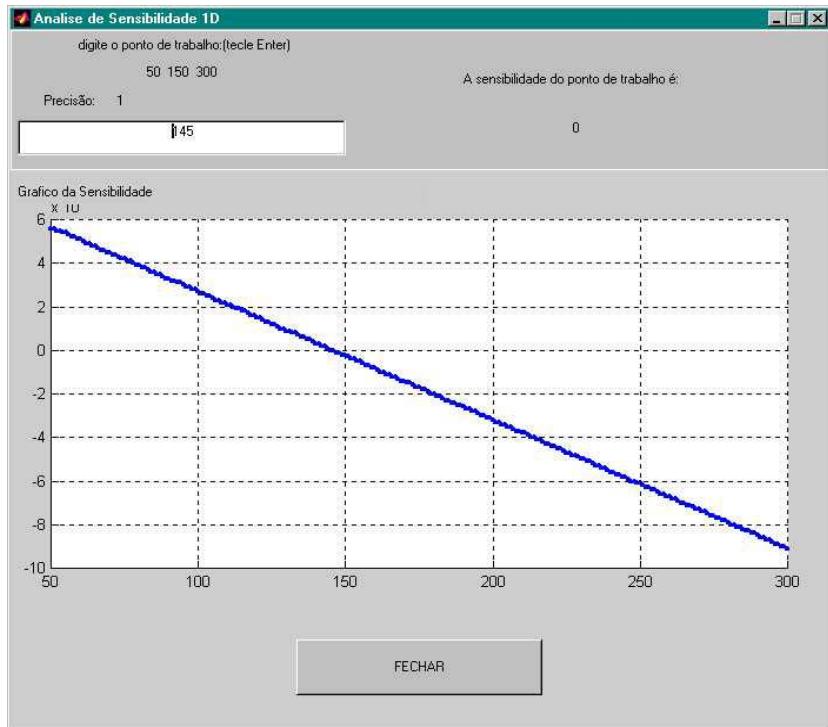


Figura 2 – Sensibilidade da rugosidade  $R_a$  com a  $v_c$ .

### 3.2. Profundidade de corte x $R_a$

Considerando velocidade de corte  $v_c = 50$  m/min e avanço igual a 0,03 mm/volta. Usando incremento da interpolação igual a 0,1; o n° de coeficientes do polinômio igual a três e o tamanho do domínio dos pontos sendo de 2,55.

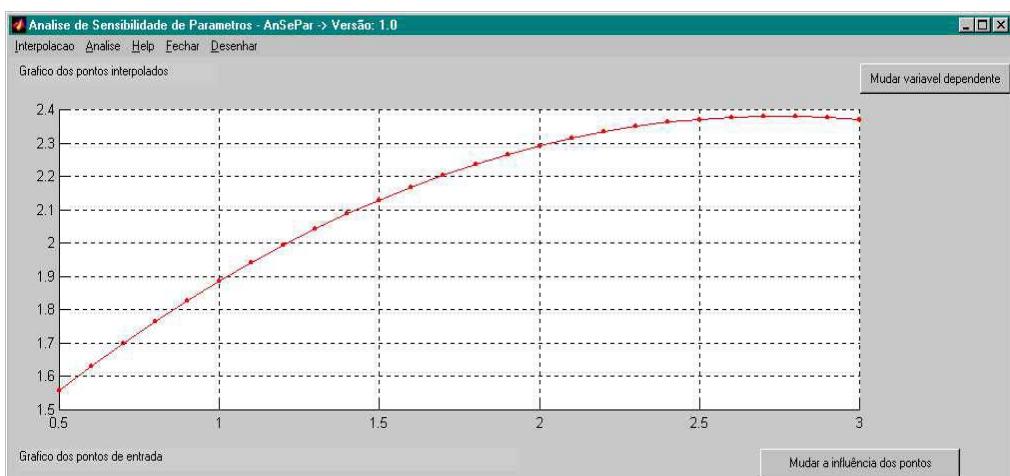


Figura 3 – Pontos interpolados.

