

TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340 COM DIFERENTES SISTEMAS DE LUBRIFRIGERAÇÃO

Vinícius da Silva Rocha, viniciustavenida@hotmail.com¹
Pedro de Souza Camargo, pedrosceng@gmail.com¹
Danilo dos Santos Oliveira, unbdanilo@gmail.com¹
José Henrique de Oliveira, jhenrique.unb@gmail.com¹
Rhander Viana, rhanderviana@gmail.com¹

¹Universidade de Brasília, Campus-Gama, Área Especial de Indústria Projeção A, CEP: 72444-240

Resumo: Este trabalho consiste em uma análise do comportamento de um aço SAE 4340 durante o processo de torneamento. A escolha por esse aço foi feita por sua grande utilização em componentes mecânicos, principalmente na indústria automotiva. Na análise deste trabalho foram variados os parâmetros de corte (velocidade de corte, profundidade e avanço) por meio de um planejamento fatorial 2^3 no torneamento do aço SAE 4340, para verificar a resposta que o material tem a essas mudanças e a relação que essas variações têm entre si, aplicando ainda ao processo de usinagem o uso da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), aplicação de fluido de corte em abundância por jorro e torneamento a seco, sem uso de fluido de corte. Nos ensaios de potência apenas com a variação do avanço, a técnica de MQL teve um desempenho melhor do que no torneamento a seco, e igual na aplicação com jorro.

Palavras-chave: Torneamento, Aço SAE 4340, Planejamento Fatorial, MQL.

1. INTRODUÇÃO

A fabricação de peças é um dos processos mais difíceis de lidar dentro de um processo produtivo, por isso, foram desenvolvidos diversos métodos com o intuito de aumentar a qualidade das peças fabricadas. Dentro dessa diversidade de processos, os que possuem formação de resíduos são classificados como usinagem. Existem diversos tipos de usinagem e esse processo é extremamente importante para a fabricação de peças (Chiaverini, 1986).

O torneamento é um desses processos classificados como usinagem, e possui um aspecto muito importante em sua implementação, que é a lubrificação e/ou refrigeração durante o corte. Desenvolver tecnologias para melhorar o sistema de lubrificação é essencial, pensando nisso surgiu um sistema chamado de MQL, mínima quantidade de lubrificante, que além da economia de lubrificante oferece uma melhoria em aspectos como qualidade da superfície usinada, diminuição das forças de corte e aumento da vida da ferramenta com a diminuição do desgaste. Segundo Chiaverini (1986), além desses fatores, a aplicação de MQL visa diminuir a quantidade de resíduos despejados no meio ambiente.

Para a realização de um estudo relacionado à aplicação do sistema de lubrificação com mínima quantidade de lubrificante é necessário entender diversos aspectos relacionados a torneamento, como parâmetros de corte, tipos possíveis de lubrificação, maquinário utilizado e aspectos finais de uma peça torneada (Ferraresi, 1977).

Dessa forma, este documento apresenta um relato teórico sobre as condições de usinagem, enfatizando o processo de torneamento e também os diversos aspectos relacionados ao sistema de lubri-refrigeração, ressaltando principalmente as características do processo de lubrificação por MQL.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O procedimento feito neste trabalho tem o propósito de determinar a melhor condição de corte para o torneamento do Aço SAE 4340, utilizando diferentes sistemas de lubri-refrigeração, jorro, MQL e torneamento a seco. Para determinar essas condições foram utilizadas técnicas de aplicação de mínima quantidade lubrificante no torneamento do aço SAE 4340 e foram usadas técnicas sobre o planejamento fatorial 2^3 com a variação da velocidade de corte, profundidade de corte e avanço. Para a medição da rugosidade média da superfície torneada foi utilizado um rugosímetro, como inferência de uma variável de saída do planejamento fatorial 2^3 proposto, e foi utilizado ainda um sistema de aquisição de potência elétrica ativa para verificar a variação do sinal com a variação dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade).

A organização dos experimentos segue a seguinte ordem de ensaios: Ensaio de rugosidade e, em seguida, ensaio de potência elétrica ativa. Ambos utilizando os sistemas de lubri-refrigeração descritos abaixo:

- A seco - sem aplicação de fluido de corte;
- Jorro - com aplicação de fluido de corte em abundância;
- MQL - com aplicação de mínima quantidade de lubrificante (parafínico).

2.1. ENSAIO DE RUGOSIDADE

O objetivo do ensaio de rugosidade foi obter a rugosidade da superfície torneada, tanto a seco quanto com aplicação de MQL e jorro. Para a análise dos dados foi utilizado um planejamento estatístico a dois níveis (+1 e -1) e três variáveis de entrada - velocidade de corte (v_c), profundidade de corte (a_p) e avanço (f), gerando oito combinações de usinagem no torneamento cilíndrico externo. A Tabela (1) mostra as variáveis de entrada em dois níveis e a Tab. (2) as condições de corte dadas pelo planejamento fatorial 2^3 . As condições de corte foram estabelecidas dentro da faixa de trabalho do inserto de metal duro utilizado, conforme as especificações do fabricante: $v_c = 275$ a 425 m/min, $f = 0,15$ a $0,50$ mm/rot e $a_p = 0,5$ a $6,0$ mm.

Tabela 1. Variáveis de interesse em dois níveis para o planejamento fatorial 2^3 .

