

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE SOBRE O TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 4340: UM ESTUDO EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E AMBIENTE LUBRI-REFRIGERANTE

Bárbara Cristina Mendanha Reis, babi_mreis@hotmail.com¹
Christianne Lacerda Soares, chrislacerda3@hotmail.com¹
Michele Lisboa Silveira, michelesilveira1991@gmail.com¹
Rafael Lucas Machado Pinto, rafaelucas@gmail.com²
Paulo Eustáquio Faria, paulofaria@ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Produção (DEP), Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 21270-901, Belo Horizonte, MG .

²Universidade Federal de Ouro Preto, R. Trinta e seis, 115 – Loanda, João Monlevade – MG, CEP 35931-008.

Resumo: A aplicação de fluidos de corte na usinagem vem sendo questionada não só em termos de prejuízos ao meio ambiente e à saúde humana, mas também em relação aos custos logísticos associados, como armazenagem e descarte. Diante deste cenário, o corte a seco e/ou a mínima quantidade de líquido (MQL) emergem como potenciais substitutos. A velocidade da operação também é um parâmetro de interesse em usinagem, tendo em vista que se trata de uma variável diretamente relacionada com o lead time de manufatura e volume produzido. Neste estudo procurou-se compreender os fenômenos intrínsecos que as variações dos parâmetros de corte, a saber: velocidade de corte (150, 200 e 250 m/min) e ambiente lubri-refrigerante (seco, jorro, MQL), causam sobre a temperatura de corte, o parâmetro de rugosidade desvio médio quadrático (Rq) e a forma dos cavacos no torneamento do aço ABNT 4340. O estudo contemplou 18 testes, sendo que profundidade de corte e avanço foram mantidos constantes em 1 mm e 0,3 mm/rev, respectivamente. Para análise estatística dos dados utilizou-se o software Minitab 17, a fim de realizar a Análise de Variância (ANOVA) e gerar os gráficos de efeitos principais e interações. Os resultados mostraram que no que concerne à temperatura, verificou-se que o modelo proposto ajustou-se melhor ao experimento ($R^2=0,8312$), sendo que o fator mais significativo foi o ambiente. O nível jorro foi o responsável pela minimização da resposta. Em relação ao parâmetro de rugosidade, os dois fatores selecionados não causaram efeitos significativos na rugosidade, este resultado coincide com a literatura, que menciona o avanço como parâmetro mais significativo para a rugosidade. Em relação à análise dos cavacos, constatou-se que a mudança na velocidade de corte e do ambiente de corte dentro dos limites estabelecidos neste estudo não foram suficientes para causar mudanças nas formas dos cavacos.

Palavras-chave: ambiente lubri-refrigerante, temperatura de corte, rugosidade, cavaco, ANOVA

1. INTRODUÇÃO

As operações de usinagem são responsáveis por determinar forma, dimensão e acabamento em materiais. São fonte de estudo e possibilitam o conhecimento e desenvolvimento para o meio industrial. Uma das operações de usinagem, o torneamento, gera altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta. Estas temperaturas, por sua vez, exercem forte influência na taxa de remoção do material e no atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte (CARVALHO, 2005).

Com relação ao acabamento do material usinado, a rugosidade é capaz de indicar a qualidade obtida durante a operação bem como a conformidade com os requisitos de sua utilidade. A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, entre outros) (MACHADO et al., 2015).

O estudo das formas dos cavacos também é importante, pois influencia diversos fatores ligados à usinagem, como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, entre outros. Estão ainda relacionados com o processo de formação do cavaco aspectos econômicos e de qualidade da peça, segurança do operador e utilização adequada da máquina-ferramenta (DINIZ et al., 2012).

Este trabalho tem como objetivo identificar como os parâmetros de entrada (ambiente lubri-refrigerante e velocidade de corte) afetam a temperatura de corte, o parâmetro de rugosidade desvio médio quadrático (Rq), e a forma dos cavacos durante torneamento cilíndrico do aço ABNT 4340. O material torneado foi selecionado devido à sua importância para as indústrias automotiva, petrolífera e naval. As análises foram fundamentadas em conceitos técnicos e estatísticos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização do fluido de corte no torneamento é capaz de influenciar parâmetros de entrada e saída considerados importantes para a avaliação do desempenho da operação. Dentre eles, pode-se citar a temperatura de corte, a qualidade da superfície usinada e a forma do cavaco. Essas variáveis serão discutidas a seguir.

2.1 Temperatura de Corte

A maior parte da potência consumida na usinagem de materiais é convertida em calor próximo à aresta de corte da ferramenta (TRENT, 1984). Nesse sentido, demandas industriais por altas taxas de produção conduzem a necessidade de se utilizar altos valores de velocidades de corte, avanços e profundidades de usinagem, gerando elevadas quantidades de calor na zona de corte e, conseqüentemente, altas temperaturas (DHAR *et al.*, 2006). Diante deste cenário, fluidos de corte apresentam ações diretas sobre temperatura de corte. Machado *et al.* (2015) afirmam que seu uso, especialmente com função refrigerante, favorece a transferência de calor da região de corte, levando a redução da temperatura tanto na peça de trabalho quanto na ferramenta de corte.

