

ESTUDO DA RUGOSIDADE E VIDA DE FERRAMENTA DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX ASTM A-890 APÓS FRESCAMENTO EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE LUBRIFICAÇÃO

Gabriel Ximenes Abreu Figueiredo¹; Éd Claudio Bordinassi²

¹Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

²Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. As últimas demandas de tecnologia em usinagem transformaram-se em uma exigência para que os serviços/produtos oferecidos por uma empresa ou indústria sejam competitivos nos mercados atuais. Com esse quadro, estudos são realizados com a função de oferecer base científica em decisões nas operações de usinagem. Esse artigo traz informações relevantes, no qual o aço inoxidável superduplex foi fresado em diferentes condições de refrigeração (à seco, com fluido em abundância e mínima quantidade de fluido - MQL) e com diferentes parâmetros de corte (avanço, profundidade de corte, velocidade de corte e 3 tipos de inserto). Primeiro realizou-se um planejamento fatorial completo para estudo da rugosidade em função das variações, e em seguida a vida útil das ferramentas foram estudadas para as condições que geraram as menores rugosidades. Os resultados mostraram que o menor avanço e a utilização de MQCL obtiveram as menores rugosidades. A vida da ferramenta também aumentou com a utilização de MQCL, e houve diferença significativa em função do inserto utilizado.

Introdução

O aço inoxidável super-duplex vem sendo usado amplamente nas indústrias de óleo e gás, química, petrolífera e automobilística. Suas principais vantagens são elevada resistência mecânica, alta resistência ao pitting, alta resistência à corrosão por fadiga e erosão, alta resistência à corrosão em meio a cloretos, alta resistência à fadiga, baixa expansão e maior condutibilidade térmica do que os aços austeníticos, boa soldabilidade, alta absorção de energia e comportamento magnético. Então, se faz importante o estudo de sua usinabilidade e da escolha dos melhores parâmetros de corte. Alguns métodos de usinagem usam em demasia fluidos lubrificantes que tem de ser processados e eliminados, gerando custos para a indústria. Além disso, podem causar danos ao meio ambiente e a saúde. De acordo com Klocke, Eisenblätter (1997) em 1994 na alemanha, a quantidade total de lubrificantes de refrigeração utilizados foi de aproximadamente 75.491 toneladas. Com o sistema MQCL a utilização desses fluidos são otimizadas, diminuindo os riscos para a saúde e para o meio ambiente. O objetivo deste trabalho é estudar a rugosidade do aço super-duplex ASTM A-890 após passar pelo processo de fresamento com diferentes parâmetros de corte, refrigeração e tipos de inserto, além de estudar o desgaste dos insertos para as condições que geraram as menores rugosidades.

Materiais e Métodos

O material utilizado nos ensaios foi o ASTM A-890 (o mesmo material utilizado por Bordinassi, 2006), com dureza de 290 HB, fundido, solubilizado a temperatura de 1130°C e resfriado em água. A composição química do aço é descrita da seguinte forma elemento/% : C/0,02; Cr/24,8; Ni/7,49; Mn/0,65; W/0,79; N/0,34; Nb/<0,001; Al/<0,001; Si/0,8; Mo/3,37; S/0,006; P/<0,025; Co/0,044; V/0,03; Ti/0,006; Pb/0,0009; Cu/0,8; Zr/0,059; Sn/0,082; Fe/restante.

Os ensaios foram realizados no Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, em um Centro de usinagem ROMI Discovery 560.

As ferramentas usadas nos ensaios foram:

- R390-025A25-11M (Fabricante 1), sem cobertura;
- R390-11 T3 08M-PM 530 (fabricante 2), sem cobertura;
- R390-11 T3 08M-MM 1040 (fabricante 2), com cobertura PVD ;
O fluido utilizado foi o Blaser Swisslube - Vasco 5000.

O método utilizado no trabalho constituiu-se em 3 etapas:

- Análise exploratória de quais parâmetros seriam razoáveis para os ensaios em função da recomendação inicial do fabricante;
- Planejamento fatorial completo para análise da rugosidade;
- Estudo do desgaste para as condições de corte que geraram as menores rugosidades;

Na primeira etapa os corpos de prova foram cortados e preparados com dimensão de Ø80x100 mm e foram dados dois passes em cada lado do corpo de prova, um no sentido concordante e outro no sentido discordante, com $a_e = 12$ mm. Em seguida mediu-se a rugosidade em três pontos de cada lado e a média dos 3 pontos foi considerada. Os ensaios foram iniciados com os parâmetros recomendados pelos fabricantes e percebeu-se que se estes fossem aplicados, a ferramenta se desgastaria rapidamente. Desta forma a velocidade de corte foi sendo diminuída até chegar a valores razoáveis para aplicação prática. Então os parâmetros de corte adotados nesta etapa foram os seguintes:

- v_c (velocidade de corte) [mm/min] = 60 – 80 – 110 – 150 – 200;
- f (avanço) [mm/v] = 0,05;
- a_p (profundidade de corte) [mm] = 0,25;
- corte à seco;
- Corte concordante/ discordante;

Na segunda etapa do trabalho realizou-se duas análises fatoriais completas, uma considerando a usinagem à seco e com fluido em abundância, a outra com usinagem a seco e usinagem com MQCL. Os níveis (máximo e mínimo) adotados foram:

- v_c [mm/min] = 60 e 80;
- f [mm/v] = 0,05 – 0,1;
- a_p [mm] = 0,25 – 0,5;
- Corte concordante e discordante.