Nas Figuras 3 e 4 mostram-se os resultados encontrados para a profundidade de corte,  $a_p$ , como parâmetro de entrada e a rugosidade aritmética média,  $R_a$ , como saída.

Observa-se na Figura 3 que há a tendência de o aumento de  $a_p$  promover o aumento de  $R_a$ , de forma quase linear até o valor de 1,5 mm.

Este efeito pode ser notado facilmente na Figura 4 em que a sensibilidade adimensional decai rapidamente neste intervalo e mais lentamente para os valores acima deste é positiva até  $a_p = 2,6$  mm e para valores superiores o sinal é invertido.

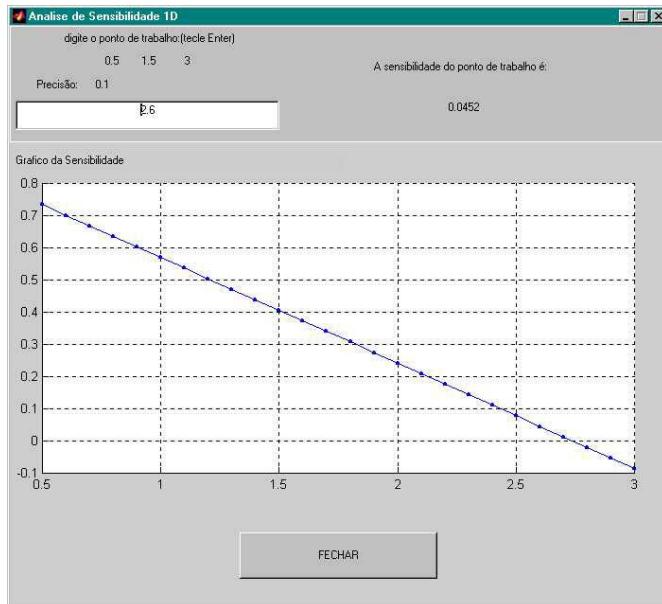


Figura 4 – Sensibilidade da rugosidade  $R_a$  com a  $a_p$ .

### 3.3. Avanço x $R_a$

Considerando Profundidade de corte,  $a_p = 3,0$  mm e velocidade de corte  $v_c = 50$  m/min. Usando incremento da interpolação = 0,01; o n° de coeficientes do polinômio = 3 e o tamanho do domínio dos pontos = 0,3.

Nas Figuras 5 e 6 mostram-se os resultados encontrados para o avanço, f, como parâmetro de entrada e a rugosidade aritmética média,  $R_a$ , como saída.

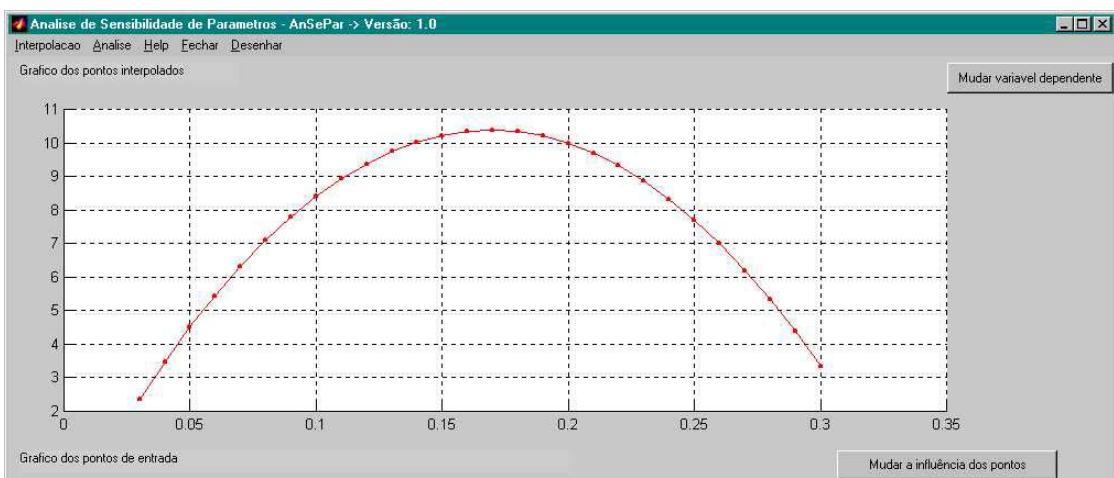


Figura 5 – Pontos Interpolados.

