

CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE E DA TENSÃO RESIDUAL DO AÇO ABNT 4340 ENDURECIDO APÓS RETIFICAÇÃO UTILIZANDO DIFERENTES FLUIDOS DE CORTE

Davi Alves da Silva, davialvesdasilvaa@yahoo.com.br
Leonardo Roberto da Silva, lrsilva@deii.cefetmg.br
Francisco Vieira dos Santos, francisco.cefetmg@gmail.com
Fernando Júnio Duarte, fernandojunioduarte@ufmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG - Campus I - Departamento de Engenharia de Materiais - DEMAT, Avenida Amazonas, 5253, Nova Suíça. Belo Horizonte, MG, Brasil

Resumo: A caracterização da topografia de superfícies de engenharia é muito importante em aplicações envolvendo atrito, lubrificação e desgaste. Embora a grande maioria das superfícies seja especificada por parâmetros 2D, muitas vezes eles não são suficientes para caracterizar uma superfície. Nota-se um amplo esforço por parte dos fabricantes e da comunidade científica em desenvolver parâmetros e metodologias com o intuito de caracterizar as superfícies para uma aplicação funcional específica. No processo de retificação, as elevadas temperaturas ocorrem devido à remoção de material e são geradas tensões residuais na superfície usinada, afetando o comportamento mecânico do material. O desempenho da retificação depende das condições de lubri-refrigeração, evitando o superaquecimento da peça que poderá interferir na sua integridade superficial. Nesse sentido, este trabalho visa caracterizar por meio dos parâmetros funcionais (K_p , R_k , R_{pk} , R_{vk}), do parâmetro estatístico (R_{ku}), da rugosidade (R_a) e da tensão residual o comportamento da superfície do aço ABNT 4340 endurecido após a retificação de mergulho utilizando diferentes fluidos de corte (Mix - 50% fluido integral a base de óleo mineral e 50% óleo de soja; fluido integral a base de óleo mineral e fluido de corte sintético), bem como a utilização da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). Em geral, os resultados viabilizaram a utilização do fluido Mix seguido pelo MQL, pois os mesmos apresentaram as maiores tensões residuais de compressão, sendo esta benéfica para a superfície atuando como inibidora da nucleação e propagação de trincas. Em relação aos parâmetros funcionais, o fluido de corte integral obteve melhor desempenho, devido este fluido permitir maior poder de lubrificação em relação aos demais fluidos utilizados. Conclui-se que, os resultados possibilitam o uso do fluido Mix e da técnica de MQL como alternativa ao uso do fluido de corte sintético.

Palavras-chave: retificação, fluidos de corte, integridade superficial, parâmetros de superfície, tensão residual.

1. INTRODUÇÃO

A demanda cada vez mais crescente por maior eficácia e confiabilidade das peças mecânicas, levam os fabricantes de produtos manufaturados a um maior entendimento dos processos de usinagem e dos pares tribológicos presentes no contato entre duas superfícies. Dessa forma, as propriedades de contato entre as superfícies estão cada vez mais importantes, sendo a rugosidade e a topografia duas propriedades de superfície de grande importância (Sedlacek et al, 2009).

De acordo com Sedlacek et al (2009), para a elaboração de um projeto adequado de superfícies em contato é muito importante compreender os parâmetros funcionais de rugosidade de uma superfície com o intuito de verificar quais são as influências do atrito e do desgaste no desempenho final da peça em serviço.

A grande preocupação da área tribológica e da engenharia de superfície é com as superfícies em contato e com a diminuição da taxa de desgaste. Esse fato tem sido alvo de muitos trabalhos na área científica. Com isso, uma grande gama de processos de usinagem, especialmente os processos de acabamento de retificação e brunimento são analisados quanto ao seu potencial de gerar uma camada superficial que se adapta às questões tribológicas nas quais a peça seja submetida (Goeke et al, 2014).

Nesse caso, o processo de retificação é de grande relevância para indústria de manufatura, pois garante aos componentes mecânicos um elevado grau de tolerâncias dimensionais e geométricas quando comparado com as operações de usinagem (como fresamento, torneamento, furação dentre outras). Porém, o processo é de baixa eficiência devido um elevado consumo de energia ser revertido em uma baixa taxa de remoção de material, se comparado com as operações de usinagem citadas anteriormente (Machado et al, 2009). Também, as elevadas temperaturas que ocorrem devido à remoção de material, podem gerar diversos tipos de danos térmicos à peça. Dentre esses danos pode-se citar: transformações microestruturais, tensões residuais de tração desfavorável, aquecimento superficial e subsuperficial da peça, reduzindo o limite de resistência à fadiga do componente usinado (Malkin, 1989).

As tensões residuais em superfícies de componentes é um fator importante em relação ao comportamento dos materiais em aplicações de engenharia. Quando tensões residuais estão presentes em um componente, elas podem

impactar positivamente ou negativamente o comportamento do componente em serviço. Os impactos negativos da tensão residual podem incluir trincas ou distorções depois da têmpera e variação dimensional durante a usinagem. No entanto, tensões compressivas podem melhorar significativamente o desempenho em serviços tal como: aumento da vida em fadiga sobre condições cíclicas de carregamento e atuar como inibidora a nucleação e propagação de trincas (Martell, Liu e Shi, 2014).

Os fluidos de corte são tradicionalmente utilizados como um meio externo para melhorar o desempenho do processo de retificação, fornecendo lubrificação e o arrefecimento na interface rebolo/peça. Sua eficiência na retificação depende da velocidade e quantidade de fluxo, direção de aplicação, design do bocal, entre outros fatores (Silva, Bianchi e Aguiar, 2001).

Na tecnologia MQL, a função lubrificante é garantida pelo óleo e a função de arrefecimento é proporcionada principalmente pelo ar comprimido. Esta pequena quantidade de fluido é suficiente para reduzir atrito no corte, diminuindo a tendência de adesão dos materiais e isso faz da tecnologia uma alternativa interessante, uma vez que combina a funcionalidade de arrefecimento com um consumo muito baixo de fluidos (Hadad e Sadeghi, 2013).