Variáveis	Nível (+)	Nível (-)
Velocidade de corte: v_c (m/min)	425	275
Avanço: f (mm/rot)	0,40	0,20
Profundidade de corte: a_p (mm)	2,0	1,0

Tabela 2. Matriz das condições de corte para o planejamento fatorial 2^3 .

Ordem de realização	Ensaio	v_c (m/min)	f (mm/rot)	a_p (mm)
1	1	425	0,20	1,0
4	2	275	0,20	1,0
3	3	425	0,40	1,0
2	4	275	0,40	1,0
5	5	425	0,20	2,0
7	6	275	0,20	2,0
6	7	425	0,40	2,0
8	8	275	0,40	2,0

O inserto de metal duro utilizado foi da classe P para aços, revestido de TiCN + Al₂O₃ + TiN por CVD fabricado pela Sandvik, especificação DNMG 15 06 08-PM 4225. A geometria da ferramenta de corte utilizada, tais como espessura (S), comprimento efetivo da aresta de corte (LE), raio de canto (RE) e diâmetro do círculo inscrito (IC), estão representadas na Fig. (1). A Tabela (3) indica as dimensões do inserto de metal duro utilizado.

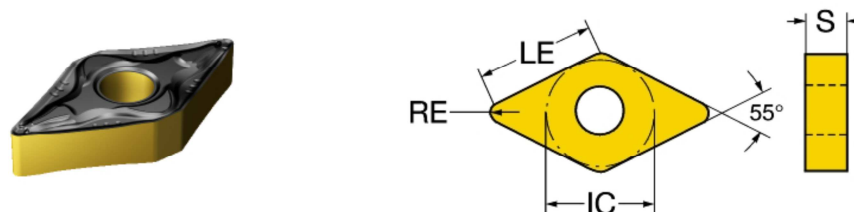


Figura 1. Geometria da ferramenta de corte (Fonte: Sandvik, 2017).

Para alojar o inserto de metal duro foi utilizado um suporte porta-ferramentas de aço endurecido PDJNL 2020K fabricado pela Sandvik. O inserto de metal duro, o porta-ferramentas e o torno CNC Diplomat Logic 195 VS utilizados no ensaio de rugosidade pertencem ao Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA.

Tabela 3. Dimensões da ferramenta de corte (Fonte: Sandvik, 2017).

Comprimento efetivo da aresta de corte - LE (mm)	Espessura da pastilha - S (mm)	Raio de canto RE (mm)	Diâmetro do círculo inscrito - IC (mm)
14,704	6,35	0,794	12,7

Após o torneamento do corpo de prova de aço SAE 4340, para cada condição de corte mostrada na Tab. (2), foram obtidos os parâmetros de rugosidade da superfície usinada, definidos como: Ra - desvio aritmético médio da superfície.

A medição do parâmetro de rugosidade Ra foi executada conforme recomendações da Norma NBR ISO 4287/2002 que define os termos para especificação da rugosidade. A norma utilizada na configuração do rugosímetro para aquisição dos parâmetros de rugosidade foi a ISO 1997 com comprimento de amostragem de 0,8 mm.

Foram realizadas três medições para cada parâmetro de rugosidade a 120° uma da outra, na direção transversal das linhas de avanço deixadas pela ferramenta de corte sobre o corpo de prova, a superfície era usinada e posteriormente era instalado o rugosímetro para fazer as respectivas medições. A ponta de rugosímetro tocava a superfície do corpo de prova uma única vez, para a aquisição das outras duas medições a peça era girada sem a retirada do rugosímetro.

A Figura (2) mostra como foram realizadas as medições de rugosidade, para cada condição de corte estabelecida na Tab. (2), foi torneado no corpo de prova de aço SAE 4340 um comprimento de usinagem de 15 mm. Todo o procedimento de medição de rugosidade foi repetido para as condições a seco, com aplicação de jorro e mínima quantidade de lubrificante (MQL).

Na medição dos parâmetros de rugosidade foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210 pertencente ao SENAI Ítalo Bologna localizado em Goiânia-GO.

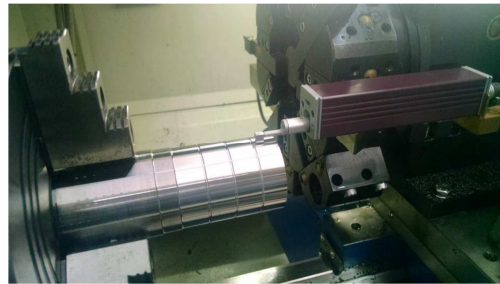


Figura 2. Medição do parâmetro de rugosidade Ra.

Na aplicação do método de mínima quantidade de lubrificante foi utilizado um nebulizador com dois bocais de aplicação, com variação de pressão de 0,5 a 6,0 bar, fabricado pela Quimatic, equipamento pertencente ao Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA. Somente um bocal de aplicação de MQL foi utilizado no ensaio com pressão de 5,0 bar e vazão de aproximadamente 120 ml/h, aplicado sobre-cabeça o mais próximo possível da ponta de corte da ferramenta.