O que resultará em 64 respostas, considerando pelo menos 1 réplica para cada combinação. Após cada passe da usinagem, foi medida a rugosidade da peça em três pontos e a média representou a rugosidade superficial.

Na terceira e última etapa do trabalho realizou-se a análise de desgaste da ferramenta. A análise do desgaste foi deixada para o final do trabalho propositalmente, para que se pudesse ter uma melhor condição de determinar os parâmetros que obtiveram melhores respostas nas etapas anteriores. Assim, de acordo com algumas observações das etapas 1 e 2 chegou-se aos seguintes parâmetros para a análise do desgaste:

- v_c [m/min] = 80;
- f [mm/v] = 0,05;
- a_p [mm] = 0,25;
- Corte concordante;
- Pastilhas 2 e 3;

Nessa etapa foram utilizadas 2 condições de refrigeração, à seco e com sistema MQCL. Inicialmente mediu-se o tempo de um passe e depois realizou-se 20 passes, após isso media-se a rugosidade superficial e o desgaste da ferramenta. A medida que o desgaste da ferramenta crescia diminuía-se os passes realizados até chegar o limite de desgaste da

ferramenta indicado para o processo de acabamento = 0,3 mm. Para registro dos desgastes encontrados se utilizou uma câmera de alta definição INSIZE modelo ISMPM200S.

Resultados e Discussão

1^a parte dos ensaios - Análise da rugosidade superficial

Os primeiros ensaios foram iniciados com os parâmetros de velocidade de corte (v_c) e avanço (f) altos demais, 150-200 (mm/min) e 0,05-0,15 (mm/v) respectivamente, conforme indicação do fabricante, o que acarretava em desgaste prematuro e/ou inutilização das pastilhas. Esse comportamento pode ser atribuído tanto a alta resistência do material quanto a usinagem e as altas temperaturas do processo, limitando a utilização de tais pastilhas para as velocidades citadas. A partir desse cenário os parâmetros foram reduzidos respectivamente para 60-80 (mm/min) e 0,05-0,1 (mm/v). Com esses novos parâmetros as pastilhas responderam bem a usinagem e os passes puderam ter maior duração, chegando a uma relação de um jogo de pastilha a cada 16 passes. A Figura 1 demonstra o comportamento da rugosidade superficial da peça em função da velocidade de corte.

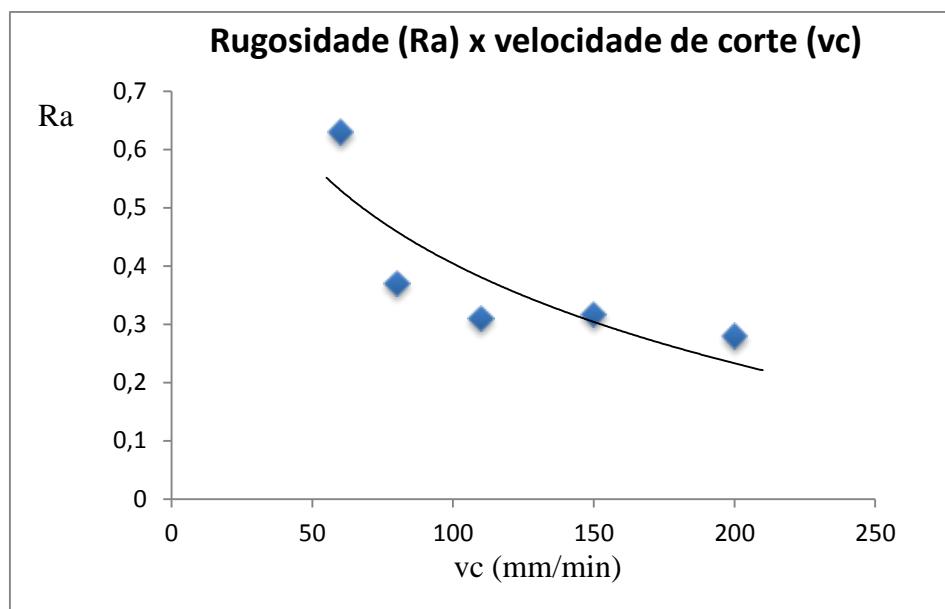


Figura 1 - Rugosidade em função da velocidade de corte.

A Figura 1 mostra todos os valores de velocidade de corte desde o primeiro ensaio. Os outros parâmetros como avanço (f), profundidade de corte (ap), fluido e corte concordante ou discordante foram fixados nos respectivos valores 0,05 mm/min, 0,25 mm, à seco, concordante. Como esperado a rugosidade superficial cai com o aumento da velocidade de corte.

