

ESTUDO DA RETIFICAÇÃO PLANA DO AÇO 4340 TEMPERADO E REVENIDO COM GEOMETRIA INTERROMPIDA E DIFERENTES TIPOS DE LUBRIFICAÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE TAGUCHI.

Marcel Yuzo Kondo

UNESP-FEG/GUARATINGUETÁ

Endereço Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Portal das Colinas CEP: 12.516-410 - Guaratinguetá, SP - Departamento de materiais e tecnologia.

Email: yuzokondo@gmail.com

Manoel Cléber de Sampaio Alves

UNESP-FEG/GUARATINGUETÁ

Eduardo Carlos Bianchi

UNESP-FEB/BAURU

Hamilton José de Mello

UNESP-FEB/BAURU

Cleverson Pinheiro

UNESP-FEG/Guaratinguetá

Marcos Valério Ribeiro

UNESP-FEG/GUARATINGUETÁ

RESUMO

Retificação exige uso de fluídos lubrificantes, onde convencionalmente uma emulsão de óleo e água é lançada em abundância na peça, emulsão que possui alto custo econômico e de descarte. Isto impulsionou a busca por métodos alternativos de lubrificação, sendo o método de mínima quantidade de fluído (MQF) uma

alternativa. Avaliou-se a retificação plana do aço 4340 temperado e revenido, buscando a influência do corte interrompido no processo e a substituição do método convencional de lubrificação pelo MQF. Tipo de lubrificação, corte interrompido e espessura de corte equivalente foram avaliados através de um arranjo ortogonal de Taguchi L₁₆. Analisou-se potência, vibração, emissão acústica durante a retificação e qualidade superficial das peças retificadas. A mudança do tipo de lubrificação teve efeitos na emissão acústica e vibração, o que não ocorreu com a qualidade superficial. Conclui-se que, do ponto de vista da rugosidade, o MQF é um possível substituto de lubrificação na retificação.

Palavras-chaves: Potência, emissão acústica, vibração, rugosidade, retificação plana

INTRODUÇÃO

O processo de retificação é um processo de precisão, uma das últimas etapas do processo de usinagem, que possibilita a obtenção de melhores tolerâncias geométricas e dimensionais mantendo-se para tanto a qualidade superficial. Neste processo a formação do cavaco se dá pela ação de grãos abrasivos ligados por resinas a um rebolo.

Um aço utilizado largamente nas indústrias automotiva, aeronáutica e de máquinas e equipamentos é o aço endurecido ISO 4340, empregado na produção de eixos, peças estruturais e em peças que exigem boa combinação de resistência e tenacidade. Essas propriedades são obtidas através do beneficiamento por têmpera e revenimento que alteram as dimensões das peças. Após os processos de endurecimento é necessário retificar as peças para a eliminação de distorções dimensionais e dar um acabamento superficial satisfatório. ⁽¹⁾

Poucas informações são encontradas sobre o corte interrompido nos processos de retificação. Kurt e Köklü (2012) investigaram a influência do rebolo e dos parâmetros de corte no erro de forma no processo de retificação com corte interrompido. De acordo com os autores a retificação é um processo de corte de metal de alta taxa de energia onde concavidades sérias são formadas devido a deformações térmicas, o que pode causar falhas em equipamentos que necessitem de vedação, como válvulas. Eles utilizaram o método de Taguchi para o

planejamento de experimento e selecionaram as condições otimizadas de processamento, inserindo-se as condições de corte interrompido através da retificação de corpos de prova com bolsões circulares usinados. Encontraram que as condições otimizadas para minimizar os erros de forma foram 80 mesh (tamanho de grão do rebolo), 10 μm (profundidade de retificação) e 22 m/min (velocidade da mesa). ⁽²⁾

Os altos custos de descarte das emulsões lubrificantes, utilizadas no sistema de lubrificação convencional, e a crescente necessidade de se desenvolver técnicas de produção ambientalmente corretas justificou a busca por alternativas ao processo de retificação com fluido. ⁽³⁾ Uma das alternativas é o método de mínima quantidade de lubrificação (MQL), também conhecido por método de mínima quantidade de fluido (MQF), onde pequenas quantidades de lubrificante são pulverizadas em um fluxo de ar comprimido. Muitos autores estudaram o MQL para substituir o sistema de lubrificação convencional nos processos de retificação. ⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