2.2. ENSAIO DE POTÊNCIA ELÉTRICA ATIVA

Este ensaio teve como propósito obter a potência elétrica ativa durante o torneamento cilíndrico externo do aço SAE 4340, com aplicação de mínima quantidade de lubrificante, jorro e a seco, de acordo com as condições de corte mostradas nas Tabs. (4) a (6), onde se variou a velocidade de corte (v_c), o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p). Os valores que serão medidos para a potência ativa são valores RMS. As condições de corte dadas nas Tabs. (4) a (6) foram estabelecidas de acordo com as especificações de trabalho do inserto de metal duro utilizado, sempre dobrando o valor do parâmetro de corte analisado, v_c , (f) e a_p , com o intuito de destacar de forma mais clara possível a sua influência na potência elétrica ativa adquirida. Os valores dos parâmetros de corte são diferentes do ensaio de rugosidade para se poder trabalhar dentro do espectro da ferramenta de corte, espectro esse que é determinado pelo fabricante.

Tabela 4. Variação da velocidade de corte para o ensaio de potência ativa.

Velocidade de corte 1 (v_{c1})	200 m/min
Velocidade de corte 2 (v_{c2})	400 m/min
Velocidade de avanço (v_f)	200 mm/min
Profundidade de corte (a_p)	1,0 mm
Comprimento de usinagem (l)	50 mm
Tempo de usinagem em v_{c1}	20 segundos
Tempo de usinagem em v_{c2}	20 segundos

Tabela 5. Variação do avanço para o ensaio de potência ativa.

Avanço 1 (f_1)	0,2 mm/rot
Avanço 2 (f_2)	0,4 mm/rot
Velocidade de corte (v_c)	250 m/min
Profundidade de corte (a_p)	1,0 mm
Comprimento de usinagem (l)	50 mm

Tempo de usinagem para f1	12 segundos
Tempo de usinagem para f2	8 segundos

Tabela 6. Variação da profundidade de corte para o ensaio de potência ativa.

Profundidade de corte 1 (ap1)	1,0 mm
Profundidade de corte 2 (ap2)	2,0 mm
Avanço de corte (f)	0,2 mm/rot
Velocidade de corte (vc)	250 m/min
Comprimento de usinagem (l)	50 mm
Tempo de usinagem em ap1	12 segundos
Tempo de usinagem em ap2	12 segundos

A potência elétrica ativa foi adquirida por meio de um sistema de aquisição e processamento de dados composto por um sensor de efeito *Hall*, ligado em uma das fases do torno CNC para aquisição da corrente elétrica, e uma plataforma eletrônica de *hardware* livre com placa simples, Arduino®. O equipamento utilizado para aquisição da potência elétrica ativa foi desenvolvido pelo Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA.

Foram realizadas três medições de potência para cada condição de corte explicitada nas Tabs. (4) a (6), com variação da condição de lubrificação - a seco, jorro e MQL. A escolha da sequência de usinagem no torneamento foi realizada de maneira aleatória. Para o ensaio de potência elétrica ativa foi utilizado um corpo de prova de aço SAE 4340 com diâmetro inicial de 45 mm e 115 mm de comprimento total, sendo utilizados 50 mm para o torneamento, conforme Fig. (3).



Figura 3. Corpo de prova de aço SAE 4340 utilizado no ensaio de potência elétrica ativa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no ensaio de rugosidade foram agrupados e discutidos em dois itens: aspectos gerais da influência dos parâmetros de corte na rugosidade e análise estatística por Pareto e superfície de resposta.

3.1. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA RUGOSIDADE

A Tabela 7 mostra os resultados das medições do parâmetro de rugosidade R_a para as condições de corte dadas.

Tabela 7. Medições de R_a para as condições de corte.

Ordem	Ensaio	vc (m/min)	f (mm/rot)	aP (mm)	Ra(seco)	Ra(Jorro)	Ra(MQL)
1	1	425	0,20	1,0	5,8 μm	5,4 μm	5,7 μm
4	2	275	0,20	1,0	1,2 μm	1,4 μm	1,6 μm
3	3	425	0,40	1,0	1,2 μm	1,2 μm	1,6 μm
2	4	275	0,40	1,0	5,5 μm	5,6 μm	6,2 μm
5	5	425	0,20	2,0	1,3 μm	1,3 μm	1,5 μm
7	6	275	0,20	2,0	1,5 μm	1,4 μm	1,7 μm
6	7	425	0,40	2,0	5,6 μm	5,4 μm	5,5 μm
8	8	275	0,40	2,0	5,9 μm	6,0 μm	5,8 μm

Em ensaios experimentais, como estes realizados para medição da rugosidade, é comum que alguns valores medidos em certos experimentos extrapolem a tendência dominante. No entanto, conforme os resultados mostrados na

tabela supracitada, observa-se numa primeira análise que houve pouca dispersão das medições da rugosidade média (R_a), provavelmente, em virtude da maneira como os ensaios foram realizados, pois manteve-se a agulha do rugosímetro sempre apoiada no corpo de prova, rotacionando apenas o corpo de prova a cada 120° para as três medições em cada condição de corte dada na Tab. (2). Outro fator que corrobora para que a dispersão dos resultados seja pequena, é o próprio processo de corte utilizado. No torneamento, o processo de corte é contínuo, a ferramenta toca a peça uma única vez com parâmetros de corte controlados, e somente sai da peça quando o comprimento de usinagem pré-estabelecido é finalizado, evitando assim choques mecânicos intermitentes que poderiam causar pequenos lascamentos prematuros da aresta de corte da ferramenta ou um desgaste excessivo, que eventualmente causaria uma rugosidade acentuada.

Os gráficos anteriores também mostraram, estatisticamente, que para a rugosidade R_a , os três sistemas de lubrificação se equilibram. O melhor resultado, portanto, fica em função da aplicação do processo de usinagem. O sistema a seco economiza muito na questão de lubrificação, porém diminui a vida útil da ferramenta. O sistema a jorro é mais utilizado e difundido, porém possui diversos problemas de operação e de descarte.

