

OTIMIZAÇÃO DO TORNEAMENTO INTERNO DO AÇO SAE 4130 EMPREGANDO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Lucas Fonseca Teixeira, engenheiro_lucas@hotmail.com¹

Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufs.br¹

Tatiane Oliveira Rosa, oliveirarosatatiane@gmail.com¹

Márcia Cristina Belício Alves Sousa, marciabelicio@hotmail.com¹

Jessica Tito Vieira, jessica.tito@hotmail.com¹

¹Universidade Federal de São João del Rei, Praça Frei Orlando, 170 - Centro, São João Del Rei - Minas Gerais.

Resumo: O entendimento do processo de fabricação por usinagem passa pelo estudo de fenômenos de formação de cavaco, esforços de corte, qualidade superficial, mecanismos de desgaste de ferramenta e o tipo de material usinado. Este trabalho foi desenvolvido variando-se velocidade de corte, profundidade de corte, avanço, balanço da peça e balanço da ferramenta para verificar a influência desses fatores nos erros de rugosidade e cilindridade no processo de mandrilamento, com o objetivo de identificar quais parâmetros possuem maior influência nesses resultados. O material dos corpos de prova foi o aço SAE 4130, devido à grande aplicação em bielas, eixo cardan, eixos, parafusos, rebites e outras peças que necessitam de boa resistência e tenacidade. Foi utilizado um perfilômetro e um circularímetro para medir a rugosidade e a cilindridade, respectivamente. Os resultados demonstraram que o avanço combinado com o balanço da peça possui maior significância entre os parâmetros de rugosidade medidos, gerando uma maior variação. Além disso, pode-se considerar que o balanço da ferramenta não apresentou influência significativa no processo de mandrilamento. Para os erros de cilindridade, o balanço da peça foi o parâmetro que teve a maior influência e a velocidade de corte combinada com a profundidade de corte a menor.

Palavras-chave: Rugosidade, Cilindridade e Mandrilamento.

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, o mercado tem exigido peças com acabamentos finos, dimensões cada vez mais precisas e com erros minúsculos na ordem de micrometros devido ao fato de peças com encaixes mais precisos serem menos sujeitas a vibrações e assim serem mais eficientes e proporcionarem uma menor perda de energia, já que atualmente se percebeu que nossas fontes energéticas são limitadas, estão se esgotando cada vez mais rápido devido ao aumento da demanda e se tornando cada vez mais caras. Além de tudo, erros de forma como a rugosidade aumentam o fator de perda de carga em tubulações e dutos acarretando em um maior custo com emprego de bombas e energia para as mesmas.

Tendo em vista as exigências do mercado, tem-se buscado investigar as variáveis que influenciam nos processos de fabricação especialmente a usinagem, que são os processos de fabricação onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco, e que podem ser controladas pelo operador para que se obtenham os melhores valores das mesmas para menores erros de forma nas peças geradas pelo processo. Entretanto, se encontra uma grande dificuldade em investigar, controlar e otimizar esses parâmetros já que são muitos e é difícil visualizar como cada um influencia individualmente na precisão da peça.

Observou-se que não se dispões de muitos materiais que tratem a respeito de uma avaliação estatística e otimização do mandrilamento que “é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou várias ferramentas de barra” (COSTA, 2006). O mandrilamento é um processo mecânico de fabricação posterior ao torneamento ou furação que visa a melhoria da qualidade de regiões usinadas internas, onde normalmente são montados rolamentos, pinos, eixos e componentes de precisão.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo geral analisar a influência dos parâmetros de corte velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, balanço da ferramenta e balanço da peça nos erros de forma e superficiais como rugosidade e cilindridade no processo de mandrilamento horizontal cilíndrico do aço SAE 4130, onde a superfície usinada é cilíndrica e o seu eixo de rotação coincide com o eixo em torno do qual a ferramenta gira, usando a técnica de Superfície de Resposta.

A metodologia de superfície de resposta é uma técnica avançada de planejamento de experimentos utilizada para a modelagem e análise de problemas, ajudando a entender e otimizar a resposta. Podem ser explorados para determinar

condições ótimas para se trabalhar ou a sensibilidade da variável resposta a mudanças dos níveis dos fatores de interesse.