O propósito deste trabalho é caracterizar e comparar os parâmetros de superfície (R_a , R_{ku} , R_{pk} , R_k , R_{vk} , K_p) e tensão residual, com a influência dos diferentes parâmetros e fluidos de corte no processo de retificação de mergulho do aço ABNT 4340 temperado e revenido, com a finalidade de proporcionar alternativas para melhoria do processo e colaborar para uma produção ecologicamente correta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido baseando-se em ensaios de retificação por mergulho realizados em uma retificadora cilíndrica universal, marca *TosHostivar*, com potência equivalente a 9 kW, e rebolo convencional de óxido de alumínio (Al_2O_3), com as seguintes dimensões e características: (355,6 x 50,8 x 127 mm - FE 38A60KV). A escolha deste rebolo deve-se ao fato do mesmo apresentar características que permitem a retificação de aços que possuem alta resistência à tração e elevada dureza.

A operação de dressagem do rebolo foi realizada no início de cada ensaio. Utilizou-se um dressador conglomerado de diamante preso a um suporte, que faz parte dos acessórios da retificadora. O objetivo da dressagem é manter a agressividade do rebolo, eliminando os grãos abrasivos gastos e os cavacos de material incrustados entre os grãos, manter as formas geométricas (perfis) do rebolo e produzir peças dentro das dimensões e rugosidades de projeto, além de evitar a ocorrência de altas temperaturas na interface da peça/rebolo.

O material utilizado nos experimentos foi o aço ABNT 4340 temperado e revenido (dureza média de 52 HRC), com diâmetro inicial de 37 mm e comprimento retificado de 42 mm conforme mostra a Fig. (1).

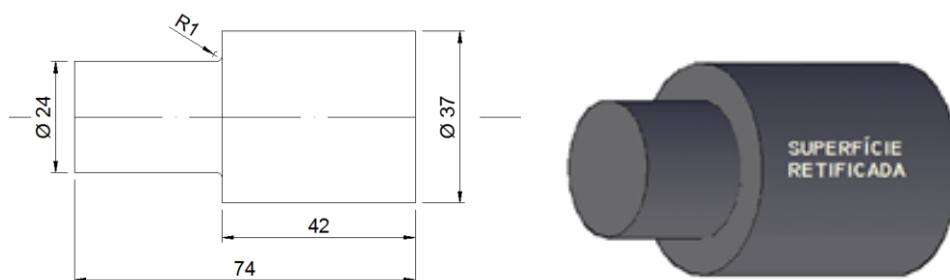


Figura 1. Representação dos corpos de prova utilizados nos experimentos.

A composição química do aço ABNT 4340 utilizado como corpos de prova é apresentada na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química (em %) do aço ABNT 4340.

C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	V	Fe
0,4	0,7	0,007	0,35	0,001	0,78	1,74	0,24	0,015	0,05	0,01	0,01	Balanço

Os parâmetros de usinagem utilizados foram: velocidades de mergulho (V_i) de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min; volume de material retificado da peça de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$; $12,64 \times 10^3 \text{ mm}^3$ e $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$; rotação da peça (η) de 155 rpm; tempo de centelhamento - *spark out* (t_s) de 6s e 10s; profundidade de dressagem (a_d) de 0,05 mm (10 passadas) e velocidade de dressagem de 2,7 mm/s.

Foram utilizados quatro tipos de fluido de corte no processo de retificação das amostras, sendo três tipos aplicados pelo método convencional e um tipo pelo método de mínima quantidade de lubrificante (MQL) com um bocal devidamente preparado para este tipo de aplicação.

Os fluidos de corte utilizados no método de lubri-refrigeração convencional foram: o Mix (50% fluido integral à base de óleo mineral e 50% óleo de soja); fluido integral a base de óleo mineral MecaFluid 14 SC do fabricante Petronas Lubrificante e o fluido de corte sintético Southcool RU 20 do fabricante Southquin. A vazão dos fluidos de corte no método convencional foi de 12L/min. Para o método de mínima quantidade de lubrificante (MQL) utilizou-se um equipamento aplicador Accu-Lube fornecido pela ITW - Chemical Products Ltda, utilizando fluido LB 1000 fornecido pelo fabricante do equipamento, sendo que a vazão do ar foi regulada para 36 m³/h a uma pressão de 5 Kgf/cm². A vazão do lubrificante foi regulada para 105 mL/h.

A matriz de experimentos foi realizada com base em quarenta e oito corpos de prova conforme Tab. (2).

Tabela 2. Matriz dos corpos de prova ensaiados.

FLUIDOS DE CORTE								
	MIX1				INTEGRAL			
Velocidade de mergulho (mm/min)	1,2		0,6		1,2		0,6	
Volume de material retificado (10 ³ x mm ³)	Teste	Réplica	Teste	Réplica	Teste	Réplica	Teste	Réplica
1,93	CDP1	CDP4	CDP7	CDP10	CDP13	CDP16	CDP19	CDP22
12,64	CDP2	CDP5	CDP8	CDP11	CDP14	CDP17	CDP20	CDP23
21,82	CDP3	CDP6	CDP9	CDP12	CDP15	CDP18	CDP21	CDP24

FLUIDOS DE CORTE								
	SINTÉTICO				MQL			
Velocidade de mergulho (mm/min)	1,2		0,6		1,2		0,6	
Volume de material retificado (10 ³ x mm ³)	Teste	Réplica	Teste	Réplica	Teste	Réplica	Teste	Réplica
1,93	CDP25	CDP28	CDP31	CDP34	CDP37	CDP40	CDP43	CDP46
12,64	CDP26	CDP29	CDP32	CDP35	CDP38	CDP41	CDP44	CDP47
21,82	CDP27	CDP30	CDP33	CDP36	CDP39	CDP42	CDP45	CDP48

Com o intuito de avaliar a magnitude e orientação das tensões residuais geradas durante as condições de usinagem sob estudo, foi realizada a medição de tensões residuais através da técnica de múltiplas exposições por difração de raio-X. O método utilizado para o cálculo dos valores nominais foi o de $\sin^2\psi$ baseado na lei de Bragg. Logo para cada difratograma, variou-se ψ de 0 a 40° sendo (0, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40°) os ângulos utilizados. Utilizou-se um difratômetro de Raios X (RDX-7000) da fabricante SHIMADZU, com as seguintes características: tubo de Raios X (Alvo de Cromo e comprimento de onda de aproximadamente 2,291 Angstrom) com tensão de 30,0 (kV) e corrente de 40,0 (mA).