Dhar *et al.* (2006) conduziram testes de torneamento do aço AISI 1040 a seco, com jorro e MQL (vazão de 60 ml/h e pressão de 7,0 bar) utilizando os seguintes parâmetros de corte: velocidade de corte (v_c) de 64; 80; 110 e 130 (m/min), avanços (f) de 0,10; 0,13; 0,16 e 0,20 (mm/rev) e profundidade de usinagem (a_p) constante de 1,0 mm. A temperatura de corte média foi medida pela técnica do termopar ferramenta-peça, sendo que a menor foi encontrada para a condição de MQL. Os autores explicaram que qualquer fluido de corte aplicado convencionalmente é incapaz de reduzir a temperatura na interface ferramenta-cavaco porque o fluido dificilmente penetrará nessa interface, onde o contato é naturalmente plástico, ainda mais sob altas velocidade de corte. Desta forma, a técnica MQL pode ter propiciado maior acesso à interface, resfriando-a devido ao reduzido comprimento de contato entre a peça e o cavaco.

Em posterior estudo, Kumar e Ramamoorthy (2007) investigaram os efeitos do ambiente de corte (seco, jorro e MQL (vazão do óleo mineral variando entre 5 e 10 ml/min)) sobre a temperatura de usinagem durante o torneamento do aço AISI 4340 utilizando velocidades de corte (v_c) entre 35 e 55 m/min, avanço (f) entre 0,05 e 0,08 mm/rev e profundidade de usinagem (a_p) constante de 1,5 mm para duas ferramentas de corte revestidas (carbonitreto de titânio (TiCN) e nitreto de zircônio (ZrN)). Para ambas as ferramentas, o melhor desempenho foi evidenciado pelo sistema MQL, seguido do jorro e por último do torneamento a seco. Os autores afirmaram que na usinagem com jorro o calor é extraído somente por convecção, mas durante o MQL a refrigeração acontece tanto por convecção quanto por evaporação. Neste caso, as partículas conseguem perpassar o vapor formado devido à sua alta velocidade e atingem a interface, facilitando a transferência de calor por evaporação.

Li e Liang (2007) tornearam o aço AISI 1045 a seco, com jorro (vazão de 15 l/min) e MQL (óleo vegetal a uma pressão de 0,276 MPa). Por meio de um termopar embutido na ferramenta, a temperatura foi medida com a variação dos seguintes parâmetros: velocidade de corte (v_c) de 45; 75; 91,5 e 137,25 m/min, avanço (f) de 0,0508; 0,0762 e 0,1016 mm/rev e profundidade de usinagem (a_p) de 0,508; 0,762 e 1,016 mm. Na avaliação de $v_c = 91,5$ m/min, a temperatura foi reduzida em 22,1% e 31,4% para MQL e jorro de fluido, respectivamente, se comparada com o corte a seco. Os autores explicam que a redução pelo MQL se dá tanto por refrigeração quanto pela lubrificação, sendo que esta última reduzirá as forças de corte, o que propiciará menos calor na zona de corte. Todavia, o jorro de fluido tem ação mais eficaz na redução da temperatura de corte (LI; LIANG, 2007).

Analisando a influência do fluido de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta, percebe-se que o uso do fluido de corte inevitavelmente propiciará resultados melhores do que o torneamento a seco devido ao favorecimento da transferência de calor da região de corte. Contudo, Shaw (1951) *apud* Machado *et al.* (2015) demonstrou que a eficiência do fluido de corte em reduzir a temperatura de corte tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte e profundidade de usinagem. Logo, há que se considerar o torneamento de materiais distintos, parâmetros de corte variados, condições do ambiente, material e geometria de corte, entre outros aspectos, a fim de encontrar a condição ótima para que melhores resultados sejam atingidos com o uso do fluido de corte.

2.2 Rugosidade Superficial

Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem. De fato, a rugosidade de uma superfície depende de vários parâmetros, como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta e operação de usinagem. Métodos estatísticos aplicados ao resultado da medição da rugosidade de uma superfície podem identificar as contribuições relativas de cada um desses parâmetros (WHITEHOUSE, 1977).

Em relação ao uso do fluido de corte e rugosidade superficial, este reduz o desgaste da ferramenta e atrito entre a ferramenta e a peça, ou ferramenta e o cavaco, favorecendo uma melhoria do acabamento (Machado *et al.*, 2015). Entretanto, os autores ressaltam que quando o fluido atua como refrigerante pode ocorrer o aumento da resistência ao cisalhamento do material da peça, elevando-se a força de usinagem e o desgaste, prejudicando o acabamento superficial.

Gaitonde, Karnik e Davim (2008) utilizaram três níveis de vazão de lubrificante (50, 100 e 200 ml/h), com velocidades de corte (v_c) de 100; 200 e 400 m/min e avanços (f) de 0,05; 0,10 e 0,15 mm/rev no torneamento de bronze, mantendo a profundidade de usinagem (a_p) constante em 2 mm. Os testes foram realizados utilizando diferentes condições de MQL e aplicando emulsão. Os autores apontaram que sob vazões menores de MQL (50 e 100 ml/h) os resultados de rugosidade foram piores devido às altas temperaturas na ponta da ferramenta, permitindo a ocorrência de fenômenos como abrasão, lascamento e formação de aresta postiça de corte. Logo, uma vazão elevada de MQL (neste caso, 200 ml/h) foi necessária para atingir uma baixa rugosidade, justificada aqui por uma redução na força específica de corte devido à diminuição da temperatura, especialmente na aresta de corte principal, onde a formação de aresta postiça de corte foi predominante.