“Frequentemente, a estimativa inicial das condições operacionais ótimas para o sistema estará longe do ótimo real. Em tais circunstâncias, o objetivo do experimentalista é mover rapidamente em direção à vizinhança geral do ótimo. Deseja-se usar um procedimento experimental simples e eficiente economicamente” (Montgomery, 2009).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentadas as características do material utilizado e as condições em que os experimentos foram realizados. Após o processo de torneamento interno, foram realizadas medições empregando um rugosímetro e um circularímetro para verificar o acabamento da peça na escala micrométrica.

2.1. Material dos Corpos de Provas

Os corpos de prova foram confeccionados a partir de tubos do aço SAE 4130 com 40 mm de diâmetro. Foram 48 corpos de prova com 25 mm de comprimento e 35,6 mm de diâmetro interno final, conforme Figura 1.



Figura 1. Corpos de Prova.

A liga de aço SAE 4130 é um material com baixo carbono que contém cromo e molibdênio para conferir maior resistência a esse composto e melhorar suas propriedades mecânicas. As características físicas do aço SAE 4130 dependem de sua composição química e da sua microestrutura, podendo esta ser alterada, dependendo de seu processo de formação. As propriedades físicas superiores do aço cromo-molibdênio 4130 o tornam adequado para aplicações em estruturas aeroespaciais.

As propriedades físicas do aço SAE 4130 são provenientes de sua composição química. Esse material é composto por mais ou menos 0,3% de carbono, o que faz dele um tipo de liga de aço com baixo teor de carbono. As propriedades mecânicas superiores desse material são provenientes da adição de cromo e molibdênio. Por volta de 1% de cromo e 0,2% de molibdênio são usados em ligas de aço SAE 4130. Outros elementos químicos, como o manganês e o silicone, também estão presentes na composição. As impurezas de enxofre e de fósforo devem ser mantidas em uma concentração inferior a 0,04% para que as características físicas do aço SAE 4130 não sejam alteradas.

2.2. Equipamentos Utilizados

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ. O processo de torneamento interno foi executado no centro de torneamento ROMI GL 240-M com velocidade de avanço rápido longitudinal e transversal de 30 m/min, rotação máxima de 6.000 rpm e potência máxima na árvore de 22,5 kW e uma ferramenta de usinagem interna triangular com 11 mm de aresta de corte fixada em uma haste redonda com diâmetro de 16 mm. A força axial e o torque serão obtidos através de um dinamômetro piezoelétrico estacionário com três canais Kistler 9272, um amplificador de sinais Kistler 5070A e o software DynoWare, conforme Figura 2.