2^a parte dos ensaios - Análise fatorial completa para rugosidade superficial

Optou-se pelo planejamento fatorial completo desses valores a fim de se comparar os três cenários expostos, usinagem a seco, fluido em abundância e MQCL. A rugosidade R_a sofreu uma variação de 0,41 até 0,82 μm . Apresentam-se aqui duas análises, a primeira, situação (1), é uma comparação entre usinagem com fluido em abundância x usinagem a seco, sobre a rugosidade superficial em operações de acabamento. A segunda análise, situação (2), é uma comparação entre a influência da usinagem com MQCL x usinagem a seco, sobre a rugosidade superficial em operações de acabamento. A Figura 2 apresenta as relações entre o valor da rugosidade média e os principais parâmetros para situação (1) e faz um quadro comparativo da rugosidade em função de todos os parâmetros envolvidos nos ensaios. Os valores encontrados nesse quadro são valores médios da rugosidade e revelam que os menores

valores de rugosidade superficial encontrados foram obtidos com o seguinte conjunto de parâmetros: menor avanço, maior velocidade de corte, no sentido concordante de usinagem, com fluido em abundância e usando a pastilha 2. A profundidade de corte não se mostrou relevante para obter-se os menores valores de rugosidade superficial. Assim, optou-se em estudar quais os parâmetros e quais as relações entre parâmetros são influentes na formação da menor rugosidade superficial para a operação de acabamento e para isso a Figura 3 foi desenvolvida.

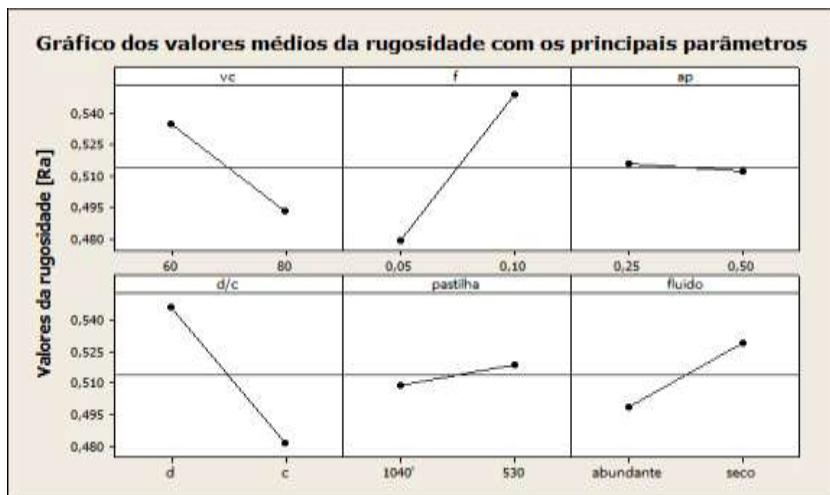


Figura 2 – Valores médios da rugosidade (R_a) na situação (1).

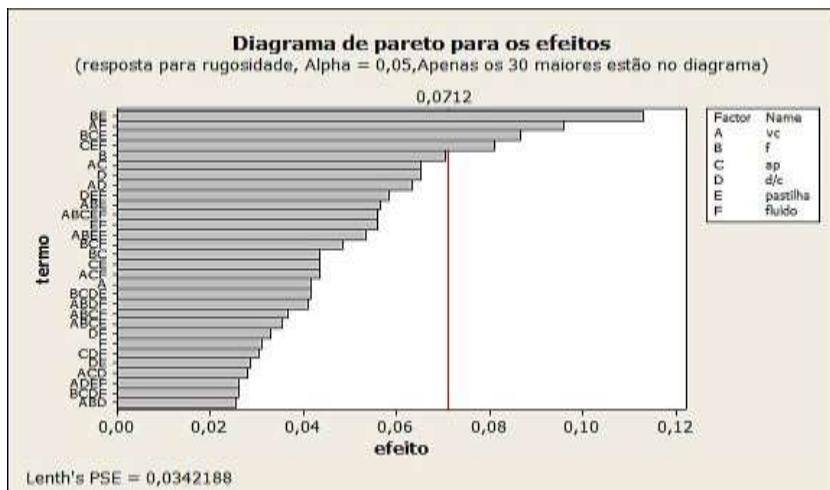


Figura 3 - Diagrama de Pareto das variáveis sobre a rugosidade para situação fluido em abundância x seco.

A Figura 3 revela que nenhuma variável atinge a linha de significância, somente a interação entre variáveis. Além disso, a relação mais significativa foi a BE, que sugere a interação entre avanço e pastilha. Os autores Diniz, Marcondes, Coppini (1999) afirmaram que o avanço para operações de acabamento deve ser o menor possível. Pois para baixos valores de avanço, um pequeno acréscimo gera uma grande redução na pressão específica de corte. Assim, a formação do cavaco é mais adequada, com pouco fluxo lateral de cavaco e a rugosidade real se aproxima da rugosidade ideal. Os pontos que tangem a discussão da influência da pastilha sobre a rugosidade superficial também são abordados pelos autores. Os autores consideram que ferramentas com cobertura de PVD tendem a diminuir o coeficiente de atrito entre os sistemas cavaco-ferramenta e ferramenta-peça e com isso, proporcionam valores de K_s (pressão específica de corte) menores quando comparado a outras ferramentas. Além disso, ferramentas com ângulos de saída (γ_c) e de inclinação (λ_s), provocam uma