As sequências utilizadas foram: Faixas 2 θ de 140 a 160 graus para um plano (211) do plano ferrita-martensita, usando módulo de elasticidade de 210 GPa e coeficiente de Poisson de 0,30. A velocidade de varredura foi de 2°C/min com passos de 0,1 graus e tempo de exposição de 3 segundos. De acordo com a norma ASTM E2860 - Método de teste padrão para medição de Tensão Residual por Difração de Raios X - ao realizar medições de tensão residual em aços martensíticos, o alvo Cr K α é tipicamente usado com o plano {211} com um ângulo 2 θ de aproximadamente 154 a 157°. Utilizou-se 2 θ = 156,1°.

Na caracterização dos parâmetros de superfície, utilizou-se um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-301 de acordo com as normas JIS 2001 e DIN 4776, com comprimento de amostragem “cut-off” de 0,8mm. As medições dos corpos de prova retificados foram realizadas em quatro posições radiais e equidistantes a 90° aproximadamente. Foram utilizados dispositivos adequados para uma maior precisão. Os parâmetros avaliados foram coeficiente de simetria (Rku), altura reduzida do pico (Rpk), profundidade rugosidade do núcleo (Rk), altura reduzida do pico (Rvk), coeficiente de vazão (Kp) e rugosidade média (Ra).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados, concernente às condições de corte e de lubri-refrigeração encontrados na retificação cilíndrica de mergulho do aço ABNT 4340 temperado e revenido para a caracterização dos parâmetros funcionais (R_{pk} , R_k , R_{vk} , K_p), do parâmetro estatístico (R_{ku}), da rugosidade média (R_a) e da tensão residual. Devido às limitações do rugosímetro *Mitutoyo* SJ-301 não foi possível gerar a curva de Abbott-Firestone.

3.1 Coeficiente de Simetria - Altura Reduzida do Pico (R_{pk})

A Figura (2) (a) e (b) mostra os resultados de R_{pk} para os diferentes fluidos de corte e velocidades de mergulho de 0,6 e 1,2 mm/min respectivamente, nos diferentes volumes de material retificado.

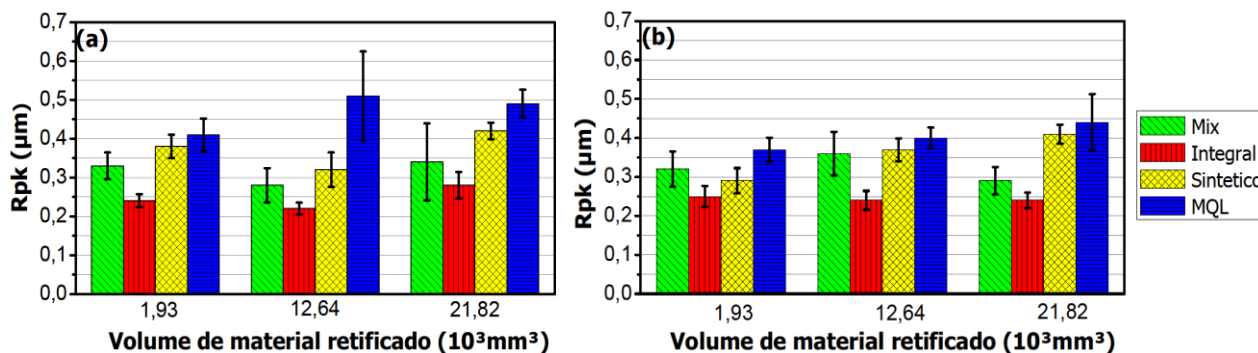


Figura 2. Coeficiente de simetria R_{pk} em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte nas velocidades de (a) 0,6 mm/min e (b) 1,2 mm/min.

Analisando a Fig. (2a), os maiores valores R_{pk} foi utilizando o fluido MQL e o menor valor foi para o volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Comparando o MQL com os demais fluidos de corte, pode-se dizer que a superfície retificada utilizando este fluido terá um desgaste inicial mais acentuado devido à superfície gerada possuir picos mais elevados. Na análise de R_k os maiores valores encontrados também foram para o MQL, e conforme a curva de Aboutt, à medida que o valor de R_k aumenta o valor de R_{pk} tende a aumentar. Na condição de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$, MQL é compatível com o fluido de corte sintético.

O fluido integral obteve-se os menores valores de R_{pk} em todas as condições de retificação. Na retificação por mergulho utilizando este fluido, a superfície gerada terá picos menos acentuados em relação aos demais fluidos de corte e provavelmente superfícies que vão trabalhar em contato o desgaste inicial será menor. E de acordo com Stout (2000), os processos de manufatura nos quais produzem pequenos valores de R_{pk} são os mais apropriados para obter informações das propriedades de amaciamento onde a geometria da superfície é um fator preocupante. Portanto é interessante retificar utilizando o fluido integral pensado em propriedades de amaciamento de uma superfície.

Na retificação utilizando o fluido sintético e velocidade de mergulho de 1,2mm/min, conforme ilustrado na Fig.(2b), observa-se um aumento do valor de R_{pk} da menor para a maior quantidade de volume de material retificado. Verifica-se uma tendência de maiores valores de R_{pk} para os fluidos com menor eficiência em lubrificar, provavelmente o atrito gerado nessa condição ser maior e consequentemente o perfil produzido na superfície retificada apresentar picos mais pontiagudos.

3.2 Profundidade de Rugosidade do Núcleo (R_k)

A Figura (3) (a) e (b) apresenta a profundidade de rugosidade do núcleo R_k das análises feitas para cada condição de lubri-refrigeração Mix, integral, sintético e MQL em função do volume de material retificado.