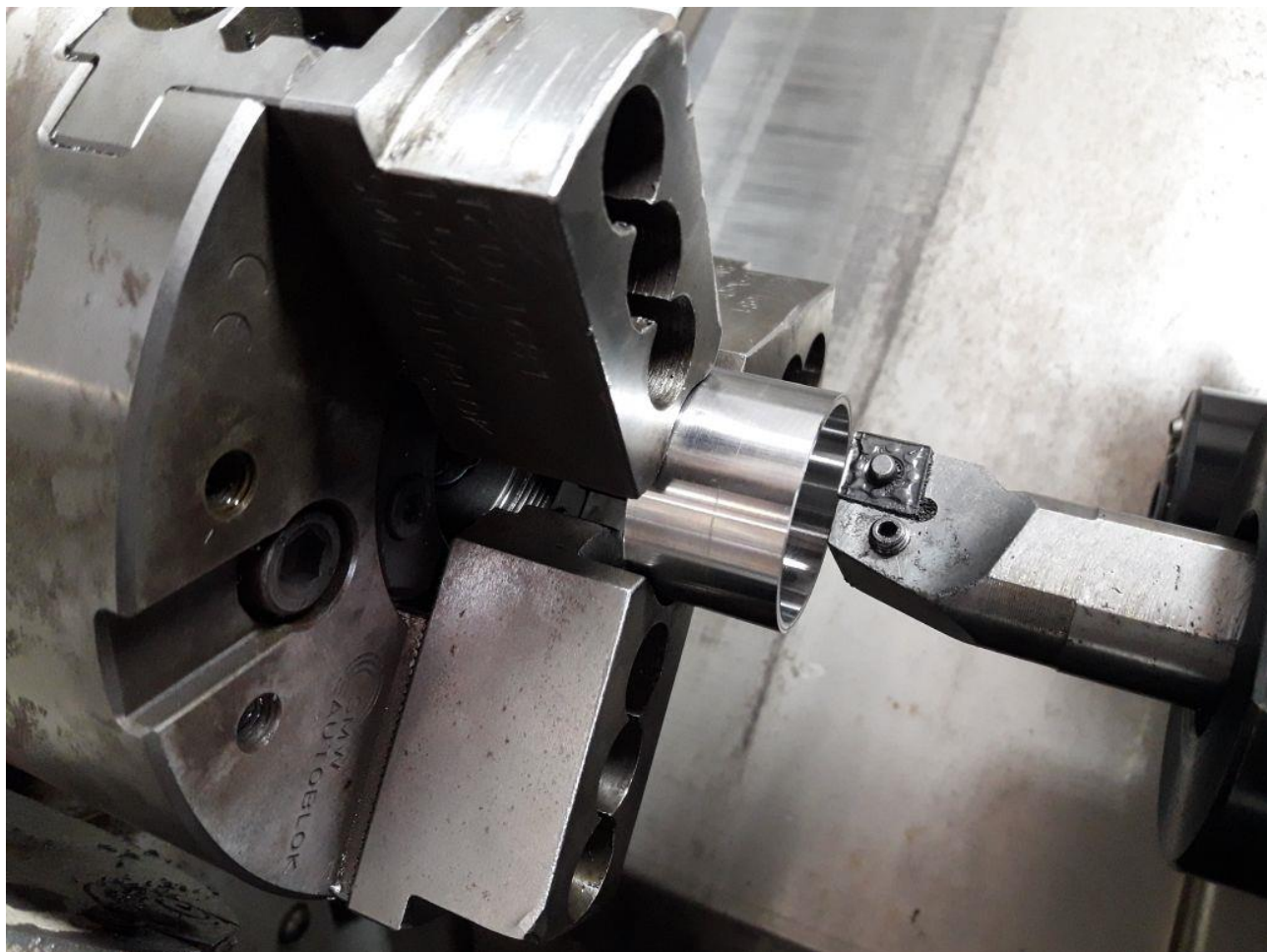


Figura 2. Torneamento Interno Tubo Aço SAE 4130.

A escolha dos parâmetros de corte para o acabamento superficial foi feita com o auxílio do método de superfície de resposta para estabelecer os parâmetros de corte para a integridade superficial. Este método se baseia em um conjunto de técnicas avançadas de planejamento de experimentos (DOE) que ajudam a entender, desenvolver, melhorar e otimizar processos. Neste trabalho foi usado como parâmetros de entrada os valores gerados pelo programa Minitab® tendo como orientação os dados iniciais do catálogo do fabricante para os parâmetros de avanço, profundidade e velocidade de corte da ferramenta. Foi considerando o menor e o maior valor desses parâmetros de corte estabelecidos como limite de segurança para evitar danos na ferramenta, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Limite dos parâmetros de corte do fabricante para a ferramenta.

	Avanço [mm/rot]	Velocidade de Corte (Vc) [m/min]	Profundidade de Corte (ap) [mm]
Mínimo	0,18	158	0,59
Máximo	0,25	300	0,80

2.3. Instrumentos de Medição

As respostas serão a rugosidade nos padrões Ra e Rz medidas com um rugosímetro surftester SJ-401 e os erros de forma cilíndricidade e circularidade medidos no circularímetro Talyrond 131.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados das medições do rugosímetro e do circularímetro para os 48 corpos de prova mandrilados com os parâmetros de entrada definidos pela metodologia de superfície de reposta.

Os dados originais foram analisados no Minitab® pela técnica de análise de variância ANOVA adotando 95% de confiabilidade, gerando gráficos de efeitos principais disponibilizados no pacote do software. Esses gráficos possibilitam uma identificação visual rápida dos parâmetros que mais influenciaram no resultado do processo de torneamento.

Além disso, o coeficiente de determinação R^2 exibido na análise de variância indica a adequação de um modelo e mede a quantidade de variabilidade nos dados explicados pela equação de regressão. “Quanto mais próximo de 1 (ou de 100%) for R^2 , melhor a qualidade da equação ajustada aos dados” (Montgomery, 2009).

Para complementar foi feita a análise da superfície de resposta gerando os modelos matemáticos e os respectivos gráficos tridimensionais através da técnica estatística DOE, onde é possível observar a relação entre os parâmetros de entrada do torneamento interno (velocidade de corte, profundidade de corte, avanço, balanço da peça e balanço da ferramenta) e o resultado das medições de rugosidade e cilíndricidade.