O sistema MQL é um meio termo entre os dois citados acima, porque economiza lubrificante e tem efeitos que amenizam o desgaste da ferramenta. Alguns fatores relevantes podem ser levantados com o intuito de melhorar o desempenho do sistema de MQL, como o método de aplicação escolhido, sobre-cabeça, em que o bocal do nebulizador é colocado acima da superfície de saída da ferramenta. Nessa aplicação, possivelmente, durante a formação do cavaco a ponta da ferramenta fica “escondida” pelo dorso do cavaco, o jato pulverizador de ar + óleo impelidos não consegue penetrar na área de corte, pois é repelido pelo dorso do cavaco, formando o chamado efeito guarda-chuva. Outra hipótese, diz respeito à regulagem do bico nebulizador, uma vez que se observou durante os ensaios, a dificuldade de regulagem da vazão de ar + óleo e sua manutenção, mantendo constantes as duas partes. Necessariamente, a falta de óleo na nebulização, e apenas a aplicação de ar, poderia causar uma dificuldade na formação do cavaco, uma vez que o efeito lubrificante do óleo é de suma importância para facilitar o cisalhamento do cavaco e seu escorregamento sob a superfície de saída da ferramenta, somente a injeção de ar poderia apenas resfriar a área de corte, e, posteriormente, causaria um encruamento localizado de material, aumentando a força de usinagem, e, posteriormente, causaria o aumento da rugosidade média da peça. A otimização desses parâmetros pode melhorar os resultados para o sistema MQL.

3.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA POR PARETO E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Para a análise de R_a utilizaram-se gráficos de Pareto, Figs. (4) a (6), os quais indicam através de barras horizontais a influência das variáveis independentes do processo (parâmetros de corte - vc , f e ap) na variável dependente do processo, rugosidade média.

A ordem em que as barras horizontais estão dispostas nas Figs. (4) a (6), corresponde ao tamanho dos efeitos principais das variáveis independentes e suas interações. Cada barra horizontal mostra um valor que representa o tamanho da influência da variável independente na variável dependente. As interações entre as variáveis independentes são representadas pelo termo *by* (“com”), por exemplo, a interação (1)by(2) significa a interação entre a velocidade de corte (vc) e o avanço (f), e assim por diante. Os gráficos de Pareto mostram a importância que cada parâmetro tem no experimento, além de mostrar qual combinação de parâmetros é mais importante para os valores de rugosidade R_a .

Os gráficos de Pareto foram confeccionados para a análise dos efeitos dos parâmetros de corte em R_a para as três condições de lubri-refrigeração ensaiadas, a seco, jorro e MQL.

A Figura (4) mostra o gráfico de Pareto de R_a para o torneamento a seco, observa-se que o avanço é a variável independente que mais influencia nos valores finais de R_a , ao passo que a velocidade de corte tem a menor importância. A relação entre os parâmetros de avanço e velocidade de corte tem o maior efeito negativo e a relação entre avanço e profundidade tem efeito positivo maior que a combinação do efeito entre a velocidade de corte e a profundidade, tudo isso resultado do grande efeito causado pela variação do avanço.

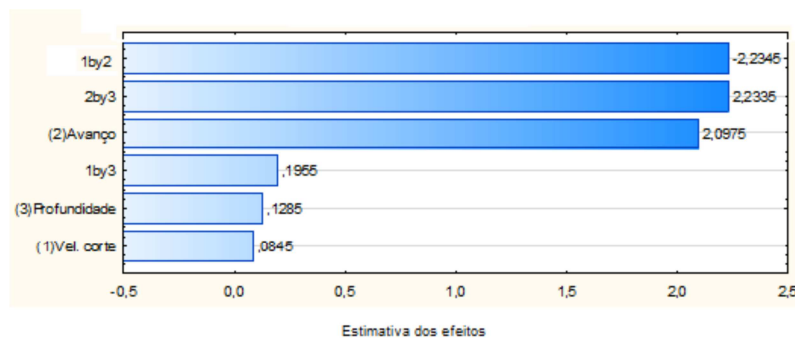


Figura 4. Pareto para R_a no torneamento a seco (Fonte: Próprio autor).

A Figura (5) mostra o gráfico de Pareto de Ra para o torneamento com jorro, o avanço também foi a variável independente que mais influenciou nos valores finais de Ra, enquanto que a profundidade teve a menor influência. A relação entre os parâmetros de avanço e velocidade de corte tem o maior efeito positivo, a relação entre avanço e profundidade tem efeito positivo maior que a combinação do efeito entre a velocidade de corte e a profundidade.

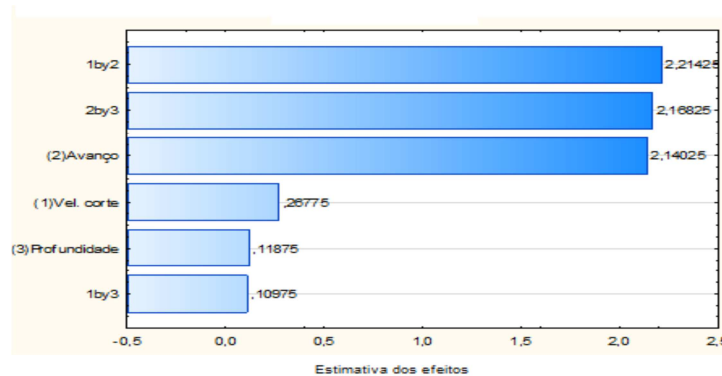


Figura 5. Pareto para Ra no torneamento com jorro (Fonte: Próprio autor).