diminuição do K_s a medida que seus valores aumentam. Com a diminuição do K_s promovido pelos fatores citados, a força de corte também diminui. Esse efeito gera uma resposta, que é a diminuição nos valores de rugosidade superficial. Pois com menores forças de corte a formação do cavaco é mais adequada assim como seu escoamento, implicando em menores resultados de rugosidade R_a . Durante a usinagem dos corpos de prova esses aspectos foram notados e ficam bem evidentes na Figura 4, quando observa-se a interação entre os parâmetros envolvidos.

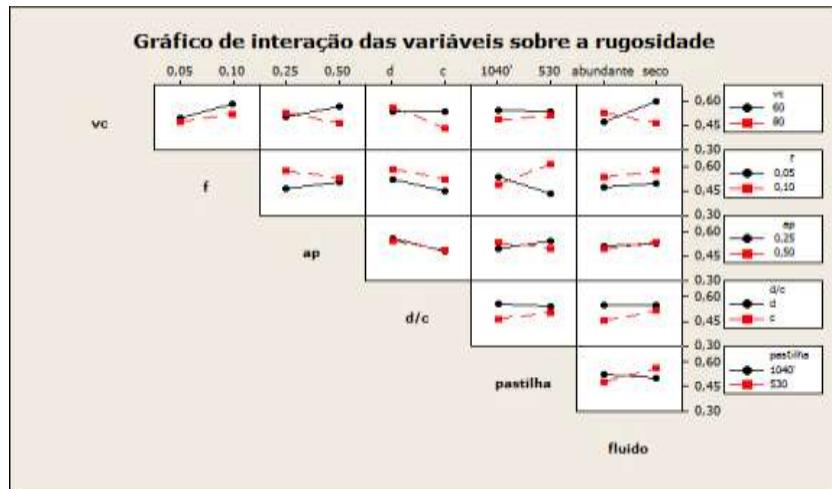


Figura 4 - Gráfico de interação dos parâmetros sobre a rugosidade na situação de usinagem fluido em abundância x seco.

Pela quarta coluna da Figura 4 é fácil perceber que algumas interações acompanham as observações das passagens anteriores. Porém em alguns pontos as pastilhas resultam em rugosidades superficiais inversas ao esperado. Diniz, Marcondes, Coppini (1999) apontam uma expressão matemática que quantifica a interferência da pastilha em relação a rugosidade da superfície. Essa expressão matemática é apresentada por : $R_{Máx\ teo} = f^2 / 8 * r_e$. Onde, $R_{Máx\ teo}$ representa a rugosidade máxima teórica, f o avanço, r_e o raio de ponta da ferramenta. Para se ter uma melhor dimensão da diferença entre rugosidade teórica e real praticada nos ensaios do trabalho a Figura 5 foi feita.

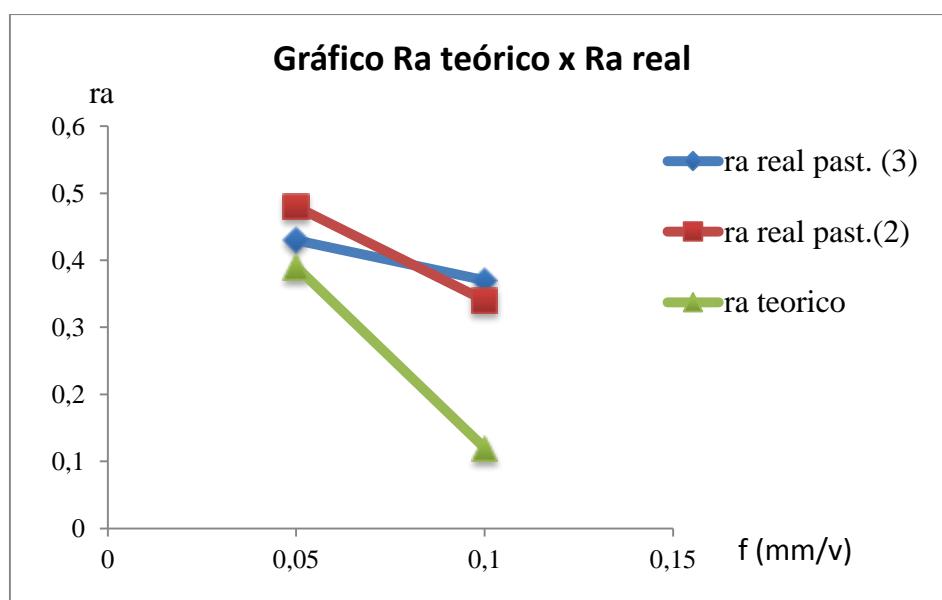


Figura 5 - Gráfico da rugosidade teórica vs. rugosidade real.