Em outro trabalho, Sadaiah e Deepakkumar (2011) elaboraram um experimento para estudar os efeitos do torneamento do AÇO AISI 4240 endurecido com MQL. O torneamento foi realizado utilizando óleo mineral comercial a uma vazão de 5 ml/min e pressão de 6,0 bar. O estudo foi conduzido utilizando-se as velocidades de corte (v_c) de 180; 200 e 220 m/min e avanços (f) de 0,04; 0,05 e 0,06 mm/rev. Um inserto de nitreto cúbico de boro policristalino (CBN) foi empregado para realizar os testes. A profundidade de usinagem (a_p) foi mantida em 0,5 mm em todos os experimentos. Os autores concluíram que o torneamento a seco apresentou os piores resultados de rugosidade, enquanto as técnicas de jorro e MQL apresentaram resultados semelhantes, mesmo variando-se velocidade de corte e avanço. Ao aumentar a velocidade de corte, a rugosidade decresceu devido ao fato de não haver formação de aresta postiça de corte.

Verificando o desempenho da aplicação do fluido de corte sobre o parâmetro rugosidade, assim como na temperatura de corte, é possível constatar melhores desempenhos quando o fluido de corte é utilizado. Porém, é importante considerar a condição ótima de vazão, pressão e localização do jato de fluido a fim de garantir os benefícios de seu uso para o determinado conjunto de material da peça de trabalho, ferramenta e parâmetros de corte e máquina-ferramenta.

2.3 Formas de Cavacos

As características do material a ser usinado, tais como a estrutura e a ductilidade, são decisivas na formação dos cavacos, assim como a geometria da ferramenta e as condições de corte. Quanto à classificação pela forma, a norma ISO 3685 (1993) distingue-os em cavacos em fita, helicoidal, em espiral, em lascas ou pedaços. Com relação à influência dos parâmetros de corte sobre a forma dos cavacos, um aumento da velocidade de corte, uma redução no avanço ou um aumento no ângulo de saída tendem a mudar as formas de lascas e fragmentos para cavacos em fita. O avanço é o parâmetro mais influente, seguido pela profundidade de corte, a afetar a forma do cavaco (MACHADO *et al.* 2015).

A classificação quanto à forma do cavaco é importante devido às características desejadas durante a usinagem. Os cavacos de forma longa podem causar danos à segurança do operador, bem como à qualidade da peça e prejudicar o acesso do fluido de corte à área de formação de cavacos, sendo necessário maior controle. Nas operações de usinagem, esperam-se cavacos curtos, que se fragmentem facilmente e não causem danos à qualidade da peça usinada, nem ao operador.

Além de identificar o tipo e a forma dos cavacos, também é importante analisar a sua espessura. Machado *et al.* (2015) explicam que, quanto menor for a espessura do cavaco, mais flexível ele é, portanto, maior será a dificuldade de quebra. Os cavacos que já sofreram intensas deformações, passando pelas zonas primárias e secundárias de cisalhamento, necessitam de uma deformação crítica (ϵ_f) para se quebrarem depois de deixar a superfície de saída da ferramenta. Nesse sentido, o uso de fluido de corte, principalmente quando evidenciado seu efeito refrigerante, favorecerá a retirada de calor da zona de corte, aumentando a resistência ao cisalhamento, favorecendo uma espessura para a quebra.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado como corpo de prova é o aço ABNT 4340, normalmente aplicado em peças com altas solicitações mecânicas, na indústria aeroespacial, automobilística, de máquinas e equipamentos. A composição química deste material está indicada na Tab. (1). Os corpos de prova cilíndricos possuíam diâmetro inicial de 73 mm. A fim de homogeneizá-los, estes foram tratados termicamente pelo processo de recozimento, a temperatura de patamar de 930 °C durante cinco horas. O resfriamento dos corpos de prova ocorreu ao forno. Após tal procedimento, a dureza média resultante foi de 193 HV. Para este experimento, foi utilizado o método de torneamento cilíndrico.

Tabela 1. Faixa de composição química do aço ABNT 4340. (ASM International, 1997).

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%
0,38 – 0,43	0,15 – 0,35	0,60 – 0,80	≤ 0,035	≤ 0,040	0,70 – 0,90	0,20 – 0,30	1,65 – 2,00

Os ensaios foram realizados em um torno CNC ROMI modelo Centur 30S (5,5 kW de potência e rotação máxima de 3500 rpm). O bico para a saída do fluido de corte foi direcionado para a superfície ferramenta-peça, detalhe ilustrado pela Fig. (1) (a). Os ensaios foram realizados com os métodos de usinagem a seco, jorro e MQL. No método MQL a vazão foi de 60 ml/h e a pressão de 6,0 bar, sendo ambas mantidas constantes. Um óleo lubrificante do tipo névoa KSO45, a uma concentração de 5% em água foi utilizado como fluido, sendo este distribuído pela empresa Kampmann.