3.1. Rugosidade

A Tabela 2 representa a Análise de Variância de um modelo de segunda ordem (modelo quadrático completo), obtido a partir dos resultados do arranjo composto central para o parâmetro de rugosidade Ra. Os fatores são estatisticamente significantes se o P-valor for menor ou igual a 0,05, sendo o valor de F a quantidade que cada fator influencia na variável resposta. Desta forma, o fator com maior valor de F apresentou maior influência nas variáveis de resposta.

Tabela 2. Análise de Variância para Rugosidade Ra.

Termo	Valor F	Valor P
Vc (m/min)	0,03	0,87
Avanço(mm/rad)	2,83	0,104
ap (mm)	1,31	0,261
Balanço da Peça (mm)	14,47	0,001
Balanço da Ferramenta (mm)	8,02	0,008
Vc (m/min)*Vc (m/min)	12,93	0,001
Avanço(mm/rad)*Avanço(mm/rad)	2,75	0,109
ap (mm)*ap (mm)	0,64	0,432
Balanço da Peça (mm)*Balanço da Peça (mm)	0,09	0,764
Vc (m/min)*Avanço(mm/rad)	0,01	0,936
Vc (m/min)*ap (mm)	1,39	0,249
Vc (m/min)*Balanço da Peça (mm)	0,1	0,756
Vc (m/min)*Balanço da Ferramenta (mm)	0,18	0,678
Avanço(mm/rad)*ap (mm)	0,71	0,406
Avanço(mm/rad)*Balanço da Peça (mm)	15,49	0
Avanço(mm/rad)*Balanço da Ferramenta (mm)	10,65	0,003
ap (mm)*Balanço da Peça (mm)	0,69	0,414
ap (mm)*Balanço da Ferramenta (mm)	0,25	0,618
Balanço da Peça (mm)*Balanço da Ferramenta (mm)	13,38	0,001
R^2 (Ajustado)= 58,25%		

Os valores também foram descritos em um gráfico com variação da rugosidade em função dos parâmetros principais de entrada que são velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, balanço da peça e balanço da ferramenta conforme mostrado na Figura 3.

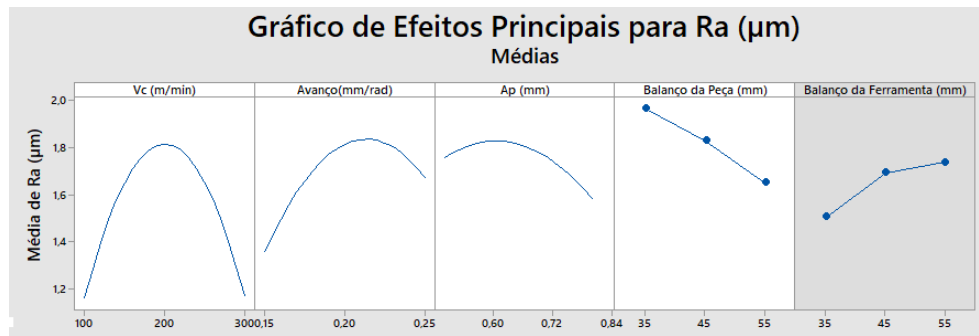


Figura 3. Gráfico dos efeitos principais na rugosidade Ra.

Observa-se que o valor máximo de rugosidade Ra foi de $2,7467\mu\text{m}$ e o valor mínimo foi de $0,9411\mu\text{m}$. A variação da rugosidade Ra foi de 291,8605%.

A partir da avaliação do P-valor da Tabela 2, observou-se que o avanço combinado com o balanço da peça foi o fator de entrada que mais interferiu nas respostas para os valores de rugosidade Ra medidos e o balanço da ferramenta o que menos contribuiu. Mas avaliando a relação do valor F, o avanço combinado com o balanço da peça apresentou a maior influência nas variáveis de resposta. O valor de R^2 ajustado mostrou-se satisfatório.

Pela Figura 1 podemos observar que para valores de profundidade de corte pequenos tem-se o efeito de aração (raspagem) do material que provoca uma rugosidade com marcas menos periódicas e em alguns casos pode-se ter uma formação irregular do cavaco durante seu cisalhamento correndo mais um fenômeno de arrancamento do que cisalhamento do material. Por outro lado, para profundidades de corte intermediárias tem-se um fenômeno mais cíclico e periódico na formação da superfície usinada com um cisalhamento mais perfeito sem a predominância do efeito de aração do material e uma rugosidade Ra menor.