Na Figura 5 percebe-se que devido a outros fatores como vibração, deformação do cavaco, fluxo lateral de cavaco entre outros, a rugosidade real obtida é menor que a teórica o que já era esperado. Voltando às interações observadas como relevantes no Diagrama de Pareto (Figura 3), outras relações também ultrapassam a linha de significância como: AF (velocidade de corte x fluido), BCE (avanço x profundidade de corte x pastilha), CEF (profundidade de corte x pastilha x fluido).

A partir desse ponto é dado início à análise da situação (2), que corresponde à comparação entre usinagem com MQCL vs. usinagem a seco, sobre a rugosidade superficial em operações de acabamento. A Figura 6 apresenta as relações entre o valor da rugosidade média e os principais parâmetros.

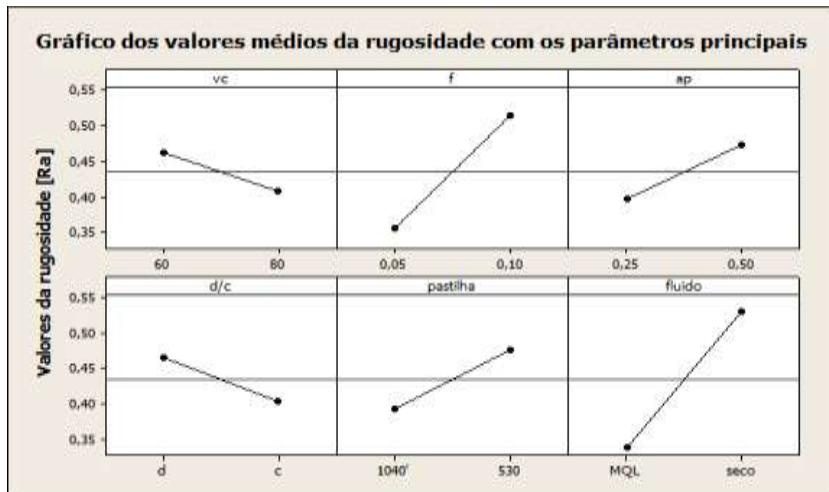


Figura 6 - Valores médios da rugosidade (R_a) na situação MQL x seco.

Percebe-se na mesma Figura, pela inclinação das retas os parâmetros mais influentes na formação dos valores da rugosidade. Os parâmetros fluido (principalmente) e avanço tem retas mais inclinadas indicando valores de rugosidade muito distantes em cada ponto. No caso do parâmetro fluido existe uma discrepância próxima de $0,20 \mu\text{m}$. Além disso, observa-se que melhores resultados são obtidos com baixos valores de avanço. Para se ter um melhor dimensionamento de quão é afetada a rugosidade, lança-se mão da Figura 7 que indica o nível de relevância de cada parâmetro com suas interações.

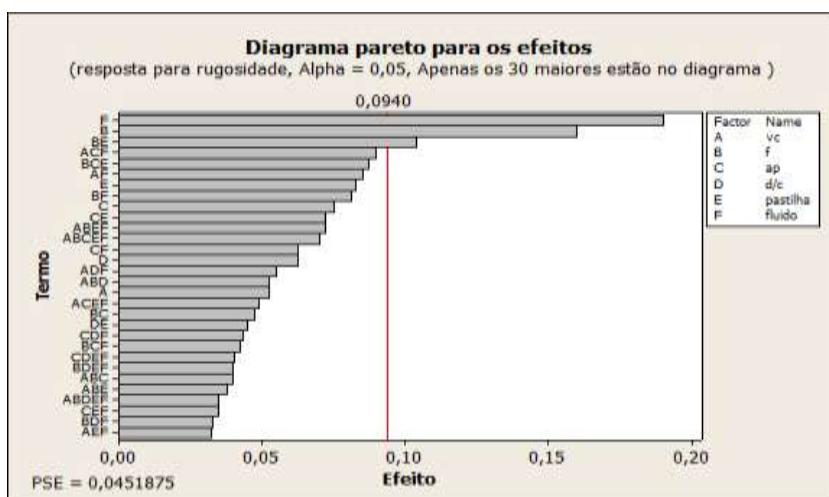


Figura 7 - Diagrama de Pareto das variáveis sobre a rugosidade para situação MQL x seco.

A Figura 7 salienta que as variáveis fluido e avanço ultrapassam a linha de significância. É fácil perceber que o fluido tem os maiores valores absolutos do Diagrama de Pareto. Isso revela que determinar como essa variável influí no resultado é de grande