Tawakoli *et al.* (2009) avaliaram a técnica de lubrificação de mínima quantidade de lubrificante (MQL) na retificação de mergulho do aço endurecido 100Cr6, comparando o desempenho com diferentes tipos de lubrificação, retificação a seco e convencional, através da análise das variáveis forças de retificação e rugosidade superficial. O aço 100Cr6 teve o melhor acabamento superficial no sistema de MQL, explicado pela lubrificação e refrigeração mais efetiva dos grãos abrasivos na interface peça-ferramenta, o que facilita o escorregamento dos cavacos na superfície da ferramenta. As forças tangenciais de retificação encontradas foram menores no MQL do que nos outros sistemas de lubrificação, enquanto os esforços normais não mostraram alteração. Os autores concluem que o sistema MQL é capaz de penetrar mais eficientemente a região de contato entre o rebolo de retificação e a peça. ⁽¹²⁾

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do tipo de lubrificação, da presença de corte interrompido e da espessura de corte equivalente nas variáveis potência de usinagem, emissão acústica, vibração e qualidade superficial na retificação plana. Também verificar se o método de mínima quantidade de fluido (MQL) pode ser uma alternativa ao sistema de lubrificação convencional.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos de prova foram confeccionados em aço 4340, de acordo com as dimensões apresentadas na Figura 1, passando então por tratamento de têmpera e revenimento, com dureza final aproximada de 56 HRC.

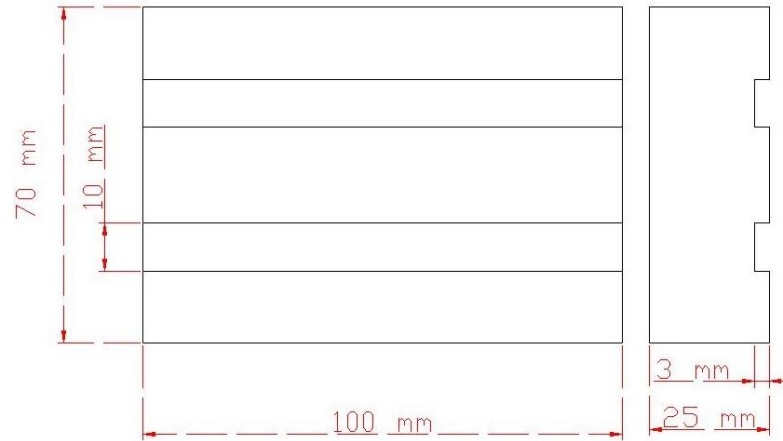


Figura 1 - Dimensões dos corpos de prova de aço 4340 temperado e revenido.

O planejamento experimental adotado foi o arranjo ortogonal L_{16} do método de Taguchi. Os três fatores analisados foram tipo de lubrificação, corte interrompido e espessura de corte equivalente, analisados em quatro níveis de acordo com Tabela 1. Para cada combinação, foram realizados três repetições, totalizando um total de 48 ensaios.

Tabela 1 – Fatores de entrada dos experimentos e valores de níveis.

Parâmetro	Nível			
	1	2	3	4
Tipo de lubrificação	Convencional	MQL (baixo)	MQL (médio)	MQL (alto)
Corte interrompido (Ranhuras)	0	1	2	3
Espessura de corte equivalente	$3,5 \cdot 10^{-3}$ mm	$7 \cdot 10^{-3}$ mm	$10,5 \cdot 10^{-3}$ mm	$14 \cdot 10^{-3}$ mm

O tipo de lubrificação convencional é aquele que a peça recebe um fluxo abundante de uma emulsão de óleo solúvel em água na proporção de 1:39. Nos experimentos este fluxo foi de 49 L/min. Para o MQL (baixa) a vazão variou entre 32 a 80 mL/h, para o MQL (média) entre 96 a 156 mL/h e para o MQL (alta) 291 a 345

mL/h. Este fato é explicado pela dificuldade de se ajustar uma vazão constante no equipamento de MQL.

O fator corte interrompido apresentou-se durante a confecção das peças onde, no nível um, a peça não apresentava sulcos ou ranhuras na superfície usinada. No nível dois a peça apresentava uma ranhura, no nível três apresentava duas ranhuras e no nível quatro. A direção de corte na retificação é perpendicular aos sulcos presentes nos corpo de prova, forçando assim a condição de corte interrompido, conforme demonstrado na Figura 2.