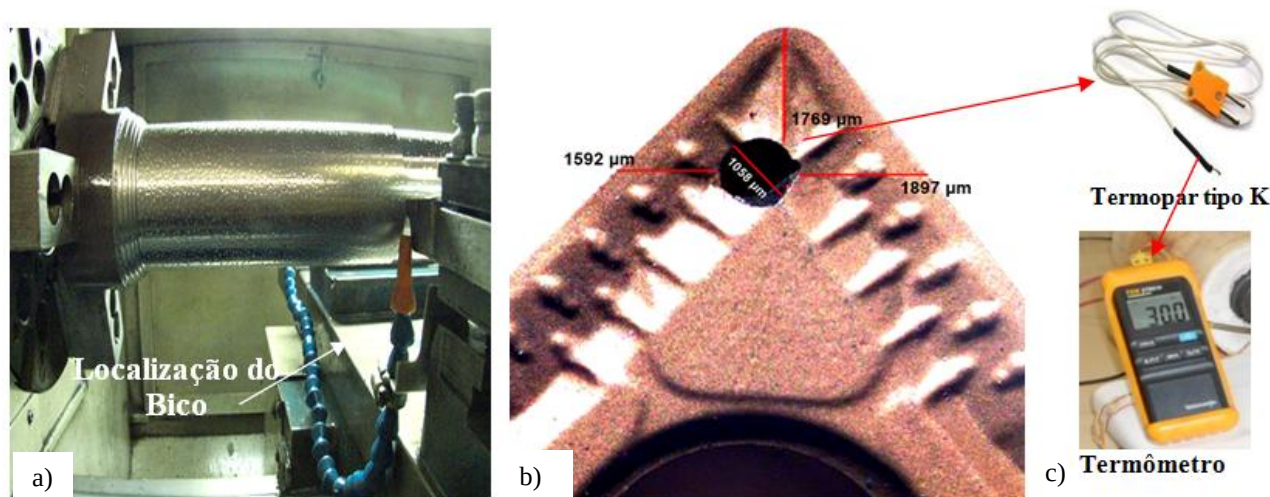


Figura 1. Montagem do experimento: (a) localização do bico, (b) localização do termopar na aresta de corte e (c) termopar tipo K e termômetro portátil.

Para aquisição da temperatura, o método utilizado neste trabalho foi o termopar. Para tanto, houve a necessidade da preparação das arestas de corte pelo processo de eletroerosão. Cada aresta possuía um furo com profundidade suficiente para a inserção de um termopar tipo K com fios de diâmetro 0,25 mm cada um, conforme ilustra a Fig. (1) (b). O suporte utilizado foi adaptado com um furo passante em sua ponta, produzido pelo processo de eletroerosão, e com um canal em sua parte posterior feito com uma microfresa. Isso foi necessário para que o fio não fosse esmagado pelo porta-ferramenta ao prendê-lo na torre do torno. Ao montar a ferramenta no suporte, uma extremidade do fio do termopar foi inserida no furo da aresta de corte enquanto a outra extremidade livre do fio foi introduzida pelo furo passante do suporte ao longo do canal feito em sua parte posterior. Essa extremidade foi então conectada a um termômetro portátil da Tektronix® modelo TEK DTM510, mostrado na Fig. (1) (c), com faixa de operação de -50°C a 1300°C e resolução de 1°C. Desta forma, a temperatura pôde ser medida no interior da ferramenta, bem próximo à aresta de corte.

Optou-se por conduzir um experimento fatorial completo 3^2 , no qual as variáveis de entrada velocidade de corte e tipo de ambiente foram manipuladas em três níveis cada, mantendo-se constantes as variáveis avanço e profundidade de usinagem. O estudo contemplou 18 testes, sendo 9 referentes ao teste principal e o restante à única réplica do experimento. A Tabela (2) ilustra os valores dos parâmetros de entrada definidos para este experimento. As variáveis de saída ou resposta analisadas foram a temperatura e a rugosidade. Todas as análises estatísticas deste trabalho foram feitas no software MINITAB versão 17 e para todas as variáveis respostas, considerou-se $\alpha = 0,05$, isto é, um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 2. Parâmetros utilizados no torneamento.

Ambiente lubri-refrigerante	Velocidade de corte V_c [m/min]			Avanço f [mm/rev]	Profundidade de usinagem a_p [mm]
Seco	150	200	250	0,3	1,0
MQL	150	200	250	0,3	1,0
Jorro de Fluido	150	200	250	0,3	1,0

Ao final de cada teste, foram coletadas amostras dos cavacos gerados para a respectiva configuração. Posteriormente foram tiradas fotografias dos cavacos para cada configuração utilizando uma câmera Canon modelo SX50 HS. As imagens dos cavacos foram editadas no software PhotoScape versão 3.7 para ajuste dimensional (ampliação), de brilho e contraste.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão serão apresentados e discutidos os resultados, conforme análises estatísticas.

4.1. Análise Estatística dos Resultados da Temperatura de Corte em função da Velocidade de Corte e Ambiente Lubri-refrigerante

Para analisar os efeitos referentes à temperatura de corte, o avanço e a profundidade de corte foram mantidos constantes, variando-se então a velocidade de corte e o ambiente lubri-refrigerante, o que resultou num planejamento de experimentos fatorial completo 3^2 . A Tabela (3) mostra p-valor para os efeitos principais e a interação entre os mesmos.