Observa-se na Figura 5 que há a tendência de f até 0,16 mm/volta aumentar  $R_a$ , enquanto acima deste valor o efeito inverte. Isto de outra forma é apresentado na Figura 6 em que a sensibilidade adimensional é positiva até  $f = 0,16$  mm/ver, ou seja, até este ponto tem a saída diretamente proporcional à entrada. Para f superiores ocorre a inversão de sinal, ou em outras palavras, acima de  $f = 0,16$  mm/rev, há a tendência de redução de  $R_a$ . Na usinagem nessa velocidade de corte, possivelmente a APC está presente, comprometendo o acabamento da superfície usinada. Por outro lado, o aumento do avanço eleva a temperatura da interface cavaco-ferramenta, aumentando o efeito de amolecimento e reduzindo o de encruamento das zonas compreendidas nos planos de cisalhamento primário e secundário. Dessa forma, há a tendência de reduzir as dimensões da APC e como consequência, melhorar o acabamento da superfície usinada.

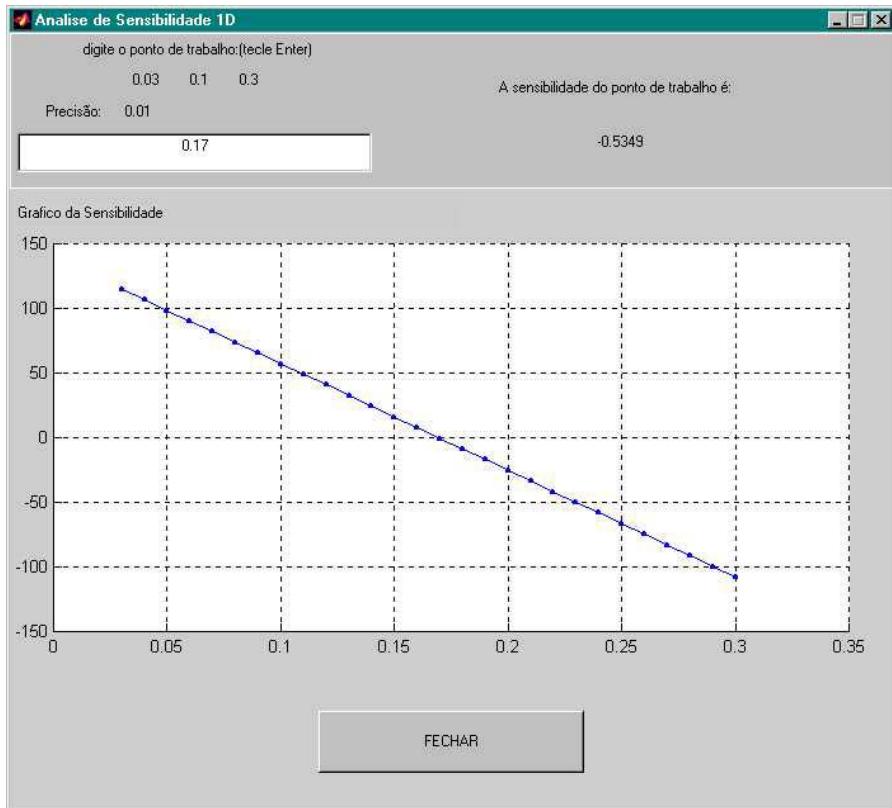


Figura 6 – Sensibilidade da rugosidade  $R_a$  com o  $f$ .