A Figura (6) mostra o gráfico de Pareto de Ra para o torneamento com MQL, o resultado também mostra que o avanço é a variável independente que mais influencia nos valores finais de Ra, e a profundidade teve a menor influência. A relação entre os parâmetros de avanço e profundidade teve o maior efeito positivo e a relação entre avanço e velocidade de corte tem efeito positivo maior que a combinação do efeito entre a velocidade de corte e a profundidade que é negativo.

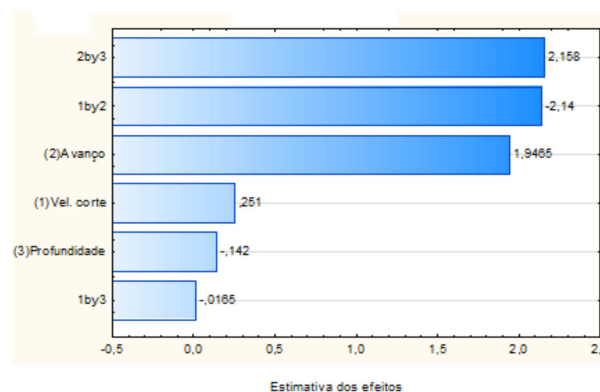


Figura 6. Pareto para Ra no torneamento com MQL (Fonte: Próprio autor).

Os gráficos de Pareto servem para justificar os resultados obtidos na Tab. 2 (adaptada) em que o avanço teve a maior influência em grande parte dos experimentos de rugosidade. De acordo com Machado *et al.* (2004), baixas velocidades de corte dão um aspecto rugoso a peça, resultado que aliado a um alto valor de avanço pioram ainda mais os valores de rugosidade. O aumento da profundidade e do avanço durante um processo de usinagem aumenta a força de usinagem, pois há um aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, o que aumenta as deflexões durante o processo, esse aumento piora o acabamento da peça. Conforme Machado et al. (2004) alguns resultados experimentais mostram que o avanço tem maior influência que a profundidade para no aumento da rugosidade de peças usinadas, já que o aumento do avanço aumenta a altura dos picos e a profundidade dos vales da superfície, resultado que foi verificado nos experimentos realizados nesse trabalho.

Os resultados de rugosidade Ra mostraram equilíbrio para todos os sistemas de lubrificação. Porém, cada mudança em valores de rugosidade pode ser interessante para aplicações industriais.

A seguir são demonstrados os gráficos de superfície de resposta, que mostram a relação de importância que cada parâmetro tem em relação aos outros parâmetros nos valores finais de rugosidade Ra da peça, lembrando que os parâmetros utilizados nos experimentos foram a profundidade (ap), a velocidade de corte (vc) e o avanço (f). A Figura (7) se refere ao torneamento com jorro, a Fig. (8) ao torneamento com MQL e a Fig. (9) ao torneamento a seco.

Na Fig. (7) quando comparado os parâmetros profundidade e velocidade de corte a resposta da rugosidade média tem comportamento mais uniforme, tendo valor próximo de 3 μm . Mostrando que a combinação de elevada vc e elevada ap aumenta a rugosidade média da peça, provavelmente, com maior efeito provocado pela profundidade de corte. Na relação entre os parâmetros profundidade e avanço, a rugosidade média tem um aumento considerável de valores quanto mais aumenta-se o avanço e a profundidade. Os valores são mínimos, próximos de 0,5 μm , com

profundidade de 2,2 mm e avanço de 0,18 mm/rot. Quando os dois fatores apresentam seus menores resultados, 0,8 mm e 2,2 mm/rot, a rugosidade média fica próxima de 3,5 μm , mostrando uma relação não-linear entre os dois fatores. Os fatores avanço (f) e velocidade de corte (vc) têm seu ponto máximo com $R_a = 6\mu\text{m}$, quando velocidade de corte e o avanço são máximos, 420 m/min e 0,42 mm/rot, respectivamente. Com elevada vc e baixo f o valor da rugosidade fica próximo de 1,75 μm , com baixa vc e baixo f a rugosidade fica próxima de 3,75 μm , o mesmo acontece quando se aumenta só o avanço para $vc = 180$ m/min, mostrando que nessa velocidade a mudança no avanço não altera muito os resultados.

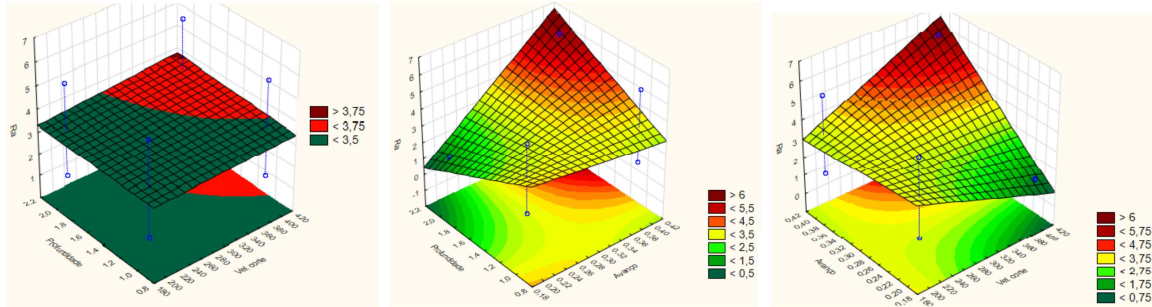


Figura 7. Superfície de resposta obtida com o comportamento das variáveis: Profundidade x Velocidade de corte, Profundidade x Avanço, Avanço x Velocidade de corte. Em (R_a) com jorro. (Fonte: Próprio autor).