Figura 2 – Ensaio de retificação plana do aço endurecido ABNT 4340.

O número de passadas do rebolo sobre a peça usinada depende do número de ranhuras na peça e da espessura de corte equivalente, totalizando um volume de material retirado constante de 168 mm^3 em cada ensaio.

As peças foram então submetidas ao processo de retificação plana com rebolo convencional de Al_2O_3 , de acordo com os parâmetros encontrados na Tabela 2.

Durante a usinagem foram captados dados de potência de corte, emissão acústica e vibração através de sensores ligados a um módulo de canais em um sistema de aquisição de dados. Estes dados foram obtidos com o auxílio do *software* LABVIEW® a uma taxa de 1000 pontos por segundo. Estes dados foram posteriormente processados no *software* MATLAB®.

Tabela 2 – Parâmetros da retificação.

Tipo de Retificação	Retificação plana
Rebolo de retificação	Norton 38A220-KVS Al ₂ O ₃
Retificadora	Retificadora plana SULAMERICA 1055E
Velocidade do rebolo	30 m/s
Velocidade de avanço	0,021 m/s
Profundidade de corte	5, 10, 15 e 20 µm
Fluido de retificação (convencional)	Óleo solúvel QUIMATIC ME-1 (1:39)
MQL system	
Fluido de retificação (MQL)	ACCU-LUBE Lb-1100 lote 314/12
Dressador	Dressador de diamante de pontos múltiplos.
Velocidade de dressagem	30 m/s

A qualidade superficial foi verificada através da obtenção das rugosidades R_a e R_t através do rugosímetro MarSurf M 300 + RD 18 da Mahr. A medição foi realizada na direção perpendicular à direção de corte, com três repetições para cada teste realizado e *cut-off* de 0,8.

A influência dos parâmetros avaliados foi realizada através do software comercial Minitab® 17.0, onde a opção de cálculo para a taxa de sinal ruído (*S/N ratio*) foi “menor é melhor”. Foram também realizadas análises de variâncias (ANOVA), com nível de confiança de 95%, para os dados de qualidade superficial, R_a e R_t , e também para os dados de potência, emissão acústica e vibração.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de qualidade superficial são apresentados, através dos valores de R_a e R_t , nas figuras 3 e 4, respectivamente.

Na Figura 5, podem ser encontrados os efeitos principais (*main effects*) para as médias (*means*) e os efeitos principais para a taxa sinal ruído (*SN ratio*), encontrados pelo método de Taguchi, para a resposta R_a .

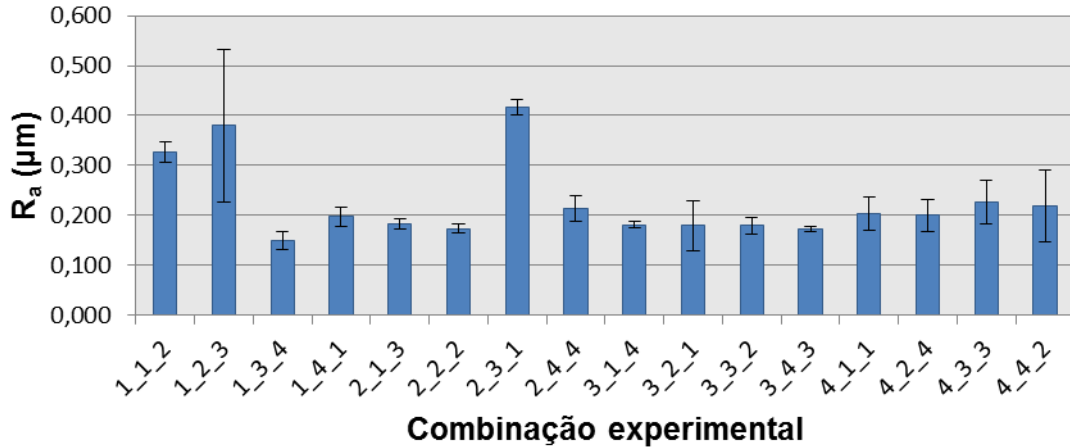


Figura 3 – Valores de rugosidade Ra.