As análises das figuras 1, 3 e 5, mostrando os pontos interpolados, observa-se a variação do parâmetro de saída, rugosidade  $R_a$ , em relação aos parâmetros de corte, onde para pequenas alterações de valores de entrada pode-se determinar o aumento ou a diminuição da rugosidade superficial, sendo esta característica decisiva no caso em que a qualidade da superfície da peça é de fundamental importância e na maioria dos casos é o fator determinante no critério de controle de qualidade.

Nas figuras 2, 4 e 6 são mostrados os valores adimensionais da influência, ou seja, observa-se à taxa de variação do parâmetro de saída em relação ao parâmetro de entrada, onde é percebido que a rugosidade superficial  $R_a$  é mais sensível às variações do avanço em relação aos outros parâmetros. Depois, o segundo de maior peso, a influenciar seria a profundidade de corte e a seguir a velocidade que menos influência dentre estes parâmetros.

#### 4. CONCLUSÕES

A partir dos dados experimentais coletados e do programa computacional, foram verificadas as sensibilidades dos parâmetros, que são importantes resultados para análises. Os resultados encontrados estão coerentes com a literatura específica de usinagem.

Pelos resultados conseguidos e características do modelo matemático o programa computacional se mostrou bastante genérico, podendo ser empregado em outros processos, mas em usinagem a generalização de resultados não é prudente. As diversas variáveis envolvidas no processo podem influenciar fortemente os resultados, de modo individual ou em conjunto, onde para cada processo se faz necessário uma nova avaliação ou análise de sensibilidade focada para o caso.

Os resultados poderão ser utilizados por empresas no setor de autopeças ou manutenção que atuem na fabricação de peças por usinagem, no torneamento.

## **5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- CHIAVERINI, V.; 1984, "Aços e Ferros Fundidos", Associação Brasileira de Metais, ABM, 5<sup>a</sup> ed., São Paulo, Brasil, 518p.
- TRENT, E.M.; 1999, "Metal Cutting", 3<sup>rd</sup> Edition, Butterworths-Heinemann Ltd, 273 pg., ISBN 0-7506-1068-9.
- DIN 4776, 1990, "Measurement of Surface Roughness; Parameters  $R_K$ ,  $R_{PK}$ ,  $R_{VK}$ ,  $M_{r1}$ ,  $M_{r2}$  for Description of the Material Portion (Profile Length Ratio) in the Roughness Profile; Measuring Conditions and Evaluation Procedures.
- MACHADO, A. e DA SILVA, R.; 1999, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Ed. UFU, Uberlândia, MG, Brasil.
- PETER, L. and SALKAUSKAS, K.; 1986, "Curve and Surface Fitting – An Introduction", Academic Press.
- MATLAB for Windows User's Guide, The Math Works Inc. 1991.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao FIP (Fundo de Incentivo à Pesquisa da PUC Minas) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela disponibilização de recursos financeiros e de bolsas de iniciação científica, fundamentais para o desenvolvimento deste projeto.

## **DEVELOPMENT OF SENSITIVITY PARAMETERS ANALYSIS METHOD APPLIED TO TURNING STEELS**

### **Abstract**

The goal of this work was to evaluate the behavior of surface roughness with cutting parameters on ABNT 4140 recovery steel on turning process. Several experiments were performed using cemented carbide tools with TiN coated by physical vapour deposition process. The variables had been the cutting parameters, as cutting speed ( $v_c$ ), depth of cut ( $a_p$ ) and feed rate ( $f$ ) and for each experimental test the roughness surface, evaluated by  $R_a$ , was measured. After that, the data generated had been utilized in Sensitivity Parameters Analysis Method, developed in the same research group that is responsible for this work. The developed method shows the sensitivity for each input parameter on output, in this case,  $R_a$ . Therefore, after conclude this work its was possible to verify as each individual parameter had influence on surface roughness.

**Key-words:** Parameters sensitivity, turning, roughness.