Na Fig. (8) comparando os parâmetros profundidade e velocidade de corte, a resposta da rugosidade média tem comportamento mais uniforme, tendo valor próximo de 3 μm , os maiores valores para a rugosidade ficaram dentro dos maiores valores dos parâmetros, velocidade de corte próximo a 420 m/min e profundidade de 2,2 mm. Na análise dos fatores avanço (f) e velocidade de corte (vc), o ponto de maior rugosidade, $R_a = 6\mu\text{m}$ acontece quando a velocidade de corte e avanço se encontram em, 180 m/min e 0,42 mm/rot, respectivamente. Com elevada vc e baixo f o valor de rugosidade fica próximo de 4 μm , com baixo vc e baixo f a rugosidade fica próxima de 1 μm . Com velocidade de corte de 420 m/min, variar o avanço não tem muito efeito na rugosidade. Em se tratando da variável avanço x profundidade, o ponto mínimo para a rugosidade média se encontra no momento em que a profundidade está em seu valor máximo de 2,2 mm e o avanço em seu valor mínimo de 0,18 mm/rot. Quando a profundidade está em 0,8 mm, variar o avanço não altera de forma considerável a rugosidade.

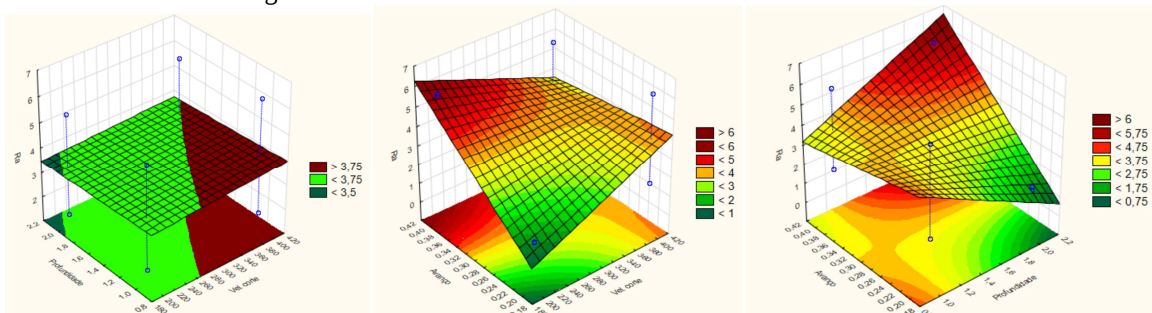


Figura 8. Superfície de resposta obtida com o comportamento das variáveis: Profundidade x Velocidade de corte, Avanço x Velocidade de corte, Avanço x Profundidade. Em (R_a) com MQL. (Fonte: Próprio autor).

Na Fig. (9) com a análise dos parâmetros de profundidade e velocidade de corte pode ser visto uma superfície de resposta uniforme e com valores próximos de 3,5 μm , onde a maior rugosidade registrada é encontrada quando a profundidade e a velocidade de corte são máximas. A menor rugosidade, abaixo de 3,5 μm , é observada em diversos pontos do gráfico. Analisando os parâmetros de avanço e profundidade, os valores para a rugosidade são máximos quando os parâmetros são máximos. A condição ótima para uma menor rugosidade é quando a profundidade é máxima e o avanço é mínimo. Na análise dos parâmetros de avanço e velocidade de corte, a condição onde os dois parâmetros são máximos, apresenta a maior rugosidade, com valores próximos de 6 μm . A menor rugosidade é mostrada quando a velocidade de corte é máxima e a avanço é mínimo, com valor para R_a próximo a 0,75 μm .

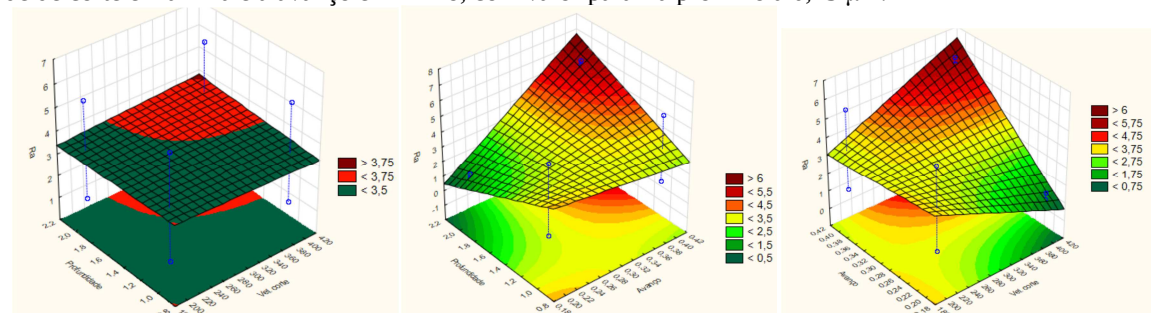


Figura 9. Superfície de resposta obtida com o comportamento das variáveis: Profundidade x Velocidade de corte, Avanço x Profundidade, Avanço x Velocidade de corte. Em (Ra) a seco. (Fonte: Próprio autor).