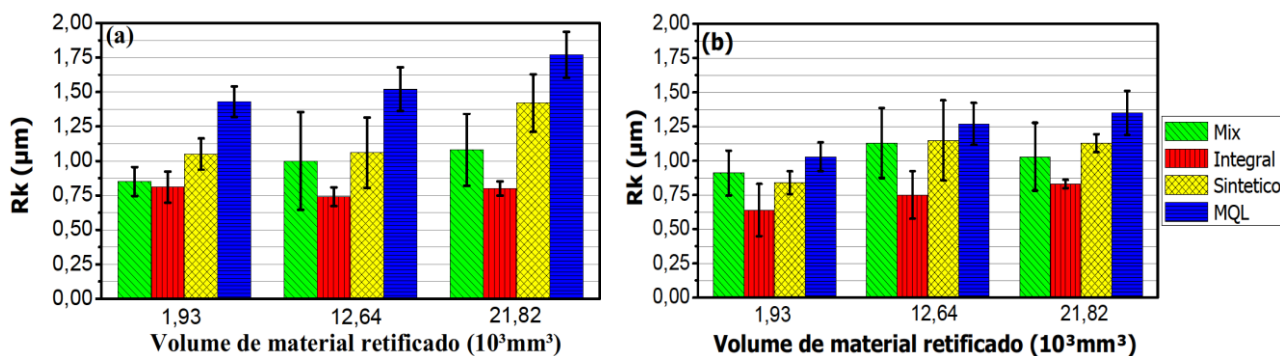


Figura 3. Profundidade de rugosidade do núcleo Rk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte nas velocidades de (a) 0,6 mm/min e (b) 1,2 mm/min.

No geral, nota-se que os menores valores de Rk foram verificados utilizando o fluido integral seguido pelo Mix, sintético e MQL. Os baixos valores de Rk indicam menor volume de vazios no que diz respeito ao contato entre duas superfícies. Observando a Fig. (3) (a) e (b), percebe-se uma tendência do aumento do valor de Rk do menor para o maior volume de material retificado. Entretanto, o volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$, são condições mais usuais no chão de fábrica já que a profundidade de penetração do rebolo nessa condição é de 0,40mm no diâmetro. Sendo assim, as condições normais de retificação oferecem menores valores de Rk, consequentemente uma superfície com um perfil mais achatado. Já os volumes de material retificado de 12,64 e $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$, são condições mais críticas, ou seja, não usuais no dia-a-dia, onde temos uma penetração do rebolo de 2,8 e 5,2 mm no diâmetro respectivamente. Superfícies em contato e que foram retificadas nessas condições, apresentarão um maior volume de vazios, podendo apresentar um maior desgaste inicial.

Verifica-se que, no volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ condição normal de retificação, houve uma tendência na diminuição do Rk com o aumento da velocidade de mergulho. Observando esse fator em operações de contato, é possível gerar superfícies com perfil platafórmico com uma elevada resistência mecânica e uma alta capacidade de suportar cargas.

Analisando duas superfícies trabalhando em contato que foram retificadas utilizando MQL, o volume de vazios entre essas duas superfícies serão maiores do que duas superfícies em contato retificadas com um fluido integral. No entanto, sendo esse volume de vazios elevado, provavelmente o contato ou apoio entre essas duas superfícies vão ser menores e pensando em desgaste, provavelmente o desgaste entre essas duas superfícies serão mais acentuados já que terão uma maior facilidade em desgastar devido a esse menor contato.

Comparando os valores de Rk e Rpk, nota-se que o fluido de corte integral obteve os melhores resultados, ou seja, os menores valores. Os resultados obtidos, estão de acordo com Petropoulos et al (2003) que analisaram a influência do processo de usinagem na relação dos parâmetros Rk e Rpk na curva de rolamento. E os resultados encontrados pelos autores mostram que quanto menor o valor de Rk, menor será o valor de Rpk, com isso menor será o desgaste na fase inicial de contato entre duas superfícies.

3.3 Altura Reduzida do Pico (Rvk)

A Figura (4) (a) e (b) apresenta o parâmetro funcional Rvk para os diferentes fluidos de corte nas velocidades de mergulho de 0,6mm/min e 1,2mm/min.

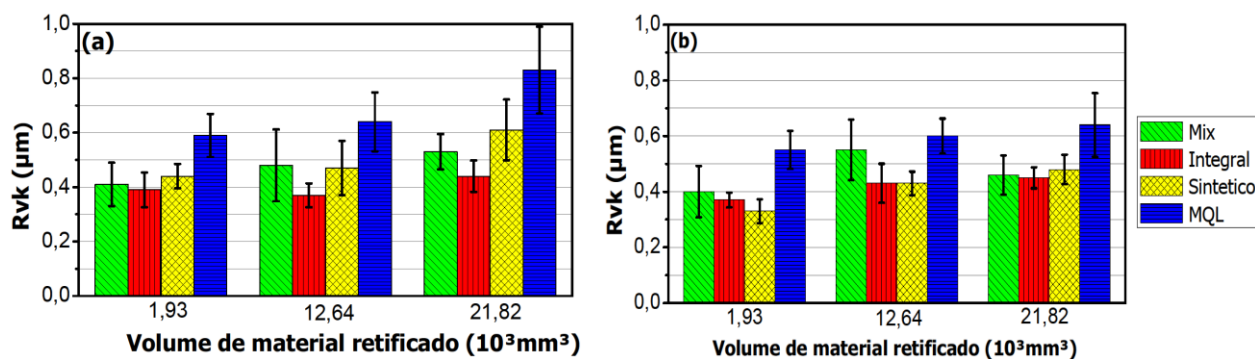


Figura 4. Altura reduzida do pico Rvk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte nas velocidades de (a) 0,6 mm/min e (b) 1,2 mm/min.

Observa-se que no geral, o comportamento do Rvk foi padrão, ou seja, com o aumento do volume de material retificado, ocorreu um aumento crescente de Rvk. Na Figura (4) (a), verifica-se que os menores valores de Rvk são para o fluido integral. Logo, valores baixos de Rvk indicaram que a superfície é de poucos vales e menor capacidade de reter lubrificante. MQL obteve elevados valores de Rvk e, possivelmente uma superfície retificada utilizando este fluido vai ter maior capacidade de reter lubrificante do que uma superfície retificada utilizando um fluido integral ou sintético. Houve uma tendência do crescimento de Rvk com o aumento do volume de material removido em ambas as velocidades de mergulho. Logo, altas taxas de material removido proporcionam uma superfície com mais vales e consequentemente maior capacidade de reter lubrificante.