importância. Todos os parâmetros significantes foram discutidos durante os ensaios e serão apresentados de acordo com sua significância no processo. Em todas as combinações possíveis, dos parâmetros tomados como influentes, percebe-se que o sistema de lubrificação MQCL apresenta resultados bem melhores quando comparados com a usinagem a seco. Existem vários fatores que explicam esse resultado, de acordo com Thepsonthi, Hamdi, Mitsui (2008), quando se usa o sistema MQCL o efeito lubrificante do fluido faz com que exista uma diminuição no desgaste da ferramenta devido. Além disso, o fluido usado reage com a superfície do material recém formada. Essa reação cria uma película metálica que tem menor resistência ao cisalhamento. Essa situação favorece o corte e a formação de cavacos mais bem definidos, já que concomitantemente com o processo de formação do cavaco, pode-se dizer também que o coeficiente de atrito peça-ferramenta e cavaco-ferramenta é reduzido por essa película recém formada. Isso faz com que a pressão específica seja reduzida e consequentemente a força de corte, resultando em superfícies com menores valores de rugosidade superficial. A outra função do sistema MQCL é a propriedade refrigerante. De acordo com Diniz, Marcondes, Coppini (1999) o fluido de corte dissipava parte do calor gerado na usinagem. Temperaturas menores favorecem a conservação da ferramenta, ou seja, a redução da geração de calor consequentemente redução da temperatura desacelerando o desgaste da ferramenta. Isso faz com que o coeficiente de atrito não aumente, resultando em valores de rugosidade superficial menores. Como no sistema MQCL a quantidade de fluido é controlada, mitiga-se a possibilidade de stress térmico e fraturas na peça de trabalho. O painel da Figura 8 o painel exibe as interações entre os parâmetros envolvidos nos ensaios.

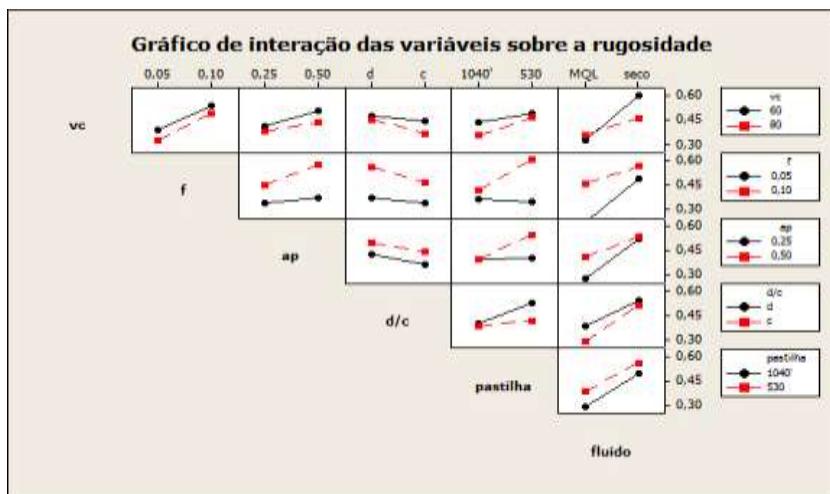


Figura 8 - Painel de interação das variáveis sobre a rugosidade na situação de usinagem MQL x seco.

Realizando uma análise mais aprofundada dos parâmetros, a Figura 8 revela o comportamento desses parâmetros caso a caso e ratificam os dados apresentados na Figura 7. Uma observação interessante é o comportamento das pastilhas 2 e 1 quando usina-se o corpo de prova com diferentes profundidades de corte. A pastilha 1 se mostra bem pior para os valores mais altos praticados, de profundidade de corte. Durante os ensaios observou-se isso devido seu baixo tempo de vida, ou seja, a pastilha se desgastava facilmente ocasionando altos valores de rugosidade superficial. A medida que se segue para as colunas da direita na segunda linha o diagrama revela que o avanço de 0,05 [mm/v] sempre proporciona valores menores de R_a quando comparado ao avanço de 0,1 [mm/v]. Essa observação está perfeitamente alinhada com o diagrama de Pareto (Figura 7), onde observou-se que o avanço era o segundo mais relevante para a rugosidade superficial.

3^a parte dos ensaios - Análise do desgaste da ferramenta

Os resultados esperados para os ensaios de desgaste eram de que a usinagem com o sistema MCQL alcançasse alguma superioridade quanto à usinagem a seco. Os primeiros 10 minutos dos ensaios com MQCL já mostravam que essa superioridade seria concretizada, pois durante esse tempo observou-se que com a usinagem a seco o desgaste da pastilha já era algo próximo de 0,1 mm e na usinagem com MQCL não existia algum desgaste relativo nas pastilhas, durante esses 10 minutos iniciais. De acordo com a Sandvik Coromant (2012), os principais tipos de desgaste no processo de fresamento são: desgaste de flanco, craterização, deformação plástica, lascamento, entalhe, trincas térmicas e aresta postiça. Nos ensaios praticados percebeu-se que o tipo de desgaste nas pastilhas foi o desgaste de flanco. A fotografia da Figura 9 mostra um exemplo típico do desgaste encontrado.