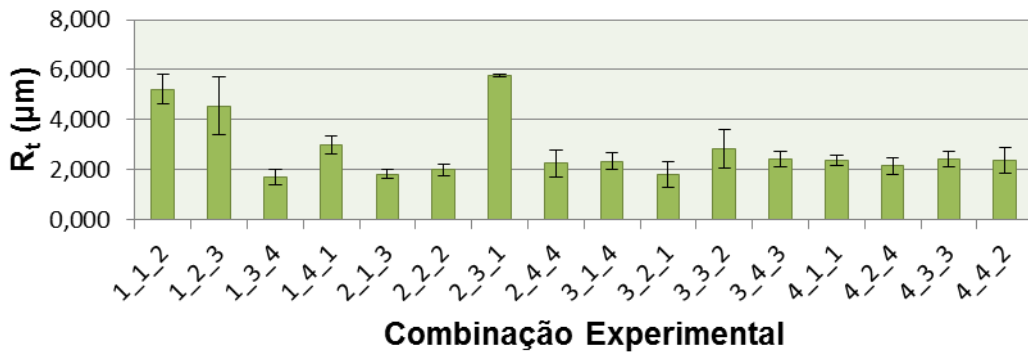


Figura 4 – Valores de rugosidade Rt.

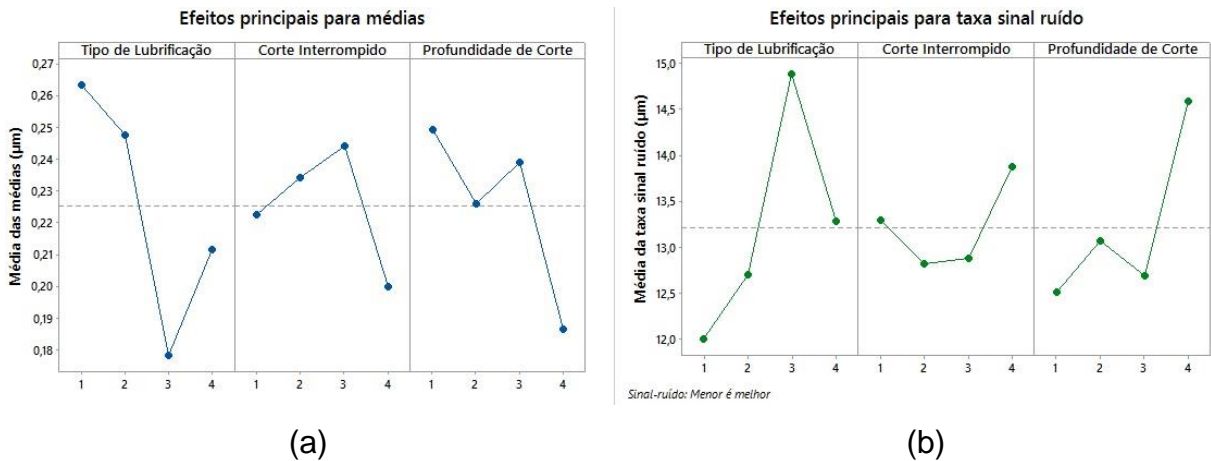


Figura 5 – a) Efeitos principais nas médias, em µm, e b) no sinal ruído (SN ratio) para os valores de Ra.

A análise dos efeitos principais para as médias pode levar a conclusão de que a mudança de nível de um fator exerceu influência nos resultados de Ra, resultado

este explicado pelo afastamento dos pontos à linha tracejada (Figura 5 (a) e (b)) que representa a média das médias. No entanto, a mudança de níveis dos fatores Tipo de Lubrificação, Geometria Interrompida e Espessura de Corte Equivalente não demonstrou influência significativa na resposta R_a , conforme demonstram os resultados da ANOVA, com nível de confiança de 95% ($\alpha=0,05$), encontrados na Tabela 3.

As mesmas conclusões foram obtidas para a resposta de qualidade superficial R_t .

Tabela 3 – Análise de variância para resposta R_a .