Tabela 3. ANOVA para a temperatura de corte (V_c e Ambiente Lubri-refrigerante).

Fonte	p-valor
V_c [m/min]	0,890
Ambiente Lubri-refrigerante	0,000
V_c [m/min]* Ambiente Lubri-refrigerante	0,994

Entre os efeitos principais e de segunda ordem, somente o ambiente lubri-refrigerante mostrou-se significativo apresentando um p-valor menor que 0,05. Logo, é possível constatar que existe uma correlação estatisticamente significativa, ao nível de confiança considerado, entre a mudança no ambiente e a variação da temperatura de corte.

Foi verificada a adequação do modelo ANOVA por meio da análise de resíduos, a fim de garantir que a distribuição de probabilidade associada ao conjunto de dados da temperatura pudesse ser aproximada pela distribuição normal. Para o teste de normalidade, foi utilizado o teste de Anderson-Darling, o qual, segundo Minitab (2017), apresenta as seguintes hipóteses:

- H_0 : Os dados seguem uma distribuição específica;
- H_1 : Os dados não seguem uma distribuição específica;

Se o valor de p for menor que o α escolhido, rejeita-se a hipótese nula de que os dados seguem determinada distribuição. Sendo assim, a Figura (2) apresenta o gráfico de probabilidade normal dos resíduos bem como as saídas do teste de Anderson-Darling para os dados da temperatura de corte após uma transformação de Box-Cox para $\lambda=0$.

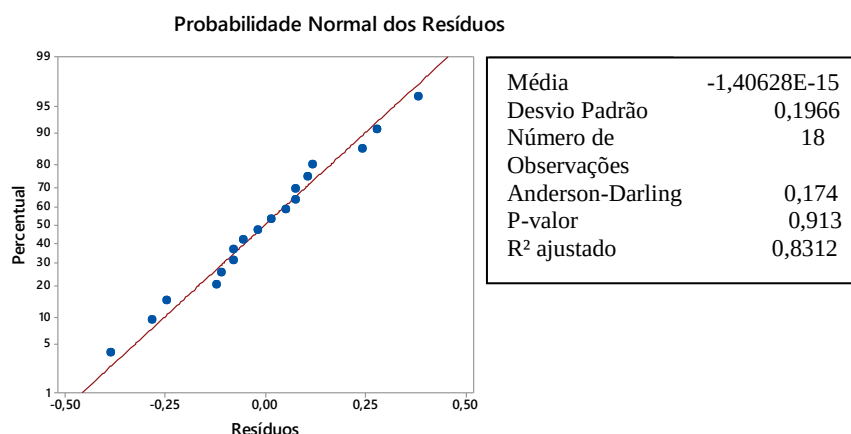


Figura 2. Teste de Normalidade para temperatura de corte.

Na Figura 2 é possível observar que os valores dos resíduos estão distribuídos em torno da linha reta de distribuição normal. Como o p-valor (0,913) é maior que o nível de significância ($\alpha=0,05$) se aceita a hipótese nula, afirmando assim que os dados seguem a distribuição normal, dado que o nível de explicação do modelo para a variação da temperatura foi de 83,12% (R^2 ajustado). A Figura (3) mostra os efeitos principais, correlacionando as médias da temperatura de corte ($^{\circ}\text{C}$) com os níveis de cada variável de entrada.

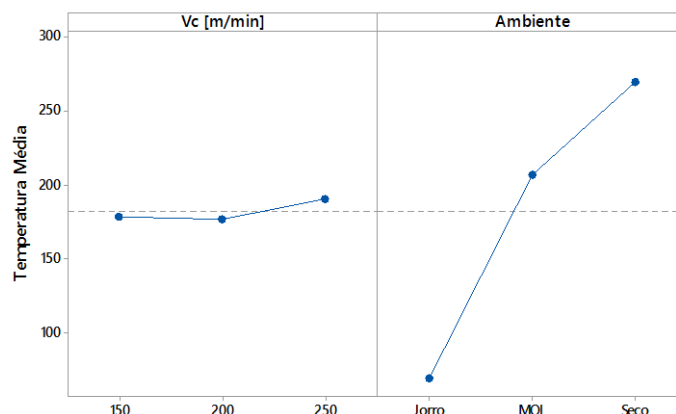


Figura 3. Gráfico de efeito principal para Temperatura de Corte: (a) v_c e (b) ambiente lubri-refrigerante.

A velocidade de corte apresenta um comportamento surpreendente, uma vez que o esperado é que o aumento desta levaria a um aumento da temperatura, dado que ocorreria um incremento da taxa de remoção de material ocasionando o aumento do calor gerado. Porém, nota-se que a variação de V_c dos parâmetros gera uma linha quase paralela à linha média geral. Como mostrado na Figura (1), neste trabalho a temperatura obtida está intimamente relacionada à temperatura da ferramenta de corte e de acordo com Shaw (1997), a fração de energia que vai para o cavaco eleva-se com o aumento de V_c ; já as frações transferidas para a ferramenta de corte e para a peça de trabalho diminuem, fato que explica o comportamento mostrado na Fig. (3), na qual cada nível da V_c afeta a temperatura da mesma forma, não existindo influência significativa. Sob velocidades de corte muito altas, praticamente toda a energia é levada para o cavaco, uma pequena quantidade é transferida para a peça de trabalho e uma quantidade ainda menor é transferida para a ferramenta de corte.