3.3. Resultados do Ensaio de Potência Elétrica Ativa

A Figura (10) mostra a curva típica de potência elétrica ativa adquirida nos ensaios. O comportamento da curva apresenta quatro regiões bem distintas, como indicado nas marcações **A**, **B**, **C** e **D**.

A região **A** representa o motor do torno ainda desligado e com potência constante com valores próximos de 3 kW. A região **B** representa o pico máximo da potência que ocorre na partida do motor com valores acima de 25 kW. Após a partida do motor, e antes de iniciar o processo de corte, o motor diminui para a sua potência nominal. Quando se inicia o torneamento, a potência ativa aumenta, e isso é mostrado na região **C**, que representa a peça sendo usinada, ou seja, aumenta o trabalho a ser realizado pelo motor. Após a usinagem o motor volta a trabalhar em vazio, isto é, está em funcionamento, mas não usina a peça, neste caso existe o consumo da sua potência nominal. Finalmente, a região **D** mostra o que ocorre quando é acionado o desligamento do motor, existe um aumento súbito da potência devido ao aumento da corrente, e em seguida, a potência consumida pelo motor atinge valores de potência da região A, ou seja, o motor está desligado.

Os dados de análise da potência elétrica ativa foram tomados apenas na região **C**, na região de usinagem, variando as condições de corte dadas nas Tabs. (4) a (6), assim como as condições de lubri-refrigeração.

Os gráficos das Figs. (11) a (13) mostram os valores de potência média adquiridos durante o período de usinagem na região **C**, para cada parâmetro de corte estudado (velocidade de corte, avanço e profundidade), e com a aplicação do sistema lubri-refrigerante com MQL, jorro e a seco.

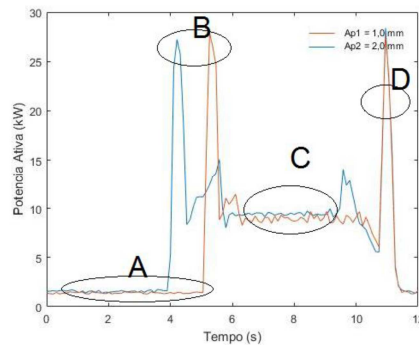


Figura 10. Sinal típico de potência elétrica ativa adquirido no ensaio. (Fonte: Próprio Autor).

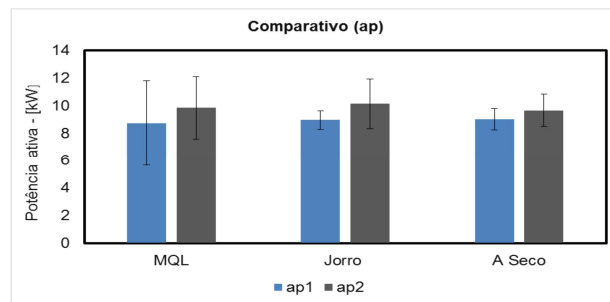


Figura 11. Variação da profundidade de corte (ap) para MQL, Jorro e a Seco (Fonte: Próprio autor).

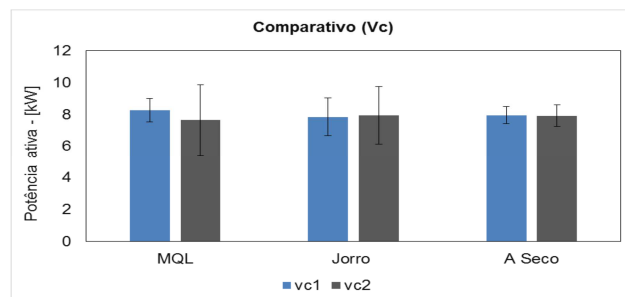


Figura 12. Variação da velocidade de corte (vc) para MQL, Jorro e a Seco. (Fonte: Próprio autor).

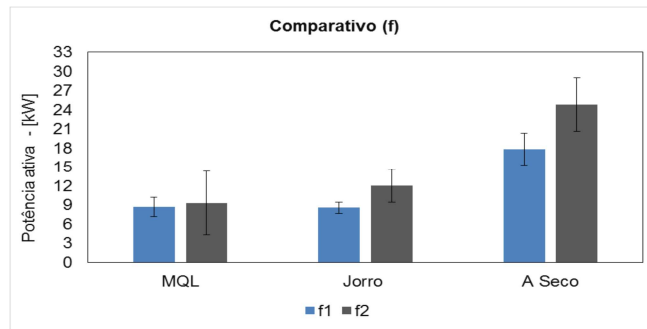


Figura 13. Variação do avanço (f) para MQL, Jorro e a Seco. (Fonte: Próprio autor).

As Figuras (11) e (12) mostram que a variação dos parâmetros de corte (a_p , v_c e f) e o uso dos sistemas de lubri-refrigeração (MQL e Jorro) não alteraram de maneira significativa, ou estatisticamente, a potência média consumida durante o torneamento.

Numa análise geral da Fig. (11) observa-se que o aumento da profundidade de corte aumentou na média a potência consumida, uma vez que a elevação de a_p causa o aumento da seção de corte (aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário) durante a usinagem, alterando especificamente a largura do cavaco, o que causaria uma elevação da força de usinagem, e consequentemente, da potência necessária ao corte, potência elétrica ativa.