Fator	Graus de Liberdade (GL)	f-value ₀	p-value
Tipo de Lubrificação	3	0,42	0,745
Corte Interrompido	3	0,07	0,972
Espessura de Corte Equivalente	3	0,34	0,801
Erro residual	6	-	-

A variável resposta Potência também não foi influenciada pela mudança de níveis do fator Tipo de Lubrificação (f-value₀ = 2,90), do fator Corte Interrompido (f-value₀ = 0,72) e nem pela mudança de nível do fator Espessura de Corte Equivalente (f-value₀ = 1,27). Isto pode ser concluído, pois nenhum dos valores de f (f-value₀) ultrapassaram o valor de f crítico, que para $\alpha=0,05$ com 3 graus de liberdade para o fator e 6 para o erro é de f-value_{crit} = 4,76. Na Figura 6 encontram-se os efeitos principais nas médias para a resposta Potência, de acordo com o método de Taguchi.

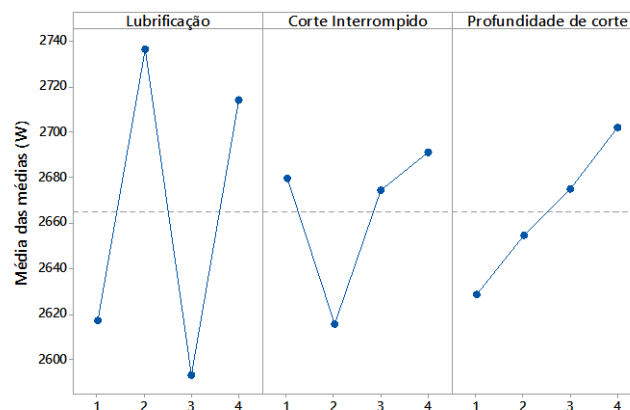


Figura 6 – Efeitos principais na média de Potência de usinagem, em watts.

Com relação à Emissão acústica, a mudança de nível da Espessura de Corte Equivalente ($f\text{-value}_0 = 2,76$) não foi significativo com relação aos efeitos na emissão. O Tipo de Lubrificação se mostrou significativo ($f\text{-value}_0=5,08$) e pode-se considerar que o Corte Interrompido exerceu influência na emissão ($f\text{-value}_0 = 4,08$), pois seu valor de f se aproximou muito ao valor crítico de $f\text{-value}_{\text{crit}} = 4,76$. Na Figura 7 encontram-se os efeitos principais na média para a Emissão Acústica.

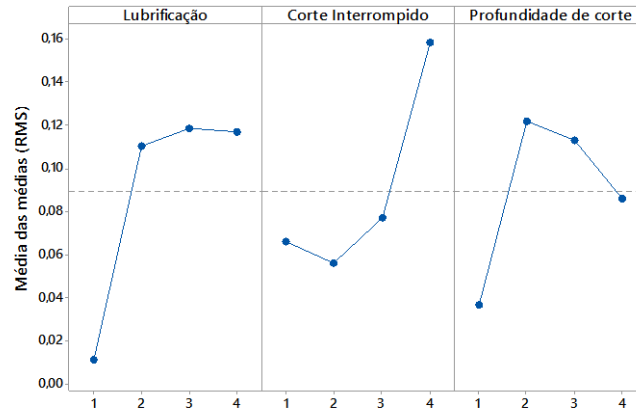


Figura 7 – Efeitos principais nas médias para Emissão Acústica, em RMS.

Para a variável resposta Vibração, somente a mudança do Tipo de Lubrificação se mostrou significativo ($f\text{-value}_0 = 1131,39$). Os fatores Corte Interrompido ($f\text{-value}_0 = 1,28$) e Espessura de Corte Equivalente ($f\text{-value}_0 = 1,62$) não mostraram significância nos efeitos de vibração. Na Figura 8 encontram-se os efeitos principais na média para a resposta Vibração.

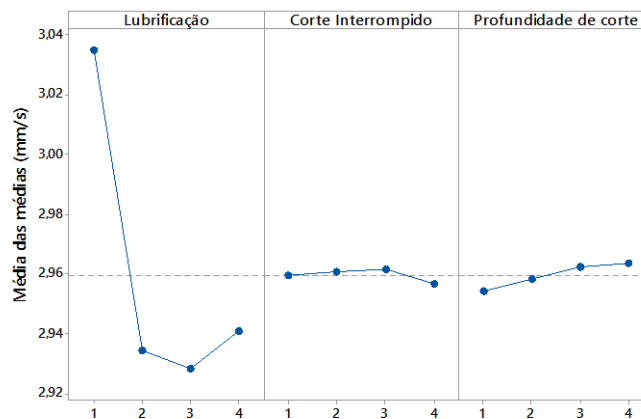


Figura 8 – Efeitos principais nas médias para Vibração, em mm/s.