Quanto ao ambiente de refrigeração mostrado na Fig. (3), a temperatura mais alta foi alcançada na usinagem totalmente a seco, sendo os valores reduzidos à medida que uma maior quantidade de fluido é dispersa na interface cavaco-ferramenta. Resultados semelhantes foram obtidos em vários trabalhos (DHAR *et al.*, 2006; KUMAR e RAMAMOORTHY, 2007; LI e LIANG, 2007).

Pode-se confirmar a suposição feita na ANOVA, sendo que a taxa de crescimento da temperatura no ambiente a seco é maior do que com MQL, que por sua vez também é maior do que com a utilização do jorro de fluido. Como no MQL a quantidade de fluido dispersa na região de corte foi inferior que no ambiente de jorro, ocorreu menor penetração da névoa na região de contato da ferramenta com a peça durante o processo de torneamento, com isto, não foram observadas grandes reduções frente ao ambiente seco. Entretanto, vale ressaltar que tal comportamento não é inesperado, dado que a função principal do MQL é a lubrificação, sendo a refrigeração secundária. Desta forma, o efeito refrigerante, para o jorro, quando comparado ao efeito lubrificante, foi maior contribuindo basicamente na redução do atrito entre ferramenta e peça. No caso do torneamento a seco, as maiores temperaturas de corte são explicadas pela ausência de um método adicional de refrigeração e ou lubrificação nas regiões onde ocorre atrito entre a ferramenta e a peça, fazendo com que ambas sejam submetidas a uma carga térmica maior. Por fim, a Figura (4) mostra o efeito de interação entre os dois fatores e a resposta na temperatura de corte.

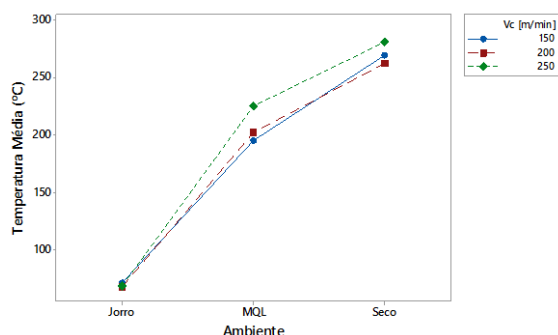


Figura 4. Gráfico de interação para Temperatura de Corte (V_c e Ambiente Lubri-refrigerante).

Da Figura (4) observa-se que, independentemente da V_c empregada, as menores temperaturas de corte são obtidas com a utilização do jorro de fluido, sendo que o pior desempenho ocorreu para o corte a seco. O jorro de fluido utilizado continha uma concentração de óleo baixa (5%), devendo então o efeito refrigerante ser mais atuante. Direcionado para a superfície de folga, ele proporcionou uma retirada de calor mais eficaz e o mínimo de óleo na

mistura também atuou para a redução do coeficiente de atrito, e, por conseguinte, da temperatura (SHAW, 1951 apud MACHADO et al., 2015).

4.2. Análise Estatística dos Resultados da Rugosidade Superficial (Rq) em função da Velocidade de Corte e Ambiente Lubri-refrigerante

Os parâmetros desvio aritmético médio (Ra), desvio médio quadrático (Rq) e altura total do perfil (Rt) foram disponibilizados pelo rugosímetro a cada leitura. No entanto, somente os resultados relativos ao Rq serão apresentados, visto que foram semelhantes aos resultados e análises realizados para o Ra. O parâmetro Rt não será apresentado, dado que seu uso como parâmetro de avaliação é menos frequente na indústria. Nesse sentido, Machado *et al.* (2015) ressaltam que este parâmetro tem o efeito de ampliar os valores dos picos e dos vales isolados, o que possibilita realçar defeitos em superfícies bem-acabadas.

De forma análoga à análise anterior, para os efeitos referentes à rugosidade, o avanço e a profundidade de corte foram mantidos constantes, variando-se a velocidade de corte e o ambiente lubri-refrigerante, o que resultou num planejamento de experimentos para um fatorial completo 3^2 . A Tabela (4) mostra o p-valor para os efeitos principais e os efeitos combinados.

Tabela 4. ANOVA para a rugosidade superficial (Rq) (V_c e Ambiente Lubri-refrigerante).

Fonte	p-valor
V_c [m/min]	0,975
Ambiente Lubri-refrigerante	0,997
V_c [m/min]* Ambiente Lubri-refrigerante	0,652

Entre os efeitos principais e de segunda ordem, nenhum destes mostraram-se significativos, ou seja, todos apresentaram p-valor maior que 0,05. Logo, é possível constatar que não existe uma correlação estatisticamente significativa, ao nível de confiança considerado, entre a mudança no ambiente ou na velocidade de corte na variação da rugosidade.

A Figura (5) apresenta o gráfico de probabilidade normal dos resíduos bem como as saídas do teste de Anderson-Darling como forma de atestar a normalidade dos dados da rugosidade. Na Figura 5 é possível observar que os valores dos resíduos estão distribuídos em torno da linha reta de distribuição normal. Como o p-valor (0,322) é maior que o nível de significância ($\alpha=0,05$) se aceita a hipótese nula, afirmando assim que os dados seguem a distribuição normal, entretanto o nível de explicação do modelo foi de 22,34% o que demonstra que somente estas variáveis são insuficientes para explicar a variação da rugosidade.