A Fig. (12) mostra uma tendência de diminuição na média da potência ativa quando se aumentou a velocidade de corte, que pode ser justificado pelo aumento da frequência de contato entre a aresta de corte da ferramenta e a peça, com a elevação da rotação da máquina. Evidentemente, a interação entre o aumento dos choques mecânicos entre a ferramenta e a peça, e o aumento da geração de calor, provocado pelo atrito durante a usinagem com o aumento da rotação (velocidade de corte), aumenta a temperatura de corte na peça, facilitando a remoção de cavaco.

Em relação ao avanço, a Fig. (13) mostra que esse parâmetro de corte foi o de maior influência na potência ativa, o seu aumento provocou picos de potência média de aproximadamente 25 kW no torneamento a seco, e mesmo com aplicação de MQL e jorro a potência média foi maior em relação a variação dos outros parâmetros de corte. Como o avanço é a distância linear percorrida pela ferramenta durante o torneamento, quanto maior f maior serão as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário do cavaco formado, elevando significativamente a espessura do cavaco, consequentemente, a potência necessária ao corte será maior. A Fig. (13) também mostra que apenas o avanço foi o parâmetro de corte capaz de influenciar significativamente a atuação dos sistemas de lubrificação, MQL e jorro, pois estatisticamente proporcionaram menores potências ativas em relação ao torneamento a seco.

4. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu adquirir mais conhecimento de técnicas de usinagem, focado na parte de torneamento. E também identificar a influência dos parâmetros de corte (v_c , a_p e f) na potência elétrica e acabamento superficial de uma peça torneada. Conhecer e aplicar um software para análise estatística, o qual pode ser amplamente utilizado como uma ferramenta para aplicação industrial, utilizando análises por gráficos de Pareto e superfícies de resposta. Proporcionou também conhecer na prática a aplicação de sistemas de lubrificação para a usinagem, especificamente, a técnica de mínima quantidade de lubrificante MQL, técnica atualmente utilizada pela indústria metalomecânica.

Esse conhecimento na prática do sistema de MQL, discutido em resultados gráficos, mostrou um equilíbrio entre os sistemas de lubrificação aplicados no torneamento do aço SAE 4340 para as condições de corte impostas, o acabamento superficial da peça usinada, o que pode ser justificado pelo fato de que todos os experimentos realizados ficaram dentro da faixa de operação da ferramenta, recomendado pelo fabricante.

Nos ensaios de potência elétrica ativa, os parâmetros de lubrificação também mostraram equilíbrio, mostrando que variar essas condições não altera os valores de potência ativa utilizados pela máquina durante a usinagem.

Os resultados em geral mostram um equilíbrio para os três sistemas de lubrificação, isso mostra que para determinar que tipo de sistema de lubrificação é mais adequado, a parte mais importante a se verificar é justamente o tipo de aplicação que aquele processo de usinagem estará submetido. O sistema MQL tem vantagens na aplicação e ameniza problemas causados pelos outros sistemas de lubrificação, como alto desgaste da ferramenta e descarte de fluido usado.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Senai Ítalo-Bologna de Goiânia e a Universidade de Brasília Campus-Gama.

6. REFERÊNCIAS

Baptista, André L. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. Revista Escola de Minas, Vol. 55 no. 2. Ouro Preto, 2002.

- Chiaverini, Vicente. Tecnologia de Mecânica, processos de fabricação e tratamento. 2. ed. São Paulo: Mc Graw hill, 1986.
- Ferraresi, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo: Blucher, 1977.
- Machado, R, A; Abrão, M, A; Coelho, T, R; Silva, B, M. Teoria da Usinagem Dos Materiais. São Paulo: Blucher, 2009.
- Tai, B. L; Stephenson, D. A.; Furness, R. J.; Shih, A. J. Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Automotive Powertrain Machining. 6. Ed. CIRP International Conference on High Performance Cutting, 2014, USA.
- F. Itoigawa, T. H. C. Childs, T. Nakamura, W. Belluco, Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy. *Wear*, vol. 260, pp.339-344, 2006.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

TURNING STEEL ALLOY SAE 4340 WITH DIFFERENT LUBRIFRIGERATION SYSTEMS

Vinícius da Silva Rocha, viniciustavenida@hotmail.com¹
Pedro de Souza Camargo, pedrosceng@gmail.com¹
Danilo dos Santos Oliveira, unbdanilo@gmail.com¹
José Henrique de Oliveira, jhenrique.unb@gmail.com¹
Rhander Viana, rhanderviana@gmail.com¹

¹Universidade de Brasília, Campus-Gama, Área Especial de Indústria Projeção A, CEP: 72444-240

Abstract. *This work consists of an analysis of the behavior of a SAE 4340 steel alloy during the turning process. The choice for this steel was made for its great use in mechanical components, especially in the automotive industry. In the analysis of this work, the cutting parameters (cutting speed, depth and feed) were varied by means of a 2³ factorial design in the SAE 4340 steel alloy turning, to verify the material response to these changes and the relation that these variations have among them, also applying to the machining process the use of the Minimum Quantity of Lubricant (MQL) technique, application of cutting fluid in abundance by wet and turning in the dry, without the use of cutting fluid. In the active power tests only with the advancement variation, the MQL technique performed better than in dry turning, and the same in spray application.*

Keywords: *Turning, SAE 4340, Factorial Design - DOE, MQL.*