CONCLUSÕES

O tipo de lubrificação teve efeitos significativos nas variáveis Emissão Acústica e Vibração. Já o fator Corte Interrompido teve influência na emissão acústica.

Pode-se concluir que a substituição da lubrificação convencional pelo MQL é possível quando se analisa a qualidade superficial das peças usinadas, uma vez que a mudança de níveis no tipo de lubrificação não demonstrou diferença significativa nos valores obtidos de R_a e R_t , dentro da faixa de parâmetros de retificação plana explorados neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CAPES pela bolsa de doutorado, ao CNPQ, processo número 473583/2013-5, e a FAPESP pelo financiamento para a compra dos materiais e equipamentos necessários a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- (1) ALVES, M. C. DE S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. DE. Influência da lubrificação na qualidade superficial de metais retificados. **REM. Revista Escola de Minas**, v. 64, p. 505–512, 2012.
- (2) KURT, M.; KÖKLÜ, U. Minimization of the shape error in the interrupted grinding process by using Taguchi method. **Mechanika**, v. 18, n. 6, p. 677–682, 2012.
- (3) SILVA, L. R. DA; BIANCHI, E. C.; FUSSE, R. Y.; et al. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant-MQL in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 2, p. 412–418, 2007.
- (4) BARCZAK, L. M.; BATAKO, A. D. L.; MORGAN, M. N. A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 11, p. 977–985, 2010. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.07.005>>. .
- (5) ALBERDI, R.; SANCHEZ, J. A.; POMBO, I.; et al. Strategies for optimal use of fluids in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 6, p. 491–499, 2011. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.02.007>>. .
- (6) EUZÉBIO, Carlos Danilo Gaioli. Uma contribuição da aplicação de modelos fuzzy empregados na detecção da queima de peças na retificação plana. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.
- (7) HADAD, M. J.; TAWAKOLI, T.; SADEGHI, M. H.; SADEGHI, B. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 54-55, p. 10–17, 2012. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.11.010>>.

(8) HADAD, M.; SADEGHI, B. Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 63, p. 1–15, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695512001332>>. Acesso em: 9/4/2015.

(9) SILVA, L. R.; CORRÊA, E. C. S.; BRANDÃO, J. R.; DE ÁVILA, R. F. Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **Journal of Cleaner Production**, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652613000383>>. .

(10) RAZUK, Henrique Cotait. **Transferência de calor inversa do método convencional e do otimizado de lubri-refrigeração na retificação plana tangencial**. 2014. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.

(11) BATAKO, A. D. L.; TSIAKOUMIS, V. An experimental investigation into resonance dry grinding of hardened steel and nickel alloys with element of MQL. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, n. 1-4, p. 27–41, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-6380-8>>.

(12) TAWAKOLI, T.; HADAD, M. J.; SADEGHI, M. H.; et al. An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 12-13, p. 924–932, 2009.

Grinding study of 4340 quenched and tempered steel with interrupted geometry and different lubrication types through Taguchi's method

ABSTRACT

Grinding requires the use of lubricating fluids, which conventionally an emulsion of oil and water is released in abundance on the piece, emulsion that has high economic and disposal costs. This fact promoted the search for alternative lubrication methods, in which minimum quantity of fluid (MQF) appears as an option. This work studied the 4340 quenched and tempered steel flat grinding, searching the interrupted cutting influence in the process and evaluating the substitution of conventional lubrication method with MQF. Evaluations of types of lubrication, interrupted cutting and specific cutting deep influence were made through a L₁₆ Taguchi's orthogonal array. Also were evaluated potency, vibration and acoustic emission during the grinding process as well as the superficial quality of the machined pieces. The change of conventional lubrication system by MQF has effects in acoustic emission and vibration, which did not happened with superficial quality. It has been conclude that MQF is a possible substitute for conventional grinding lubrication without loss of superficial quality.

Key-words: Potency, acoustic emission, vibration, roughness, flat grinding