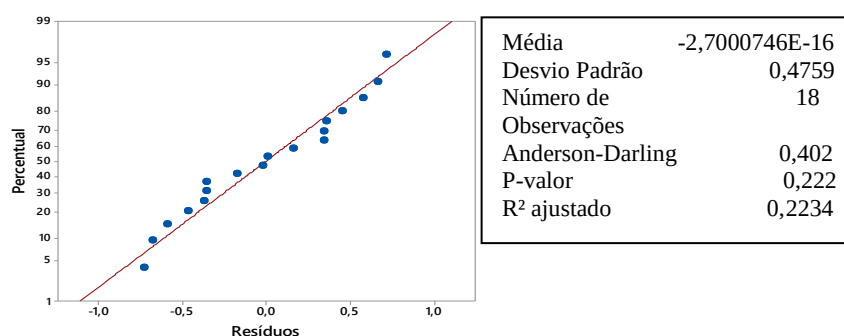


Figura 5. Teste de Normalidade para rugosidade.

Por meio desta análise, não foi possível identificar uma melhoria na rugosidade superficial dada a aplicação do fluido de corte, assim como nos trabalhos de Gaitonde; Karnik; Davim (2008) e Sadaiah e Deepakkumar (2011). Entretanto, este resultado coincide com a literatura, que menciona o avanço como parâmetro mais significativo para a rugosidade – parâmetro de corte mantido fixo neste experimento. Nesse sentido, Machado *et al.* (2015) afirmam que dentre as condições de corte, o avanço mostra-se como o parâmetro mais influente, uma vez que, a altura média dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática ao avanço. No que tange a produtividade, trata-se de um resultado interessante, pois é possível trabalhar com velocidades mais elevadas (diminuindo-se o lead time e, consequentemente aumentando-se os níveis de produção) sem prejudicar esta variável resposta, que é uma dimensão da qualidade frequentemente exigida pelos clientes.

De acordo com Machado *et al.* (2015), um aumento da velocidade de corte e avanço resultam em uma maior taxa de produção, ou seja, ocorre redução do tempo de horas trabalhadas por peça, o que implica num custo de fabricação menor. Entretanto, maiores velocidades de corte e avanços irão aumentar o número de ferramentas gastas por peça, pois o desgaste das ferramentas aumenta. Desta forma, torna-se necessário encontrar um ponto de equilíbrio entre custos de produção e taxa de produção que proporcione economia na fabricação de lotes de peças. Além destes, os fatores profundidade de corte, material e geometria da ferramenta, além do fluido de corte, também podem ser avaliados como oportunidades para maximizar a economia na fabricação de peças por usinagem.

A Figura (6) representa a relação existente entre taxa de produção e custos em função da velocidade de corte, proposto por Machado *et al.* (2015). Neste estudo, o avanço permaneceu constante, desta forma a velocidade de corte foi o principal parâmetro a influenciar as condições econômicas de corte.

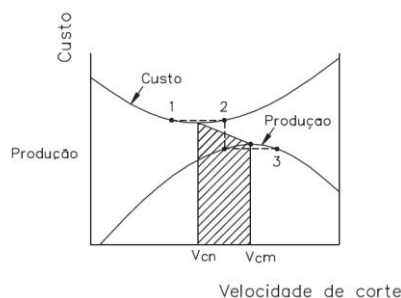


Figura 6. Combinação entre Custo e taxa de produção em função da V_c de Machado *et al.* (2015)

Por meio da Figura (6), é possível perceber que existe um valor de velocidade de corte, representado por V_{cn} , que minimiza os custos totais de fabricação, chamado de velocidade econômica de usinagem. Já a velocidade representada por V_{cm} é aquela que resulta em máxima taxa de produção. Valores de velocidade corte compreendidos entre V_{cn} e V_{cm} representam o intervalo de máxima eficiência. Como o aumento da V_c resulta em aumento da produção, mas gera aumento de custo, conforme curvas representadas na Fig. (6), este trade-off se equaliza no intervalo de máxima eficiência.

4.3. Análise Qualitativa dos Cavacos função da Velocidade de Corte e Ambiente Lubri-refrigerante

A Tabela (5) apresenta os cavacos gerados para as diferentes velocidades de corte e meio lubri-refrigerante testados.

Tabela 5. Imagem dos cavacos coletados ($f = 0,30$ mm/rev e $a_p = 1,0$ mm).

	Ambiente Lubri-refrigerante		
Velocidade de Corte	Seco	MQL	Jorro
$V_c = 250$ m/min			
$V_c = 200$ m/min			
$V_c = 150$ m/min			

Ao analisar as imagens da Tab. (5) constata-se que a mudança na V_c , dentro dos limites estabelecidos neste estudo, não foi suficiente para causar uma mudança aparente na forma do cavaco. Uma mudança na V_c causou mudança no raio de curvatura do cavaco, influenciando mais diretamente a sua espessura. A mudança do ambiente de corte também não proporcionou mudança na forma dos cavacos, que, para qualquer condição, apresentou-se na forma helicoidal curta.