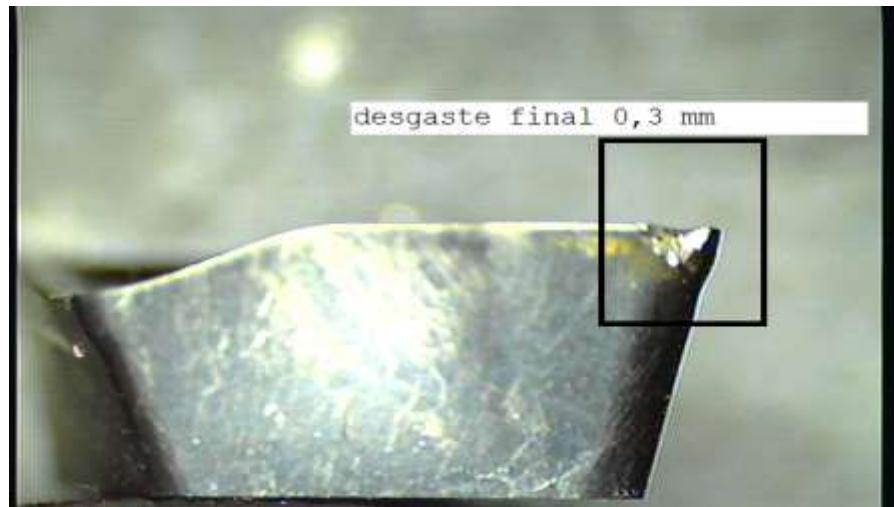


Figura 9 - Desgaste da pastilha 2 ao final do ensaio com usinagem com MQCL com ampliação de 60X.

Com todos os ensaios realizados e dados colhidos, optou-se por realizar alguns gráficos que auxiliassem a análise do desgaste. Assim, a Figura 10 mostra o gráfico do primeiro ensaio com usinagem a seco.

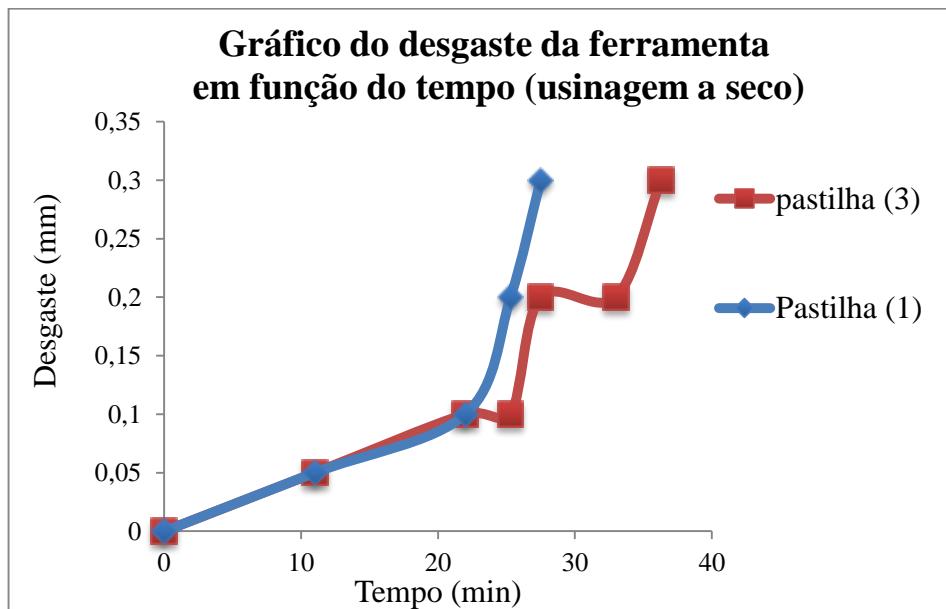


Figura 10 - Gráfico do desgaste da ferramenta em função do tempo, utilizando usinagem a seco.

O gráfico da Figura 10 apresenta alguns pontos importantes a se destacar. O tempo total de vida útil da pastilha 1 é de aproximadamente 27,5 min por aresta de corte, como cada pastilha apresenta duas arestas de corte chega-se a um total de 55 min por pastilha, considerando o desgaste máximo admissível de 0,3 mm. Para a pastilha 3 o tempo total de vida útil é de 36,6 min por aresta de corte ou 73,2 min por pastilha. Esses dados revelam que a pastilha 3 tem uma vida útil 33,09% maior do que a pastilha 1. Pelo gráfico da Figura 10 fica nítido que a partir de 0,1 mm de desgaste a ferramenta passa a se desgastar mais rapidamente. Além de usinagem a seco realizou-se também ensaios com o sistema MQCL e a Figura 11 mostra alguns resultados obtidos.