Relacionando o parâmetro Rvk e o parâmetro Rpk, podemos obter informações sobre a fricção e o atrito entre duas superfícies em contato. Analisando os resultados obtidos nos testes, observa-se que os valores de Rvk são maiores que todos os valores de Rpk nas duas velocidades de mergulho e nos volumes de material retificado para os diferentes fluidos de corte. Contudo, percebe-se que a diferença entre Rvk e Rpk é mais acentuada para MQL seguido pelo fluido de corte integral. E quanto maior for o valor de Rvk em relação à Rpk menor será a fricção, o atrito e o desgaste entre duas superfícies em contato. Sedlacek et al (2009) relacionaram o desgaste da superfície do aço AISI 52100 com os parâmetros funcionais e descobriram que quanto maior for o valor de Rvk em relação ao Rkp menor será a fricção, o atrito e o desgaste entre duas superfícies em contato.

3.4 Coeficiente de Vazio (Kp)

A Figura (5) (a) e (b) apresenta os resultados de Kp para os diferentes fluidos de corte nas velocidades de mergulho de 0,6 e 1,2 mm/min, nos diferentes volumes de material retificado. Nota-se que no geral os valores de Kp não seguiram um comportamento padrão.

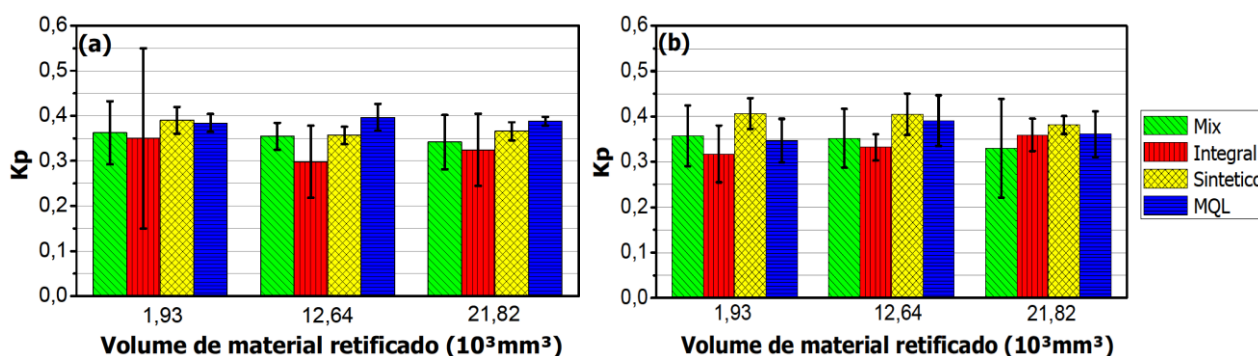


Figura 5. Coeficiente de vazio Kp em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte nas velocidades de (a) 0,6 mm/min e (b) 1,2 mm/min.

De acordo com a Fig. (5) (a) e (b), o menor valor encontrado para o coeficiente de vazio ocorreu com a utilização do fluido integral, volume de material retificado de $12,64 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Já, o maior valor obtido para o coeficiente de vazio ocorreu para o fluido sintético com volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ e $12,64 \times 10^3 \text{ mm}^3$, conforme Fig. (5) (b). Esse comportamento ocorreu devido ao fato do fluido de corte integral permitir maior poder de lubrificação em relação aos demais fluidos. Já para o fluido sintético observou-se comportamento contrário, uma vez que, esse fluido possui baixo poder de lubrificação e alto poder de refrigeração.

Comparando os resultados obtidos de Rk com os valores de coeficiente de vazio para o fluido de corte integral, percebe-se que nas mesmas condições analisadas de velocidade de mergulho e volume de material retificado, que os menores valores de Rk garantem os menores valores para o coeficiente de vazio.

No geral, o fluido de corte integral apresentou melhor desempenho, uma vez que, produziu uma superfície com menor coeficiente de vazio, e quanto menor o valor desse parâmetro, menor o volume de vazios na superfície, garantindo assim maior contato entre duas superfícies e menor será o desgaste sofrido por essa superfície. Os resultados obtidos, vão de encontro com Mattos (2009), que ao analisar uma superfície cilíndrica de motores a combustão interna, no qual é exigido excelente acabamento superficial, os menores valores de Rk resultam uma superfície com menor volume de vazios.

3.5 Coeficiente de Simetria (Rku)

A Figura (6) (a) e (b) apresenta os valores do parâmetro estatístico Rku com diferentes fluidos de corte para velocidades de mergulho de 0,6 e 1,2 mm/min e diferentes volumes de material retificado da peça.

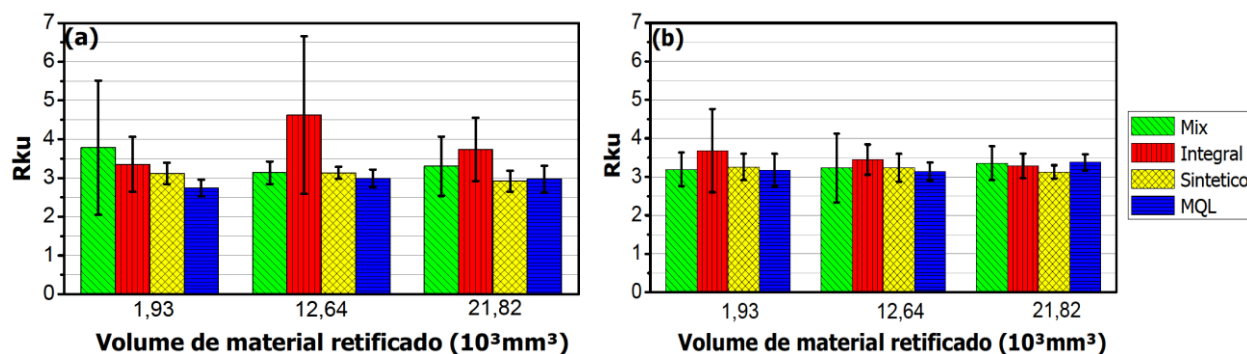


Figura 6. Coeficiente de simetria Rku em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte nas velocidades de (a) 0,6 mm/min e (b) 1,2 mm/min.