Observa-se também que para o balanço da peça quanto maior o mesmo, menor é a rugosidade o que não acontece para o balanço da ferramenta devido ao seu aparato de fixação e peso que geram vibrações quanto maior o balanço, gerando uma superfície mais irregular e com uma rugosidade mais elevada.

Foram registrados menores valores de rugosidade para os menores valores de avanço. Por outro lado, observa-se que a rugosidade em relação aos parâmetros velocidade de corte e profundidade de corte se manteve próxima de uma média e esses parâmetros não tiveram uma influência muito grande sobre os valores de rugosidade.

3.2. Cilindricidade

A análise de variância para o parâmetro de cilindridade considerando os três raios de ponta é representado na Tabela 3.

Tabela 3. Análise de Variância para Cilindricidade

Termo	Valor F	Valor P
Vc (m/min)	1,63	0,212
Avanço(mm/rad)	0,43	0,517
ap (mm)	0,03	0,858
Balanço da Peça (mm)	1,16	0,29
Balanço da Ferramenta (mm)	0,97	0,333
Vc (m/min)*Vc (m/min)	0,7	0,41
Avanço(mm/rad)*Avanço(mm/rad)	1,69	0,205
ap (mm)*ap (mm)	1,63	0,212
Balanço da Peça (mm)*Balanço da Peça (mm)	49,13	0
Vc (m/min)*Avanço(mm/rad)	2,47	0,127
Vc (m/min)*ap (mm)	0	0,989
Vc (m/min)*Balanço da Peça (mm)	0,14	0,711
Vc (m/min)*Balanço da Ferramenta (mm)	0,19	0,667
Avanço(mm/rad)*ap (mm)	0	0,988
Avanço(mm/rad)*Balanço da Peça (mm)	1,47	0,235
Avanço(mm/rad)*Balanço da Ferramenta (mm)	1,27	0,27
ap (mm)*Balanço da Peça (mm)	0,11	0,741
ap (mm)*Balanço da Ferramenta (mm)	1,1	0,302
Balanço da Peça (mm)*Balanço da Ferramenta (mm)	0,62	0,437
R^2 (Ajustado)= 52,46%		

Os resultados da tabela acima estão detalhados nos gráficos da cilindridade vs. avanço, velocidade de corte e profundidade de corte, conforme mostrado na Figura 4.

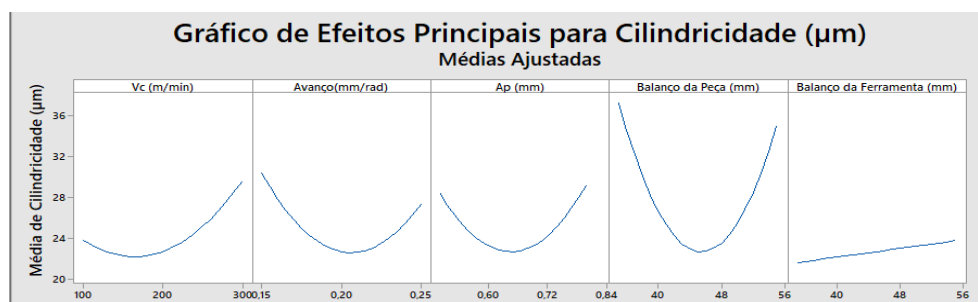


Figura 4. Gráfico dos efeitos principais na Cilindridade.

Observa-se que o valor máximo de cilindridade em relação foi de 51,21 μm e o valor mínimo foi de 18,21 μm . A variação da cilindridade foi de 281,2191%. A partir da avaliação do P-valor da Tabela 3, observou-se que o balanço da peça foi o fator de entrada que mais interferiu nas respostas para os valores de cilindridade medidos e a velocidade de corte combinada com a profundidade de corte o que menos contribuiu. Porém, avaliando-se a relação do valor F, o balanço da peça apresentou a maior influência nas variáveis de resposta. Portanto, o valor de R2 ajustado mostrou-se satisfatório.