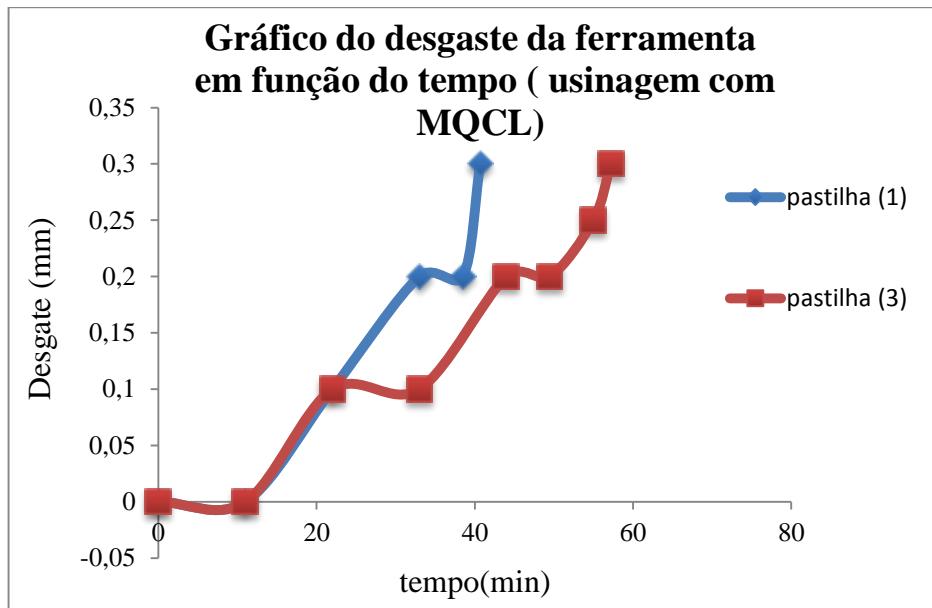


Figura 11 - Desgaste da ferramenta em função do tempo, usinagem com MQCL.

Pelo gráfico da Figura 11 percebe-se que os tempos máximos de vida para as pastilhas 3 e 2 são 40,7 min e 57,2 min, respectivamente. Como cada pastilha tem duas arestas de corte chega-se a um total de 81,4 min e 114,4 min respectivamente. Esses tempos mostram que a pastilha 2 tem uma vida útil 40,5% maior que a pastilha 3. Comparando o gráfico da Figura 10 com o gráfico da Figura 11 percebe-se a diferença, em termos de vida útil, da usinagem a seco com a usinagem com sistema MQCL. O tempo de vida da pastilha 3 é 48% maior quando usina-se o SDSS com sistema MQCL e para a pastilha 2 esse fator sobe para 56,3%. Em números absolutos isso significa que a pastilha 3 consegue continuar usinando 26,4 min a mais quando é usinada com MQCL. Já para a pastilha 2 esse tempo representa 41,2 minutos. De acordo com Dhar; Kamruzzaman; Mahiuddin Ahmed (2006) dependendo dos parâmetros de corte usados na usinagem, o sistema MQCL pode reduzir a temperatura de corte em cerca de 5-10%. É sabido que temperaturas de corte mais baixas favorecem a integridade da pastilha aumentando a vida útil da ferramenta.

Conclusões

Nesse trabalho realizou-se vários ensaios e alguns pontos ficaram claros quanto ao processo de fresamento do SDSS. Quanto os resultados obtidos em relação a rugosidade superficial tem-se as seguintes conclusões:

- De um modo geral baixos valores de avanço para a usinagem de aço inoxidável super duplex geram superfícies com menores valores de rugosidade R_a .
- As ferramentas com cobertura PVD, tem melhor desempenho para o aço inoxidável super duplex.

- Existe um comportamento entre a_p e fluido que influi na obtenção dos menores valores de rugosidade. Para um determinado valor mínimo de R_a observa-se: usinagem a seco, alto valor de a_p . Usinagem com fluido, baixo valor de a_p .
- Quando se utilizou o sistema de MQCL os valores de R_a , são extremamente baixos e tem uma defasagem de aproximadamente 0,20 μm para a usinagem a seco.
- A interação pastilha x avanço é de grande significância para se alcançar baixos valores de R_a , independente da lubrificação utilizada na usinagem.

As conclusões obtidas quanto a vida útil da ferramenta foram:

- Tempo total de usinagem de 55 min por pastilha (past. 1) para usinagem a seco e de 73,2 min por pastilha (past. 3) para usinagem a seco, portanto a pastilha 3 tem uma vida útil 33,09% maior do que a pastilha 1.
- Tempo total de usinagem de 81,4 min por pastilha (past. 3) para usinagem com MQCL e de 114,4 min por pastilha (past. 2) utilizando o mesmo sistema de refrigeração, portanto a pastilha 2 tem uma vida útil 40,5% maior que a pastilha 3.
- O tempo de vida da pastilha 3 é 48% maior quando usina-se o SDSS com sistema MQCL, comparando com a usinagem a seco, o que corresponde a 26,4 min a mais de vida;
- O tempo de vida da pastilha 2 é 56,3% maior quando usina-se o SDSS com sistema MQCL, comparando com a usinagem a seco, o que corresponde a 41,2 min a mais de vida;

Referências Bibliográficas

- Bordinassi, E.; (2006) *Contribuição ao estudo da integridade superficial de um aço inoxidável super-duplex após usinagem*. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Dhar N.R.; Kamruzzaman M.; Mahiuddin Ahmed (2006) *Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI- 4340 steel*. Journal of Materials Processing Technology, v 172, p. 299-304.
- Diniz, A.E.; Marcondes, F.C.; Coppini, N.L. (1999) *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 1^a. Edição. São Paulo.
- Klocke F.; Eisenblätter G. (1997) *Dry Cutting*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, v 46, p 519 – 526.
- Thepsonthi T.; Hamdi M.; Mitsui T. (2008) *Investigation into minimal-cutting-fluid application in high-speed milling of hardened steel using carbide mills*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v 49, p. 156-162
- Sandvik Coromant http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/pages/default.aspx.