Observa-se que os valores de Rku não seguiram um comportamento padrão. No geral, MQL apresentou os menores valores de Rku em relação aos demais fluidos de corte, mesmo com o aumento do volume de material retificado. Analisando os resultados de Rku para MQL, verifica-se que houve um aumento nos valores de Rku com o aumento da velocidade de mergulho, mostrando provavelmente uma perda de eficiência desse fluido.

Nota-se que a dispersão nos valores de Rku utilizando o fluido sintético foi pequena de acordo com a Fig.(6) (b), no entanto verifica-se na Fig.(6) (a) que no maior volume de material retificado a dispersão foi maior com um pequeno decréscimo no valor de Rku. Isso mostra que em ambas as velocidades de mergulho e volume de material retificado, o fluido sintético manteve o mesmo desempenho, acarretando poucas variações nos valores de Rku.

De acordo com Fig. (6) (a), percebe-se que o fluido de corte integral não seguiu um comportamento padrão com relação aos volumes de material retificado e houve uma grande dispersão dos valores medidos. Contudo, na Fig. (6) (b) observa-se um comportamento padrão onde os valores de Rku foram decrescendo com o aumento de volume de material retificado, mesmo comportamento observado para o fluido sintético. Analisando a Fig. (6) (a), o fluido de corte Mix não manteve um comportamento padrão com o aumento do volume de material retificado. Já na Figura (6) (b) os valores de Rku aumentaram ligeiramente com o volume de material retificado seguindo um comportamento padrão.

Relacionando os resultados obtidos do parâmetro estatístico Rku e do parâmetro funcional Rpk, uma vez que, esses dois parâmetros analisam a presença de picos na superfície, observamos que MQL obteve melhores resultados para Rku, no entanto, o fluido de corte integral alcançou melhores resultados para Rpk.

3.6 Rugosidade (Ra)

A Figura (7) (a) e (b) apresenta os valores médios de rugosidade (Ra) com diferentes fluidos de corte para as velocidades de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min e volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$, $12,64 \times 10^3 \text{ mm}^3$ e $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Verifica-se que o fluido integral apresentou menor rugosidade em relação aos demais fluidos de corte em todos os três diferentes volumes de material retificado. Isso se deve ao fato de que, este fluido tem um excelente poder lubrificante. Consequentemente, o coeficiente de atrito é reduzido proporcionando menores forças de corte no processo de retificação, além de um oferecer um bom acabamento superficial.

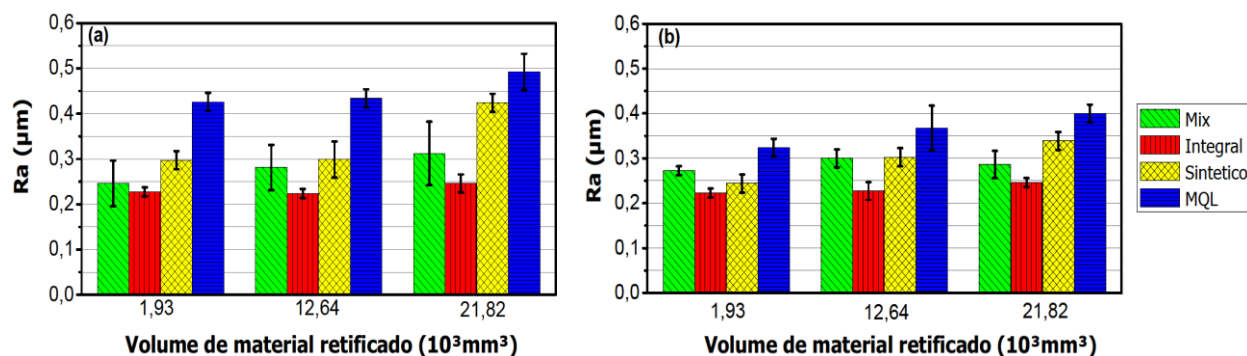


Figura 7. Rugosidade média Ra em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte nas velocidades de mergulho de (a) 0,6 mm/min e (b) 1,2 mm/min.

Os menores valores de rugosidade encontrados para os diferentes fluidos de corte foram para o volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$, mostrando que menor penetração do rebolo na operação de mergulho melhor será a rugosidade, resultados coerente com os obtidos por (Alves et al, 2009), onde afirma que menores taxas de remoção de material, menor será a rugosidade.

Observa-se, que a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL), proporcionou as maiores rugosidades, provavelmente pelo fluido não ter sido eficiente quanto à retirada de cavaco da zona de corte em relação aos demais fluidos de corte. Oikawa et al (2009), afirma que, na técnica MQL, o ar comprimido não é eficiente para a retirada de cavaco na zona de corte, ocorrendo a formação de uma “borra” com cavaco de difícil remoção e isto vem a afetar a rugosidade da peça. É importante destacar que, a vazão e a pressão do ar comprimido utilizado nos experimentos foram inferiores a indicação do fabricante do equipamento de MQL.

3.7 Tensão Residual

A Tabela (3) apresenta os valores de tensão residual para dois corpos de prova do mesmo material retificado ABNT 4340 utilizados na pesquisa, porém, as medidas de tensão foram realizadas antes de passar pelo processo de retificação.

Tabela 3. Valores de tensão residual.

Corpo de prova	Processo	Tensão residual de tração (MPa)
CDP 49	Torneado/não temperado	33
CDP 50	Têmperado/não retificado	262

As tensões residuais para os corpos de prova torneado apresentados na Tab. (3) são de tração, o que é prejudicial para o componente mecânico, pois tensão residual de tração tende a acelerar o processo de nucleação e propagação de trincas, diferentes das tensões nos CDPs retificados que foram todas de compressão. Leppert e Peng (2012) encontraram na camada superficial de um aço AISI 316L no processo de torneamento, todas as tensões residuais de natureza trativa. Navas, Gonzalo e Bengoetxea (2012), também encontraram tensões residuais de tração no torneamento de um aço AISI 4340 e nas condições de usinagem em que o calor gerado foi mais elevado à magnitude das tensões de tração tenderam a aumentar.