A partir da Figura 4 e considerando a variação da velocidade de corte, nota-se que sua influência foi relativamente significativa, já que com seu aumento observou-se um aumento nos erros de cilindridade. Já para os parâmetros de entrada, avanço, profundidade de corte e balanço da peça, nota-se que os valores do erro de cilindridade foram menores para menores valores desses parâmetros, tendendo a aumentar o erro com valores intermediários e novamente caindo com valores mais altos, demonstrando assim que esses valores se aproximam de uma linha média. E finalmente para o balanço da ferramenta, observou-se que o erro na cilindridade se mostrou um valor quase constante, mostrando pouca dependência com esse valor.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo experimental realizado foram aplicados como fatores de entrada velocidade de corte, profundidade de corte, avanço, balanço da peça e balanço da ferramenta.

A partir do estudo experimental e da análise estatística foi possível concluir que o avanço combinado com o balanço da peça foi o fator de entrada que mais interferiu nas respostas para os valores de rugosidade R_a medidos e o balanço da ferramenta o que menos contribuiu e que o balanço da peça foi o fator de entrada que mais interferiu nas respostas para os valores de cilindridade medidos e a velocidade de corte combinada com a profundidade de corte o que menos contribuiu.

Assim, para o torneamento interno de peças com paredes finas deve-se atentar fortemente para os parâmetros de entrada avanço, balanço da peça e ferramenta, pois os mesmos podem variar significativamente a forma do material usinado, influenciando não apenas em aspectos qualitativos como aspectos técnicos de montagem com outros componentes. Pode-se afirmar que o parâmetro mais importante no controle de micro e macro erros como rugosidade, cilindridade é o avanço, pois pode influenciar não apenas parâmetros da qualidade superficial dos produtos usinados, mas também nos requisitos técnicos aos quais o material torneado se aplica.

5. REFERÊNCIAS

- Cunha, L.S. Manual Prático do Mecânico. 8ª ed. São Paulo. Ed. da UFSC. Hemus, 1990.
- Ferraresi, D. Usinagem dos Metais: Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo: Edgard Blucher, 1990. 751 p.
- Montgomery, D. C., Runger, G. C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 4a. ed. Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2009.
- Morais, J. Desenho Técnico Básico 3, ISBN: 972-96525-2-X, Porto Editora, 2006.
- Morais, J. Texto de Apoio à Disciplina de Desenho de Construção Mecânica (MiEM). AEFEP.
- Mühle, H.B., Weingaertner, W.L., Schroeter, R.B., Mandrilamento de Precisão com Cabeçotes e Excentricidade Variável e Sistema de Balanceamento, in. COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 22 a 26 de novembro e 1999, Águas de Lindóia - São Paulo.
- Souza, A. J. Apostila - Processos de Fabricação por Usinagem Parte 2. Rio Grande do Sul: UFRGS, 2011.
- Stemmer, C.E.. Ferramentas de Corte II. 2ª ed. Florianópolis. 1995.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

OPTIMIZING THE INTERNAL TURNING OF SAE 4130 EMPLOYING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Lucas Fonseca Teixeira, engenheiro_lucas@hotmail.com¹

Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufsj.edu.br¹

Tatiane Oliveira Rosa, oliveirarosatatiane@gmail.com¹

Márcia Cristina Belício Alves Sousa, marciabelicio@hotmail.com¹

Jessica Tito Vieira, jessica.tito@hotmail.com¹

¹Federal University of São João del-Rei - UFSJ, Praça Frei Orlando, 170 - Centro, São João Del Rei - Minas Gerais - Brazil

Abstract. *The understanding of the manufacturing process through machining involves the study of chip formation phenomena, shear stresses, surface quality, tool wear mechanisms and the type of machined material. This work was developed by varying cutting speed, shear depth, feedrate, workpiece balance and tool balance to verify the influence of these factors on the roughness and cylindricity errors in the boring process, in order to identify which parameters have the greatest influence on these results. The material of the test specimens was SAE 4130 steel, due to its great application in connecting rods, shaft, shafts, screws, rivets and other parts that need good strength and toughness. A profilometer and a circularimeter were used to measure roughness and cylindricity, respectively. The results showed that the advance combined with the workpiece balance has greater significance among the measured roughness parameters, generating a greater variation. In addition, it can be considered that the tool balance did not have a significant influence on the boring process. For the cylindricity errors, the piece balance was the parameter that had the greatest influence and the cutting speed combined with the lowest cutting depth.*

Keywords: *Roughness, Cylindricity, Boring.*