5. CONCLUSÕES

Em relação aos testes e condições utilizadas, concluiu-se que:

- Somente o efeito principal ambiente lubri-refrigerante mostrou-se significativo ao nível de confiança de 95% sobre a temperatura de corte, sendo que a menor temperatura de corte foi alcançada no ambiente de abundância de fluido (jorro), independentemente da V_c utilizada;
- Nenhum parâmetro de entrada (velocidade de corte e ambiente lubri-refrigerante) ou a interação destes foi influente sobre a qualidade superficial, ao nível de significância estabelecido por este modelo. Os resultados corroboraram com a literatura, que afirma ser o avanço o parâmetro mais influente sobre a rugosidade;
- Para os intervalos de V_c e ambientes lubri-refrigerantes estudados, não foi possível identificar alterações significativas na forma dos cavacos, sendo estes mantidos na forma helicoidal curta.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores dessa pesquisa agradecem a assistência dos departamentos de Engenharia de Produção e Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, pela disponibilização do Laboratório de Usinagem e Automação.

7. REFERÊNCIAS

- ASM International. Materials Selection and Design. In: ASM Handbook. EUA: ASM International, 1997. v. 20.
- Carvalho, S.R. “Determinação do campo de temperatura em ferramentas de corte durante um processo de usinagem por torneamento”. 2005. 123 p. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia.
- Dhar, N. R. et al. “The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel”. Journal of Materials Processing Technology, v. 171, n. 1, p. 93–99, 2006.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C; Coppini, N. L. “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”. 8ª ed. São Paulo: Artliber, 270p., 2012.
- ISO 3685. “Tool life testing with single – point turning tools”. 2.ed. 1993.
- Gaitonde, V. N.; Karnik, S. R.; Davim, J. P. “ Selection of optimal MQL and cutting conditions for enhancing machinability in turning of brass”. Journal of Materials Processing Technology, v. 204, n. 1-3, p. 459–464, ago. 2008.
- Kumar, C. R. V.; Ramamoorthy, B. “Performance of coated tools during hard turning under minimum fluid application”. Journal of Materials Processing Technology, v. 185, n. 1-3, p. 210–216, abr. 2007.
- Li, K.-M.; Liang, S. Y. “Performance profiling of minimum quantity lubrication in machining”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 35, n. 3-4, p. 226–233, dez. 2007.
- Machado, A.R., Abrão A.M, Coelho, R.T, Da Silva, M.B. “Teoria da usinagem dos materiais”. 3ª edição. São Paulo: Editora Blucher, 2015. 408 p.
- Sadaiah, M.; Deepakkumar, P. “Investigations on finish turning of AISI 4340 steel in different cutting environments by CBN insert”. 2011.
- Shaw, M. C.; “Metal Cutting Principles”. 1st ed. New York: Oxford University Press, 1997. 594 p.
- Trent, E.M. “Metal cutting.” 2 ed. London: Butterworths & Co.,1984.
- Whitehouse, D.J. “Review article: surfasse metrology” Meas. Sci. Technol., n.8,p.955-972, 1977.

8. DIREITOS AUTORAIS

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS ON THE TURNING OF AISI 4340 STEEL: A STUDY IN RELATION TO THE CUTTING SPEED AND LUBRI-REFRIGERANT ENVIRONMENT

Bárbara Cristina Mendanha Reis, babi_mreis@hotmail.com¹

Christianne Lacerda Soares, chrislacerda3@hotmail.com¹

Michele Lisboa Silveira, michelesilveira1991@gmail.com¹

Rafael Lucas Machado Pinto, rafaelucas@gmail.com²

Paulo Eustáquio Faria, paulofaria@ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Produção (DEP), Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 21270-901, Belo Horizonte, MG .

²Universidade Federal de Ouro Preto, R. Trinta e seis, 115 – Loanda, João Monlevade – MG, CEP 35931-008.

Abstract: *The application of cutting fluids in the machining has been questioned not only in terms of damages to the environment and to human health, but also in relation to the associated logistic costs (storage, disposal, for example). In this scenario, dry cut and / or minimum amount of liquid (MQL) emerge as potential substitutes. The speed of the operation is also a parameter of interest in machining, considering that it is a variable directly related to the manufacturing lead time of each piece and also as the volume produced. Therefore, the aim of this study was to understand the intrinsic phenomena that variations in the cutting parameters, such as: cutting speed (150, 200 and 250 m / min) and lubricant-coolant environment (dry, fluid, MQL) The roughness (Rq) and the shape of the chips in the turning AISI 4340 steel. The study included 18 tests, and the depth of cut and feed rate were kept constant at 1 mm and 0.3 mm / rev, respectively. For the statistical analysis of the data, the Minitab 17 software was used in order to perform the Analysis of Variance and the graphs of main effects and interactions. The results showed that the two factors selected don't cause significant effects on the roughness and the model is not enough to represent it, however, this result coincides with the literature, which mentions the advance as the most significant parameter for the roughness. Regarding the temperature, it was verified that the proposed model was better fitted to the experiment ($R^2 = 94.75$), and the most significant factor was the environment. The gushing level was responsible for minimizing the temperature response. regarding the analysis of the chips, it was found that the change in Vc cutting speed and the cutting environment within the limits established in this study was not enough to cause a change in chip form.*

Key Words: *environment lubri-refrigerant, cutting temperature, roughness, chip, ANOVA*