A Figura (8) (a) e (b) apresenta os valores de tensão residual com diferentes fluidos de corte para velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min e volume de material retificado da peça de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$; $12,64 \times 10^3 \text{ mm}^3$ e $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

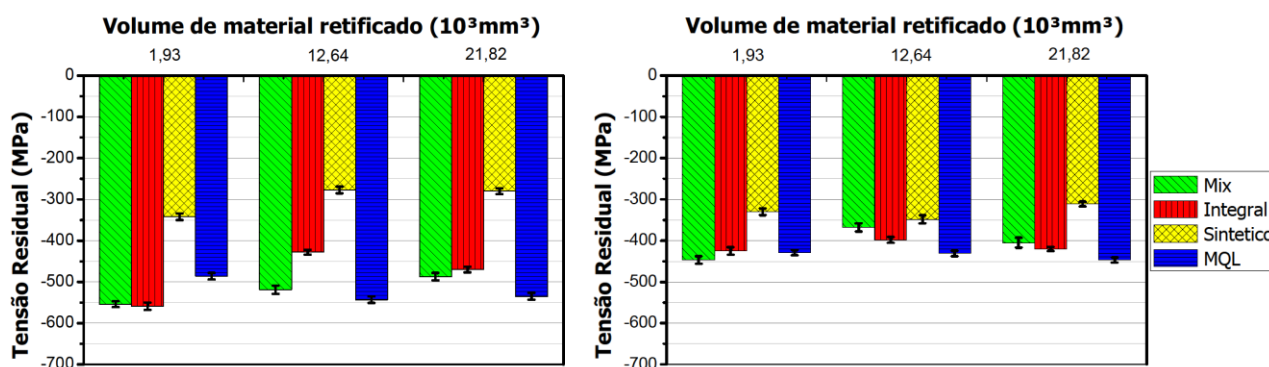


Figura 8. Tensão Residual em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte nas velocidades de mergulho de (a) 0,6 mm/min e (b) 1,2 mm/min.

Todas as tensões encontradas para as amostras retificadas foram tensões compressivas e estão de acordo com diversas literaturas. Reis et al (2010), estudou tensões residuais geradas na usinagem do aço AISI 4340 e para as amostras retificadas as tensões encontradas em seu estudo foram compressivas na direção transversal. Tensões residuais de compressão são benéficas, pois atuam como inibidoras a nucleação e propagação de trincas e aumenta a resistência à fadiga e à vida útil dos componentes.

Observa-se na Fig. (8) (a), que MQL apresentou valor da tensão residual de compressão de maior magnitude em comparação aos demais fluidos de corte nos volumes de material retificado de 12,64 e $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$, sendo este mesmo comportamento verificado na Fig. (8) (b). Analisando Fig. (8) (a) e (b), no geral, em ambas as velocidades de mergulho e volumes de material retificado, os menores valores de tensão residual de compressão foram encontrados para o fluido sintético. O fluido sintético tem um maior poder de refrigeração e dissipação de calor, e possivelmente menores temperaturas foram geradas no processo comparado aos demais fluidos de corte utilizados. De acordo com Fusse (2005), as dilatações térmicas na retificação são proporcionais às temperaturas geradas no processo e as tensões de compressão são geradas pela maior dilatação das camadas externas em relação às camadas mais internas.

Percebe-se no geral que em ambas as velocidades de mergulho e volume de material retificado, os fluidos Mix e integral por possuir mesma característica de poder lubrificante, tenderam a valores de tensão mais próximos uns dos outros e seguiram comportamento parecido. Já o fluido sintético e MQL com características de lubri-refrigeração diferentes, não seguiram comportamentos parecidos e os valores de tensão de um em relação ao outro foram dispersos.

Nota-se também que, em ambas as velocidades de mergulho as maiores tensões residuais de compressão geradas foram verificadas no menor volume de material retificado e que, na prática é interessante já que, este volume é o mais usual no processo de retificação onde o sobremetal é de 0,4mm e sendo as tensões compressivas benéficas ao processo.

4. CONCLUSÕES

Por meio do estudo dos parâmetros de superfície, rugosidade e da tensão residual na análise do aço ABNT 4340 temperado e revenido, conclui-se que:

- ✓ Pelo fato de ter ocorrido pequenas diferenças nos valores de rugosidade (Ra), MQL é uma alternativa considerável, diminuindo o uso de fluidos de corte na indústria, ocasionando redução no impacto de seu descarte e obtendo ainda, melhoria nas condições de trabalho dos operadores de chão de fábrica.
- ✓ Para o parâmetro Rpk os menores valores foram obtidos com a utilização do fluido integral em todas condições de retificação. Pequenos valores de Rpk são os mais apropriados para obter informações das propriedades de amaciamento.
- ✓ O parâmetro Rk foi influenciado pelo o aumento da velocidade de mergulho na condição normal de retificação, além disso, a condição utilizando MQL apresentou a menor eficiência entre os fluidos de corte analisados. Comparando os valores de Rk e Rpk, nota-se que o fluido de corte integral obteve melhor desempenho.
- ✓ Os maiores valores de Rvk foram alcançados utilizando MQL. Houve uma tendência do crescimento de Rvk com o aumento do volume de material removido em ambas as velocidades de mergulho.
- ✓ O menor valor encontrado para o coeficiente de vazio ocorreu com a utilização do fluido integral. Já o maior valor obtido, ocorreu para o fluido sintético. Esse comportamento ocorreu devido ao fato do fluido de corte integral permitir maior poder de lubrificação em relação aos demais fluidos. Comparando os resultados obtidos de Rk com os valores de coeficiente de vazio para o fluido integral, percebe-se que os menores valores de Rk garantem os menores valores para o coeficiente de vazio.
- ✓ Todas as tensões residuais encontradas para as amostras retificadas foram tensões compressivas. No geral, MQL levou a maiores tensões de compressão sendo benéfica ao componente usinado, seguido pelos fluidos Mix e integral que tiveram desempenhos bem parecidos. O fluido sintético apresentou menores tensões de compressão.
- ✓ No geral, os melhores resultados nos parâmetros avaliados, foram obtidos pelo fluido integral. Alternativo a este fluido, o Mix é interessante com bons resultados também nos parâmetros avaliados, além de possuir em parte uma formulação biodegradável. A técnica MQL é compatível com o fluido de corte sintético.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro de auxílio à pesquisa, pelas bolsas de Iniciação Científica e de Produtividade em Pesquisa. Ao CEFET-MG pelo financiamento da bolsa de mestrado e auxílio à pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Alves, M.C.S., Bianchi, E.C., Aguiar, P.R., Catai, R.E., 2009, “Influência na qualidade final de metais retificados através da variação da velocidade de mergulho”, Revista metalurgia e materiais, Vol. 62, Ouro Preto, No. 1, pp.65-71.
- Fusse, R.Y., 2005, “Estudo comparativo entre a lubri-refrigeração convencional e a MQL no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho”. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Bauru.
- Goeke, S., Biermann, D., Stickel, D., Stemmer, P., Fischer, A., Geenen, K., Huth, S., Theisen, W., 2014, “Enhancing the Surface Integrity of Tribologically Stressed Contacting Surfaces by an Adjusted Surface Topography”, Procedia CIRP 13, pp. 214-218.
- Hadad, M., Sadeghi, B., 2013. “Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy”, Cleaner Production. Dehaghan, pp. 332-343.
- Leppert, T., Peng, R.L., 2012, “Residual stresses in surface layer after dry and MQL turning of AISI 316L steel”, Production Engineering, Vol. 6, No. 4-5, pp. 367-374.
- Machado, A.R.et al., 2009, “Teoria da usinagem dos materiais”, Edgard Blucher Ltda, São Paulo, Brasil, 371 p.
- Malkin, S., 1989, “Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives”, 1th Edition. Dearborn, USA: Society of Manufacturing Engineers, 275 p.
- Martell, J.J., LIU, C.R., SHI, J., 2014, “Experimental investigation on variation of machined residual stresses by turning and grinding of hardened AISI 1053 steel”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 74, No. 9-12, pp. 1381-1392.

- Mattos, R.F.J., 2009, “Análise Topográfica da Superfície de Cilindro de Motores a Combustão Interna”, Dissertação (Mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná.
- Navas, V.G., Gonzalo, O., Bengoetxea, 2012, “Ion. Effect of cutting parameters in the surface residual stresses generated by turning in AISI 4340 steel”, International Journal Of Machine Tools & Manufacture. Guipuzcoa, pp. 48-57.
- Oikawa, M.H., Destro, R.S., Souza, R.M., Fugita, H., Simões, R.P., Bianchi, E.C., Aguiar, P.R., Sampaio, M. C., 2009, “Utilização da mínima quantidade de lubrificação (MQL) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho em cerâmicas com rebolos diamantados”, Congresso brasileiro de engenharia de fabricação, Belo Horizonte. Anais
- Petropoulos, G., Dasic, P., Vodolazskaya, N., Dramalis, D., 2003, “Is the Rk group of roughness parameters suitable to describe turned surfaces”, International Scientific Conference, Gabrovo.
- Reis, W. P. et al. 2010. “Estudo das tensões residuais geradas na usinagem de aço AISI 4340”, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Campos do Jordão, Anais.
- Sedlacek, M., Podgornik, B., Vizintin, J., 2009, “Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear”, Wear, Vol. 266, pp. 482-487.
- Silva, E.J.da, Bianchi, E.C., Aguiar, P.R.de A., 2001, “Review of Grinding Fluids - performances and management: Uma Revisão de Fluidos de Corte-Desempenho e Manutenção”, Revista de Ciência & Tecnologia, São Paulo, Vol. 18, No. 8, pp. 67-77.
- Silva, L. R. da et al., 2007, “Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant - MQL in grinding”, International Journal of Machine Tools & Manufacture. São Paulo, pp. 412-418.
- Stout, K. J., 2000, “Developments of methods of the characterization of roughness in three-dimensions”, Penton press, London.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

CHARACTERIZATION OF SURFACE PARAMETERS AND RESIDUAL STRESS OF ABNT 4340 HARDENED STEEL AFTER GRINDING USING DIFFERENT CUTTING FLUIDS

Davi Alves da Silva, davialvesdasilvaa@yahoo.com.br
Leonardo Roberto da Silva, lrsilva@deii.cefetmg.br
Francisco Vieira dos Santos, francisco.cefetmg@gmail.com
Fernando Júnio Duarte, fernandojunioduarte@ufmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG - Campus I - Departamento de Engenharia de Materiais - DEMAT, Avenida Amazonas, 5253. Nova Suíça. Belo Horizonte, MG, Brasil.

Abstract: The characterization of topography of engineering surfaces is very important in applications involving friction, lubrication and wear. Although the large part of surfaces are specified by 2D parameters, they are often not sufficient to characterize a surface. Note a large effort is made by manufacturers and the scientific community to develop parameters and methodologies in order to characterize the surfaces for a specific functional application. In the grinding process, high temperatures occur due to the removal of material and residual stresses are generated on the machined surface, affecting the mechanical behavior of the material. The grinding performance depends on the lubrication-refrigeration conditions, avoiding overheating of the part that may interfere with its surface integrity. In this sense, the aim of this work is to analyze the surface behavior of ABNT 4340 hardened steel after grinding using different cutting fluids (K_p , R_k , R_{pk} , R_{vk}) of the statistical parameter (R_{ku}) of the roughness (R_a) and residual stress (Mix - 50% mineral oil based mineral oil and 50% soy oil, mineral oil based synthetic fluid and synthetic cutting fluid), as well as the use of the Minimum Quantity of Lubricant (MQL) technique. In general, the results enabled the use of the Mix fluid followed by MQL, because they presented high residual stresses of compression, being this beneficial for the surface acting as inhibitor of nucleation and propagation of cracks. In relation the functional parameters, the integral cutting fluid obtained better performance, because this fluid allows larger lubrication power in relation to the other fluids used. It is concluded that the results allow the use of the Mix fluid and the MQL technique as an alternative to the use of the synthetic cutting fluid.

Palavras-chave: grinding, cutting fluids, surface integrity, surface parameters, residual stress.